

Klimatneitralitātes dimensijas

Dagnijas Blumbergas redakcijā



2026

Zinātniskā
monogrāfija



Rīgas Tehniskā universitāte
Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Klimatneitralitātes dimensijas

Dagnijas Blumbergas redakcijā

Klimatneitralitātes dimensijas. Zinātniskā monogrāfija. Rīga, RTU Izdevniecība, 2026. 324 lpp.

Autori

Dagnija Blumberga, Jeļena Pubule, Dace Lauka, Valērija Kosteviča, Anna Kubule, Ilze Vamža, Ilze Luksta, Ģirts Bohvalovs, Alīna Safronova, Andra Blumberga, Krista Laktuka, Dace Paule, Ritvars Freimanis, Klaudio Rošā (*Claudio Rochas*)

Zinātniskā redaktore

Dr. habil. sc. ing. Dagnija Blumberga

Recenzenti

Dr. habil. chem. Māris Kļaviņš

Dr. sc. ing. Ainis Lagzdīns

Monogrāfijā aplūkotas un analizētas siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju samazināšanas pasākumu kopas sektoros, kuriem visas pasaules valstis katru gadu veic inventarizāciju ANO atskaitei: enerģētikas, transporta, atkritumu apsaimniekošanas, rūpniecības, lauksaimniecības un mežsaimniecības sektorā. Katram sektoram veikts SEG emisiju audits, analizēti šo emisiju samazināšanas pasākumi un tehnoloģiskie risinājumi, vērtēta ietekmes uz klimata pārmaiņām ilgtspēja.

Monogrāfijas mērķis ir, balstoties zinātnisko pētījumu rezultātos, skaidrot Latvijas tautsaimniecības sektoru ieguldījumu klimata pārmaiņu mazināšanā, valstij virzoties uz ilgtspējīgu attīstību un klimatneitralitāti.

Monogrāfija domāta zinātniekiem, universitāšu studentiem, ministriju un aģentūru ierēdņiem, pašvaldību un uzņēmumu pārstāvjiem, kā arī jebkuram sabiedrības pārstāvim, lai iedrošinātu skatīties nākotnē caur sistēmiskas attīstības prizmu un inovatīvu risinājumu dinamisko attīstību.

Zinātniskā monogrāfija izdota projekta "Klimata neitralitātes lēmumu modeļi darbībā" ietvaros (projekta Nr. VPP-KEM-Klimatneitralitāte-2023/2-0002). Projektu finansē Latvijas Zinātnes padomes Valsts pētījumu programma "Klimatneitralitātes mērķu sasniegšanas lēmumu pieņemšanas atbalsta sistēma".

Zinātniskā monogrāfija apstiprināta ar RTU Zinātnes padomes 2026. gada 19. janvāra sēdē, protokols Nr. 04000-3-e/1.

Literārā redaktore Inga Gulbe

Maketētāja un vāka dizaina autore Baiba Lazdiņa

© Rīgas Tehniskā universitāte, 2026

© Dagnija Blumberga, Jeļena Pubule, Dace Lauka,
Valērija Kosteviča, Anna Kubule, Ilze Vamža, Ilze Luksta,
Ģirts Bohvalovs, Alīna Safronova, Andra Blumberga,
Krista Laktuka, Dace Paule, Ritvars Freimanis,
Klaudio Rošā (*Claudio Rochas*), 2026

<https://doi.org/10.7250/9789934372681>

ISBN 978-9934-37-269-8 (print)

ISBN 978-9934-37-268-1 (pdf)



Dimensions of Climate Neutrality. Scientific monograph. Riga, RTU Press, 2026. 324 p.

Authors

Dagnija Blumberga, Jeļena Pubule, Dace Lauka, Valērija Kosteviča, Anna Kubule, Ilze Vamža, Ilze Luksta, Ģirts Bohvalovs, Alīna Safronova, Andra Blumberga, Krista Laktuka, Dace Paule, Ritvars Freimanis, Klaudio Rošā (*Claudio Rochas*)

Scientific Editor

Dr. habil. sc. ing. Dagnija Blumberga

Reviewers

Dr. habil. chem. Māris Kļaviņš

Dr. sc. ing. Ainis Lagzdīnš

The monograph examines and analyses sets of measures to reduce greenhouse gas (GHG) emissions in the energy, transport, waste management, industry, agriculture, and forestry sectors, for which all countries of the world carry out annual inventories for the UN report. An audit of GHG emissions has been carried out for each sector, measures to reduce these emissions and technological solutions have been analysed, and the sustainability of the impact on climate change has been assessed.

The aim of the monograph is, based on the results of scientific research, to explain the contribution of Latvian economic sectors to climate change mitigation, as the country moves towards sustainable development and climate neutrality.

The monograph is intended for scientists, university students, civil servants of ministries and agencies, representatives of municipalities and companies, as well as any representative of society, to encourage them to look at the future through the prism of systemic development and the dynamic development of innovative solutions.

The scientific monograph was published within the framework of the project “Climate Neutrality Decision Models in Action” (project No. VPP-KEM-Klimatneitralitā-2023/2-0002). The project is funded by the National Research Program “Decision-Making Support System for Achieving Climate Neutrality Goals” of the Latvian Science Council.

The scientific monograph was approved for publication by the Scientific Board of RTU at the meeting on 19 January 2026, Minutes No. 04000-3-e/1.

Literary Editor Inga Gulbe

Layout and cover design Baiba Lazdiņa

© Riga Technical University, 2026

© Dagnija Blumberga, Jeļena Pubule, Dace Lauka,
Valērija Kosteviča, Anna Kubule, Ilze Vamža, Ilze Luksta,
Ģirts Bohvalovs, Alīna Safronova, Andra Blumberga,
Krista Laktuka, Dace Paule, Ritvars Freimanis,
Klaudio Rošā (*Claudio Rochas*), 2026

<https://doi.org/10.7250/9789934372681>

ISBN 978-9934-37-269-8 (print)

ISBN 978-9934-37-268-1 (pdf)

Saturs

Ievads	7
--------	---

01 ENERĢĒTIKAS SEKTORS 12

1.1. Enerģētikas sektora SEG emisiju audits	16
1.1.1. Aprēķinu metodika 1.A.1 Enerģētikas nozarei	20
1.1.2. Aprēķinu metodika 1.A.2 Apstrādes rūpniecības un būvniecības nozarei	21
1.1.3. Aprēķinu metodika 1.A.4 Citas nozares	23
1.1.4. Aprēķinu metodika 1.A.5 Citi	25
1.1.5. Aprēķinu metodika 1.B. Kurināmā gaistošās emisijas nozarei	25
1.2. Tehnoloģiskie paņēmieni enerģētikas sektora dekarbonizācijai (klimata pārmaiņu mazināšanas tehnoloģiskie risinājumi enerģētikas sektorā)	26
1.3. Atjaunojamo energoresursu tehnoloģijas – vēja tehnoloģijas/enerģija	27
1.3.1. Atjaunojamo energoresursu tehnoloģijas – biometāns	34
1.3.2. Atjaunojamo energoresursu tehnoloģijas – ūdeņradis	42
1.3.3. Enerģijas akumulācija	50
1.3.4. Oglekļa dioksīda uztveršana, transportēšana, uzglabāšana un utilizācija	61
1.4. Klimata pārmaiņu mazināšanas ilgtspējas vērtējums enerģētikas sektorā	71
1.4.1. ANO ilgtspējas attīstības mērķi enerģētikas sektorā	72
1.4.2. Ilgtspējas novērtējums reģionālajā līmenī	78
1.4.3. Dzīves cikla analīze kā instruments ilgtspējas novērtēšanai	81

02 TRANSPORTA SEKTORS 98

2.1. Transporta sektora SEG emisiju audits	100
2.1.1. Transporta sektora SEG emisijas Eiropas Savienībā	100
2.1.2. Transporta sektora SEG emisijas Latvijā	102
2.1.3. Transporta sektora SEG emisiju aprēķins	104
2.2. Klimata pārmaiņu mazināšanas tehnoloģiskie risinājumi	104
2.2.1. Nacionālais enerģētikas un klimata plāns	107
2.2.2. Transporta attīstības pamatnostādnes	109
2.2.3. Pasākumi klimata pārmaiņu mazināšanai	111
2.2.4. Šķēršļi un iespējas ieviešanai praksē	114
2.3. Klimata pārmaiņu mazināšanas ilgtspējas vērtējums	116
2.3.1. Saskare ar ANO ilgtspējīgas attīstības mērķiem (diagramma)	116
2.3.2. Iespējamā ietekme uz vidi un lauku attīstību	117
2.3.3. Pārvaldības un politikas sinerģijas	118

03 RŪPNIECĪBAS SEKTORS 124

3.1. Rūpniecības sektora SEG emisiju audits	126
3.1.1. Cementa rūpniecības emisijas	128
3.1.2. Stikla ražošanas sektora emisijas	133

3.1.3.	Citi karbonātu lietošanas veidi	135
3.1.4.	Kurināmā izmantošana neenerģētiskām vajadzībām un šķīdinātāju izmantošana	135
3.1.5.	OSNV izmantošana	136
3.2.	Rūpniecības sektora dekarbonizācijas tehnoloģiskie paņēmieni	138
3.2.1.	Izejvielu nomaīņa minerālu rūpniecībā	139
3.2.2.	Oglekļa uztveršana un uzglabāšana	142
3.2.3.	Ūdeņraža izmantošana	146
3.2.4.	Elektrifikācija	147
3.2.5.	Energopatēriņa mazināšanas pasākumi	148
3.2.6.	Neaugsmes (<i>Degrowth</i>)	149
3.2.7.	OSNV aizstājēju emisiju samazināšana	150
3.3.	Klimata pārmaiņu mazināšanas ilgtspējas vērtējums rūpniecības sektorā	152
3.3.1.	ANO ilgtspējas attīstības mērķi rūpniecības sektorā	152
3.3.2.	Vides, sociālais un ekonomiskais novērtējums	154

04 LAUKSAIMNIECĪBAS SEKTORS 162

4.1.	Lauksaimniecības sektora SEG emisiju audits	164
4.2.	Klimata pārmaiņu mazināšanas tehnoloģiskie risinājumi	175
4.2.1.	Nacionālais enerģētikas un klimata plāns	176
4.2.2.	Kopējā lauksaimniecības politika	177
4.2.3.	Eiropas Komisijas vīzija lauksaimniecības un pārtikas nākotnei	179
4.2.4.	Oglekļa saistīga lauksaimniecība	181
4.2.5.	Pasākumi klimata pārmaiņu mazināšanai – klimatsaprātīga lauksaimniecība	188
4.3.	Klimata pārmaiņu mazināšanas ilgtspējas vērtējums	193
4.3.1.	Saikne ar ANO ilgtspējīgas attīstības mērķiem	193
4.3.2.	Izturētspējas un ilgtspējas rādītāji	194
4.3.3.	Aprites cikla analīze lauksaimniecības praksē	196
4.3.4.	Iespējamā ietekme uz vidi un lauku attīstību	198
4.3.5.	Pārvaldības un politikas sinerģijas – no darbības uz rezultātos balstītu atbalstu	200

05 ZIZIMM 214

5.1.	Globālais oglekļa cikls un AFOLU sektors	215
5.1.1.	ZIZIMM sektors un oglekļa cikls ZIZIMM sektorā	217
5.1.2.	ZIZIMM sektora SEG emisijas ES un Latvijā	221
5.2.	ZIZIMM sektora SEG emisiju audits Latvijā	228
5.2.1.	Emisiju un piesaistes aprēķina metodoloģijas ZIZIMM sektorā	228
5.2.2.	Oglekļa krājas izmaiņas (CRF – 4A, 4B, 4C, 4D, 4E)	232
5.2.3.	Nocirstie koksnes produkti (NKP) (CRF 4Gs)	241
5.2.4.	Augsnes nosusināšana, mitrināšana vai cita apsaimniekošana (CRF 4II)	243
5.2.5.	Tiešās un netiešās N ₂ O emisijas no slāpekļa mineralizācijas/imobilizācijas (CRF 4III)	247
5.2.6.	Emisijas no biomasas dedzināšana (CRF 4IV)	247
5.3.	Klimata pārmaiņu mazināšanas tehnoloģiskie risinājumi	249
5.3.1.	Apmežošanas pasākumi	250

5.3.2.	Meža apsaimniekošanas uzlabošanas pasākumi	251
5.3.3.	Agromežsaimniecības pasākumi	254
5.3.4.	Bioogles izmantošana aramzemē	257
5.3.5.	Ilgtspējīgas koksnes produktu ražošana un izmantošanas pasākumi	258
5.4.	Klimata pārmaiņu mazināšanas ilgtspējas vērtējums ZIZIMM	260
5.4.1.	Saikne ar ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķiem	260
5.4.2.	Dzīves cikla analīze kā instruments ilgtspējas novērtēšanai	267

06 ATKRITUMU UN NOTEKŪDEŅU APSAIMNIEKOŠANAS SEKTORS 282

6.1.	Atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektora SEG emisiju audits	285
6.1.1.	Atkritumu apglabāšanas sektora SEG emisiju audits	286
6.1.2.	Atkritumu bioloģiskā pārstrāde	293
6.1.3.	Atkritumu sadedzināšana	297
6.1.4.	Notekūdeņu attīrīšana un novadīšana	298
6.2.	Tehnoloģiskie paņēmieni atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektora dekarbonizācijai	299
6.2.1.	Atkritumu neradīšana, veicinot inovatīvu bioproduktu ražošanu	300
6.2.2.	Notekūdeņu dūņu izmantošanas veidi	301
6.2.3.	Noārdāmā oglekļa daļas samazināšana apglabāto atkritumu plūsmā	303
6.2.4.	Tekstila atkritumu apjoma samazināšana un tekstila izmantošana	306
6.2.5.	Biogāzes uzlabošana biometāna ieguvei	307
6.2.6.	Patērētāju paradumu ietekme uz atkritumu apsaimniekošanu	309
6.3.	Klimata pārmaiņu mazināšanas ilgtspējas vērtējums atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektorā	310
6.3.1.	ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķu sasaiste ar atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektoru	310
6.3.2.	Vides, sociālais un ekonomiskais novērtējums	312
	Izmantotā literatūra	315
	Summary	319

Ievads

Mēs visi dzīvojam laikā, kad katru dienu pārliecināmies par klimata pārmaiņām un to, ka izvairīties no tām nebūs iespējams. Ja nu vienīgi varam darīt visu, lai mazinātu ietekmi uz tām. Nenoliedzami, ka vienu no galvenajām lomām spēlē Apvienoto Nāciju Organizācijas (ANO) klimata politika un visu pasaules valstu politiķi, kuri ir pieņēmuši svarīgus lēmumus. Viss aizsākās 1992. gadā Riodežaneiro ar Konvenciju par bioloģisko daudzveidību. Svarīga loma ir 1997. gadā pieņemtajam Kioto protokolam – ANO Vispārējās konvencijas par klimata pārmaiņām protokolam, kas tika izveidots kā līdzeklis cīņā pret globālo sasilšanu. Katru gadu kādā no pasaules valstīm norisinās ANO Klimata pārmaiņu konference jeb *UNFCCC* Pušu konference (*COP*), kurās nelieliem soļiem notiek virzība uz vienošanos par jaunām aktivitātēm globālās sasilšanas mazināšanai. Ļoti bieži iepriekš sagatavotie protokoli un citi dokumenti netiek pieņemti. Piemēram, 2025. gadā *COP30* Brazīlijā nespēja vienoties par skaidru plānu jeb ceļvedi fosilā kurināmā pakāpeniskai izskaušanai. Šajā reizē noteicošās bija naftas ražotājvalstis, kas bloķēja jebkādu vērā ņemamu formulējumu. Bagāto lielvalstu vadītāji klimata pārmaiņu problēmu risinājumos vēl joprojām nesaskata biznesu un ekonomisko attīstību.

Savukārt Eiropas dalībvalstis ir cieši apņēmušās īstenot klimata politiku, lai mazinātu ietekmi uz klimata pārmaiņām. Eiropas zaļais kurss iezīmē ambiciozu ceļu klimatneitralitātes sasniegšanai, paredzot dažādas iniciatīvas tautsaimniecības sektoru dekarbonizācijai.



1. attēls.
SEG emisiju
tautsaimniecības
sektori.

Šis process ir būtisks ne tikai, lai sasniegtu ES izvirzīto mērķi samazināt SEG emisijas vismaz par 55 % līdz 2030. gadam, bet arī lai nodrošinātu dalībvalstu tautsaimniecības ilgtermiņa attīstības ilgtspēju.

Latvija gatavojas sasniegt klimatneitralitāti 2050. gadā. Starpmērķis ir ambiciozs – samazināt SEG emisijas vismaz par 17 % līdz 2030. gadam. Uzdevums nav viegls. Lai šo apņemšanos īstenotu, nepieciešams mērķtiecīgs un milzīgs darbs ne tikai katrā sektorā atsevišķi, bet jāveido nacionāla klimata politika un jāmeklē instrumenti tās īstenošanai. Aktuālie klimatneitralitātes pasākumi apkopoti Nacionālajā enerģētikas un klimata plānā 2021.–2030. gadam (NEKP 2030).

Neatkarīgi no politiskajiem pagriezieniem zinātniekiem ir jāturpina izpēte, lai nodrošinātu argumentus, kas palīdzēs politiķiem nenovirzīties no ceļa, kas ved uz klimata pārmaiņu ietekmes mazināšanu. Pēdējā laikā starptautiskajās zinātniskajās konferencēs arvien vairāk tiek runāts par stikla sienu, kas izveidojusies starp zinātniekiem un valsts pārvaldes pārstāvjiem. Šī grāmata varētu būt argumentēts zvaniņš, kas mēģinās ieskandināt problēmas parlamenta deputātu un ministriju ierēdņu izpratnei, liekot ieklausīties zinātniekos.

Monogrāfija ieskicē takas un taciņas, kas soli pa solim virzīs mūs katru atsevišķi un visus kopā ietekmes uz klimata pārmaiņām mazināšanas virzienā. Tā veidota, izmantojot autoru zinātnisko pētījumu rezultātus. Grāmatā skaidrots Latvijas tautsaimniecības sektoru ieguldījums un iespējas klimata pārmaiņu mazināšanā, valstij virzoties uz ilgtspējīgu attīstību un klimatneitralitāti. Grāmatas autoru mērķis ir, balstoties zinātnisko pētījumu rezultātos, skaidrot Latvijas tautsaimniecības sektoru ieguldījumu klimata pārmaiņu mazināšanā.

Monogrāfijā aplūkotas un analizētas siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju samazināšanas pasākumu kopas sektoros, par kuriem visas pasaules valstis katru gadu apkopo SEG emisiju datus. Valsts iesniedz ANO Nacionālo inventarizācijas ziņojumu (*NIR*) par SEG emisijām sešos sektoros:

- enerģētikas sektors ietver energoresursu bilanci esošo kurināmo gaistošās emisijas un visus tehnoloģiskos procesus, kuros tiek īstenoti degšanas procesi;
- transporta sektors ietver emisijas no transportlīdzekļu izmantotās degvielas;
- atkritumu apsaimniekošanas sektors ietver atkritumu uzglabāšanas tehnoloģiskos risinājumus, ieskaitot notekūdeņu attīrīšanas dūņu saimniecības;
- rūpniecības sektors ietver tikai tos tehnoloģiskos risinājumus, kuros SEG emisijas izdalās izejvielu pārstrādes procesā, kā arī emisijas no atsevišķu vielu izmantošanas;

- lauksaimniecība ir lauksaimniecības, mežsaimniecības un citāda zemes izmantojuma (angļu val. *AFOLU*) sektora viena sastāvdaļa;
- ZIZIMM (angļu val. *LULUCF*) ir zemes izmantošana, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības sektors ir *AFOLU* otra sastāvdaļa.

Grāmatā katrs SEG emisiju tautsaimniecības sektors radoši aplūkots no trīs skatupunktiem. Nav iespējams izmantot vienu recepti visiem sektoriem. Sešu sektoru pirmās nodaļas veltītas SEG emisiju auditam, kas balstīts ievaddatu ieguvē, matemātiskā apstrādē un rezultātu analizē. Nākamās nodaļas ir būtiskākās klimatneutritātes mērķu sasniegšanas iespēju noteikšanā. Tajās analizēti izvēlētie SEG emisiju samazināšanas pasākumi un tehnoloģiskie risinājumi. Sektoru raksturojuma pēdējās nodaļās vērtēta ietekmes uz klimata pārmaiņām samazinājuma ilgtspēja un izturētspēja, ņemot vērā ANO ilgtspējas mērķus un klimata adaptācijas iespēju analīzi.

SEG emisiju audits īstenots, balstoties ievaddatu ieguves un apstrādes metodikās, kuras reglamentē nacionālie un starptautiskie dokumenti. Katra sektora emisiju uzskaites pamatā ir Starpvaldību klimata pārmaiņu paneļa (*IPCC*) (*Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*) izstrādātās vadlīnijas par SEG nacionālo inventarizāciju. Detalizēta informācija par izmantotajiem aprēķinu detalizācijas līmeņiem (*tier*), valsts specifiskajiem emisiju koeficientiem un emisiju avotiem, kā arī emisiju apjomiem iegūta no Centrālās Statistikas pārvaldes datubāzēm, Latvijas Nacionālais siltumnīcefekta gāzu inventarizācijas ziņojuma saskaņā ar ANO Vispārējo konvenciju par klimata pārmaiņām un Parīzes nolīgumu (*NIR*) (*Latvia's National Inventory Document under the UNFCCC and Paris Agreement*), tā pielikumiem



2. attēls.

Monogrāfijas
satura vizuālais
skaidrojums.

un Centrālās datu krātuves (*Common Reporting Format (CRF)*) datu tabulām.

Grāmata ietver ietekmes uz klimata pārmaiņām mazināšanas pasākumu izvērtēšanas metodikas izklāstu, iegūto rezultātu aprakstu un interpretāciju. SEG samazināšanas pasākumi atšķiras gan ar nepieciešamo ieguldījumu apjomu, gan ar iegūtajiem rezultātiem. Bieži ir iespējams liels SEG emisiju apjoma samazinājums ar nelielām investīcijām un otrādi, tāpēc svarīgu lomu spēlē indikatori, ar kuriem var vērtēt vienas SEG emisiju vienības samazinājuma izmaksas (EUR/t CO₂ ekv.). Klimatneitralitātes pasākumi sektoros atšķiras arī ar papildu ietekmi uz tautsaimniecību un tās ilgtspējīgas attīstības potenciālu. Šādi piemēri atrodami katrā sektorā. Piemēram, atjaunojamo energoresursu īpatsvara pieaugums enerģētikas sektorā varētu valstij palīdzēt kļūt par ūdeņraža eksportētājvalsti. Cits piemērs ir saistīts ar notekūdeņu dūņu granulās ietvertā oglekļa uzglabāšanu celtniecības materiālos, aizstājot vērtīgas celtniecības materiālu izejvielas.

Ietekmes uz klimata pārmaiņām mazināšana ir viens no galvenajiem ilgtspējīgas attīstības pamatnosacījumiem. Sektoru ieguldījums atšķiras un ir atkarīgs no SEG avotiem, apjoma un sastāva. Piemēram, enerģētikas sektors ir galvenais SEG emisiju avots gan globālajā, gan reģionālajā, gan arī nacionālajā līmenī. Lai veicinātu pāreju uz klimatneitrālu un ilgtspējīgu energoapgādi, ir būtiski izvērtēt, cik lielā mērā ieviestie vai plānotie tehnoloģiskie risinājumi vai politikas pasākumi veicina vides, sociālo un ekonomisko ilgtspēju un izturētspēju.

Grāmatā klimatneitralitātes pasākumu ilgtspēja vērtēta, balstoties ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķos (IAM). Metodika sniedz

3. attēls.

ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķi.



strukturētu pieeju, kas palīdz valstīm un reģioniem izvērtēt un integrēt ilgtspējas principus visos sektoros. Ilgtspējas vērtējums sektoros kalpo kā instruments, lai noteiktu, kā izvēlētie risinājumi ietekmē klimata mērķu sasniegšanu, kā tie saskan ar ekonomiskās attīstības un sociālās labklājības nodrošināšanu, un cik lielā mērā tie atbilst globālajiem ilgtspējas standartiem.

Monogrāfija domāta zinātniekiem, universitāšu studentiem, ministriju un aģentūru ierēdņiem, pašvaldību un uzņēmumu darbiniekiem, kā arī jebkurai sabiedrības pārstāvim, lai iedrošinātu skatīties nākotnē caur sistēmiskas attīstības prizmu un inovatīvu risinājumu dinamiskas attīstības griezumā.



01

ENERĢĒTIKAS SEKTORS

Ievads

01	ENERĢĒTIKAS SEKTORS	12
1.1.	Enerģētikas sektora SEG emisiju audits	16
1.1.1.	Aprēķinu metodika 1.A.1 Enerģētikas nozarei	20
1.1.2.	Aprēķinu metodika 1.A.2 Apstrādes rūpniecības un būvniecības nozarei	21
1.1.3.	Aprēķinu metodika 1.A.4 Citas nozares	23
1.1.4.	Aprēķinu metodika 1.A.5 Citi	25
1.1.5.	Aprēķinu metodika 1.B. Kurināmā gaistošās emisijas nozarei	25
1.2.	Tehnoloģiskie paņēmieni enerģētikas sektora dekarbonizācijai (klimata pārmaiņu mazināšanas tehnoloģiskie risinājumi enerģētikas sektorā)	26
1.3.	Atjaunojamo energoresursu tehnoloģijas – vēja tehnoloģijas/enerģija	27
1.3.1.	Atjaunojamo energoresursu tehnoloģijas – biometāns	34
1.3.2.	Atjaunojamo energoresursu tehnoloģijas – ūdeņradis	42
1.3.3.	Enerģijas akumulācija	50
1.3.4.	Oglekļa dioksīda uztveršana, transportēšana, uzglabāšana un utilizācija	61
1.4.	Klimata pārmaiņu mazināšanas ilgtspējas vērtējums enerģētikas sektorā	71
1.4.1.	ANO Ilgtspējas attīstības mērķi enerģētikas sektorā	72
1.4.2.	Ilgtspējas novērtējums reģionālajā līmenī	78
1.4.3.	Dzīves cikla analīze kā instruments ilgtspējas novērtēšanai	81
02	Transporta sektors	
03	Rūpniecības sektors	
04	Lauksaimniecības sektors	
05	ZIZIMM	
06	Atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektors	

Izmantotā literatūra

Summary

Enerģētikas nozare veido 4 % no Latvijas iekšzemes kopprodukta un ir nozīmīgs faktors visos Latvijas tautsaimniecības sektoros [1]. Enerģētikas sektoru raksturo ilgtermiņa un kapitālintensīvas investīcijas, un tas vēsturiski ir parādījis pakāpenisku attīstības tendenci, tomēr pēdējo piecu gadu laikā enerģētikas sektors ir iegājis dinamiskā izmaiņu fāzē. Izmaiņas saistītas ar palielināto nepieciešamību samazināt atkarību no fosilajiem resursiem un palielināt atjaunojamās enerģijas daļu. Latvija aktīvi attīsta atjaunojamās enerģijas infrastruktūru, vienlaikus uzlabojot energoefektivitāti. Šī dinamiskā izmaiņu fāze nodrošinās ilgtermiņa enerģētisko neatkarību un samazinās siltumnīcefekta gāzu emisijas (SEG) [1].

Enerģētikas sektors ir viens no nozīmīgākajiem SEG emisiju avotiem, jo tajā plaši tiek izmantoti fosilie energoresursi elektroenerģijas, siltumenerģijas un transporta nodrošināšanai. SEG emisijas izsaka oglekļa dioksīda ekvivalentos (CO₂ ekv.) [2].

CO₂ ekvivalents ir universāla mērvienība, ar ko norāda katras SEG globālās sasilšanas potenciālu (GSP), kas izteikts kā vienas oglekļa dioksīda vienības GSP. To izmanto, lai kopīgi novērtētu dažādu SEG emitēšanu. Dažādu SEG emisiju pārrēķins CO₂ ekvivalentos var atšķirties atkarībā no izmantotās IPCC metodoloģijas. GSP faktori:

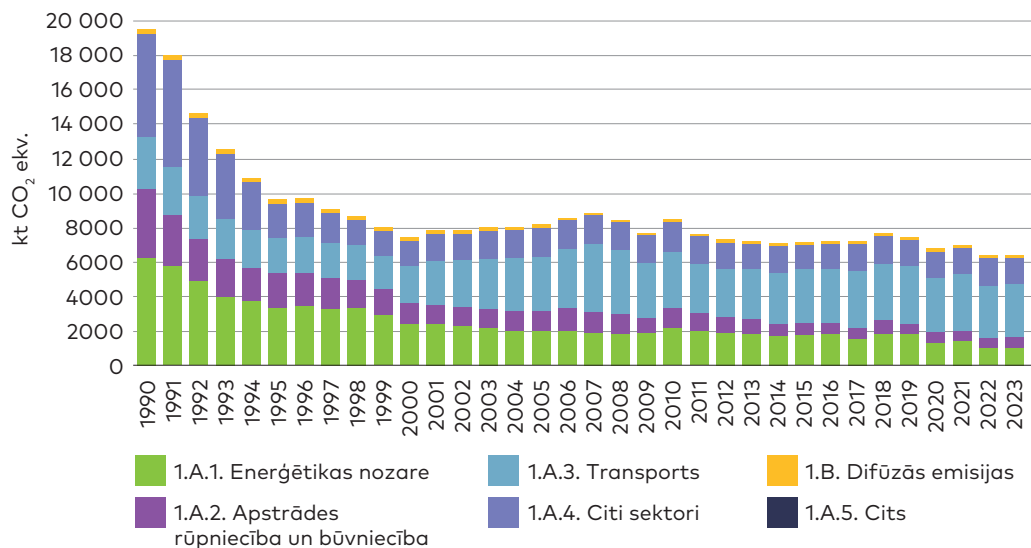
CO₂ = 1 CO₂ ekv.

CH₄ = 25 CO₂ ekv.

N₂O = 298 CO₂ ekv.

CO₂ ir galvenā SEG, kas veicina klimata pārmaiņas, un tas veido būtiskāko daļu no kopējām emisijām. Latvijā 2023. gadā CO₂ emisijas veidoja 66,1 % no visām SEG emisijām, uzskatāmi parādot energoresursu patēriņa nozīmi emisiju kontekstā. [3] Kā jau iepriekš minēts, enerģētikas sektors ir viens no būtiskākajiem SEG avotiem. 2023. gadā tas radīja 64,1 % jeb 6394,07 kt CO₂ ekv., kas šo sektoru padara par vienu no lielākajiem emisiju radītājiem Latvijā. Ir būtiski, ka Latvijā kopš 1990. gada enerģētikas sektorā SEG emisijas tiek samazinātas, un 2023. gadā tās ir samazinātas par 67,3 %, salīdzinot ar 1990. gadu (atskaites gads) [3].

SEG emisiju tendences enerģētikas sektorā no 1990. gada līdz 2023. gadam parādītas 1.1. attēlā. Atskatoties uz emisiju apjomu 1990. gadā, redzams, ka lielāko emisiju daļu enerģētikas sektorā radīja enerģijas ražošanas nozare (32,3 %) un citas nozares (komerciālais un sabiedriskais sektors; mājsaimniecības; lauksaimniecība/mežsaimniecība/zvejsaimniecība) (30,4 %) [3]. Lielais emisiju apjoms ir sasaistāms ar vairākiem faktoriem, jo 1990. gadā Latvijā bija attīstīta smagā rūpniecība, metalurģija, ķīmiskā rūpniecība, un citās nozarēs bija augsts enerģijas patēriņš. Lai nodrošinātu rūpnieciskos procesus, ražotu elektroenerģiju un siltumenerģiju kā enerģijas avots tika izmantoti fosilie kurināmie (ogles, mazuts, dabasgāze). Rūpnieciskajās zonās bieži atradās arī centralizētās katlumājas vai

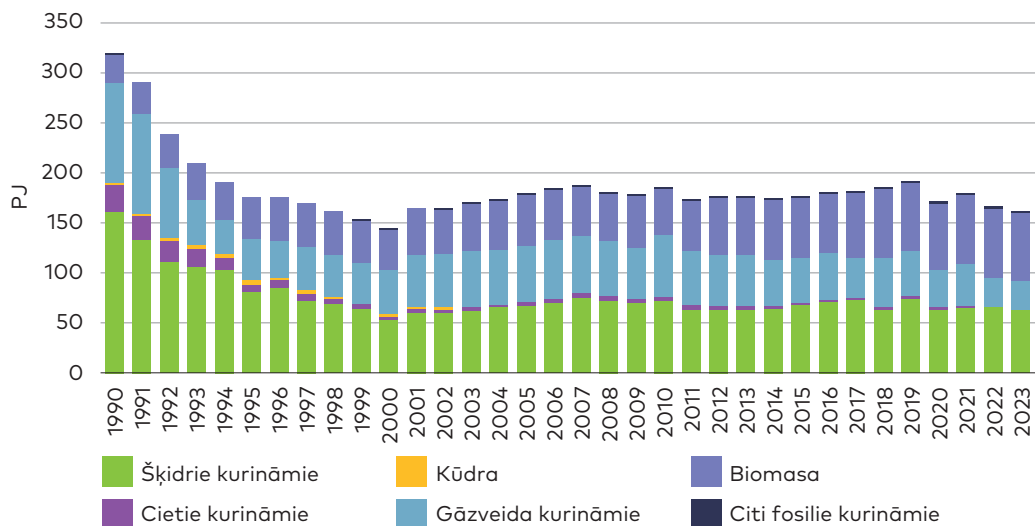


TEC, kas radīja augstu emisiju koncentrāciju. Šajā laika posmā arī energoefektivitātes līmenis bija zems un gandrīz neeksistēja piesārņojuma kontroles tehnoloģijas un politikas instrumenti, kas ierobežotu vai samazinātu šīs piesārņojošās darbības. Arī mājāsaimniecību sektorā plaši tika izmantoti individuālie katli un krāsnis, ko kurināja ar oglēm vai šķidrajiem kurināmajiem.

Laikam ejot, SEG emisiju samazināšanās enerģētikas sektorā notika vairāku savstarpēji saistītu faktoru ietekmē, kas ietver gan tehnoloģiskās pārmaiņas, politikas instrumentu rīku ieviešanu un sociālekonomiskās tendences. 2023. gadā emisijas vairākās enerģētikas nozares kategorijās samazinājās, salīdzinot ar 1990. gadu. Enerģijas ražošanas nozarē emisijas samazinājās par 84 %, apstrādes rūpniecībā un būvniecībā – par 84,8 %, bet citos sektoros (komerciālais un sabiedriskais sektors; mājāsaimniecības; lauksaimniecība/mežsaimniecība/zvejsaimniecība) – par 75 %. Transports ir vienīgais sektors, kurā SEG emisijas ir palielinājušās par 3,2 %, salīdzinot ar 1990. gadu. Par transporta sektora analīzi, emisiju auditu un iespējamiem tehnoloģiskajiem risinājumiem klimatu pārmaiņu mazināšanai lasāms nodaļā “Transporta sektors”. SEG emisiju samazinājums enerģētikas sektorā ir saistāms ar rūpniecības restrukturizāciju, jo 20. gadsimta deviņdesmito gadu sākumā daudzas energoietilpīgas rūpnīcas tika slēgtas vai modernizētas. Ražošanas procesos tika ieviestas energoefektīvākas tehnoloģijas. Būtisks emisiju samazinājums enerģētikas sektorā tika sasniegts, pakāpeniski pārejot no fosilā kurināmā uz atjaunojamiem energoresursiem. Enerģijas ražošanas uzņēmumos samazinājās ogļu un mazuta izmantošana. Emisiju būtisku samazinājumu ir sekmējusi ne tikai pāreja uz energoefektīvākām tehnoloģijām un atjaunojamo energoresursu

1.1. attēls.

SEG emisiju dinamika enerģētikas sektorā no 1990. līdz 2023. gadam kt CO₂ ekv. [3].



1.2. attēls.

Kurināmā patēriņš enerģētikas nozarē (1990–2023) (PJ) [3].

ieviešana, bet arī beidzamo 30 gadu laikā īstenotā klimata un enerģētikas politika. Starptautiskās vienošanās, piemēram, Kioto protokols un Parīzes nolīgums, kā arī Eiropas Savienības (ES) ambiciozie emisiju samazināšanas mērķi, ir radījuši spēcīgu regulatīvu ietvaru, kas motivē valstis un uzņēmumus pārveidot enerģētikas infrastruktūru. Eiropas emisijas kvotu tirdzniecības sistēma (ETS), valsts atbalsta mehānismi, kā arī nacionālās enerģētikas un klimata stratēģijas ir kalpojušas kā galvenie instrumenti emisiju samazināšanai. Šie pasākumi ir veicinājuši ogļu un citu emisijām bagātu kurināmo izmantošanas samazināšanos elektroenerģijas un siltuma ražošanā, vienlaikus sekmējot atjaunojamo energoresursu – vēja, saules, biomasas un hidroenerģijas – attīstību.

Emisiju samazinājums tieši sasaucās ar resursu izmantošanu enerģijas ražošanā. Laika posmā no 1990. gada līdz 2023. gadam biomasas izmantošana ir augusi vairāk nekā divas reizes. Tās īpatsvars ir pieaudzis no 8,6 % 1990. gadā līdz 41,6 % 2023. gadā. Beidzamo 30 gadu laikā ievērojami ir sarukusi šķidrā kurināmā (par 60,3 %), cietā kurināmā (par 98,2 %), kūdras (par 95,6 %) un dabasgāzes (par 72,3 %) izmantošana [3]. Kā jau iepriekš minēts, tad klimata politika un emisiju mērķi bija viens no faktoriem, kas sekmēja straujāku pāreju no fosilajiem uz atjaunojamiem energoresursiem. Biomasas izmantošanu uzskata par neitrālu vai zemāku emisiju risinājumu, jo augšanas laikā biomasas avoti piesaista CO₂. Pārejas posmā, kad tika ieviesti atbalsta mehānismi un subsīdijas, valstī bija pieejams atbalsts atjaunojamajiem energoresursiem, tostarp biomasai, kas veicināja investīcijas katlumājās, siltumapgādē un koģenerācijas stacijās. Savukārt ES struktūrfondi līdzfinansēja pāreju no ogļu vai naftas katliem uz šķeldu, granulām vai biogāzi.

Enerģētikas sektors Latvijā un ES ir viens no nozīmīgākajiem SEG emisiju avotiem. 2022. gadā Latvijā tas veidoja vairāk nekā 32 % no kopējām emisijām (neskaitot ZIZIMM), galvenokārt no kurināmā sadedzināšanas enerģijas ražošanai un patēriņam. Tā kā enerģētikas joma ES veido ap 75 % no kopējām emisijām, tā ir prioritāra klimata politikas joma [4].

Latvija kā ES dalībvalsts pilda saistības saskaņā ar ANO Klimata konvenciju un Kioto protokolu, kā arī Parīzes nolīgumu, kura ietvaros apņēmusies līdz 2030. gadam samazināt emisijas par vismaz 55 % un līdz 2050. gadam sasniegt klimatneitralitāti. Šīs apņemšanās tiek īstenotas ar nacionālajiem plāniem un politikas dokumentiem [4].

Klimata un enerģētikas mērķi ietver arī atjaunojamo energoresursu īpatsvara palielināšanu, energoefektivitātes uzlabošanu un enerģētiskās drošības stiprināšanu. Līdz ar to enerģētikas sektorā tiek pakāpeniski samazināta fosilā kurināmā izmantošana, ieviestas atjaunojamo energoresursu (AER) tehnoloģijas un attīstītas emisiju samazināšanas iniciatīvas gan ETS, gan ne-ETS sektoros [4].

Ikvienā sektorā, īpaši enerģētikas sektorā, ir jāpāriet uz klimatneitralitāti. Tās sasniegšana ir viens no ES galvenajiem politikas virzieniem, lai samazinātu SEG emisijas, vienlaikus veicinot ilgtspējīgu sektora attīstību. Šāda veida pāreja prasa strukturālas pārmaiņas ekonomikā, īpaši enerģētikas sektorā, kas ir viens no lielākajiem SEG emisiju avotiem. Pāreja uz klimatneitralitāti balstās pakāpeniskā fosilā kurināmā aizstāšanā ar atjaunojamiem energoresursiem, energoefektivitātes paaugstināšanā, kā arī jaunu tehnoloģiju ieviešanā, kas ļauj sektoru attīstību virzīt zemu emisiju vai nulles emisiju enerģijas ražošanā.

Lai nodrošinātu pierādījumos balstītu lēmumu pieņemšanu un efektīvu klimata politikas īstenošanu, būtiska ir detalizēta SEG emisiju uzskaitē un analīze. Enerģētikas sektorā emisiju audits ļauj identificēt galvenos emisiju avotus, novērtēt emisiju samazināšanas dinamiku un noteikt jomas, kurās nepieciešami papildu pasākumi.

1.1. Enerģētikas sektora SEG emisiju audits

Jau pirmajā nodaļā dots neliels ieskats par emisiju apjomiem un to samazinājumu enerģētikas sektorā beidzamo 30 gadu laikā. Enerģētikas sektors sastāv no diviem apakšsektoriem – kurināmā sadedzināšanas procesiem, kas ietver stacionāro iekārtu emisijas, un kurināmā gaistošās emisijas, kuras rodas no kurināmā nesadedzināšanas procesiem, piemēram, dabasgāzes noplūdēm un benzīna iztvaikošanas. Kurināmā sadedzināšanas apakšsektorā nozīmīgu daļu SEG emisiju veido citi sektori, kas ietver ēku apkuri, kā arī kurināmā izmantošana lauksaimniecībā, mežsaimniecībā un zivsaimniecībā. Enerģētikas nozare ietver elektroenerģijas un siltumenerģijas

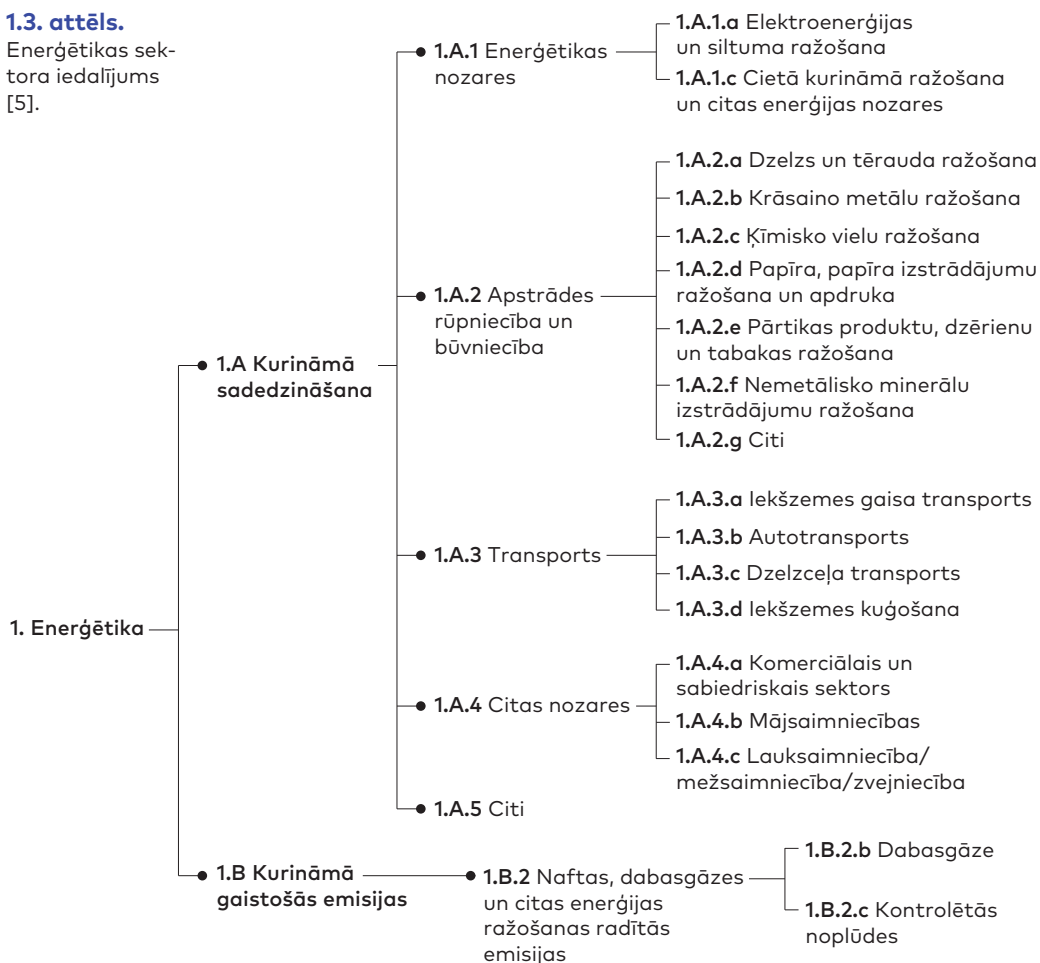
ražošanu. Apstrādes rūpniecība un būvniecība ietver emisijas, kas rodas no kurināmā izmantošanas ražošanas procesos. Neliela daļa emisiju rodas citās nozarēs un aptver enerģētikas sektora emisijas no kurināmā sadedzināšanas avotiem, kas nav piesaistāmi citām nozarēm, piemēram, enerģijas ražošanai, mājsaimniecībām vai rūpniecībai. Šajā kategorijā ietilpst gan stacionārās iekārtas (ģeneratori u. c.), gan mobilās iekārtas ārpus transporta sektora.

Turpmākajās apakšnodaļās ir aplūkota metodoloģija emisiju kvantitatīvai noteikšanai no šādām nozarēm:

- 1.A.1 Enerģētikas nozare;
- 1.A.2 Apstrādes rūpniecība un būvniecība;
- 1.A.3 Transports;
- 1.A.4 Citas nozares;
- 1.A.5 Citi;
- 1.B. Kurināmā gaistošās emisijas.

1.3. attēls.

Enerģētikas sektora iedalījums [5].



SEG emisiju uzskaitēi enerģētikas sektorā izmantotie dati un avoti

Emisiju uzskaites enerģētikas sektorā pamatā ir Starpvaldību klimata pārmaiņu paneļa (IPCC) izstrādātās vadlīnijas par SEG nacionālo inventarizāciju, īpaši to 2. sējums "Enerģētika" (2006 *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2 "Energy"*). [6] Detalizētāka informācija par izmantotajiem aprēķinu līmeņiem (tier), valsts specifiskajiem emisiju koeficientiem un emisiju avotiem iegūta no Latvijas Nacionālais siltumnīcefekta gāzu inventarizācijas ziņojums saskaņā ar ANO Vispārējo konvenciju par klimata pārmaiņām un Parīzes nolīgumu (NIR) (*Latvia's National Inventory Document under the UNFCCC and Paris Agreement*), tā pielikumiem un Centrālās datu krātuves (*Common Reporting Format (CRF)*) [7] datu tabulām.

Lai nodrošinātu atbilstošu emisiju uzskaiti dažādās nozarēs – enerģijas ražošanā, apstrādes rūpniecībā, būvniecībā, ēku apsildē un citos sektoros –, izmantoti arī nacionālās oficiālās statistikas dati, tostarp enerģijas bilances un kurināmā patēriņa dati, kas sniedz detalizētu pārskatu par kurināmā izmantošanu dažādās tautsaimniecības nozarēs [8], [9].

Aprēķinu metodoloģija enerģētikas sektorā

Saskaņā ar Latvijas Nacionālais siltumnīcefekta gāzu inventarizācijas ziņojums saskaņā ar ANO Vispārējo konvenciju par klimata pārmaiņām un Parīzes nolīgumu SEG (CO₂, CH₄, N₂O) emisiju aprēķināšanai nozarēs (1.A.1 Enerģētikas nozare, 1.A.2 Apstrādes rūpniecība un būvniecība, 1.A.4 Citas nozares un 1.A.5 Citi) izmantotas 1. līmeņa (*Tier 1*) un 2. līmeņa (*Tier 2*) metodes. Precīzs sadalījums pa nozarēm ir parādīts 1.1. tabulā.

Metodoloģijas izstrādē un aprēķinu veikšanā izmantoti emisiju faktori atbilstoši Latvijas Nacionālajam siltumnīcefekta gāzu inventarizācijas ziņojumam. 1. līmeņa (*Tier 1*) metodei izmantotas arī IPCC vadlīnijas, 2. sējums "Enerģētika" [6], savukārt 2. līmeņa (*Tier 2*) metodei piemēroti valstij raksturīgie emisiju koeficienti no Latvijas Nacionālā siltumnīcefekta gāzu inventarizācijas ziņojuma saskaņā ar ANO Vispārējo konvenciju par klimata pārmaiņām un Parīzes nolīgumu.

Attiecībā uz 1.A.1., 1.A.2., 1.A.4. un 1.A.5. nozarēm aprēķini veikti, balstoties vadlīnijās, 2. sējumā "Enerģētika" [6]. 1. līmeņa konkrētās avotu kategorijas (*Tier 1*) metodē izmantots 1.1. vienādojums, kur galvenie neatkarīgie mainīgie ir degvielas patēriņš un emisijas faktors. Lai aprēķinātu konkrētās avotu kategorijas kopējās emisijas, visas emisijas, kas iegūtas ar 1.1. vienādojumu, tiek saskaitītas pa visiem kurināmā veidiem.

1.1. tabula.

Enerģētikas sektorā izmantotās metodes un emisijas faktori

Kategorija	Izmantotās metodes		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
1. Enerģētika	T1, T2, T3	T1, T2, T3	T1, T2
A. Kurināmā sadedzināšana	T1, T2	T1, T2	T1, T2
1. Enerģētikas nozares	T1, T2	T1	T1
2. Apstrādes rūpniecība un būvniecība	T1, T2	T1	T1
3. Transports	T1, T2	T1, T2	T1, T2
4. Citas nozares	T1, T2	T1, T2	T1, T2
5. Citi	T1	T1	T1
B. Kurināmā gaistošās emisijas	T3	T3	NA
1. Cietā kurināmā ieguve un apstrāde	NA	NA	NA
2. Naftas, dabasgāzes un citas enerģijas ražošanas radītās emisijas	T3	T3	NA
C. CO₂ transportēšana un uzglabāšana	NA	NA	NA

Apzīmējumi: Tier 1 – T1; Tier 2 – T2; Tier 3 – T3, NA – nav attiecināms

$$Emisijas_{SEG,degviela} = Degvielas\ patēriņš_{degviela} \times Emisijas\ faktors_{SEG,degviela}, \quad (1.1.)$$

kur

*Emisijas*_{SEG, degviela} – SEG emisijas pēc kurināmā veida (kg SEG);*Degvielas patēriņš*_{degviela} – sadedzinātā kurināmā daudzums (TJ);*Emisijas faktors*_{SEG, degviela} – konkrētās SEG emisijas standarta emisijas koeficients pēc kurināmā veida (kg gāzes/TJ). Attiecībā uz CO₂ tas ietver oglekļa oksidācijas koeficientu, kas pieņemts par 1.

Valstī specifiskie rādītāji saistībā ar emisiju faktoriem un patēriņiem iegūti no NIR un pārējie rādītāji iegūti no IPCC. Tier 2 un Tier 3 var mainīties valsts specifiskie rādītāji, bet Tier 1 rēķina tikai IPCC.

2. līmeņa (Tier 2) metodes pieejā 1. līmenī (Tier 1) izmantotie noklusētie emisiju faktori 1.1. vienādojumā aizstāti ar konkrētajai valstij raksturīgajiem emisiju faktoriem no Latvijas Nacionālā siltumnīcefekta gāzu inventarizācijas ziņojuma saskaņā ar ANO Vispārējo konvenciju par klimata pārmaiņām un Parīzes. NIR izmantotais vienādojums ir tas pats, kas norādīts IPCC vadlīnijās par kurināmā sadedzināšanu stacionārās iekārtās (katlumājas, rūpnieciskās krāsnis), taču tā pieraksts ir pielāgots, mainot simbolus un izteiksmes secību.

$$Em = EF \times B_q, \quad (1.2.)$$

kur

Em – kopējās emisijas (kt);

EF – aprēķinātais vai standartizētais emisijas faktors (t/TJ);

B_q – kurināmā daudzums siltuma vienībās (TJ).

Kurināmā sadedzināšanas radītās emisijas ietver visu valstī sadedzināto kurināmo, tostarp punktveida avotus, transportu un citu kurināmo sadedzināšanu [1]. Turpmākajās sadaļās sīkāk aplūkota izstrādātā aprēķinu metodika.

1.1.1. Aprēķinu metodika 1.A.1 Enerģētikas nozarei

No vienotā ziņošanas formāta (*CRF*) 1.A.1 Enerģētikas nozare ietver emisijas no kurināmā sadedzināšanas stacionāros avotos elektroenerģijas un siltuma ražošanai. Saskaņā ar vadlīnijām emisijas no uzņēmumiem, kam elektroenerģijas vai siltuma ražošana pilnībā vai daļēji savām vajadzībām ir kā papildu darbība savai pamatdarbībai (turpmāk – pašražotāji (*autoproducers*)), pieskaita tai nozarei, kurā tās radušās, nevis 1.A.1 sektoram.

Latvijā 1.A.1 sektora SEG emisijas tiek uzrādītas šādās apakšnozarēs [7]:

1.A.1.a. Elektroenerģijas un siltuma ražošana:

1.A.1.a.i Elektroenerģijas ražošana,

1.A.1.a.ii Elektroenerģijas un siltuma koģenerācija,

1.A.1.a.iii Siltuma ražotnes;

1.A.1.c. Cietā kurināmā ražošana un citas enerģijas nozares:

1.A.1.c.i Cieto kurināmo ražošana.

1. līmeņa (*Tier 1*) emisiju faktori tiešo SEG emisiju (CO_2 , CH_4 , N_2O) aprēķinam ņemti no *IPCC* vadlīniju sadaļas par stacionāro sadedzināšanu šādiem kurināmā veidiem: kūdras briķetes, poligona gāze, notekūdeņu dūņu gāze, cita biogāze, biodīzeļdegviela, salmi. Savukārt pārējiem kurināmā veidiem, pamatojoties uz “Energobilances” [8] statistikas tabulu un attiecīgajiem nozares emisiju faktoriem, tiek izmantoti valsts specifiskie 2. līmeņa (*Tier 2*) emisiju faktori (CO_2 , CH_4 un N_2O no *NIR*).

Enerģētikas nozares emisiju aprēķina metodika iekļauj trīs galvenos soļus:

1. **solis** – veic aprēķinus 1.A.1.a.i, 1.A.1.a.ii, 1.A.1.a.iii un 1.A.1.c.i apakšnozarēm, izmantojot 1.2. vienādojumu;
2. **solis** – saskaita rezultātus katram kurināmā veidam (šķidrāis kurināmais, cietais kurināmais u. c.) 1.A.1.a.i, 1.A.1.a.ii, 1.A.1.a.iii un 1.A.1.c.i apakšnozarēs, lai iegūtu 1.A.1.a un 1.A.1.c apakšnozaru vērtības.

**1.4. attēls.**

Aprēķina metodika 1.A.1 Enerģētikas nozarei.

3. solis – saskaita rezultātus katram kurināmā veidam (šķidrāis kurināmais, cietais kurināmais u. c.) 1.A.1.a un 1.A.1.c apakšnozarēs, lai iegūtu kopējo 1.A.1 emisiju apjomu.

1.1.2. 1.A.2 Apstrādes rūpniecības un būvniecības nozares emisiju aprēķinu metodika

Apstrādes rūpniecības un būvniecības nozare (1.A.2) ietver emisijas no kurināmā sadedzināšanas rūpnieciskās ražošanas sadedzināšanas iekārtās, tostarp emisijas no bezceļu transportlīdzekļiem. 1.A.2. sektors ietver arī emisijas no kurināmā izmantošanas uz vietas rūpnieciskās ražošanas iekārtās (pašražotāji (*autoproducers*)). Par šīm emisijām ziņo konkrētās apakšnozarēs. Par emisijām no rūpniecības nozares bezceļu un citām pārvietojamām mašīnām (mehānismi ar iekšdedzes dzinējiem) jāziņo kā par atsevišķu apakš kategoriju. Šīs emisijas aprēķina no benzīna un dīzeļdegvielas kombinētās izmantošanas konkrētās apakšnozarēs. Apstrādes rūpniecības un būvniecības nozarē SEG emisijas Latvijā tiek ziņotas šādās apakšnozarēs [1]:

- 1.A.2.a Dzelzs un tērauda ražošana;
- 1.A.2.b Krāsaino metālu ražošana;
- 1.A.2.c Ķīmisko vielu ražošana;
- 1.A.2.d Papīra, papīra izstrādājumu ražošana un apdruka;
- 1.A.2.e Pārtikas produktu, dzērienu un tabakas ražošana;
- 1.A.2.f Nemetālisko minerālu izstrādājumu ražošana;
- 1.A.2.g Citi:
 - 1.A.2.g.i Mašīnu ražošana;
 - 1.A.2.g.ii Transporta iekārtu ražošana;
 - 1.A.2.g.iii Ieguves rūpniecība (izņemot kurināmo) un karjeru izstrāde;

- 1.A.2.g.iv Koksne un koka izstrādājumi;
- 1.A.2.g.v Būvniecība;
- 1.A.2.g.vi Tekstilrūpniecība un ādas rūpniecība;
- 1.A.2.g.vii Bezceļu transportlīdzekļi un cita tehnika;
- 1.A.2.g.viii Citi.

Tiešo SEG emisiju (CO_2 , CH_4 , N_2O) aprēķināšanai 1. līmeņa (*Tier 1*) emisiju faktori ņemti no IPCC vadlīniju sadaļas par stacionāro sadzīves atkritumiem, un attiecas uz šādiem kurināmā veidiem: kūdras briķetes, biodīzeļdegviela, salmi. Savukārt citiem kurināmā veidiem, kas uzskaitīti "Energobilances" [8] statistikas tabulā atbilstošajos sektoros, izmantoti valsts specifiskie 2. līmeņa (*Tier 2*) emisiju faktori (CO_2 , CH_4 un N_2O no NIR).

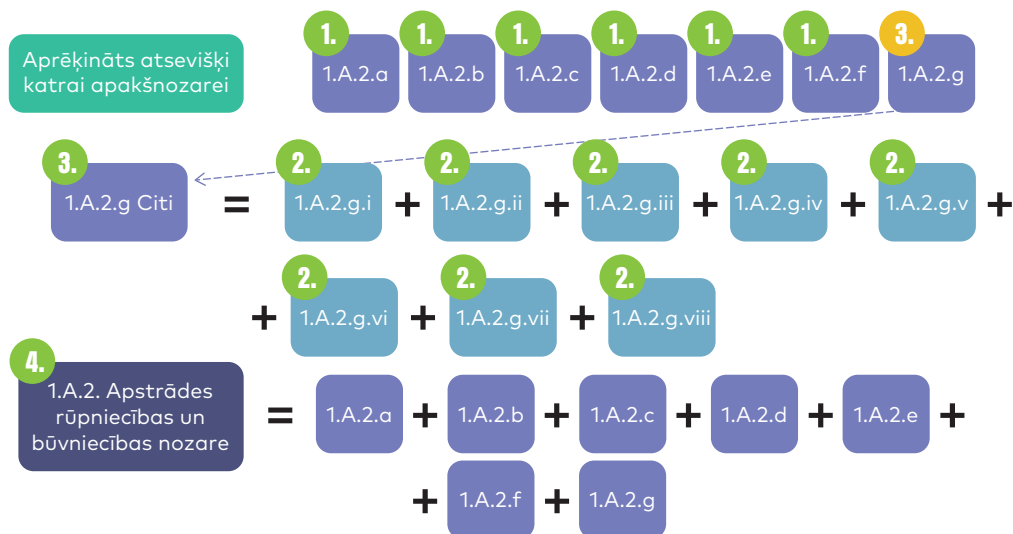
NIR ziņojumā, aprēķinot CO_2 emisijas no rūpnieciskajiem un sadzīves atkritumiem 1.A.2.f apakšnozarē "Nemetālisko minerālu izstrādājumu ražošana", izmantotas konkrētu ražotņu faktiskās vērtības.

1.A.2. Apstrādes rūpniecības un būvniecības nozares emisiju aprēķinu metodika ir parādīta 1.5. attēlā:

1. **posms** – veikt aprēķinus 1.A.2.a; 1.A.2.b; 1.A.2.c; 1.A.2. d; 1.A.2.e; 1.A.2.f nozarēm, izmantojot 1.2. vienādojumu;
2. **posms** – veikt aprēķinu 1.A.2.g apakšsektoriem (1.A.2.g.i; 1.A.2.g.ii; 1.A.2.g.iii; 1.A.2.g.iv; 1.A.2.g.v; 1.A.2.g.vi; 1.A.2.g.vii un 1.A.2.g.viii), izmantojot 1.2. vienādojumu;
3. **posms** – saskaitīt rezultātus katram kurināmā veidam 1.A.2.g.i; 1.A.2.g.ii; 1.A.2.g.iii; 1.A.2.g.iv; 1.A.2.g.v; 1.A.2.g.vi; 1.A.2.g.vii un 1.A.2.g.viii (šķidrās kurināmais, cietās kurināmais u. c.), lai iegūtu 1.A.2.g vērtības;

1.5. attēls.

1.A.2 Apstrādes rūpniecības un būvniecības nozares emisiju aprēķina metodika.



4. posms – saskaitīt rezultātus katram kurināmā veidam 1.A.2.a; 1.A.2.b; 1.A.2.c; 1.A.2.d; 1.A.2.e; 1.A.2.f un 1.A.2.g (šķidrāis kurināmais, cietais kurināmais u. c.), lai iegūtu 1.A.2. vērtības.

Aprēķinos izmantoti emisijas faktori atbilstoši *IPCC* vadlīnijām (2006. gada metodoloģija), kā arī dati no valsts enerģijas bilances un (CSP) nozares uzņēmumu pašdeklarētās informācijas. Kurināmā patēriņš sadalīts pa nozarēm, balstoties Centrālās statistikas pārvaldes datos un papildu informācijā no uzņēmumu ziņojumiem. Piemērojot emisijas faktoros dažādiem kurināmā veidiem (piemēram, dīzeļdegvielai, dabasgāzei u. c.), aprēķinātas CO₂, CH₄ un N₂O emisijas.

1.1.3. 1.A.4 Citas nozares emisiju aprēķinu metodika

Citas nozares ietver emisijas no neliela mēroga kurināmā sadedzināšanas komerciālajā/institūciju, dzīvojamā sektorā un lauksaimniecības/mežsaimniecības/zvejniecības nozarēs. Turklāt emisijas no automašīnām, ko izmanto komerciālajā, dzīvojamā, lauksaimniecības un mežsaimniecības sektorā, šeit ir iekļautas kā emisijas no bezceļu automašīnām. Emisijas no autotransporta ražotājiem ir iekļautas attiecīgajās 1.A.4. nozarēs. Saskaņā ar *IPCC* vadlīnijām par šīm emisijām jāziņo tajās nozarēs, kurās tās rodas. SEG emisijas 1.A.4. Citas nozares Latvijā tiek ziņotas šādās apakšnozarēs:

1.A.4.a Komerciālais un sabiedriskais sektors:

1.A.4.a.i Stacionārā sadedzināšana;

1.A.4.a.ii Bezceļu transportlīdzekļi un citas iekārtas;

1.A.4.b Mājsaimniecības:

1.A.4.b.i Stacionārā sadedzināšana;

1.A.4.b.ii Bezceļu transportlīdzekļi un citi mehānismi;

1.A.4.c Lauksaimniecība/mežsaimniecība/zvejsaimniecība:

1.A.4.c.i Stacionārā sadedzināšana;

1.A.4.c.ii Bezceļu transportlīdzekļi un cita tehnika;

1.A.4.c.iii Zvejniecība.

Tiešo SEG (CO₂, CH₄, N₂O) emisiju aprēķināšanai 1. līmeņa (*Tier 1*) emisiju faktori iegūti no *IPCC* vadlīniju sadaļas par stacionāro sadedzināšanu šādiem kurināmā veidiem: citi šķidrie kurināmie, poligona gāze, cita biogāze, biodīzeļdegviela, salmi, kokogles. Apakšnozarē 1.A.4.c.iii Zvejniecība dīzeļdegvielas emisiju aprēķināšanai izmantoti noklusētie emisiju faktori no *IPCC* vadlīniju sadaļas "Mobilā sadedzināšana". Savukārt pārējiem kurināmā veidiem, kas uzskaitīti "Energobilances" [8] statistikas tabulā pēc attiecīgā sektora, piemēroti valsts specifiskie 2. līmeņa (*Tier 2*) emisiju faktori (CO₂, CH₄ un N₂O no *NIR*).

Pieņemumi emisiju aprēķināšanai no apvidus transportlīdzekļiem sektorā 1.A.4 ir saistīti ar divtaktu un četraktu motoru

īpatsvaru. Lai novērtētu CH_4 un N_2O emisijas no apvidus transportlīdzekļiem, benzīna emisijas faktori ņemti no *IPCC* vadlīniju nodaļas "Mobilā sadedzināšana". Tā kā nav pieejama informācija par divtaktu un četraktu motoru īpatsvaru, pieņemts, ka 25 % no patērētā benzīna tiek sadedzināti divtaktu dzinējos, bet 75 % – četraktu dzinējos.

Arī dīzeļdegvielas emisiju faktori apvidus transportlīdzekļiem ņemti no tās pašas vadlīniju nodaļas. Turklāt veikti šādi pieņēmumi attiecībā uz dīzeļdegvielas patēriņu dažādos *CRF* 1.A.4 sektora apakšsektoros:

- 1.A.4.a (komerciālais un sabiedriskais sektors) pieņemts, ka 99 % dīzeļdegvielas tiek izmantoti mobilajai sadedzināšanai (apvidus transportlīdzekļos), bet 1 % – stacionārajai sadedzināšanai;
- 1.A.4.b (mājsaimniecības) pieņemts, ka visa dīzeļdegviela tiek izmantota bezceļu transportlīdzekļos;
- 1.A.4.c (lauksaimniecība, mežsaimniecība, zvejsaimniecība) pieņemts, ka 99 % dīzeļdegvielas tiek izmantota mobilajai sadedzināšanai, bet 1 % – stacionārajai sadedzināšanai 1.A.4.c.i apakšnozarē.

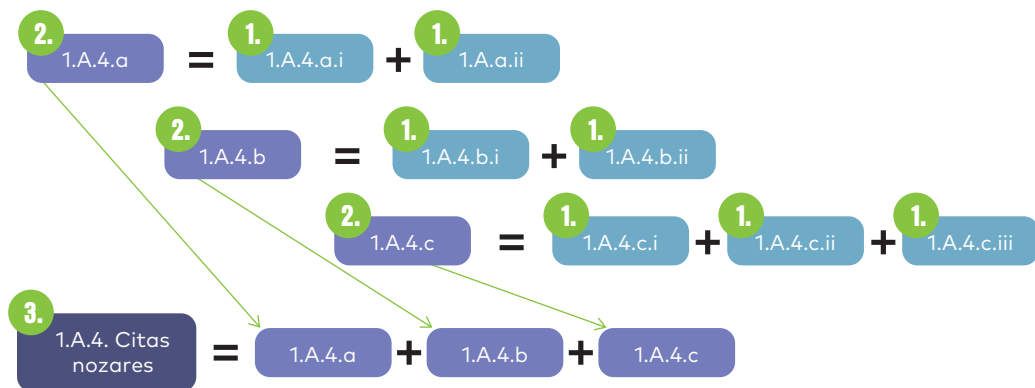
Papildus tam pieņemts, ka dīzeļdegviela, kas patērēta 1.A.4.c.iii apakšnozarē (zvejniecība), tiek izmantota zvejas kuģos. Šajā gadījumā emisiju faktori ņemti no *IPCC* vadlīnijām. Benzīna un dīzeļdegvielas emisiju faktori mobilajā sadedzināšanā, kā arī dīzeļdegvielai zvejniecības sektorā (1.A.4.c.iii), izmantoti no *NIR*.

1.A.4. Citas nozares emisiju aprēķina process ir parādīts 1.6. attēlā:

- 1. posms** – veikt aprēķinu 1.A.4.a.i un 1.A.4.a.ii; 1.A.4.b.i un 1.A.4.b.ii; 1.A.4.c.i, 1.A.4.c.ii un 1.A.4.c.iii apakšsektoriem, izmantojot 1.2. vienādojumu;
- 2. posms** – summēt rezultātus katram degvielas veidam 1.A.4.a.i un 1.A.4.a.ii; 1.A.4.b.i un 1.A.4.b.ii; 1.A.4.c.i, 1.A.4.c.ii un

1.6. attēls.

Aprēķina metodika 1.A.4 Citas nozares.



1.A.4.c.ii (šķidrāis kurināmais, cietais kurināmais u. c.), lai iegūtu vērtības 1.A.4.4 .a, 1.A.4.b un 1.A.4.c;

3. posms – saskaitīt katra kurināmā veida 1.A.4.a, 1.A.4.b un 1.A.4.c (šķidrāis kurināmais, cietais kurināmais u. c.) rezultātus, lai iegūtu 1.A.4.

Atsevišķos gadījumos, piemēram, sektorā 1.A.4 Citas nozares, emisiju aprēķinos iekļauti arī pieņēmumi, lai nodrošinātu pēc iespējas pilnīgāku emisiju uzskaiti un atbilstību metodoloģiskajām prasībām.

1.1.4. Aprēķinu metodika 1.A.5 Citi

1.A.5 apakšsektors “Citi” ietver emisijas, kas rodas no sadedzināšanas procesiem, kas neietilpst citos detalizētajos 1.A apakšsektoros. Šo sektoru uzskata par specifisku, jo tas aptver gan stacionāros, gan mobilos sadedzināšanas avotus ar īpašu lietojumu. Stacionārie avoti var ietvert, piemēram, militārās bāzes, ārkārtas rezerves elektroģeneratorus, kā arī citas ierīces, kuras izmanto sadedzināšanai ārpus tradicionālajām rūpniecības vai mājsaimniecību vajadzībām. Mobilā sadedzināšana šajā kontekstā attiecas uz emisijām, kas rodas no transportlīdzekļiem, kuri nav klasificēti parastajā transporta sektorā, piemēram, militārie transportlīdzekļi vai specializētā tehnika. Lai arī daļa no šī sektora tehnoloģijām attiecas uz transporta jomu, šajā nodaļā tās padziļināti netiks aplūkotas, jo uzsvars ir uz stacionāro sadedzināšanu un tās ietekmi emisiju kontekstā [10].

1.1.5. Aprēķinu metodika 1.B. Kurināmā gaistošās emisijas nozarei

Kurināmā gaistošās emisijas ietver CO₂, CH₄ un NMVOC emisijas no dabasgāzes un vieglā šķidrā kurināmā. Nozare 1.B.2.a Naftas gaistošās emisijas nav iekļautas aprēķinu metodikā, jo tās rada tikai NMVOC emisijas, kas ir netiešās SEG emisijas. Par CO₂ un CH₄ emisijām no dabasgāzes liecina 1.B.2.b Dabasgāzes gaistošās emisijas:

1.B.2.b.i Ventilācija;

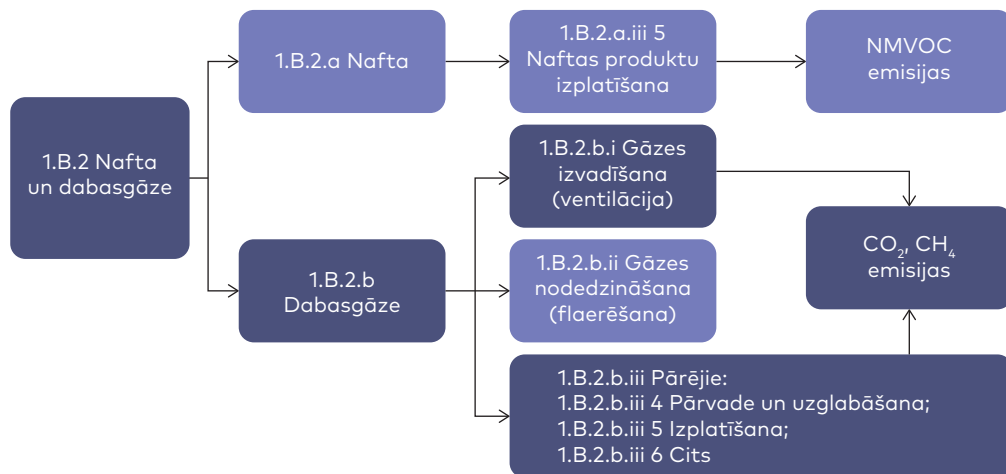
1.B.2.b.iii Visi citi:

1.B.2.b.iii 4 Pārvadāšana un uzglabāšana;

1.B.2.b.iii 5 Sadale;

1.B.2.b.iii 6 Citi (ietver noplūdes dzīvojamo un komerciālo ēku sektorā).

Saskaņā ar Ministru kabineta 2022. gada 25. oktobra noteikumiem Nr. 675 [11] ir noteiktas atbildīgās institūcijas, kas sagatavo SEG inventarizāciju. Šie noteikumi paredz, ka dabasgāzes pārvaldes un uzglabāšanas uzņēmumi ir atbildīgi par 1.B.2.b Dabasgāzes



emisiju aprēķina veikšanu un kvalitātes kontroli. Tādējādi AS “Cone-xus Baltic Grid”, kas nodrošina gāzes pārvades sistēmas un pazemes krātuves “Inčukalns” darbību, un AS “Gaso”, kas veic dabaszgāzes sadali, aprēķina CH₄ un CO₂ emisijas, izmantojot speciāli šīm organizācijām izstrādātu 3. līmeņa (*Tier 3*) metodiku, kas ir starptautiski pārbaudīta un apstiprināta Vides pārraudzības valsts birojā. Pazemes gāzes krātuve “Inčukalns” atbilst arī ISO standartiem, un visas datu ieguves procedūras tiek stingri kontrolētas un pārbaudītas. Detalizēts aprēķinu metodikas apraksts atrodams Latvijas Nacionālā inventarizācijas ziņojuma 1990–2022 pielikumos [7].

1.7. attēls.

Aprēķina metodika 1.B.2.b Kurināmā gais-tošās emisijas no dabaszgāzes.

1.2. Tehnoloģiskie paņēmieni enerģētikas sektora dekarbonizācijai (klimata pārmaiņu mazināšanas tehnoloģiskie risinājumi enerģētikas sektorā)

Globālo klimata mērķu sasniegšana un pāreja uz klimatneitrālu ekonomiku prasa būtiskas pārmaiņas enerģētikas sektorā, kas ir viens no lielākajiem SEG emisiju avotiem [12], [13]. Lai samazinātu emisijas un vienlaikus nodrošinātu energoapgādes drošību, konkurētspēju un pieejamību, ir nepieciešama visaptveroša sektora dekarbonizācija, izmantojot dažādas tehnoloģijas un inovācijas [14], [15].

Šajā apakšnodalā aplūkoti galvenie tehnoloģiskie virzieni, ko uzskata par būtiskiem enerģētikas sektora dekarbonizācijā. Tie ietver gan tradicionālo enerģijas ražošanas procesu efektīvizēšanu, gan pāreju uz atjaunojamiem energoresursiem, enerģijas akumulācijas risinājumiem, kā arī oglekļa uztveršanu un uzglabāšanu.

Katrs no šiem virzieniem ir izvērtēts, balstoties aktuālajos zinātniskajos pētījumos, politikas dokumentos un tehnoloģiju attīstības tendencēs, kā arī atbilstošajās aprēķinu metodikās un emisiju faktoru analizē. Šī pieeja ļauj identificēt ne tikai SEG emisiju samazinājuma potenciālu, bet arī izvērtēt tehnoloģiju piemērotību Latvijas kontekstā [16].

1.3. Atjaunojamo energoresursu tehnoloģijas – vēja tehnoloģijas/enerģija

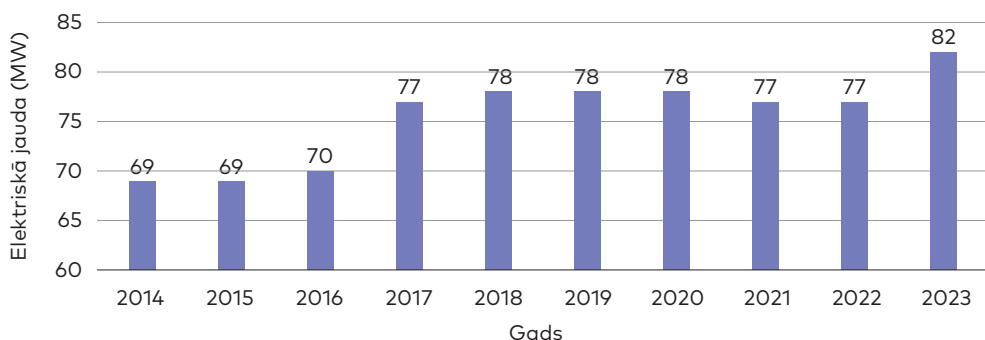
Vēja enerģijas tehnoloģiju attīstība Latvijā cieši saskan ar Nacionālajā enerģētikas un klimata plānā (NEKP) izvirzītajiem mērķiem un pasākumiem. Kā viens no galvenajiem atjaunojamo energoresursu virzieniem vēja enerģija tiek uzskatīta par būtisku instrumentu SEG emisiju samazināšanai un enerģētiskās neatkarības stiprināšanai. NEKP ietvaros paredzēta gan sauszemes vēja elektrostaciju (VES), gan atkrastes vēja parku attīstība, tostarp Latvijas un Igaunijas kopprojekta *ELWIND* īstenošana un jaunu parku attīstība atbilstoši Jūras plānojumam 2030. Kopumā plānots uzstādīt papildu 800 MW jaudas atkrastes zonā un vismaz 1 GW jaudas sauszemē, tādējādi būtiski palielinot vēja enerģijas īpatsvaru nacionālajā elektroenerģijas bilanci.

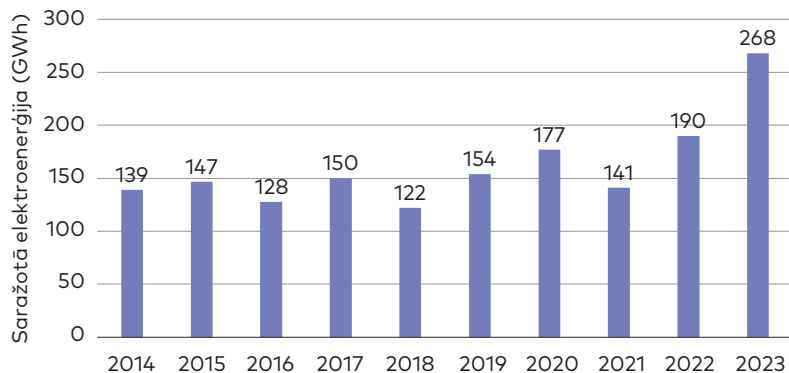
Saskaņā ar CSP datiem Latvijā 2023. gadā bija uzstādītas vēja elektrostacijas ar jaudu 82 MW, kas saražoja 268 GWh elektroenerģijas (sk. 1.8. att.) [17]. Skatot uzstādīto vēja elektrostaciju jaudu un saražoto elektroenerģijas daudzumu Latvijā pēdējo 10 gadu laikā, redzams, ka neliels jaudu pieaugums pieredzēts 2017. gadā un tad tikai 2023. gadā.

Savukārt saražotais elektroenerģijas daudzums no vēja elektrostacijām pa gadiem bijis mainīgs, kas visticamāk saistāms ar mainīgiem laikapstākļiem. Straujāks saražotās elektroenerģijas daudzuma

1.8. attēls.

Latvijas vēja elektrostaciju uzstādītā elektriskā jauda (MW) [17].





1.9. attēls.

Latvijā esošo vēja elektrostaciju saražotais elektroenerģijas daudzums (GWh) [17].

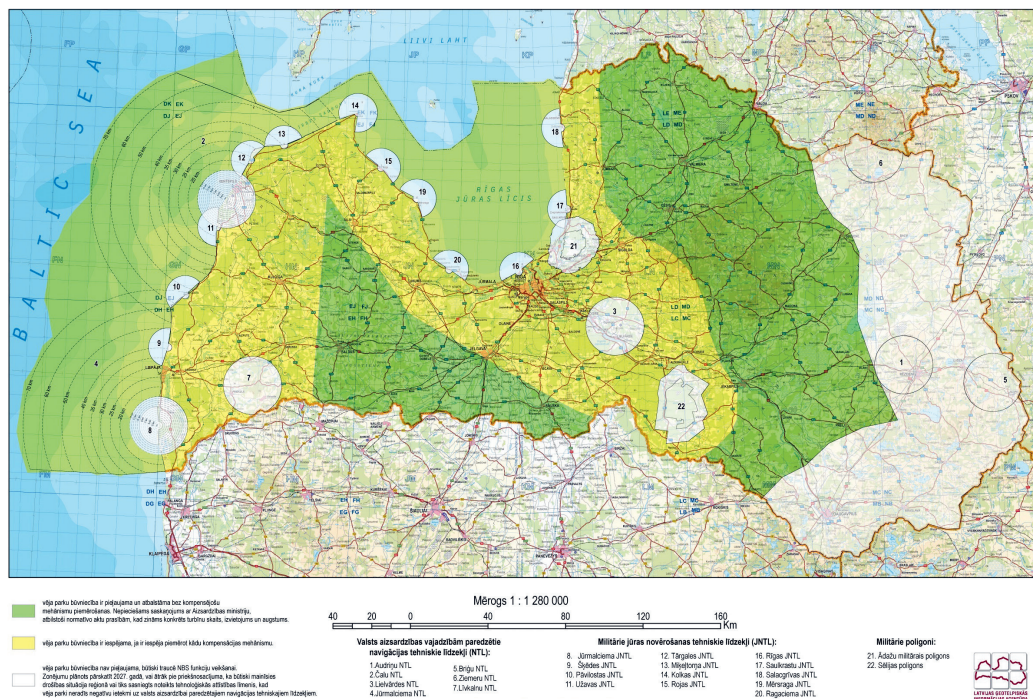
pieaugums redzams 2022. gadā (190 GWh) un 2023. gadā jau 268 GWh (sk. 1.9. att.) [17].

Uzstādīto vēja elektrostaciju jaudas un līdz ar to saražotās elektroenerģijas daudzums pēdējos divos gados saistāms ar 2022. gada nogalē darbu uzsākušo Tārgales vēja parku [18]. 2023. gadā darbu uzsāka Ventspils *Wind* vēja parks, kas ir pirmais meža teritorijā izvietotais vēja parks [19].

Saskaņā ar biedrības “Zaļā brīvība” veikto izpēti 2023. gadā bijis rekordaugsts pieteikumu skaits ietekmes uz vidi novērtējuma veikšanai vēja elektrostaciju izbūvei, tādējādi līdz 2023. gada nogalei

1.10. attēls.

Aizsardzības ministrijas izveidotā vēja parku karte [21].



Latvijā bija aptuveni 40 iesāktu vai jau pabeigtu ietekmes uz vidi novērtējumu šādu staciju izveidei [19].

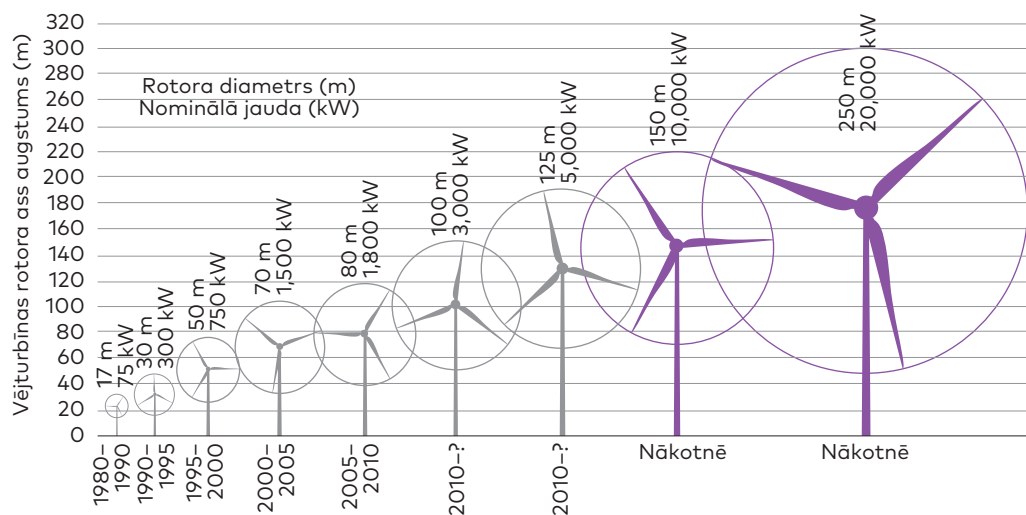
Par valsts pārvaldes iestāžu pēdējo gadu aktīvu iesaisti vēja elektrostaciju izveides atbalsta veicināšanā liecina virkne pasākumu: 2022. gadā Ekonomikas ministrijas sagatavotais informatīvais ziņojums par sauszemes vēja parku turpmāko attīstību valstī, lai identificētu esošos šķēršļus un tos mazinātu [20]; Aizsardzības ministrijas 2024. gadā izveidotais informatīvais ziņojums "Par vēja parku attīstību Latvijā un aizsardzības nozares operacionālajām vajadzībām" ar tam pievienotu vēja parku karti (sk. 1.10. att.) [21]. Šajā kartē noteiktas zonas, kurās līdz 2027. gadam nav pieļaujama vēja elektrostaciju celtniecība, jo tas varētu radīt tiešu apdraudējumu valsts aizsardzības spējām [21].

No esošās situācijas izpētes un iepriekšminētā redzams, ka jau pēdējos desmit gados ir bijusi investoru interese par vēja elektrostaciju izbūvi Latvijas teritorijā, kā arī pēdējos divus gadus redzama aktīva atbildīgo iestāžu iesaiste birokrātisko šķēršļu mazināšanai un normatīvo aktu sakārtošanai [20]. Līdz ar to ir saskatāmas pozitīvas iezīmes NEKP nospraustā mērķa īstenošanā, vienlaikus no institucionālās kapacitātes un infrastruktūras ir atkarīgs, vai būs iespējams sasniegt plānoto uzstādīto jaudu palielinājumu līdz 800 MW atkrastes zonā un 1 GW uz sauszemes, kas ir vairāk nekā divdesmitkārtīgs pieaugums, salīdzinot ar 2023.gada datiem [17].

Palielinot atjaunojamās elektroenerģijas īpatsvaru, attiecīgi samazinātos SEG emisijas no importēto fosilo energoresursu lietojuma enerģijas ieguvei, t. i., dabasgāzes un ogļēm. CSP dati liecina, ka 2022. gadā Latvijā bija 35 koģenerācijas stacijas ar uzstādīto elektrisko jaudu 1087 (MW), kuras kā kurināmo izmanto dabasgāzi [22]. Statistikas dati par koģenerācijas stacijās patērēto kurināmo siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošanai liecina, ka no fosilajiem resursiem galvenokārt izmantota dabasgāze (13 390 TJ), dīzeļdegviela (743 TJ) un sašķidrinātā naftas gāze (10 TJ) [22].

Saskaņā ar AS "Augstsprieguma tīkls" apkopoto informāciju par Latvijā saražotās un patērētās elektroenerģijas bilanci 2023. gadā redzams jau iepriekšminētais vēja elektrostacijās saražotās elektroenerģijas pieaugums par 42 % (salīdzinot ar 2022. gada datiem) [23]. Vienlaikus 2023. gadā redzams arī ar dabasgāzi saražotās elektroenerģijas pieaugums par 17 % (1 362 676 MWh), salīdzinot ar 2022. gadu [23].

Savukārt, skatoties uz Latvijā saražotās elektroenerģijas bilances kopainu, redzams, ka dabasgāze, lai gan nedominē, ir otrs izplatītākais elektroenerģijas avots aiz hidroelektrostacijām [23]. Salīdzinot elektroenerģijas avotu procentuālo īpatsvaru energobilancē, dabasgāze veido 22 % no kopējā saražotā elektroenerģijas daudzuma, kamēr vēja elektrostacijās saražotā – tikai 4 % [23]. Atsaucoties uz iepriekš minēto, SEG emisiju ietaupījumu būtu



iespējams rast, samazinot no dabasgāzes iegūtās elektroenerģijas daudzumu, kas, kā jau minēts, šobrīd veido 22 % no kopējās elektroenerģijas bilances [23]. Vēja elektrostaciju uzstādīto jaudu palielināšana varētu sniegt nozīmīgu ieguldījumu no atjaunojamo resursu saražotās elektroenerģijas īpatsvara palielinājumam Latvijas elektroenerģijas bilancē un attiecīgi arī samazināt emisijas, kas rodas no fosilo resursu izmantošanas elektroenerģijas ražošanai. Tādējādi vēja elektrostaciju attīstībai ir daudzpusīga nozīme emisiju samazināšanā – ne tikai elektroenerģijas ražošanā, bet arī citos sektoros, kas patērē šo enerģiju. Palielinoties atjaunojamās elektroenerģijas pieejamībai, iespējams veicināt arī transporta elektrifikāciju un mazināt fosilo degvielu patēriņu citās nozarēs, piemēram, apstrādes rūpniecībā, būvniecībā un mājāsaimniecībās. Tas savukārt nozīmē potenciālu emisiju samazinājumu emisiju kategorijās 1.A.1 Enerģētikas nozares, 1.A.2 Apstrādes rūpniecība un būvniecība, 1.A.4 Citas nozares.

Vēja turbīnu tehniskie parametri ir dažādi (turbīnu augstums, rotora diametrs, tehnoloģiju attīstības līmenis), kā arī to saražotais elektroenerģijas daudzums ir atkarīgs no lokācijas, gaisa blīvuma, vēja ātruma (sk. 1.11. att.).

Ja par piemēru ņem 2022. gadā darbu uzsākušo Tārgales vēja parku, kuram saskaņā ar *Utilitas* mājaslapā pausto informāciju uzstādītā jauda ir 58,8 MW un plānotais saražotās elektroenerģijas daudzums gadā ir 155 GWh [18], tad var pieņemt, ka viens MW uzstādītās jaudas saražo aptuveni 2636 MWh elektroenerģijas gadā. Tas atbilst aptuveni 30 % no maksimāli iespējamās jaudas, ko varētu saražot ideālā gadījumā, ja vēja turbīnas darbotos ar pilnu jaudu visu gadu (8760 stundas gadā). Atkrastes vēja parku efektivitāte var būt arī augstāka (lielāka turbīnu augstuma un rotoru diametra

1.11. attēls.

Tipisku komerciālo vēja turbīnu izmēra pieaugums (pagātne, nākotnes prognozes) [24].

dē]). Saražotās elektroenerģijas daudzums vēja elektrostacijās atkarīgs arī no vēja ātruma un gaisa blīvuma, kas nav ņemts vērā šajā aprēķinā.

Starptautiskās atjaunojamās enerģijas aģentūras (*IRENA*) apkopotie dati liecina, ka pasaulē laika posmā no 2013. gada līdz 2022. gadam saules enerģijā (46 %) un sauszemes vēja elektroenerģijā (32 %) ir veiktas lielākās investīcijas no visiem atjaunojamiem energoresursiem [25]. Laika gaitā pieaugušas un turpina pieaugt investīcijas atkrastes vēja enerģijā. Saskaņā ar *IRENA* publicētajiem datiem uz sauszemes izbūvēto vēja elektrostaciju izlīdzinātajām elektroenerģijas izmaksām (*LCOE*) ES kopumā ir tendence samazināties [25], zemāko cenu 2022. gadā sasniedzot Spānijā (0,0329 USD/kWh), Zviedrijā (0,0372 USD/kWh) un Itālijā (0,0419 USD/kWh) [25]. Par Baltijas valstīm šādi dati gan nav pieejami.

Kopīgā pētniecības centra (*Joint Research Centre*), "Tīrās enerģijas tehnoloģiju observatorija – Vēja enerģija Eiropas Savienībā: Tehnoloģiju attīstības stāvoklis, tendences, vērtību ķēdes un tirgi: 2022. gads" tehniskajā ziņojumā "*Wind Energy in the European Union*" (2022) [26] pausta informācija, ka sauszemes vēja enerģijas izlīdzinātās elektroenerģijas izmaksas (*LCOE*) samazināsies no 40 EUR par MWh 2019. gadā līdz 26 EUR par MWh 2030. gadā un līdz pat 19 EUR par MWh 2050. gadā. 2021. gadā sauszemes vēja enerģijas *LCOE* ES valstīs tika lēstas no 36 EUR/MWh līdz 51 EUR/MWh atkarībā, piemēram, no atrašanās vietas un finansēšanas nosacījumiem [26]. *CAPEX* sauszemes vēja enerģijas projektiem noteiktajos Eiropas tirgos svārstās no 1060 EUR/kW līdz 1425 EUR/kW [26]. Saskaņā ar pašreizējām prognozēm sauszemes vēja enerģijas *CAPEX* līdz 2030. gadam un 2050. gadam samazinās attiecīgi par 8 % un 18 % [26]. Šajā laikposmā vēl lielāks samazinājums gaidāms *OPEX*, kas pašlaik ir aptuveni 18 EUR/MWh līdz 36 EUR/MWh, līdz 2030. gadam samazinoties par 14 %, bet ilgtermiņā (2050. gadā) – līdz pat 30 % [26]. Lai gan pēdējos gados vērojams sauszemes vēja enerģijas projektu finansējuma izmaksu (vidējās svērtās kapitāla izmaksas (*WACC*)) samazinājums, šis rādītājs ES valstīs ievērojami atšķiras [26]. Kamēr daudzās ES centrālajās valstīs *WACC* ir zemas (1,3–4,3 %), mazāk attīstītajos tirgos, piemēram, Grieķijā, Rumānijā un Baltijas valstīs, *WACC* svārstās no aptuveni 7 % līdz 10 % [26]. Šo atšķirību daļēji var skaidrot ar atšķirīgajām procentu likmēm un riskiem, ar ko attiecīgajās valstīs saskaras investori [26].

Savukārt atkrastes vēja parkiem (vēja ģeneratoriem ar stiprinājumu jūras gultnē) *LCOE* strauji samazinās un atrodas robežās no 61 EUR/MWh līdz 96 EUR/MWh [26]. Īpaši kopš 2014. gada vērojama vēja ģeneratoru augstuma un rotoru diametra, kā arī pašu projektu apjomīguma pieaugums, tādējādi veidojot vienības izmaksu samazināšanos (apjoma radīti ietaupījumi) [26]. Saskaņā ar pašreizējām prognozēm par turpmākajām izmaksām, kas saistītas ar jūras

gultnē nostiprinātiem atkrastes vēja ģeneratoriem, līdz 2050. gadam varētu sagaidīt *LCOE* līmeni robežās no 30 EUR/MWh līdz 60 EUR/MWh [26]. Tādējādi atkrastes vēja parku izmaksas varētu pat sasniegt līdzīgu investīciju apjomu kā sauszemes iekārtas [26].

Līdzīgi kā citām kapitālietilpīgām atjaunojamo energoresursu tehnoloģijām, finansējuma izmaksas (*WACC*) būtiski ietekmē *LCOE* [26]. *WACC* galvenokārt ietekmē valstu riski un procentu likmes [26]. Lai gan nav daudz datu par jūras vēja *WACC*, nesen veiktā pētījumā konstatēts, ka jūras vēja enerģijas *WACC* parasti ir lielākas (no 3,5 % līdz 9 %) nekā sauszemes vēja enerģijas *WACC*, jo šī tehnoloģija ir agrīnā attīstības posmā, tādējādi tai ir augstāks riska profils [26]. *WACC* varētu samazināt (un panākt konvergenci starp valstīm), koncentrējoties uz vēja enerģijas projektu parādu finansēšanas riska mazināšanu, izmantojot politiku, kas īsteno atbalsta shēmas, lai samazinātu projektu naudas plūsmas svārstīgumu [26]. Līdz *Covid-19* pandēmijas sākumam *CAPEX* jūras vēja enerģijas projektiem samazinājās, bet 2021. gada beigās galvenajos jūras vēja enerģijas tirgos *CAPEX* pieauga vidēji par aptuveni 29 % [26]. Atkarībā no turbīnu nominālās jaudas, vietas dziļuma, izmantotās pamatu stiprināšanas tehnoloģijas un projekta lieluma *CAPEX* aplēses Eiropas iedibinātajos tirgos svārstās no 2,90 EUR/MW līdz 3,75 EUR/MW [26].

Vienkāršojot aptuvenās vēja elektroenerģijas parka izbūves izmaksas var pieņemt uz 1 MW uzstādītās vēja jaudas. Zināms, ka 2022. gadā darbu uzsākušais Tārgales vēja parks izmaksājis 70 miljonus EUR un ir uzstādīti 58,8 MW vēja elektrostacijas jaudas. Tas nozīmē, ka 1 MW vēja elektrostacijas uzstādīšana uz sauszemes izmaksā aptuveni 1,19 miljonus EUR. Līdz ar to var pieņemt, ka plānotā 1 GW uzstādīšana uz sauszemes varētu izmaksāt aptuveni 1190 miljonus EUR, lai gan, ņemot vērā straujo tehnoloģiju attīstību un cenu samazināšanos, nākotnē izmaksas varētu būt arī zemākas.

Vēja enerģijas tehnoloģiju ieviešana būtiski sekmē SEG emisiju samazināšanu, aizstājot elektroenerģijas ražošanu no fosilajiem energoresursiem. Šo tehnoloģiju labvēlīgo ietekmi uz vidi var pamatot ar SEG emisiju samazinājumu, salīdzinot enerģijas avota emisijas faktorus – jo mazāks emisijas faktors, jo mazāka ietekme uz vidi – Fosilo energoresursu emisijas faktori ir skaitliski lielāki: dabasgāzei 0,240 t CO_{2ekv.}/MWh, dīzeļdegvielai – 0,306 t CO_{2ekv.}/MWh un oglēm – 0,370 t CO_{2ekv.}/MWh [27]. Savukārt vēja elektrostacijās saražotajai elektroenerģijai emisijas faktors ir 0,010 t CO_{2ekv.}/MWh (dzīves cikla emisijas), kas ir ievērojami mazāks un dod krietni lielāku emisiju samazinājumu [27]. Vienlaikus jāuzsver, ka vēja elektrostacijas to darbināšanas laikā nerada SEG emisijas.

Ietekmes uz vidi kontekstā, vislielākais ieguvums, ražojot elektroenerģiju ar vēja turbīnām, ir fosilās izcelsmes enerģijas avotu

aizstāšana ar enerģiju no atjaunojamiem energoresursiem. Īstermiņā tas nozīmē, ka vēja elektroenerģija veido konkurenci un izspiež no tirgus iekārtas, kas elektroenerģijas ražošanai izmanto fosilos resursus [24]. Savukārt ilgtermiņā, ja ir iespēja uzstādīt elektroenerģijas ražošanas iekārtas, kas izmanto atjaunojamus energoresursus, tad iekārtas, kas darbināmas ar fosilajiem energoresursiem vairs netiek uzstādītas un attiecīgi arī izmantotas [24]. Ja tiek vērtēts vēja turbīnu ražošanas un uzstādīšanas dzīves cikls, tostarp šajos procesos izmantotā enerģija, ietekme uz vidi saglabājas neliela [24].

Vērtējot sauszemes un atkrastes vēja parku ietekmi uz ekoloģiju, pētījumi liecina, ka katra vēja parka ietekme ir jāvērtē atsevišķi. Visvairāk vēja elektrostacijas tiek kritizētas saistībā ar apdraudējumu putniem un sīkspārņiem, kas uzstādītajos vēja ģeneratoros mēdz ietriekties un iet bojā, kā arī novērojamo biotopu un ekosistēmu pārveidošanās procesu [24]. Tomēr ietekmes veids un apjoms ir atkarīgs no konkrētās vietas, kas pirms vēja parku izbūves tiek izvērtēta ietekmes uz vidi novērtējuma procedūrā [24]. Atkrastes vēja parku gadījumā jāvērtē ietekme uz grunti un uz grunts dzīvojošajiem organismiem, zivju krājumiem, putnu migrācijas ceļiem un jūras dzīvi kopumā [24].

Atkrastes vēja enerģijas ietekme uz jūras organismiem vēl ir salīdzinoši maz pētīta, jo vēja ģeneratoru izvietošana jūrā vēl nav tik plaši izplatīta [24]. Atkrastes vēja parku ietekmes varētu būt atšķirīgas to uzstādīšanas, ekspluatācijas un ekspluatācijas pārtraukšanas posmos [24]. Tāpat kā sauszemes vēja parkiem, radītā ietekme ir ļoti atkarīga no konkrētās vietas apstākļiem un var būt gan negatīva, gan pozitīva. Iespējamā negatīvā ietekme ietver zemūdens skaņas un vibrācijas, elektromagnētiskos viļņus, fiziskus traucējumus un iespējamo invazīvo sugu izplatīšanos [24]. Vienlaikus vēja ģeneratoru struktūras var radīt arī jaunas vairošanās vietas vai patvērumus, kā arī darboties kā mākslīgi rifi vai zivju pulcēšanās vietas [24].

Saistībā ar vēja ģeneratoru uzstādīšanu uz sauszemes bieži tiek pieminēts sadursmēs bojā gājušo putnu un sīkspārņu skaits, kas var radīt sekas populācijas līmenī, bet plašāks izvērtējums liecina, ka cilvēka darbību rezultātā bojāgājušo īpatņu skaits ir pat lielāks [24]. Līdz ar to nav iemesla domāt, ka lielāks uzstādīto vēja parku skaits varētu nozīmīgi ietekmēt putnu un sīkspārņu populācijas samazināšanos [24]. Jāuzsver, ka pirms jaunu vēja parku izbūves katrā gadījumā ir veicams rūpīgs ietekmes uz vidi novērtējums, izvērtējot visus aspektus [24].

Vēja parku izbūve atstāj redzamu un praktisku ietekmi uz vietējo ainavu un kopienām. Vēja turbīnas ir apjomīgas konstrukcijas, ko papildina elektropārvades infrastruktūra, tāpēc tās ir viegli pamanāmas. Turbīnas darbības laikā rodas troksnis un mirgošanas efekts, kas var radīt diskomfortu, ietekmēt tūrismu, saimniecisko darbību un samazināt nekustamo īpašumu vērtību tuvumā [24], [28].

Pētījumi rāda, ka var būt nozīmīga ietekme uz īpašumu cenām. Grieķijā, Evijas salā, vēja turbīnas samazināja īpašumu vērtību līdz pat 14,4 % 2 km rādiusā, bet mazapdzīvotajā Kefalonijā šāda ietekme netika novērota [28]. Nīderlandes pētījumā konstatēts līdzīgs efekts – vidēji 1,8 % cenu kritums 2 km rādiusā, novērojot spēcīgāku ietekmi no turbīnām virs 150 m augstuma. Šie rezultāti uzsver pareizas izvietojšanas nozīmi – mazāk apdzīvotās teritorijās ietekme uz iedzīvotājiem ir mazāka [29].

Vēja parku attīstība ietekmē arī zemes izmantošanu – tiek veidoti pievedceļi, apakšstacijas, komunikācijas un aizsargjoslas. Šīs pārmaiņas var samazināt lauksaimniecībā un mežsaimniecībā izmantotajās platības. Tiek lēsts, ka zemes pieprasījums vēja parkiem Eiropā svārstās no 21 322 m² līdz 161 290 m² uz vienu MW jaudas. Šī iemesla dēļ rūpīgs teritoriālais plānojums ir būtisks, lai mazinātu ietekmi uz bioloģisko daudzveidību un nodrošinātu sabiedrības atbalstu [30].

1.3.1. Atjaunojamo energoresursu tehnoloģijas – biometāns

Pēdējos gados energoefektivitāte un atjaunojamo energoresursu izmantošana kļuvušas par būtiskiem stratēģiskiem virzieniem ES. Reaģējot uz pieaugošo nepieciešamību pēc ilgtspējīgas un neatkarīgas enerģijas apgādes, Eiropas Komisija izstrādājusi iniciatīvu *RePowerEU*, kuras mērķis ir paātrināt atjaunojamo enerģijas avotu ieviešanu visā ES un nodrošināt klimatneitralitāti līdz 2050. gadam [31].

Šī iniciatīva būtiski ietekmē arī biogāzes sektoru, jo paredz ES emisiju kvotu tirdzniecības sistēmas paplašināšanu, minimālās oglekļa cenas ieviešanu un bezmaksas kvotu skaita samazināšanu. Šīs pārmaiņas var samazināt līdzšinējos šķēršļus biogāzes efektīvai izmantošanai un veicināt tās turpmāko attīstību [32].

Biogāze, ko iegūst anaerobās fermentācijas ceļā, pārstrādājot organiskos atkritumus un biomasu, ir atjaunojams un ilgtspējīgs enerģijas avots. Tomēr, lai to varētu izmantot kā dabasgāzes aizstājēju vai kā transporta degvielu, tā jāuzlabo, pārveidojot par biometānu. Šis process ietver oglekļa dioksīda atdalīšanu un gāzes enerģētiskā satura paaugstināšanu, nodrošinot atbilstību kvalitātes prasībām degvielas lietojumos vai ievadīšanai gāzes tīklā.

Biogāzes ražošana ir būtisks process dažādu atkritumu apsaimniekošanā, kas spēlē nozīmīgu lomu lauksaimniecības ilgtspējā. Mūsdienu saimniecības saskaras ar ievērojamiem izaicinājumiem, nodrošinot savu darbību bez biogāzes staciju izmantošanas. Šo staciju neesamība var radīt būtiskas negatīvas sekas vietējai sabiedrībai, tostarp problēmas, kas saistītas ar nepatīkamām

smakām un vietējās ekosistēmas traucējumiem. Biogāzes ražošana ir viens no tehnoloģiskajiem risinājumiem lauksaimniecībā, kas ļauj ne tikai efektīvi pārstrādāt atkritumus, bet arī radīt siltumenerģiju un elektrību. Turklāt biogāzes ražošanas blakusprodukts – digestāts – kalpo kā augstvērtīgs augsnes mēslojums, kas ir ilgtspējīgāka alternatīva fosilajiem mēslošanas līdzekļiem. Biogāzes ražošana ir būtisks elements aprites ekonomikā. Plūsmas, kas agrāk tika uzskatītas par atkritumiem no rūpniecības, ūdenssaimniecības un lauksaimniecības procesiem, var novirzīt uz biogāzes pārstrādes iekārtām, kur tās tiek pārveidotas par atjaunojamu enerģiju, barības vielām bagātu organisko mēslojumu un jaunām minerālvielām. Aprites ekonomikas ieviešana, kas balstīta resursu atgūšanā, būs galvenais priekšnosacījums ES virzībai uz oglekļa neitralitāti nākotnē. [33]

Latvijai ir potenciāls ar biometānu aizstāt aptuveni 15 % no šobrīd patērētās dabasgāzes [34]. Šobrīd valstī biogāzes ražošana, kuras pamatā ir anaerobā fermentācija, jau atbilst ilgtspējīgas biogāzes ražošanas potenciālam. Lai gan iespējas piegādāt biometānu transporta nozarei ir ierobežotas, dažas no šīm iespējām nodrošina esošais saspīestās dabasgāzes (CNG) uzpildes staciju tīkls [34]. Būtu nepieciešamas atbalsta programmas lopkopības, gaļas un piena rūpniecībai, lai samazinātu tās oglekļa dioksīda emisijas un kopējās lauksaimniecības radītās SEG emisijas. Augsti attīstīts dabasgāzes tīkls ir Latvijas priekšrocība. Šis tīkls ļauj efektīvi integrēt biometānu tīklā ar nosacījumu, ka daudzas nelielas anaerobo fermentāciju ražotnes ir koncentrētas ap vienu biometāna attīrīšanas iekārtu. Biogāzes koģenerācijas elektrostacijas var pārveidot biometāna ražošanai gan kā atsevišķus pārstrādes punktus, gan staciju grupas ar centralizētām pārstrādes iekārtām, kas atrodas tuvu dabasgāzes cauruļvadiem vai rūpnieciskās izmantošanas vietām. Ņemot vērā izejvielu īpašības, biometāna ražošanas savienošana ar rūpniecisko



1.12. attēls.
Biometāna ražošanas infrastruktūra [35].

notekūdeņu attīrīšanas iekārtām var radīt sinerģiju. Sinerģiju varētu panākt, izveidojot īsas piegādes ķēdes, kas ietver biogēno oglekļa dioksīdu un biometāna izmantošanu smagajā transportā vai rūpniecībā. Turklāt digestāta kā reģionāla barības vielu avota izmantošana var uzlabot biometāna ražošanas ilgtspēju [34].

Eiropā biometānu ražojošo iekārtu skaits pēdējos gados ir nepārtraukti pieaudzis. Līdz 2023. gada aprīlim Eiropā darbojās 1322 biometāna ražošanas iekārtas, kas ir par aptuveni 30 % vairāk nekā 2021. gadā, kad to bija 1023. Saskaņā ar Eiropas Biogāzes asociācijas izveidoto biometāna ražotņu karti 2024. gadam Latvijā šobrīd darbojas četras biometāna ražotnes [35]. Šī dinamika norāda uz pieaugošu interesi un investīcijām biometāna sektorā visā ES, kas saskan ar *RePowerEU* iniciatīvas mērķiem paplašināt ilgtspējīgas enerģijas avotu izmantošanu.

Lai paplašinātu biogāzes izmantošanas iespējas, tā ir jāattīra, kas ir būtisks solis biogāzes kvalitātes uzlabošanā. Sākotnējā posmā biogāzi žāvē, no tās atdalot ūdens tvaikus. Pēc tam seko biogāzes attīrīšana, kuras laikā tiek noņemti sērūdeņradis un citi nevēlami piemaisījumi. Biogāzes uzlabošana palielina tās enerģētisko vērtību, kā to parāda samazinātais sadegšanas siltums. Pastāv divas galvenās biogāzes uzlabošanas tehnoloģijas: fizikāli ķīmiskās un bioloģiskās metodes. Šīs tehnoloģijas nodrošina dažādus veidus, kā efektīvi attīrīt un uzlabot biogāzi, padarot to piemērotu plašākam lietojumam un paaugstinot tās enerģētisko potenciālu [36], [37].

Biometāns ir augstas kvalitātes metāns, kas iegūts, attīrot biogāzi. Tā metāna sastāvs ir vismaz 95 % un pēc uzlabošanas to iespējams izmantot kā dabasgāzes aizstājēju. Metāna saturs neapstrādātā biogāzē parasti ir 50–70 %, savukārt oglekļa dioksīda saturs ir 30–50 % [38], [39]. Biogāzi, kas ir uzlabota, lai tajā būtu līdz pat 95 % metāna, var tieši ievadīt dabasgāzes sistēmā [39], [40].

Fizikālā absorbcija ir viena no visbiežāk izmantotajām biogāzes attīrīšanas metodēm. Tās pamatā ir atšķirīgā gāzu šķīdība ūdenī vai citos šķīdinātājos. Šīs tehnoloģijas ietvaros biogāzi ievada skruberī, kur ūdens vai cits šķīdinātājs izšķīdina CO₂, kamēr metāns, kas ir mazāk šķīstošs, tiek novadīts tālāk [36]. Lai gan šī metode ir vienkārša un salīdzinoši lēta, tās trūkums ir augstais ūdens patēriņš, kas var radīt papildu ekspluatācijas izmaksas, un pēc absorbcijas procesa nepieciešamā ūdens attīrīšana [41].

Ķīmiskā absorbcija piedāvā augstāku selektivitāti salīdzinājumā ar fizikālo metodi, ļaujot iegūt augstākas tīrības pakāpes metānu, izmantojot amīnu vai citus sārmu šķīdumus, lai saistītu CO₂ un H₂S. Lai gan šī metode ir efektīvāka un prasa mazāku šķīdinātāju daudzumu, tai ir arī trūkumi, piemēram, nepieciešamība pēc augstākas temperatūras šķīdinātāju attīrīšanai [41] un augstākas izmaksas, jo izmantotie šķīdinātāji ir dārgāki un bieži vien toksiski [36].

Adsorbcijas pamatā ir gāzu adsorbcija uz cietiem materiāliem ar lielu virsmas laukumu, piemēram, aktivētās ogles vai zeolīta. Šī metode ir energoefektīva un droša, taču ir nepieciešama biogāzes priekšattīrīšana no ūdens un sērūdeņraža, lai izvairītos no neatgriezeniskas adsorbcijas. Metāna zudumi, izmantojot šo metodi, ir līdz pat 4 % [36], [42].

Membrānu atdalīšana ir viena no izplatītākajām biogāzes uzlabošanas metodēm ES [43], izmantojot daļēji caurlaidīgas membrānas, kas atdala vielas atkarībā no to caurlaidības īpašībām. Šīs tehnoloģijas ir vienkāršas un kompakti uzstādāmas, tām ir zemas ekspluatācijas izmaksas, taču augstas investīciju izmaksas, un biogāze pirms apstrādes jāattīra no ūdens un H_2S [37].

Kriogēnās atdalīšanas pamatā ir biogāzes komponentu sašķidrināšana vai sacietēšana zemā temperatūrā vai augstā spiedienā. Šī metode nodrošina ļoti augstu biometāna tīrību un CO_2 atgūšanu ar augstu tīrības pakāpi, tomēr tai ir nepieciešamas lielas investīcijas un darbības izmaksas, kā arī biogāzes priekšattīrīšana [42].

Bioloģiskās metodes piedāvā ilgtspējīgu pieeju biogāzes uzlabošanai, izmantojot mikroorganismus, kas spēj pārvērst CO_2 un pievienoto H_2 , kas iegūts no atjaunojamiem energoresursiem, biometānā. Šobrīd pārsvarā vēl tikai pētniecības procesā ir pieejamas vairākas biogāzes bioloģiskās uzlabošanas tehnoloģijas, kuras var iedalīt *in situ*, *ex situ* un hibrīdajās tehnoloģijās [36], [44]. *In situ* tehnoloģijās biogāzes ražošana un uzlabošana notiek vienā reaktorā, savukārt *ex situ* atsevišķu aprīkojumu uzstāda jau esošām biogāzes ražotnēm. Hibrīdas tehnoloģijas apvieno abu pieeju priekšrocības. Bioloģiskās metodes var būt ekonomiski izdevīgas un videi draudzīgas, īpaši, ja uzlabošanas procesam nepieciešamais ūdeņradis tiek iegūts no atjaunojamiem energoresursiem.

Ex situ tehnoloģiju priekšrocība ir tā, ka biogāzes uzlabošanas iekārtas ir iespējams integrēt jau esošajās biogāzes ražotnēs. Šādā *ex situ* reaktorā ir iespējams arī pievienot ieejošās gāzes plūsmai papildu CO_2 , kas iegūts un atdalīts citos rūpnieciskos procesos [37]. Turklāt šajos reaktoros var pielāgot dažādas darbības stratēģijas, piemēram, uzstādot H_2 difūzeri, kas ievērojami palielina gāzes un šķidruma masas pārnese efektivitāti, vai piepildot reaktorus ar īpašiem filtrmateriāliem, kas imobilizē mikroorganismus un nodrošina tiešu bioloģiskā katalizatora saskari ar gāzi [45]. *Ex situ* reaktoriem raksturīga lielāka efektivitāte un stabilitāte, lai gan ir nepieciešams ilgāks laiks, lai mikroorganismi pielāgotos un nostabilizētos [37], [45].

Svarīgākais bioloģisko biogāzes uzlabošanas tehnoloģiju ieguvums ir tas, ka CO_2 netiek vienkārši atdalīts vai absorbēts, bet gan pārvērsts enerģiju saturošos vai augstas pievienotās vērtības produktos, veicinot ilgtspējīgu un bioloģisko aprites ekonomiku. Tas ir

īpaši efektīvi, ja biogāzes uzlabošanas procesā izmantotais ūdeņradis ir iegūts no atjaunojamiem energoresursiem.

Tradicionālais biogāzes attīrīšanas process ietver fizikāli ķīmisko paņēmieni izmantošanu, kas var būt gan energoietilpīgi, gan dārgi, tāpēc jaunu biotehnoloģiju metožu ieviešana sola ievērojami samazināt gan enerģijas patēriņu, gan izdevumus, kas saistīti ar biogāzes attīrīšanu [46]. Biometanizācija (bioloģiskā metāna uzlabošana) ir ļoti daudzsoļīga biogāzes kvalitātes uzlabošanas metode. Tā ietver mikroorganismu izmantošanu ūdeņraža un oglekļa dioksīda pārvēršanai metānā [47]. Šī metode piedāvā videi draudzīgu organiskās biomasas pārstrādes iespēju. Tā var apmierināt steidzamo pieprasījumu pēc enerģētiskās neatkarības, un to var ieviest enerģijas pārvēršanas gāzēs sistēmās kā atjaunojamās enerģijas uzkrāšanas tehnoloģiju [48], [49]. Lai līdz minimumam samazinātu biogāzes ražošanas izmaksas, tehnoloģijām ir jāasniedz optimāla efektivitāte, vienlaikus patērējot pēc iespējas mazāk enerģijas biogāzes pārstrādes procesā. Par ļoti daudzsoļīgu biometanizācijas tehnoloģiju ir atzīti *ex situ* apsmidzināmo biofiltru reaktori [36], [50]. Šajos reaktoros esošais filtrmateriāls ir būtisks, lai radītu labvēlīgu vidi mikroorganismu attīstībai un palielinātu metanoģenēzes efektivitāti. Tiek pētītas dažādas materiālu paaudzes un sastāvi, tomēr ir vajadzīgi turpmāki ekoloģiski un ekonomiski efektīvi risinājumi [51]. Jaunās biogāzes uzlabošanas tehnoloģijas, kas šobrīd tiek pētītas un atrodas izmēģinājumu fāzē, liecina par potenciālu nākotnes ilgtspējīgas enerģijas ražošanā. Lai gan pastāv pierādītas un plaši izmantotas tehnoloģijas, pašreizējie centieni ir vērsti uz tehnisko un ekonomisko izaicinājumu risināšanu, uzsverot inovatīvu risinājumu nepieciešamību šajā jomā. Bioloģiskā biogāzes uzlabošana, kas sola lielāku metāna iznākumu, zemākas enerģijas prasības un izvairīšanos no dārgu ķīmisku vielu izmantošanas, ir nozīmīgs faktors šajā kontekstā [52].

Bioloģiskās biogāzes attīrīšanas tehnoloģijas galvenā priekšrocība ir oglekļa dioksīda pārveidošana vērtīgos produktos efektīvā un videi draudzīgā veidā. Šis process ievērojami veicina ilgtspējīgas bioekonomikas un aprītes ekonomikas attīstību [36]. Šajā procesā hidroģenotrofie mikroorganismi izmanto oglekļa dioksīdu no biogāzes un papildu ūdeņradi, lai ražotu biometānu. Tomēr jāņem vērā, ka šis uzlabotais biogāzes process prasa ievērojamu enerģijas patēriņu, jo kā izejviela tiek izmantots ūdeņradis [53].

Lai nodrošinātu šīs pieejas ilgtspējību, procesā izmantotajam ūdeņradim ir jābūt iegūtam no atjaunojamiem avotiem. Ūdeņradi var ražot ar elektrolīzi, izmantojot elektroenerģiju, kura iegūta no saules vai vēja enerģijas pārpalikuma, kas tiek ražots ārpus maksimālā pieprasījuma periodiem [53], [54]. Biometāna ražošanas izmaksas šajā sistēmā ir atkarīgas no biometanizācijas procesā izmantotā ūdeņraža izmaksām [55]. Ja ir pieejams atjaunojamās enerģijas

pārpalikums, to var izmantot biogāzes uzlabošanai, padarot biometanizāciju par enerģijas uzkrāšanas veidu [56]. Šo pieeju pazīst kā “Power to Gas” jeb enerģijas pārveide gāzē koncepciju (*PtoG*) [57]. Eiropā darbojas vairākas demonstrāciju iekārtas, lai pierādītu šīs tehnoloģijas dzīvotspēju, un prognozējams, ka katalītiskā metanizācija būs ļoti perspektīva biogāzes iekārtām tuvākajā nākotnē [52].

Metanogēnos mikroorganismus bioloģiskajā ūdeņradī metanizācijā var izmantot divos dažādos veidos. Viens veids ir *in situ* sistēma [58], kurā biometanizācijas process norit anaerobā fermentatora tvertnē, kur organiskie materiāli piemērotos apstākļos tiek pārvērsti biogāzē [59]. Otrais veids ir *ex situ* sistēma, kurai biometanizācijas procesam tiek izmantots atsevišķs, ārpus fermentatora esošs reaktors [60]. Biometanizācijas procesā galvenā ķīmiskā reakcija ir zināma kā Sabatjē reakcija:

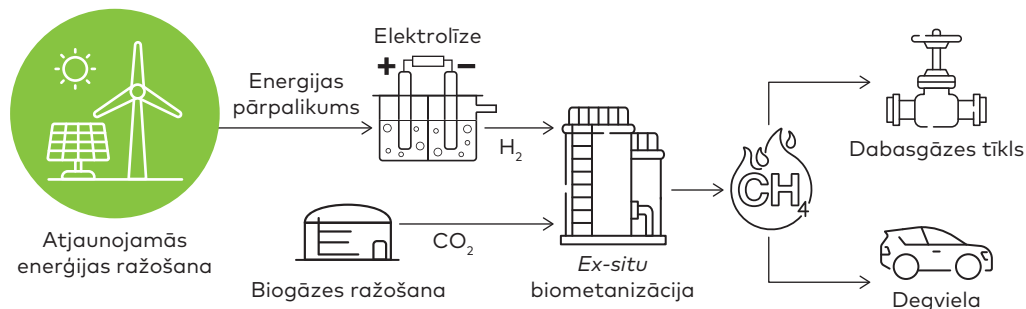


Šajā reakcijā molekulārais ūdeņradis un oglekļa dioksīds tiek pārveidoti par metānu. Oglekļa dioksīds šajā procesā darbojas kā izejmateriāls, ko izmanto metāna veidošanā. Tādā veidā biogāzi, kas sākotnēji satur 30–50 % oglekļa dioksīda, var pārveidot par biometānu. Metanogēni ir mikroorganismi, kas spēj vielmaiņas procesā pārvērst ūdeņradi par metānu, darbojas kā katalizatori šajā reakcijā. Mikroorganismus, kas atbild par šo reakciju, sauc par hidrogenotrofiem metanogēniem, un tie galvenokārt sastopami anaerobā vidē [61]. 1.13. attēlā ir parādīta *PtoG* koncepcijas shēma, kurā izmanto *ex situ* bioreaktora sistēmu.

Ex situ biometanizāciju var veikt ar dažādiem reaktoru veidiem, piemēram, apsmidzināmo biofiltru reaktoriem [63], [64], nepārtraukti maisāmiem tvertnes reaktoriem [65], fiksēta slāņa reaktoriem [66], bioplēves “*plug-flow*” reaktoriem [67] un cita veida bioreaktoriem [68], [69]. *Ex situ* tehnoloģijām ir daudz priekšrocību. Šīs tehnoloģijas piedāvā daudzas priekšrocības. Rūpniecisko oglekļa dioksīdu var viegli no ārpuses ievadīt *ex situ* reaktorā biometanizācijas laikā, lai atbalstītu hidrogenotrofisko metanogēnēzi. Tehnoloģiskie risinājumi nodrošina CO₂ izmantošanu biogāzes attīrīšanā, kur

1.13. attēls.

Enerģijas pārveide gāzē [62].



tas tiek pārveidots par biometānu. Tomēr ārējās bioreaktoru sistēmās kā substrātus var izmantot tikai tādas gāzes kā H_2 un CO_2 , kas fermentācijas procesā kalpo kā enerģijas avots [70].

Lai maksimāli palielinātu gāzu un šķidrumu mijiedarbības laiku un veicinātu bioplēves izplatību, ir būtiski nodrošināt efektīvas gāzu difūzijas sistēmas un pielāgotu biofiltru izkārtojumu. Bioplēves veidošanās veicināšana var uzlabot metāna ražošanas efektivitāti [71]. Apsmidzināmo biofiltru reaktoru izmantošana metanizācijā ir daudzsološs biotehnoloģijas lietojums. Šajā procesā hidrogenotrofie metanogēni tiek imobilizēti uz reaktorā izmantotā materiāla [72]. Mikroorganismu imobilizācija var uzlabot substrāta pārveides efektivitāti, samazināt aiztures laiku un minimizēt mikrobioloģiskā piesārņojuma risku. Šādi mikroorganismi ir izturīgāki pret bīdes spriegumiem un var tikt pārstrādāti, tā samazinot ar procesu saistītās izmaksas [73]. Bez imobilizācijas, piemēram, maisīšanas reaktoros, mikroorganismi ir pakļauti izskalošanās riskam, kas var izraisīt procesa nestabilitāti un samazinātu biometāna ražošanu [74]. Reaktorā esošo filtrmateriālu īpašībām un to ietekmei uz apsmidzināmo biofiltru reaktoru sistēmu ir būtiska loma biometanizācijas procesa optimizēšanā [73]. Materiālu dažādās īpašības var palīdzēt konfigurēt apsmidzināmo biofiltru reaktorus, lai nodrošinātu optimālus apstākļus, kas piemēroti biometanizācijai.

Enerģijas pārveide gāzē (*PtoG*) ir metode, kurā elektrolīzes ceļā tiek ražota gāzveida degviela un kurā tiek izmantota atjaunojamā vai pārpalikusi elektroenerģija. Parasti *PtoG* sistēmās iegūst ūdeņradi, tomēr pastāv arī sistēmas, kurās, izmantojot koelektrolīzi vai cietā oksīda kurināmā elementus, tieši tiek ražota sintēzes gāze vai metāns [75]. Iegūto ūdeņradi var izmantot kā enerģijas nesēju (*Power-to-Hydrogen*) vai arī lietot divpakāpju un trīspakāpju sistēmās, lai ražotu vai uzlabotu dažādas ķīmiskās vielas un enerģētiskās gāze.

Tehniski uzlabotai biogāzei ir daudzveidīgas izmantošanas iespējas, tomēr praktiskie biometāna izmantošanas risinājumi ir cieši saistīti ar vietējiem apstākļiem, piemēram, gāzes pārvades infrastruktūras attīstības līmeni reģionā. Līdz šim biogāzes uzlabošana nav kļuvusi par izdevīgu biznesa modeli, jo biogāzes uzlabošanas izmaksas ir lielākas nekā dabasgāzes tirgus cena, kas bieži ir zemāka. Tas radīja nepieciešamību pēc subsīdijām šīs tehnoloģijas attīstībai. Piemēram, Vācijā aptuveni 85 % no saražotā biometāna izmanto koģenerācijas stacijās, jo vietējie normatīvie akti paredz subsīdijas, kas padara biogāzes uzlabošanu ekonomiski pievilcīgu un konkurētspējīgu [32]. Biometāna izmantošana koģenerācijā ir videi draudzīgāka alternatīva, salīdzinot ar dabasgāzi, jo tā ļauj izlīdzināt elektroenerģijas pieprasījumu un nodrošināt stabilu enerģijas piegādi, ņemot vērā vēja un saules enerģijas ražošanas svārstības. Tomēr, lai biometāna izmantošana koģenerācijā būtu efektīva,

koģenerācijas stacijai jāatrodas tuvu teritorijai, kurā nepieciešama siltumapgāde, jo tas nodrošina optimālu enerģijas izmantošanu un samazina transportēšanas izmaksas [32].

Teritorijās, kurās ir labi attīstīta gāzes pārvades infrastruktūra, pastāv iespēja ievadīt uzlabotu biogāzi tieši gāzes tīklā. Biometāns, kad tas ir pievienots gāzes tīklam, nodrošina praktiski tādas pašas izmantošanas iespējas kā dabasgāze. Tomēr jāuzsver, ka biometāns ir atjaunojams resurss, un tā izmantošana var būt ne tikai videi draudzīgāka, bet arī ekonomiski izdevīgāka, īpaši ņemot vērā SEG emisiju samazinājumu, kas saistīts ar biometāna ražošanu un patēriņu. Šādā veidā biometāns var piedāvāt ilgtermiņa ieguvumus gan vides, gan ekonomiskajā kontekstā, veicinot ilgtspējīgu enerģijas izmantošanu. Lai biometānu varētu pārvadīt gāzes tīklā, tam ir jāatbilst iepriekš noteiktiem gāzes standartiem attiecībā uz spiedienu, sastāvu un enerģētisko vērtību. Dažkārt var rasties situācija, kurā, lai paaugstinātu biometāna enerģētisko vērtību, tai jāpievieno propāns. Šāds solis var samazināt SEG ietaupījumus un vienlaikus palielināt biometāna izmantošanas izmaksas [77]. Tādēļ, izvēloties vispiemērotāko biogāzes uzlabošanas metodi ir jāņem vērā paredzētais biometāna izmantošanas veids.

Tīklā pievadīto biometānu var efektīvi izmantot siltumapgādes nodrošināšanai, piedāvājot vairākas priekšrocības:

- iespēju izmantot biometānu neatkarīgi no tā ražošanas vietas un laika, tā palielinot tā izmantošanas efektivitāti un ilgtspējību;
- iespēju lietot esošos gāzes katlus un siltuma sistēmas;
- iespēju izmantot esošo infrastruktūru.

Nākotnes attīstības scenāriji liecina, ka biometāna izmantošana siltumapgādē varētu būt ekonomiski izdevīgāka nekā siltumapgādes sektora elektrifikācija. Tomēr, ņemot vērā, ka biomasa var izmantot arī citu nozaru vajadzībām, piemēram, augstas pievienotās vērtības produktu ražošanā, kas varētu nodrošināt lielāku peļņu, siltumapgādei bieži iesaka izmantot siltumsūkņus [32].

Biometānu var efektīvi izmantot transporta nozarē kā degvielu gan vieglajiem, gan smagajiem transportlīdzekļiem, piedāvājot zemu emisiju alternatīvu tradicionālajām fosilajām degvielām, piemēram, dīzeļdegvielai un benzīnam. Biometānu var saspiest un uzglabāt līdzīgi kā saspiesto dabasgāzi (*CNG*) vai sašķidrināto dabasgāzi (*LNG*). Tā integrēšana transporta nozarē ir salīdzinoši vienkārša, jo iespējams izmantot jau esošo dabasgāzes uzpildes infrastruktūru. *CNG* un *LNG* uzpildes stacijas var bez būtiskām izmaiņām pielāgot biometāna izplatīšanai, kas ļauj samazināt nepieciešamību pēc lieliem ieguldījumiem jaunā infrastruktūrā. Šādu pieeju jau veiksmīgi izmanto vairākās Eiropas valstīs, piemēram, Vācijā, Čehijā, Zviedrijā, Itālijā un Nīderlandē [32], [78]. Biometāna izmantošanu transporta sektorā var būtiski veicināt

labvēlīgi noskaņota politikas vide, piemēram, subsīdijas un nodokļu atvieglojumi, kas paredzēti atjaunojamās degvielas izmantošanai. Tāpat biometāna loma transportā būs atkarīga no saspiestās dabasgāzes (CNG) transportlīdzekļu izplatības un tehnoloģiskās attīstības, kas radīs nepieciešamo infrastruktūru un pieprasījumu pēc šī veida degvielas [79].

Fizikālķīmiskās biogāzes uzlabošanas metodes sniedz arī netiešus ieguvumus, piemēram, iespēju izmantot atdalīto CO₂ citos rūpnieciskos procesos. Parasti šis atdalītais CO₂ tiek izlaists atmosfērā, taču tā atkārtota izmantošana palīdz samazināt SEG emisijas un fosilā CO₂ ražošanu. CO₂ var izmantot sausā ledus ražošanai, kas ir svarīgs resurss pārtikas, ķīmijas un farmācijas nozarēs. Turklāt to var izmantot arī kosmētikas, augstvērtīgu ķīmikāliju un vaska ražošanā, kā arī sintētiskās degvielas ražošanā. No biogāzes var ražot ūdeņradi, izmantojot tvaika pārveidošanas tehnoloģiju, kurā oglekļa ūdeņraži un ūdens tiek pārvērsti ūdeņradī un oglekļa monoksīdā [32].

Biometāna izmantošanas rentabilitāte nākotnē varētu pieaugt, ja palielināsies dabasgāzes cenas, tiks paaugstinātas CO₂ emisiju cenas vai tiks ieviesta "zaļās" gāzes sertifikācijas sistēma [32]. Veicot tehniski ekonomisko analīzi, kurā novērtēta Dānijas biometanizācijas staciju ekonomiskā dzīvotspēja un ilgtspējība, secināts, ka būtisks faktors, kas ietekmē rentabilitāti, ir ūdeņraža cena. Inovāciju ieviešana un globālu stratēģiju izstrāde, kas samazinātu ūdeņraža ražošanas izmaksas, varētu padarīt ūdeņradi ekonomiski izdevīgāku, tā uzlabojot arī biometanizācijas rentabilitāti [80].

Kopumā biometāna ražošana ir uzskatāma par videi draudzīgu risinājumu, kas atbilst ilgtspējīgas attīstības principiem. Tās ieviešana nerada būtisku kaitējumu būtiskās vides jomās: klimata pārmaiņu mazināšanā un pielāgošanā, ūdens resursu aizsardzībā, aprites ekonomikā, piesārņojuma novēršanā, kā arī bioloģiskās daudzveidības un ekosistēmu saglabāšanā. Turklāt biometāna ieguvē iespējams izmantot bioloģiskos atkritumus un kūtsmēslus, tādējādi ne tikai ražojot atjaunojamo enerģiju, bet arī samazinot atkritumu apjomu un veicinot resursu efektīvu izmantošanu. Pareizi plānota un īstenota biometāna ražošana var būt nozīmīgs ieguldījums klimatneitralitātes mērķu sasniegšanā.

1.3.2. Atjaunojamo energoresursu tehnoloģijas – ūdeņradis

Ņemot vērā Nacionālajā enerģētikas un klimata plānā (NEKP) noteiktos pasākumus, iespējams prognozēt, ka tie nākotnē būtiski sekmēs ūdeņraža tehnoloģiju ieviešanu Latvijas enerģētikas sektorā. Piemēram, plānā paredzēts, ka nepastāvīgās elektroenerģijas

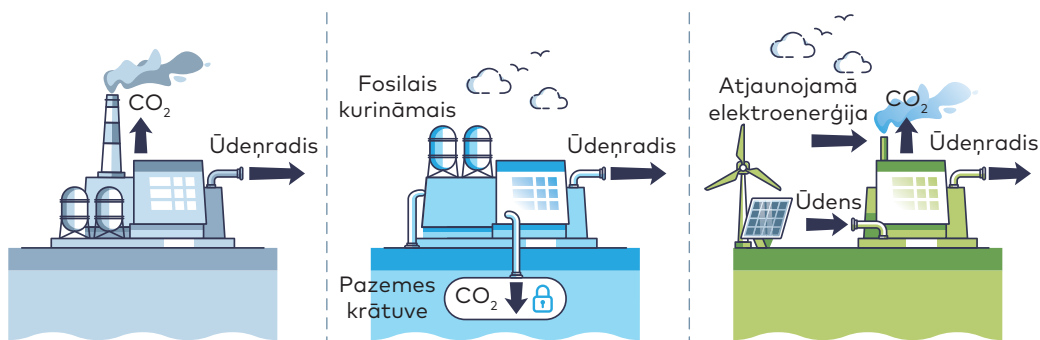
ražošanas stacijām, tostarp vēja, saules un hidroelektrostacijām ar noteiktu jaudu, varētu tikt noteikts pienākums nodrošināt akumulatoru vai balansēšanas risinājumus, tostarp ūdeņraža ražošanas iekārtas. Tāpat SEG emisiju samazināšanas pienākums lielajām siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošanas iekārtām (>100 MW) paredz šo iekārtu pilnīgu dekarbonizāciju līdz 2040. gadam, kas varētu veicināt pāreju uz zemu emisiju tehnoloģijām, tostarp ūdeņradi kā kurināmo. Papildus ikgadējais pienākums nodrošināt noteiktu atjaunojamās enerģijas īpatsvaru dabasgāzē veicinās biometāna un ūdeņraža integrēšanu esošajos tīklos vai to piegādi alternatīvā veidā. Šie pasākumi kopumā liecina par regulatīvu un stratēģisku virzību uz ūdeņraža tehnoloģiju integrāciju Latvijas enerģētikas sistēmā [81].

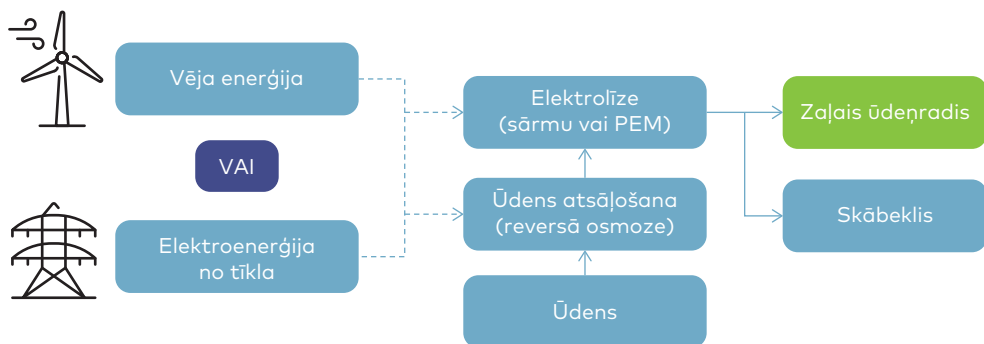
Enerģētikas sektorā ūdeņradis darbojas kā enerģijas pārnēsētājs, kas pārvieto enerģiju no viena punkta uz citu, nevis tiešs enerģijas avots. To var iegūt dažādos veidos, atkarībā no nepieciešamā ūdeņraža apjoma, tīrības līmeņa, pieejamajiem resursiem un izmaksām. Pašlaik lielāko daļu ūdeņraža ražo no dabasgāzes, izmantojot tvaika reformēšanas procesu, kurā niķeļa katalizatora klātbūtnē metāna molekulas tiek sadalītas, endotermiskā reakcijā veidojot oglekļa monoksīdu un ūdeņradi. Smagāku ogļūdeņražu sadalīšanai izmanto daļēju oksidāciju, kurā degvielas un gaisa maisījumu daļēji sadzina, iegūstot sintēzes gāzi. Cietos fosilos kurināmos var pārstrādāt gazifikācijas procesā, bet šķidros – pirolīzes procesā. Visi šie procesi šķel ogļūdeņražu saites, radot noteiktas koncentrācijas un tīrības pakāpes, tomēr ūdeņraža ražošana no neatjaunojamiem resursiem veicina papildu oglekļa emisijas [76].

Ūdeņraža tehnoloģijas klasificē, ņemot vērā to ražošanas metodes un saistītās oglekļa emisijas. Šī klasifikācija palīdz noteikt tehnoloģijas ietekmi uz vidi un tās piemērotību klimatneitralitātes mērķu sasniegšanai.

Pelēkais ūdeņradis ir visizplatītākā ūdeņraža ražošanas forma, kas iegūta no fosilajiem kurināmajiem, galvenokārt dabasgāzes, izmantojot tvaika metāna reformēšanas (SMR) procesu. Šī metode ir

1.14. attēls.
Ūdeņraža klasifikācija [82].





tehniski un ekonomiski attīstīta, taču tā rada ievērojamu daudzumu CO₂ emisiju, kas netiek uztvertas vai samazinātas, tādēļ šis ūdeņradis netiek uzskatīts par ilgtspējīgu risinājumu [82].

Zilo ūdeņradi arī ražo no dabasgāzes, izmantojot līdzīgu reformēšanas tehnoloģiju kā pelēkā ūdeņraža gadījumā, taču papildus tiek lietotas oglekļa uztveršanas un uzglabāšanas (CCS – *carbon capture and storage*) tehnoloģijas. Tādējādi ievērojama daļa radīto emisiju tiek savākta un uzglabāta, būtiski samazinot ietekmi uz klimatu. Šo tehnoloģiju uzskata par pārejas risinājumu uz ilgtspējīgākiem ūdeņraža ražošanas veidiem [82].

Zaļo ūdeņradi iegūst, elektrolīzes ceļā šķēļot ūdeni, izmantojot elektroenerģiju, kas nāk no atjaunīgajiem energoresursiem, piemēram, vēja, saules vai hidroenerģijas. Šī metode nerada CO₂ emisijas, un to uzskata par vīdei visdraudzīgāko ūdeņraža ražošanas veidu. Zaļais ūdeņradis ir būtisks enerģētikas dekarbonizācijas stratēģijās un tiek uzskatīts par nozīmīgu ilgtermiņa risinājumu pārejai uz klimatneitrālu ekonomiku [82].

Zaļā ūdeņraža ražošanas sistēmas centrā kopā ar enerģijas ražošanas iekārtu ir ūdens elektrolīze. Šī procesa veikspēja tiešā veidā ietekmē enerģijas transformācijas efektivitāti, tās ietekmi uz vidi, ūdeņraža ražošanas izmaksām un vispārējo sistēmas izmantošanu

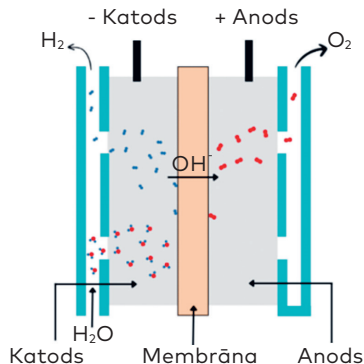
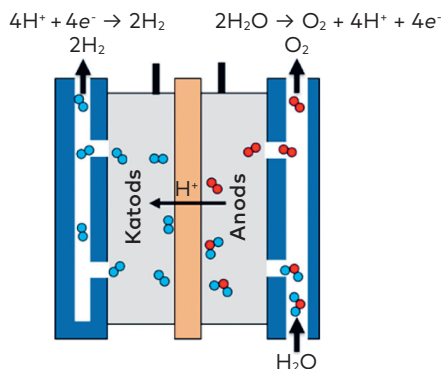
1.15. attēls.

Zaļā ūdeņraža ražošanas vienkāršota shēma (autoru veidota shēma).

1.17. attēls.

Sārmains ūdens elektrolīzes tehnoloģijas shēma [89].

1.16. attēls.
Elektrolīzes
process.



[83]. Ūdens elektrolīzē ir daudz dažādu mainīgo, kuru izmaiņas ietekmē visa procesa veiktspēju un rentabilitāti [84]. Tieši tāpēc ir ļoti svarīgi rūpīgi analizēt faktorus, kas mainās dažādos ūdens elektrolīzes procesos un nosaka to atšķirības.

Šie faktori ir jonu pārnese veidi, elektrodi un katalizatori, procesā uzturētā temperatūra un spiediens, spriegums un strāva, kā arī sistēmas izmērs [85]. No šiem faktoriem ir atkarīgas arī ūdeņraža ražošanas tehnoloģijas izmaksas un arī tās ietekme uz vidi. Vispopulārākās zaļā ūdeņraža ražošanas tehnoloģijas (ŪRT) var iedalīt trijos veidos: cietā oksīda elektrolīzes tehnoloģija (COE), protonu apmaiņas membrānu elektrolīzes tehnoloģija (PAME), sārmainā ūdens elektrolīzes jeb SŪE tehnoloģija [86].

Viens no zināmākajiem ūdeņraža ražošanas tehnoloģiju veidiem ir sārmainā ūdens elektrolīzes jeb SŪE tehnoloģija. Tā ir droša un komerciāli izplatīta tehnoloģija, kuras efektivitāte ir robežās no 47 % līdz 82 % [87]. Šīs tehnoloģijas princips ir šāds: elektroķīmiskā ūdens sadalīšanas procesā notiek ūdeņraža izdalīšanās reakcija un skābekļa izdalīšanās reakcija. Kā redzams 1.12. att., katra no šīm reakcijām notiek attiecīgajā katoda un anoda nodalījumā, un starp tiem novieto membrānu, kas ļauj saglabāt ūdeņradi un skābekli atsevišķi [88].

Šīs elektrolīzes tehnoloģijas elektrodos parasti izmanto ne pārāk dārgus materiālus, tādus kā niķelēts tērauds (jeb tērauds ar niķeļa pārklājumu), niķeļa un nerūsējošā tērauda siets [88], [90]. Membrānu, ko izmanto SŪE ūdeņraža ražošanas tehnoloģijā, parasti izgatavo no porainas gumijas vai keramikas [90]. Izmantoto materiālu un darba temperatūras (50–80°C) dēļ šo tehnoloģiju uzskata par ekonomiski izdevīgu ūdeņraža ražošanas variantu. Tomēr, tā kā izmantotā membrāna nevar izturēt lielu strāvu, tās veiktspēja samazinās, kas norāda uz izmantotā materiāla trūkumiem [88], [90].

Analizējot SŪE ūdeņraža ražošanas tehnoloģiju, konstatēts, ka tās ievērojamā enerģijas patēriņa dēļ, īpaši saistībā ar elektrolītisko sistēmu zudumiem, var palielināties tādi vides ietekmes faktori kā globālās sasilšanas potenciāls (GSP), eitrofikācijas potenciāls (EP) un paskābināšanās potenciāls (PP) [90] [91]. Izmantotās izejvielas ir vēl viens būtisks vides ietekmes faktors. Pirmkārt, jāatzīmē, ka SŪE galvenās sastāvdaļas – niķeli un tēraudu, ko izmanto katodā un anodā, – parasti ražo, izmantojot lielu fosilās enerģijas daudzumu, kas palielina kopējo SŪE tehnoloģijas GSP [91]. Savukārt SŪE elektrodiem paredzēto aktīvo komponentu izmantošana palielina tehnoloģijas paskābināšanās potenciālu un eitrofikācijas potenciālu [91]. Viens no būtiskākajiem SŪE tehnoloģijas ietekmes uz vidi faktoriem ir ozona noārdīšanas potenciāls. To veicina SŪE tehnoloģijā izmantotie akrilnitrila-butadiēna-stirola elementi, kas rada ievērojami lielu,

salīdzinot ar citiem ūdeņraža ražošanas procesiem, ozona noārdīšanas potenciāla vērtību [90].

Protonu apmaiņas membrānas elektrolīzes (PAME) tehnoloģija kopā ar SŪE tehnoloģiju ir viena no divām komerciāli pieejamajām elektrolīzes tehnoloģijām [92]. PAME darbības princips ir šāds: elektrolīzes tehnoloģijas elektrodos plūst līdzstrāva, kuras dēļ anods kļūst pozitīvi lādēts, bet katods – negatīvi. Anodā ūdens oksidējas, veidojot skābekļa (O_2) gāzi un protonus (H^+) [92]. Šie protoni pārvietojas caur PAME uz katodu, kur tie savienojas ar elektroniem, kas iegūti ūdens oksidēšanās procesā, tādējādi veidojot ūdeņraža (H_2) gāzi [92].

Salīdzinot PAME sistēmu ar SŪE, tās priekšrocības ir saražotas gāzes tīrības pakāpe un kopējā ražošanas efektivitāte, taču viens no galvenajiem PAME sistēmas trūkumiem ir tās augstās izstrādes izmaksas [92].

Tiek izcelts arī tās zemais ietekmes uz vidi potenciāls, salīdzinot ar citām ūdeņraža ražošanas tehnoloģijām [90], [91] Šajā tehnoloģijā izmantotie aktīvie materiāli ir platīna grupas materiāli, kamēr citās ūdeņraža ražošanas tehnoloģijās tas ir niķelis. Izmantojot platīna grupas materiālus, rezultāta sasniegšanai nepieciešamais materiāla daudzums ir daudz mazāks nekā gadījumā, ja izmantotais materiāls ir niķelis. Tas ievērojami samazina PAME tehnoloģijas ietekmi uz vidi, taču palielina tās izmaksas [90] [91]. Tomēr viens no PAME tehnoloģijas ražošanā un ekspluatācijā no izmantotajiem materiāliem ir alumīnijs, kas var palielināt ozona noārdīšanas potenciālu [90]. Salīdzinot visus vidi ietekmējošos faktorus, enerģijas patēriņš ir galvenais faktors, kas nosaka PAME tehnoloģijas ietekmi uz vidi. Tas ir mazāks nekā SŪE tehnoloģijai, bet lielāks nekā COE tehnoloģijai [91].

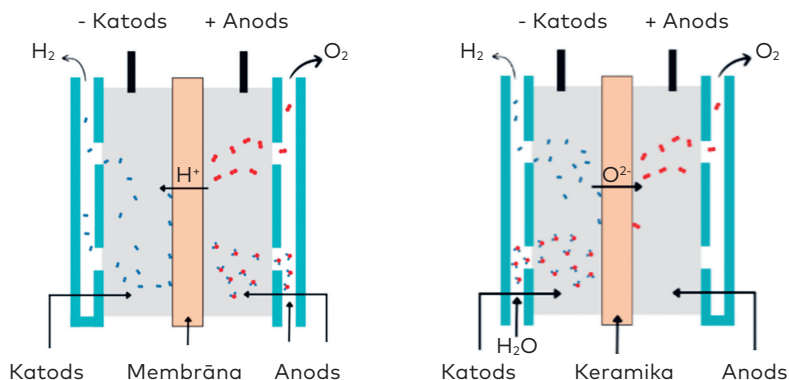
Cietā oksīda elektrolīzes (COE) ūdeņraža ražošanas tehnoloģija nav komerciāli izplatīta, taču to uzskata par perspektīvu, un, iespējams, tā ir nākamā aktuālā ūdeņraža ražošanas tehnoloģija [92]. COE tehnoloģija, līdzīgi PAME un SŪE tehnoloģijām, sastāv no katoda un

1.19. attēls.

Cietā oksīda elektrolizatora shēma [83].

1.18. attēls.

Protonu apmaiņas membrānu elektrolizatora shēma [89].



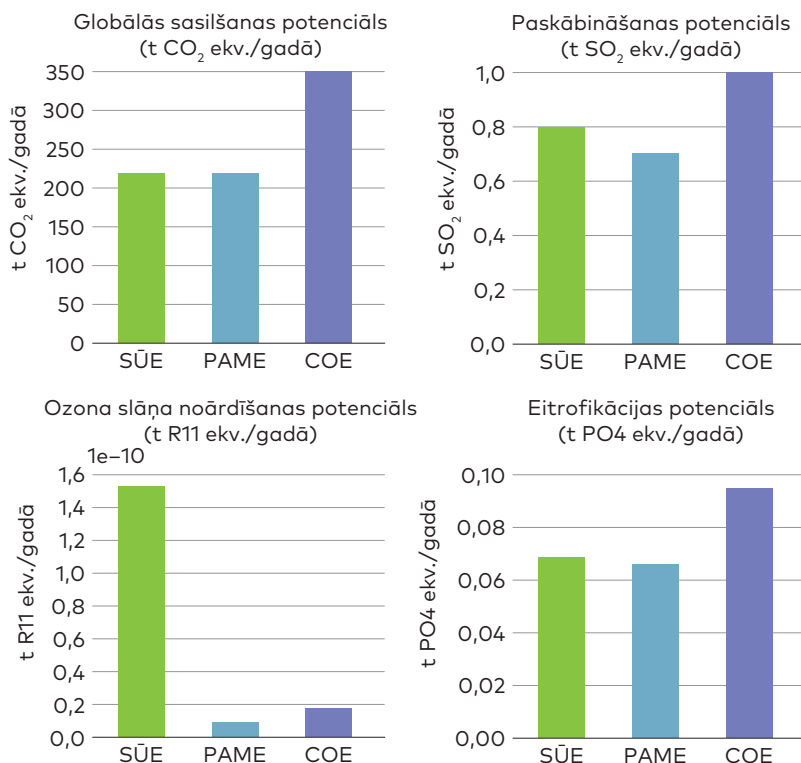
anoda daļām. Ūdens tvaikus reducē uz O_2 joniem un ūdeņradi. Elektrolīts, kurš parasti sastāv no keramiska materiāla, atrodas starp anodu un katodu, un novada O_2 jonus uz anoda daļu, kur tie oksidējas, veidojot skābekli [89].

Salīdzinot COE ar PAME tehnoloģiju, pirmā tiek darbināta daudz augstākā temperatūrā (800–1000 °C), taču, neskatoties uz to, tehnoloģijas veiktspēja ir lielāka, jo procesā izmanto ūdens tvaiku, nevis šķidrumu [93], kā arī augstās temperatūras dēļ novēro ātrāku jonu difūziju un vispārējā procesa augstāku efektivitāti [89]. Šajā tehnoloģijā elektrodu izgatavošanai izmanto tādus metālus kā niķelis, kobalts, titāns vai platīns. Elektrodu izgatavošanai izmanto materiālus, kas spēj izturēt augstu temperatūru, piemēram, niķeli vai cirkonija oksīdu [90], [91].

Jāatzīmē, ka COE tehnoloģijas darbības temperatūra ir aptuveni 10 reizes lielāka, salīdzinot ar citām ūdeņraža ražošanas tehnoloģijām. Šī faktora dēļ tehnoloģijas augstais elektroenerģijas patēriņš ir liels ietekmes uz vidi potenciālu veicinošs faktors [90], [91]. Savukārt tehnoloģijā izmantoto materiālu ražošana, kuri ir piemēroti kalpošanai ļoti augstas temperatūras apstākļos, veicina augstu GSP, EP un PP, kas negatīvi ietekmē tehnoloģijas kopējo ietekmes uz vidi potenciālu [90], [91].

1.20. attēls.

SŪE, PAME un COE vēja-ūdeņraža sistēmas GSP, EP, PP un ozona slāņa noārdīšanas potenciāls.



Vēja-ūdeņraža sistēmu salīdzinošā analīze liecina, ka SŪE un PAME tehnoloģijām ir līdzīgas GSP, PP un EP vērtības, turklāt šie rādītāji abām tehnoloģijām ir zemāki nekā COE sistēmai. Vienaļpus īpaši jāizceļ tas, ka ozona slāņa noārdīšanas potenciāls ir ievērojami augstāks tieši SŪE tehnoloģijai. Lai nodrošinātu visaptverošu salīdzinājumu un atvieglotu dažādu vērtējamo aspektu savstarpējo izvērtēšanu, potenciāla vērtības attēlotas grafiski (sk. 1.20. att.). Tas ļauj vizuāli uzskatāmi novērtēt katras tehnoloģijas kopējo ietekmi uz vidi un veicina precīzāku vērtību salīdzināšanu starp visām vērtētajām ūdeņraža ražošanas tehnoloģiju sistēmām.

Vēja-ūdeņraža sistēmu salīdzinošais izvērtējums ļauj secināt, ka PAME tehnoloģija vairumā gadījumu uzrāda zemāku vides ietekmes potenciālu, salīdzinot ar citām analizētajām sistēmām. Pretēji tam, SŪE tehnoloģija būtiski izceļas ar ievērojami augstu ozona slāņa noārdīšanas potenciālu. Kopumā vērtējot, COE sistēma uzrāda būtiski augstākas GSP, PP un EP vērtības – aptuveni par trešdaļu lielākas nekā PAME un SŪE tehnoloģijām, kas norāda uz tās izteiktāku kopējo ietekmi uz vidi.

Ūdeņradi var uzglabāt kā augsta spiediena gāzi, kriogēnu (zemas temperatūras) šķidrumu vai cietā veidā, izmantojot metālu hidrīdus. Uzglabāšanas laikā, īpaši temperatūras svārstību gadījumā, daļa šķidrā ūdeņraža var iztvaikot, tāpēc ir nepieciešamas labi izolētas tvertnes. Ilgstošai uzglabāšanai var izmantot pazemes gāzes krātuves. Ūdeņraža transportēšanai nepieciešamās enerģijas apjoms ir svarīgs faktors, lai izvērtētu, kādā formā ražošana ir visefektīvākā. Transportējot ūdeņradi lielos attālumos, izdevīgāk to ir sašķidrināt. Ūdeņraža transportēšanas principi ir līdzīgi dabasgāzes un benzīna pārvadāšanai un uzglabāšanai, izmantojot gāzes balonus, cisternas un tvertnes ar dubultām sienām un izolācijas pildījumu. Ņemot vērā ūdeņraža gāzes zemo blīvumu, tā transportēšanai pa caurulēm nepieciešama lielāka enerģija, salīdzinot ar dabasgāzi [76].

Tiek pētītas dažādas ūdeņraža uzglabāšanas iespējas, no kurām daudzas koncentrējas uz vietēji ražotā ūdeņraža pārveidi atpakaļ elektroenerģijā, taču daži projekti ietver arī ūdeņraža sajaukšanu ar dabasgāzi. Šī risinājuma pievilcību nosaka vairāki apsvērumi par dabasgāzes tīkla potenciālu nodrošināt ilgtermiņa un liela mēroga enerģijas uzglabāšanas jaudas. Piemēram, ievadot tīklā 1 % no gada laikā saražotā ūdeņraža, uzkrātā elektroenerģija atsevišķās valstīs var pārsniegt 10 % no kopējā vēja un saules enerģijas ražošanas apjoma, kas ir būtisks solis, lai mazinātu lielo vēja parku ražošanas nestabilitāti [94].

Šobrīd identificētās nozares, kurās iespējams izmantot ūdeņradi ir enerģētika, rūpniecība, transports un būvniecība [95]. Ūdeņradim ir potenciāls aizstāt fosilās degvielas tādos rūpnieciskos procesos ar augstu energoietilpību kā tērauda un ķīmiskā rūpniecība [95]. Savukārt transporta sektorā ūdeņradis varētu būt veids kā dekarbonizēt

tālsatiksmes un smago kravu pārvadājumus [95]. Zaļā ražošana un izmantošana rada pavisam minimālas CO₂ emisijas [95].

Ūdeņradi var izmantos siltumapgādē ūdens uzsildīšanai; telpu apsildei gan privātmājās, gan daudzdzīvokļu un biroju ēkās [96]. Kā liela priekšrocība ir tā, ka var izmantot esošos dabasgāzes katlus, tos pārkonfigurējot [96]. Ūdeņraža sadedzināšanas zemā ekserģētiskā efektivitāte un augstās ražošanas izmaksas tā izmantošanu tikai siltumapgādē padara par visneizdevīgāko risinājumu [96]. Labāks lietojuma veids varētu būt ūdeņraža izmantošana koģenerācijas stacijās ar augstāku kopējo veiktspējas efektivitāti (COP > 5) [96].

Zinātniskajā literatūrā veikta virkne pētījumu par augstāko iespējamo ūdeņraža piejaukumu dabasgāzei bez lielām investīcijām infrastruktūras pielāgošanā ūdeņraža kā siltumenerģijas avota izmantošanai. Vairāki pētījumi norāda, ka ūdeņraža piejaukums dabasgāzei līdz 20–25 % (pēc tilpuma) uzskatāms par drošu risinājumu, kas neprasa būtiskas izmaiņas esošajā infrastruktūrā. Piemēram, ūdeņraža piejaukumu līdz 25 % var uzskatīt par tehniski drošu, savukārt centralizētās siltumapgādes sistēmās iespējams izmantot 15–20 % ūdeņraža bez nepieciešamības būtiski pārveidot esošo tīklu. Tajā pašā laikā uzsvērts, ka drošības apsvērumu dēļ ūdeņraža saturs dabasgāzes maisījumā nedrīkstētu pārsniegt 20 %, lai saglabātu cauruļvadu un sistēmu ekspluatācijas drošību [97], [98], [99].

Savukārt Somijas, Igaunijas, Latvijas, Lietuvas, Polijas un Vācijas pārvades sistēmu operatoru īstenotajā projektā “Ziemeļu–Baltijas ūdeņraža koridors”, kurā skatītas arī ūdeņraža ievades iespējas Latvijas, Lietuvas, Igaunijas un Somijas gāzes pārvades sistēmās, secināts, ka ar salīdzinoši nelielām investīcijām pārvades sistēmā iespējams transportēt dabasgāzi ar ūdeņraža piejaukuma īpatsvaru 2–5 % [100]. Iespējams pārvadīt dabasgāzi ar ūdeņraža piejaukumu 10 % un lielākā apjomā, bet šādā gadījumā sagaidāmas lielākas izmaksas, jo ir jāpielāgo pārvades sistēma un jāveic materiālu testi [100]. Vienlaikus šobrīd spēkā esošie Ministru kabineta 2022. gada 13. septembra noteikumi Nr. 567 “Noteikumi par prasībām biometāna un gāzveida stāvoklī pārvērstas sašķidrinātās dabasgāzes ievadīšanai un transportēšanai dabasgāzes pārvades un sadales sistēmā” nosaka, ka ūdeņraža piejaukums dabasgāzei, ja to ievada dabasgāzes pārvades sistēmā, kas tieši saistīta ar piegādēm citām valstīm vai Inčukalna pazemes gāzes krātuvi, jābūt mazākam vai vienādam ar 0,1 % [101]. Savukārt, ja ūdeņradi ievada dabasgāzes sadales vai pārvades sistēmā, kas nav tieši saistīta ar piegādēm citām valstīm vai Inčukalna pazemes gāzes krātuvi, ūdeņraža piejaukumam dabasgāzei jābūt mazākam vai vienādam ar 2 % [101].

Šobrīd ūdeņradis veido ļoti nelielu daļu no ES kopējās energoresursu struktūras, kā arī to lielākoties ražo, izmantojot fosilos energoresursus – dabasgāzi vai akmeņogles [95], [102]. Kā skaidrojums jāmin tas, ka ražošanas izmaksu ziņā zaļais ūdeņradis (arī

mazoglekļa ūdeņradis) vēl joprojām ir krietni dārgāks nekā ūdeņradis, kas ražots no fosilajiem resursiem [95].

Latvijā pašlaik darbojas viena ūdeņraža ražošanas un uzpildes stacija, kurā ūdeņradi ražo tvaika-reformācijas procesā [103]. Ražotne primāri paredzēta "Rīgas satiksmes" trolejbusu uzpildei, bet tā pieejama arī vieglo automašīnu uzpildei [103]. Minētā ūdeņraža ražošanas un uzpildes stacija izveidota 10 ar ūdeņradi darbināmu trolejbusu uzpildei [103]. Stacija izveidota projekta "H2Node" ietvaros ar ES līdzfinansējumu, un tās kopējās izmaksas veido 16,1 miljonu EUR [103]. Šajā stacijā ūdeņraža ražošanai izmanto dabasgāzi [104].

Par kavējošo faktoru ūdeņraža ražošanas attīstībai Latvijā šobrīd uzskatāms konkrēta tehnoloģiskā lietojuma mērķa trūkums [104]. Lietuvā, piemēram, ūdeņradi izmanto naftas pārstrādes rūpnīcās un minerālmēslu ražošanā, savukārt Igaunijā ūdeņradi izmanto centralizētajā siltumapgādes sistēmā [104].

Elektroenerģijas un siltumenerģijas ražošanā izmantotajai dabasgāzei piejaucot zaļo ūdeņradi (2 %, 5 %, 10 % vai 20 % apmērā), tiktu panākts attiecīgais emisiju samazinājums no dabasgāzes izmantošanas, jo zaļā ūdeņraža izmantošana nerada emisijas. Zaļo ūdeņradi ražojot, Latvijā tiktu veicināta arī valsts enerģētiskā neatkarība ar skatu nākotnē, kad ūdeņraža ražošanas tehnoloģiju izmaksas samazinātos, kā arī pieejamākas kļūtu tehnoloģijas, kurās iespējams izmantot 100 % ūdeņradi.

1.3.3. Enerģijas akumulācija

Esošā situācija liecina, ka uzstādīto zaļā kursa mērķu sasniegšanai nepieciešama daudz aktīvāka dalībvalstu rīcība. 2023. gadā atjaunojamo energoresursu īpatsvars enerģijas patēriņā bija 24,5 %, taču uzstādītais mērķis ir jau 2030. gadā sasniegt 42,5 % [105]. Tas liecina, ka ir jāturpina investēt atjaunojamās enerģijas ražošanas projektos, tomēr šī īpatsvara strauja palielināšana ietver atjaunojamās enerģijas mainīguma problemātiku, kā arī to, ka elektroenerģijas apgādes tīkliem šādas izmaiņas rada izteiktu papildu spiedienu. Lai efektīvāk virzītu enerģētikas sektora pāreju uz atjaunojamiem energoresursiem, papildus jāinvestē arī enerģijas uzkrāšanā, tā palielinot uzticamību atjaunojamai enerģijai un energodrošību.

Saistībā ar ģeopolitisko situāciju, sākot no 2022. gada maija, Baltijas valstis neimportē elektroenerģiju no Krievijas un Baltkrievijas, kas rada pastiprinātu spiedienu pašiem nodrošināt pašpatēriņu. 2023. gadā Baltijas valstis sasniedza augstāko īpatsvaru (60,6 %) kopš 2018. gada pašpatēriņa noseģšanā ar lokāli saražoto elektroenerģiju [23].

Papildus 2025. gada 8. februārī Baltijas valstis, atslēdzoties no padomju laika *BRELL* enerģijas loka un sinhronizējoties ar

kontinentālās Eiropas tīklu (*CEN*), integrējot Baltijas valstu elektro-tīklus Eiropas energosistēmā, panāca pilnīgu enerģētisko neatkarību, kas aktualizē enerģijas akumulācijas tehnoloģiju ieviešanu arī Baltijas valstu reģionā [106].

Termins “elektroenerģijas uzkrāšanas sistēmas” ietver daudz komponentu un funkciju. Tas skaidrojams kā “elektroenerģijas pārveidošana citā uzglabājamā formā un pēc tam uzkrātās enerģijas pārvēršana elektroenerģijā pēc nepieciešamības” [107]. Elektroenerģijas uzkrāšanas tehnoloģijas galvenokārt izmanto, lai samazinātu atjaunojamo energoresursu radītos traucējumus un uzkrātu saražotās enerģijas pārpalikumu. Tomēr tās ir nozīmīgas arī slodzes līdzsvarošanā, maksimālās slodzes samazināšanā, telekomunikācijās un elektriskajos transportlīdzekļos [107].

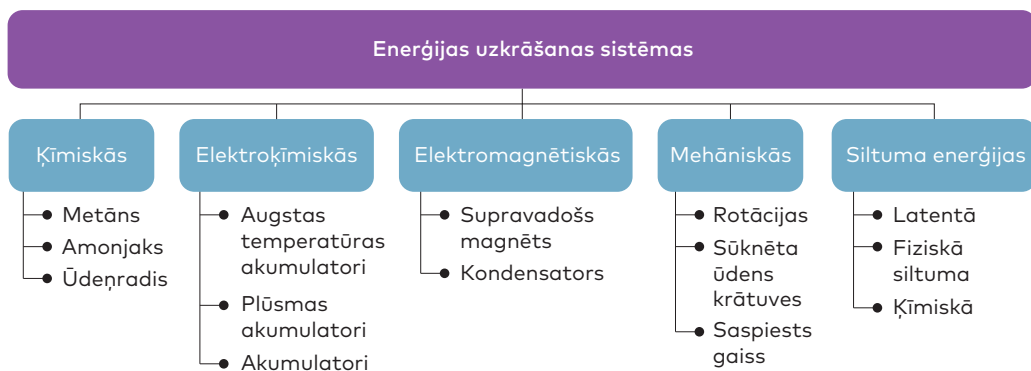
Elektroenerģijas uzglabāšanas sistēmas var izmantot gan maza, gan liela mēroga sistēmās. Maza izmēra sistēmas (uzstādītā kapacitāte mazāka par 1 MW) lielākoties ir dzīvojamās ēkas, nelielas kopienas, kurās šīs sistēmas galvenokārt izmanto kā enerģijas rezervi energoapgādes pārrāvumu laikā un enerģijas izmaksu samazināšanai. Šajos gadījumos pamatā izmanto akumulatorus, taču šādam lietojumam adaptējami visi pieejamie enerģijas uzkrāšanas veidi [108].

Liela mēroga elektroenerģijas uzglabāšanas sistēmas galvenokārt kalpo tīkla pārvaldībai un apgādes stabilizēšanai. Šim nolūkam galvenokārt izmanto sūknētās hidroakumulācijas, saspiesta gaisa enerģijas akumulācijas un liela izmēra akumulatoru sistēmas [109].

Elektroenerģijas uzkrāšanas sistēmas elektrotīklā saražoto enerģiju uzkrāj dažādās formās (ķīmiski, termiski, mehāniski un elektroķīmiski) un tad ievada to tīklā [110]. Šo sistēmu specifika ir uzkrāt ar atjaunojamajiem energoresursiem saražoto elektroenerģiju, lai to varētu izmantot vēlāk, tā samazinot zudumus [111]. Elektroenerģijas uzkrāšanas sistēmu pamatfunkcija ir pieprasījuma un piedāvājuma balansēšana, kā arī tās kalpo kā virzītājspēks pārejā uz zaļo enerģiju, uzglabājot atjaunojamo enerģiju, kompensējot tās mainīgumu un nepastāvību [110], [112].

1.21. attēls.

Elektroenerģijas uzkrāšanas tehnoloģiju klasifikācijas shēma [114].



Elektroenerģijas uzkrāšanas sistēmas spēj būtiski ietekmēt procesus trīs savstarpēji saistītos sektoros: elektroenerģijas ražošana, sistēmas operatori un lietotāji. No elektroenerģijas ražošanas aspektā enerģijas uzkrāšana ir ļoti svarīga spēkstacijām, lai mazinātu disbalansu starp ražošanu un patēriņu. Lai mazinātu pārvades un sadales sastrēgumus, elektroenerģijas uzkrāšanas tehnoloģijas izmanto sistēmu operatoru sektorā. Savukārt galapatērētājiem akumulācija ietekmē izmaksu dinamiku, jo elektroenerģijas cena atspoguļo ražošanas, pārvades un sadales izmaksas [113].

Kopumā sastopami 14 enerģijas uzkrāšanas tehnoloģiju veidi [114]. Pamātā tās iedala piecās kategorijās: ķīmiskās, elektroķīmiskās, elektromagnētiskās, mehāniskās un siltumenerģijas uzkrāšanas sistēmas. Šāda klasifikācija veidota, pamatojoties uz enerģijas pārveidošanas veidu [115]. 2018. gadā 98 % no kopējā enerģijas uzkrāšanas tehnoloģiju īpatsvara ieņēma sūknētā ūdens krātuves tehnoloģija [116].

Tomēr bieži tās iedala arī šādās kategorijās: fiziskā enerģijas uzkrāšana, elektromagnētiskā enerģijas uzkrāšana, elektroķīmiskā enerģijas uzkrāšana un enerģijas uzkrāšana ar fāžu maiņu.

Ķīmiskā elektroenerģijas uzkrāšana

Ķīmiskā elektroenerģijas uzkrāšana nozīmē enerģijas uzkrāšanu ar ķīmisko saišu palīdzību, piemēram, ūdeņraža ražošana ar elektrolīzi [110]. Būtībā elektroenerģija tiek pārveidota citā enerģijas nesējā. Elektroenerģijas pārvēršanu ūdeņradī vai metānā bieži dēvē par enerģijas pārvēršanu gāzē (*power to gas*) [117].

Ūdeņradis kā enerģijas akumulācijas risinājums

Viens no perspektīvākajiem enerģijas uzkrāšanas veidiem ir ūdeņradis, kas tiek ražots, izmantojot atjaunojamo elektroenerģiju, elektrolīzes ceļā sadalot ūdeni. Ūdeņradi var uzglabāt spiedtvertnēs vai pārveidot citos savienojumos, piemēram, izmantojot *power-to-X* tehnoloģijas.

Visplašāk izmantotā metode ir uzglabāšana spiedtvertnēs, kas piemērota neliela un vidēja mēroga lietojumiem. Alternatīvi iespējams izmantot šķidro organisko ūdeņraža nesēju (*LOHC*), kur ūdeņradis tiek ķīmiski piesaistīts šķidrumam, padarot uzglabāšanu un transportēšanu drošāku un vieglāk integrējamu esošajā infrastruktūrā. Abi risinājumi veicina ūdeņraža kā klimatneitrālas enerģijas sistēmas sastāvdaļas lomu.

Biometāns kā enerģijas akumulācijas un aprites risinājums

Biometāns ir attīrīts biogāze, ko var izmantot kā atjaunojamo dabasgāzes aizstājēju esošajos gāzes tīklos vai kā kurināmo. Tā ražošana samazina atkritumus un SEG emisijas, īpaši, ja CO₂ tiek pārvērsts papildu metānā, izmantojot atjaunojamo ūdeņradi. Biometāns veicina vides ilgtspēju, lauksaimniecības atbalstu un enerģētisko neatkarību.

Elektroķīmiskā elektroenerģijas uzkrāšana

Elektroķīmiskais elements pārvērš ķīmisko enerģiju elektriskajā enerģijā vai uzglabā to, izmantojot oksidēšanās reakcijas [118]. Viens no elektroķīmiskās elektroenerģijas uzkrāšanas veidiem ir akumulatori [119].

Akumulatori sastāv no diviem elektrodiem – anoda un katoda –, kurus atdala jonus vadošs elektrolīts. Būtībā akumulators ir ierīce, ko veido viens vai vairāki elektroķīmiski elementi, lai ar enerģiju darbinātu citas ierīces, procesus [118].

Izmantotākās nozarē ir litija jonu akumulatori, kurām ir ļoti plašs lietojums, sākot no elektromobiļiem un beidzot ar integrāciju elektrotīklos [119]. Plūsmas akumulatori savukārt izmanto šķidros elektrolītus, un tās pamatā izmanto uzkrāšanai ilgāku laika posmu, jo tās nodrošina izteiktu elastību [113], [114]. Metāla-gaisa akumulatori izmantojami kā ekonomiski efektīvs risinājums elektroenerģijas uzkrāšanai ilgākā laikā [109]. Šī veida tehnoloģijas ir samērā viegli pielāgojamas, tāpēc piemērotas risinājumiem, kad nepieciešama spēja apkalpot augstu enerģijas blīvumu, un moduļveida sistēmām.

Elektroķīmiskā elektroenerģijas uzglabāšana piemērota īslaicīgai glabāšanai un biežai izmantošanai [122]. Galvenokārt tā ir piemērotas sistēmām, kur nepieciešams vidēji ilgš izlādes laiks – no dažām minūtēm līdz stundām [115].

Enerģijas uzkrāšana ar akumulaoriem

Litija jonu baterijas (Li-ion) ir visizplatītākie tīkla mēroga uzkrāšanas akumulatori, kuros enerģija tiek glabāta litija jonu kustībā starp elektrodiem. Populārākie tipi ir Ni-Mn-Co oksīda (NMC), litija dzelzs fosfāta (LFP) un litija titanāta (LTO) akumulatori, kuros ir atšķirīgas īpašības un izmaksas. Sistēmas satur vadības un temperatūras regulēšanas komponentus, nodrošinot drošu un efektīvu darbību.

Nātrija-sēra (Na-S) baterijas ir augstas jaudas un enerģijas intensitātes sistēmas, kuras darbojas augstā temperatūrā (~300 °C). Tās galvenokārt izmanto ražošanas laika nobīdei un rezerves jaudai, taču nav piemērotas ilgtermiņa uzglabāšanai, jo ir būtiski siltuma zudumi. Efektivitāte sasniedz aptuveni 83–89 %.

Vanādijs redoksplūsmas akumulatori (VRB) atšķiras ar šķidruma elektrolītu uzglabāšanu atsevišķās tvertnēs, ļaujot neatkarīgi regulēt enerģijas kapacitāti un jaudu. Tās piemērotas gan tīkla, gan vietējām vajadzībām, to enerģijas pārveides efektivitāte ir ap 70–90 %. VRB sistēmas ir modulāras un elastīgas, taču patērē enerģiju elektrolītu cirkulācijai.

Elektromagnētiskā elektroenerģijas uzkrāšana

Elektromagnētisko elektroenerģiju iespējams uzglabāt elektriskā lauka vai magnētiskā lauka veidā. Populārākās šīs kategorijas

uzkrāšanas tehnoloģijas ir elektrostatiskie kondensatori, elektriskie divslāņu kondensatori un supravadošas magnētiskās enerģijas uzglabāšana [118].

Mehāniskās elektroenerģijas uzkrāšanas sistēmas

Mehāniskā elektroenerģijas uzkrāšana ir visvecākais elektroenerģijas uzkrāšanas veids. Tā ietver tādas metodes kā, piemēram, sūkņēta ūdens krātuves, kas, uzsūkņējot ūdeni uz augstāku ūdens rezervuāru un vajadzības brīdī laižot to cauri turbīnām, ražo elektrību, enerģijas uzglabāšana saspiesta gaisa formā un rotācijas tehnoloģija [110], [118], [123]. Mehāniskās elektroenerģijas uzkrāšanas tehnoloģijas parasti izmanto lielizmēra un ilglaicīgas uzkrāšanas projektos [110], [118]. Jāatzīmē, ka sūkņēta ūdens krātuves globāli dominē šajā nozarē, veidojot ap 98 % no kopējā globālā uzglabāšanas apjoma [111].

Siltumenerģijas uzkrāšanas sistēmas

Siltumenerģijas uzkrāšanas sistēmās elektroenerģijas uzkrāšana atbild par siltumenerģijas pieprasījuma un piedāvājuma līdzsvaru. Tā kā ļoti lielu daļu enerģijas patērīna veido siltumenerģija un saules enerģijas ražošanas sistēmu un siltumsūkņu skaits tupina pieaugt, šo tehnoloģiju attīstība spēj būtiski veicināt dekarbonizāciju. Šī elektroenerģijas uzkrāšanas veida piemērs ir saules vai vēja enerģijas saražota atjaunojamā enerģija, no kuras siltumsūknis saražo siltumenerģiju, ko tālāk akumulēt [124].

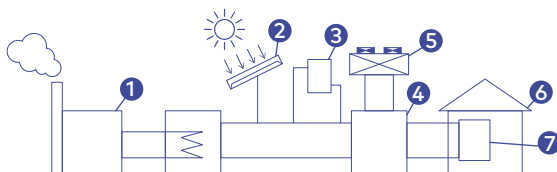
Šīs dažāda mēroga siltumenerģijas uzkrāšanas tehnoloģijas izveidotas, lai novērstu siltumenerģijas zudumus un uzkrātu enerģijas pārpalikumus vēlākai izmantošanai. Siltumenerģijas uzkrāšanas tehnoloģijām ir specifiskas termofizikālas īpašības, piemēram, piemēroti kušanas punkti un labu siltumietilpība [118].

Šobrīd šīs tehnoloģijas galvenais izaicinājums ir zema tehnoloģiskā gatavība. Šī pieeja ir samērā jauna, tāpēc atšķirībā no citām elektroenerģijas uzkrāšanas tehnoloģijām tai ir zems enerģijas blīvums. Tas nozīmē, ka tehnoloģija aizņem vairāk vietas, kas veido augstas infrastruktūras izmaksas [124].

Siltumenerģijas akumulācija ar fāžu pārejas materiāliem (PCM)

Fāžu pārejas materiāli uzkrāj un atdod siltumu, mainot savu agregātstāvokli noteiktā temperatūrā, nodrošinot augstu latentās siltumenerģijas ietilpību. PCM ļauj saglabāt gandrīz nemainīgu izlādes temperatūru un ir īpaši piemēroti ēku apkures un dzesēšanas, saules enerģijas un centralizētās siltumapgādes vajadzībām. Tos iespējams izmantot gan īstermiņā (stundas, dienas), gan sezonāli (mēneši). Tehnoloģija ir komerciāli gatava (TRL 9), tās energoefektivitāte ir virs 90 % un enerģijas blīvums – līdz 85 kWh/m³. Vidējais kalpošanas laiks ir 10–30 gadi.

PIEMĒRS. PCM siltumenerģijas akumulācijas sistēmas ieviešana gaisa kondicionēšanai biroju ēkā Polijā. Ieviestā sistēma paredzēta gaisa kondicionēšanas nodrošināšanai biroju ēkā, kur tiek dzesētas septiņas telpas. Sistēma izmanto zemas temperatūras siltumu no centralizētās siltumapgādes, lai ražotu atdzesētu ūdeni, ko izmanto ēkas gaisa kondicionēšanai. Dzesēšanas slodzi šajās telpās rada siltuma pārnese no trim avotiem: apkārtējās vides, cilvēkiem (darbiniekiem) un elektroiekārtām (galvenokārt no datoriem).



Vispārējā dzesēšanas sistēmas shēma: 1 – centralizētā siltumapgādes sistēma, 2 – saules enerģijas apkures sistēma, 3 – siltumenerģijas uzkrāšana, 4 – adsorbcijas dzesēšanas sistēma, 5 – atddzesēšanas sistēma, 6 – biroju ēka, 7 – gaisa dzesētājs.

Papildus elektroenerģijas uzkrāšanas veidam šīs tehnoloģijas iedala arī pēc akumulācijas ilguma (sk. 1.2. tabulu). Elektroenerģijas uzkrāšanas tehnoloģijas savā starpā atšķiras īpašību ziņā, tāpēc pirms to ieviešanas ļoti būtiski ir izvērtēt tehnoloģijas atbilstību konkrētajai vajadzībai.

Tādas sistēmas kā rotācijas enerģijas uzkrāšana, supravadošā (strāvas vadīšana bez pretestības) magnētiskā enerģijas uzkrāšana, superkondensatori ir vislabāk piemērotas lietojumos, kad sistēmām ir jāspēj ātri reaģēt uz izmaiņām un pieprasījumu. Savukārt, piemēram, sūkņētā ūdens uzglabāšana un saspiestā gaisa enerģijas uzglabāšana ir piemērotākas, kad reakcijas laiks nav tik būtisks [119], [120].

Šobrīd visbiežāk, neskaitot sūkņētā ūdens krātuves, zinātniskajā literatūrā analizētas un industrijā izmanto elektroķīmiskās elektroenerģijas akumulācijas tehnoloģijas, kas ietver dažāda veida akumulatorus, kā arī aktualizēts ūdeņraža tehnoloģijas ieviešanas potenciāls un ar to saistīto risku, problemātikas izvērtējums [110].

Saules un vēja tehnoloģiju saražotās enerģijas strauji krītošās cenas dēļ prognozējams, ka atjaunojamās enerģijas ražošanas projektu skaits turpinās pieaugt, kas savukārt veicinās elektroenerģijas akumulācijas tehnoloģiju aktīvāku ieviešanu. Uzkrāšanas iekārtu skaitam pieaugot, arvien vairāk tiks aktualizēta transporta sektora dekarbonizācija, lai palielinātu elektromobiļu īpatsvaru, kā arī padziļināta enerģētikas sektora dekarbonizācija ceļā uz atjaunojamo enerģiju.

1.2. tabula

Elektroenerģijas uzkrāšanas tehnoloģiju iedalījums pēc uzkrāšanas laika un attiecīgais lietojums [123]

Veids	Ilgums	Lietojums
Īstermiņa	≤ 6 stundas	Stabilitātes, piemēram, elektroenerģijas kvalitātes, pārvaldībai
Dienas ietvaros	6–12 stundas	Maksimālo slodžu samazināšanai
Vairāku dienu / nedēļas	12–100 stundas	Mainīgas atjaunojamo energoresursu enerģijas ražošanas nevienmērības novēršanai
Sezonas	≥ 100 stundas	Sezonas akumulēšana mainīgo atjaunojamo energoresursu enerģijas svārstību un ekstrēmu laikapstākļu līdzsvarošanai
Ilgtermiņa	Vairāki gadi	Resursu pietiekamībai

Nodrošinot atjaunojamās enerģijas pilnvērtīgu integrēšanu tīklā un attiecīgi samazinot SEG emisijas, elektroenerģijas uzkrāšanas sistēmu ieviešana elektrotīklos var būtiski veicināt straujāku enerģijas pāreju no fosilā resursa uz atjaunojamo, sasniedzot ES un nacionāli uzstādītos stratēģiju mērķus. Tomēr, ņemot vērā šī brīža datus un tendenci, secināms, ka, lai sasniegtu neto nulles emisiju mērķi, nepieciešama aktīvāka virzība un iesaiste šajā jomā [128].

Papildus enerģētikas nozare turpina attīstīties un tiek radītas jaunas tehnoloģijas, piemēram, mikrotīkli, superkondensatori, litija-sēra akumulatori u. c. [129]. 1.3. tabulā apkopotas jaunākās tendences zinātniskajā literatūrā un pētījumos, kas saistīti ar elektroenerģijas uzkrāšanu.

Kopā ar jauniem pētniecības virzieniem attīstās arī komerciālais sektors, piedāvājot dažādas alternatīvas jau kādu laiku zināmajām elektroenerģijas uzkrāšanas tehnoloģijām.

Piemēram, Itālijā kā pamatalternatīva ekonomiski izdevīgajām litija jonu akumulatoriem šobrīd tiek piedāvāta uzņēmuma *Energy Dome* inovācija – CO₂ akumulators, kas spēj ilgstoši akumulēt enerģiju [130]. Tehnoloģijas galvenā ideja ir izmantot pārpalikušo elektroenerģiju un/vai saražoto atjaunojamo elektroenerģiju, lai saspiestu un uzsildītu oglekļa dioksīda gāzi (CO₂) un procesā iegūtā siltumenerģija tiek uzkrāta siltummainī [130]. CO₂ atdzesē, pārvērš šķidrā formā un atbrīvo, kad jāražo elektroenerģija, sasildot ar uzkrāto siltumenerģiju un gāzei paplašinoties darbinot ģeneratoru [58]. Kā pamatpriekšrocība uzsverams tas, ka šim akumulatoram nav nepieciešami reti sastopami metāli, tam prognozēts 30 gadu ekspluatācijas laiks un augsta darbības efektivitāte [130]. 2024. gadā Sardīnijā tika atklāta pasaulē pirmā ilgstošas darbības enerģijas uzglabāšanas CO₂ akumulatoru sistēma [131].

1.3. tabula

Jaunās tendences enerģijas uzkrāšanas sistēmu izpētē [129]

Uzkrāšanas tehnoloģija	Pētniecības virzieni
Elektriskie transportlīdzekļi	Uzlādes stacijas, tīkla pieslēgšana, maršrutēšana, bezvadu uzlāde, <i>plug-in</i> hibrīdi
Siltumenerģijas uzglabāšana	Siltuma pārnese, zemas temperatūras uzglabāšana, fāžu pārejas materiāli, kušanas process
Litija-sēra akumulatori	Augsta veiktspēja, elektroķīmisko reakciju paātrināšana, pašizlādes samazināšana, cietvielu akumulatori
Metāna ražošana	CO ₂ metanizācija, zemas temperatūras metanizācija
Ūdeņraža uzglabāšana	Cietais un šķidrās ūdeņradis, dehidrogenācija, grafēna izmantošana
Ģeotermālie siltumsūkņi	Modelēšana, veiktspējas optimizācija, hibrīdās sistēmas
Litija jonu akumulatori	Augstas veiktspējas risinājumi
Mikrotīkli	Elektrotransportlīdzekļu integrācija, enerģijas uzkrāšana, ūdeņraža sistēmas, frekvenču kontrole
Superkondensatori	Augstas veiktspējas elektroda materiāli

Elektroenerģijas uzkrāšanas sistēmas pamatā nodrošina tīkla stabilitāti, taču to ne mazāk svarīgās īpašības un apsvērumi ieviešanai ir dekarbonizācija (atjaunojamās enerģijas uzkrāšana un tās pieejamības nodrošināšana, kad tās ražošana jauda ir zema), ekonomiskie ieguvumi un uzlabota elektrotīkla efektivitāte, samazinot enerģijas zudumus, ko rada lielais atjaunojamās enerģijas ražošanas projektu skaits [111]. Palielinot elektroenerģijas akumulācijas uzstādīto kapacitāti, palielinās arī atjaunojamās enerģijas ražošanas un izmantošanas īpatsvars [129].

Neskatoties uz vairākām svarīgām elektroenerģijas uzkrāšanas priekšrocībām, šīs tehnoloģijas vēl joprojām ir attīstības procesā – tiek meklētas labākās to konfigurācijas un kombinācijas. Kā izaicinājums elektroenerģijas uzkrāšanas sistēmu aktīvākai ieviešanai šobrīd ir augstās uzstādīšanas izmaksas, akumulatoru nolietojšanās un neefektīva enerģijas ekspluatācija. Mehāniskajai elektroenerģijas uzkrāšanai raksturīgie izaicinājumi ir to izmērs, augstas kapitāla izmaksas, teritorijas ierobežojumi un augsta uzturēšanas darbu slodze [129].

Jāmin arī, ka ļoti būtisks ir motivējošs tiesiskais regulējums un finansiālais atbalsts šāda tipa projektu attīstībai un ieviešanai [112]. Subsīdijas, regulatīvās reformas un atbalsts pētniecībai un izstrādei ir veidi, kā dažādas valstis, piemēram, Amerikas Savienotās Valstis, Ķīna, Austrālija un citas, ir motivējušas elektroenerģijas uzkrāšanas tehnoloģiju ieviešanu un projektu īstenošanu [128].

Runājot par ļoti lielu elektroenerģijas uzglabāšanas apjomu, ierobežojošie faktori jeb izaicinājumi ir teritorijas pieejamība, resursu

pieejamība akumulatoru ražošanai, kā arī ne mazāk būtisks faktors – to pārstrāde [132]. Kā viens no kavējošiem faktoriem šobrīd ir pieaugošās akumulatoru izejvielu cenas, jo pieprasījums pēc tām pieaug, bet piedāvājums ir ierobežots [128]. Šīs problēmas risināšanai svarīgi ir izstrādāt jaunus materiālus un tehnoloģiju veidus, piemēram, litija-kobalta oksīda katodus aizstāt ar niķeļa oksīda katodiem vai izstrādāt jaunas elektroķīmiskās sistēmas, piemēram, litija-sēra, litija-skābekļa, nātrija-sēra u. c. [118].

Lai sistemātiski izvērtētu enerģijas akumulācijas iespējas pašvaldību līmenī, noderīga *PESTLE* analīze, kas ietver politiskos, ekonomiskos, sociālos, tehnoloģiskos, juridiskos un vides aspektus. Attiecībā uz reģionālo virzību uz pāreju uz zaļo enerģiju pašvaldībām ir būtiska nozīme, lai nodrošinātu enerģijas uzkrāšanas ieviešanu pilsētās un reģionos. Pēdējo desmit gadu laikā vietējo pašvaldību loma valsts energosistēmā ir būtiski mainījusies. Ja agrāk pašvaldības palāvās uz valsts valdību vispārējo politiku, aktīvi nepiedaloties energosistēmas plānošanā, tad mūsdienās pašvaldības ir ieņēmušas spēcīgāku institucionālo lomu un kontroli pār vietējās energosistēmas pārvaldību. Viens no iemesliem, kāpēc pieaug vietējo pašvaldību aktīvā loma, ir pāreja no fosilā kurināmā, kas lielākoties ir centralizēts, uz atjaunojamās enerģijas sistēmām, kas ir decentralizētas. Tā kā decentralizēto energosistēmu skaits vietējās jurisdikcijās ievērojami pieaug, pašvaldībām ir lielāks stimuls uzņemties lielāku lomu savā kopējā reģiona enerģētikas nozarē.

Pašvaldībām ir dažādas lomas, sākot no mērķu izvirzīšanas, plānošanas un regulēšanas līdz aktīvai līdzdalībai attīstības procesā kā operatoriem, finansētājiem un veicinātājiem, kā arī būt par galvenajiem sistēmas informētības veidotājiem un pieprasījuma apkopotājiem. Pašvaldībām var būt būtiska loma nākotnes enerģētikas pārejā uz atjaunojamiem enerģijas avotiem, jo ir daudz iespēju uzstādīt atjaunojamo enerģiju uz pašvaldību zemes, piemēram, uz sabiedrisko ēku jumtiem, tāpēc pašvaldības varētu mudināt savus iedzīvotājus aktīvi piedalīties reģiona enerģētikas sistēmas attīstībā [133].

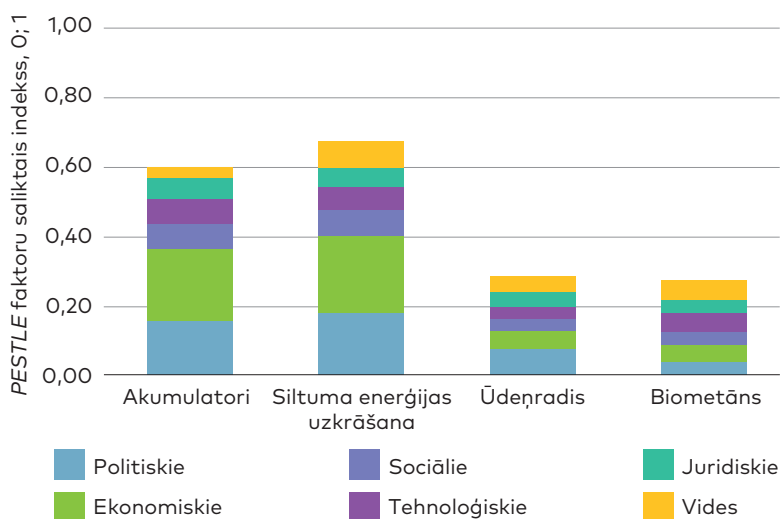
Pašvaldības var arī sniegt atbalstu, izmantojot finansiālus stimulus (piemēram, nodokļu atvieglojumus, dotācijas) un nosakot prasības (piemēram, apbalvojumus). Turklāt atbalstam vajadzētu būt ne tikai finansiālam, bet arī konsultāciju veidā par atjaunojamās enerģijas plānošanu un attīstību [8]. Mainīgās enerģijas jomā ir jāizstrādā jaunas un inovatīvas enerģijas uzkrāšanas tehnoloģijas un alternatīvus attīstības ceļi. Tomēr vietējās valsts iestādes, kas ir atbildīgas par labvēlīgas politiskās vides radīšanu atjaunojamo energoresursu infrastruktūras attīstībai reģionos, sastopas ar daudzām problēmām un neskaidrībām pietiekamas enerģijas uzkrāšanas ieviešanā, kas bieži vien paliek neatrisinātas zināšanu un nepietiekamu iespēju dēļ, kas savukārt būtiski kavē reģionālo ceļu uz klimatneitralitāti [133].

Izmantojot *PESTLE* metodi kopā ar salikto indeksu, tiek salīdzinātas četras dažādas alternatīvas enerģijas uzkrāšanas sistēmas: litija jonu akumulatori, siltuma enerģijas akumulācija, ūdeņradis (*power-to-gas*) un biometāns (*power-to-liquid*) [133].

Siltumenerģijas uzkrāšana sasniedza augstāko saliktā indeksa vērtību 0,67, kam seko akumulatoru ar 0,60, ūdeņradis – ar 0,29 un biometāns – ar 0,28.

Politiskajai un ekonomiskajai dimensijai bija vislielākā ietekme uz saliktā indeksa kopējiem rezultātiem, jo pašvaldību pārstāvju novērtētie svāri indeksa aprēķinā bija lielāki. Rezultātā siltumenerģijas uzglabāšana pārspēja pārējās alternatīvas galvenokārt tāpēc, ka politiskās un ekonomiskās dimensijas apakšindeksā tai bija spēcīgāka pozīcija. Akumulatoru gadījumā vājākā pozīcija izrādījās vides dimensija, jo tā rada lielāku ietekmi uz vidi. Tomēr tai nebija būtiskas ietekmes uz saliktā indeksa kopējiem rezultātiem, jo tās kopējais svārs bija 0,09 punkti. Dimensiju līmenī vislielākās atšķirības apakšindeksa rezultātos bija vērojamas ekonomiskajā un vides dimensijā. Līdzīgi *PESTLE* saliktā indeksa rezultāti tika iegūti attiecībā uz ūdeņradi un biometānu, jo abām tehnoloģijām konstatēti līdzīgi ierobežojošie faktori tehnoloģiju ieviešanai pašvaldībās. Lielie kapitālieguldījumi, mazāk mērķtiecīgas politikas iniciatīvas un atbalsts, kā arī sarežģītāka šo tehnoloģiju integrācija esošajā tīklā ir galvenie iemesli, kāpēc ūdeņraža un biometāna uzglabāšana ievērojami atpaliek no akumulatoriem un siltuma enerģijas uzglabāšanas attīstības [133].

Politiskās dimensijas analīze liecina, ka politiskā iniciatīva un atbalsts no valsts puses, mērķtiecīga politika valsts un starptautiskā līmenī, kā arī konkrētu pašvaldību prioritāšu un vajadzību noteikšana ir galvenie faktori enerģijas uzkrāšanas tehnoloģiju iespējai



1.22. attēls.

Izvēlēto alternatīvu rezultātu analīze.

ieviešanai. Pašlaik siltumenerģijas uzkrāšana un akumulatoru integrācija ir augstāka valsts prioritāte, un rezultātā pastāv valsts finansējuma programmas, kas atbalsta šādas infrastruktūras attīstību pašvaldībās. Tomēr nav skaidra politikas fokusa vai atbalsta, lai paātrinātu ūdeņraža vai biometāna sistēmu ieviešanu pašvaldībās. Ekonomiskā aspekta analīze parādīja, ka siltumenerģijas uzkrāšana un akumulatori pašlaik ir visrentablākā alternatīva, jo tām ir viszemākās specifiskās kapitālieguldījumu izmaksas (EUR/kW) un ekspluatācijas un uzturēšanas izmaksas (EUR/kWh) salīdzinājumā ar ūdeņradi un biometānu, kam nepieciešami lieli ieguldījumi infrastruktūras izbūvē. Turklāt kapitāla pieejamība pašvaldību līdzfinansējuma ziņā akumulatoriem un siltumenerģijas uzglabāšanai ir daudz lielāka, jo sākotnējās ieguldījumu izmaksas ir zemākas. Sociālās dimensijas analīze atklāja, ka gan sabiedrības, gan pašvaldības attieksme un zināšanas par izvēlētajām tehnoloģijām ir augstākas un pozitīvākas siltuma enerģijas uzglabāšanas un akumulatoru gadījumā, jo tās jau ir zināmas. Tomēr sabiedrība un pašvaldība ir diezgan skeptiski noskaņota attiecībā uz ūdeņraža un biometāna potenciālo attīstību, jo par šīm tehnoloģijām joprojām ir daudz nezināmā, un pašvaldībai nav nepieciešamo prasmju un zināšanu, lai pārliecinoši izprastu, kā šīs sistēmas darbojas un kā tās potenciāli varētu integrēt pašvaldības enerģētikas sistēmā [133].

Tehnoloģiskās dimensijas rezultāti liecina, ka akumulatoru un siltumenerģijas akumulēšana pašlaik ir pārāka par ūdeņraža un biometāna akumulēšanas sistēmām, jo ir augstāka tehnoloģiskā brieduma pakāpe, efektivitāte un mazāka tehnoloģijas sarežģītība, lai to integrētu esošajā tīklā. Lai gan akumulatori uzrādīja visātrāko reakcijas laiku starp citām alternatīvām, to uzglabāšanas ilgums pie pilnas jaudas bija ievērojami mazāks nekā siltumenerģijas uzglabāšanai, ūdeņradim un biometānam. Juridiskajā dimensijā tika novērtēta vides atļaujas iegūšanas sarežģītības pakāpe un pašvaldības atļaujas iegūšanas birokrātijas pakāpe visām četrām alternatīvajām tehnoloģijām. Rezultāti parādīja, ka ūdeņradim un biometānam atļaujas piešķiršanas process būtu ievērojami sarežģītāks drošības risku un daudzo neskaidrību dēļ, kas potenciāli varētu aizkavēt šo tehnoloģiju ieviešanu pašvaldībā. Vides dimensijas rezultāti parādīja, ka akumulatoriem ir vislielākā potenciālā ietekme uz vidi salīdzinājumā ar citām alternatīvām. Tas saistīts ar litija jonu resursiem, kuru ieguve ir ļoti energoietilpīga, un litija jonu akumulatoru utilizēšanu ir saistīta ar vairākiem ilgtspējības jautājumiem. Salīdzinājumā ar citām alternatīvām akumulatoriem ir arī visīsākais kalpošanas laiks, kas nozīmē biežāku tehnisko sastāvdaļu nomaiņu un negatīvi ietekmē resursu efektivitāti [133].

Dažādas pētnieciskās metodes, tostarp *PESTLE* un saliktais indekss, ļauj izvērtēt jaunāko tehnoloģiju piemērotību un ieviešanas iespējas pašvaldību līmenī, ņemot vērā vietējos apstākļus un ilgtspējas mērķus. No tehnoloģiskā skatupunkta būtiski ir uzlabot esošo

sistēmu jaudu un efektivitāti, kā arī nodrošināt saskaņotu Eiropas mēroga pieeju un atbalsta mehānismus šo tehnoloģiju plašākai ieviešanai. Tas veicina ne tikai enerģētisko neatkarību, bet arī reģionālo attīstību un klimata pārmaiņu mazināšanu.

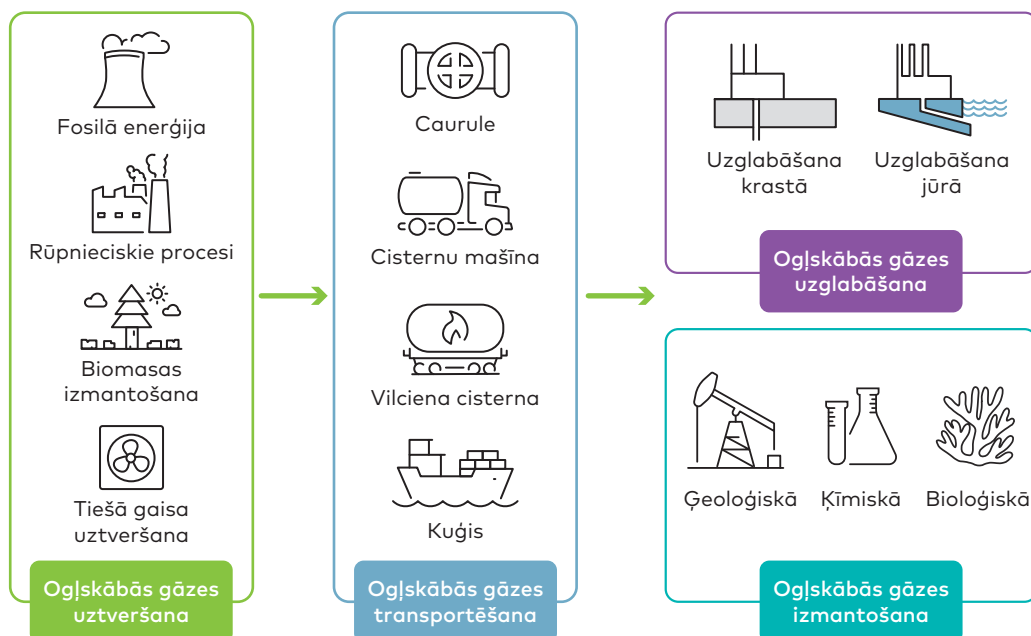
1.3.4. Oglekļa dioksīda uztveršana, transportēšana, uzglabāšana un utilizācija

CO₂ uztveršana un uzglabāšana ir pieskaitāma nulles CO₂ emisiju tehnoloģijām, un to var piemērot enerģijas ražošanas un rūpnieciskām iekārtām, kuru darbības rezultātā, piemēram, sadedzinot fosilā kurināmā veidus (piemēram, mazutu, dabasgāzi, akmeņogles, slānekli u. c.) vai biomasu, rodas oglekļa dioksīda emisijas.

Oglekļa dioksīda uztveršana, transportēšana, uzglabāšana un izmantošana (CCUS – *Carbon Capture, Utilisation and Storage*) ir tehnoloģiju kopums, kas paredzēts, lai samazinātu CO₂ emisijas atmosfērā un veicinātu pāreju uz oglekļa neitralitāti. Šis process ietver CO₂ uztveršanu no lieliem emisiju avotiem, piemēram, rūpnieciskajiem uzņēmumiem vai elektroenerģijas stacijām, tālāk transportējot to (parasti cauruļvados vai citos drošos veidos) uz vietām, kur to iespējams ilgstoši uzglabāt pazemes ģeoloģiskajās struktūrās vai pārveidot par derīgiem resursiem, piemēram, izmantot rūpniecībā vai lauksaimniecībā. CCUS risinājumi uzskatāmi par būtisku starpposma instrumentu klimata pārmaiņu mazināšanai, īpaši nozarēs,

1.23. attēls.

Oglekļa dioksīda uztveršanas, transportēšanas, uzglabāšanas un utilizācijas definīcija saskaņā ar oglekļa neitralitātes mērķi [134].



kur emisiju samazināšana ar citām metodēm ir tehniski sarežģīta vai ekonomiski neefektīva. Ilgtspējīgas un efektīvas *CCUS* sistēmas ieviešana prasa gan atbilstošu regulējumu un infrastruktūru, gan sadarbību starp publisko un privāto sektoru, lai tehnoloģija kalpotu kā stabils atbalsts oglekļa neitralitātes mērķu sasniegšanā.

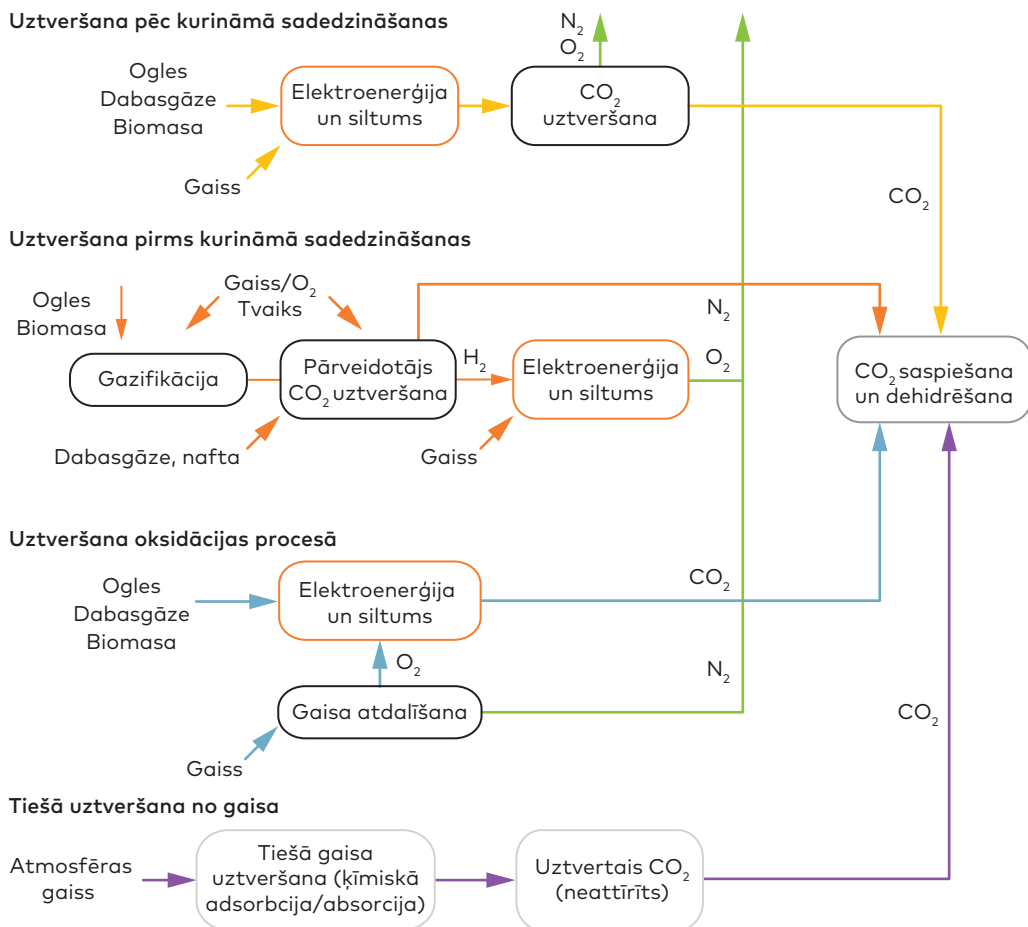
Oglekļa dioksīda uztveršana

Oglekļa uztveršanas tehnoloģijas ir metožu kopums, kas paredzēts oglekļa dioksīda emisiju uztveršanai no dažādiem avotiem, piemēram, elektrostacijām un rūpnieciskajiem procesiem, lai mazinātu SEG ietekmi uz klimata pārmaiņām [135].

Oglekļa dioksīda saimniecības ietvaros CO_2 uztveršanas procesa mērķis ir radīt koncentrētu augstspiediena plūsmu, kas ir piemērota CO_2 transportēšanai uz norādīto uzglabāšanas vietu. Uztveršanas metodēm ir būtiska nozīme CO_2 emisiju samazināšanā, un tās var iedalīt četrās pamatmetodēs: CO_2 atdalīšana pēc kurināmā

1.24. attēls.

Oglekļa dioksīda uztveršanas metodes [135].



sadedzināšanas, CO₂ atdalīšana pirms kurināmā sadedzināšanas, kurināmā sadedzināšana skābekļa klātbūtnē un tiešā gaisa uztveršana (uztveršanas metožu tehnoloģiskās shēmas ir parādītas 1.24. attēlā). CO₂ uztveršanas metodes izvēli ietekmē dūmgāzu plūsmas ķīmiskās īpašības (piemēram, CO₂ sastāvs un koncentrācija) un fizikālās īpašības (piemēram, spiediens) [136], [137].

Galvenais elements, kas būtiski ietekmē ar CO₂ uztveršanas tehnoloģiju aprīkotas elektrostacijas funkcionalitāti, ir energoavota efektivitātes izmaiņas. Ņemot vērā, ka emisiju uztveršanai ir nepieciešama papildu enerģijas ievade, tātad papildu kurināmais, kopējā energoavota efektivitāte samazinās. Piemēram, CO₂ uztveršana pirms kurināmā sadedzināšanas ieviešana samazina energoefektivitāti par 15–20 %, pēc kurināmā sadedzināšanas – 25–40 %, kurināmā sadedzināšana – 10–15 % [135], [138]. Vienlaikus oglekļa dioksīda uztveršanas ieviešanas rezultātā pieaug sekundārais vides piesārņojums un resursu patēriņš, piemēram, absorbcijas filtru izmantošana, ūdens izmantošana un ķīmisko vielu lietošana uztveršanai un enerģijas ražošanai. Emisiju uztveršanas tehnoloģiju vides un klimata ieguvumus un trūkumus var visaptveroši novērtēt, tikai veicot pilna cikla CO₂ uztveršanas, transportēšanas un uzglabāšanas sistēmas analīzi [136].

CO₂ uztveršana pirms kurināmā sadedzināšanas ir vērsta uz CO₂ atdalīšanu pirms fosilā kurināmā vai biomasas sadegšanas. Kurināmais pirms sadegšanas tiek gazificēts un pārveidots ar gaisu un ūdens tvaiku, rezultātā radot CO₂ un H₂. Tas ietver tvaika pārveidošanas reakciju, lai ražotu CO un H₂, un ūdens-gāzes maiņas reakciju, lai pārvērstu CO par CO₂. Atšķirībā no fosilajiem kurināmā veidiem biomasas gazifikāciju var apgrūtināt augsts mitruma saturs biomasā, zemāka siltumietilpība, higroskopiskums un zems blīvums, kas kopumā apgrūtina izejvielu apstrādi. Reakcijas rezultātā iegūto CO₂ un H₂ atdala, izmantojot gāzu atdalīšanas metodi, un CO₂ tiek uztverts, savukārt H₂ var izmantot, piemēram, kā degvielu ūdeņraža gāzes turbīnām [139], [140], [141].

- **CO₂ uztveršanas efektivitāte.** Uztveršana pirms sadegšanas bieži vien ir efektīvāka, jo CO₂ plūsma ir koncentrētāka – spēj uztvert līdz pat 90 % CO₂ emisiju.
- **Priekšrocības.** CO₂ atdalīšanas metode ar zemāku enerģijas patēriņu, pateicoties paaugstinātai CO₂ koncentrācijai, paaugstinātam spiedienam un samazinātam gāzes tilpumam. Samazināts ūdens patēriņš (atšķirībā no CO₂ uztveršanas pēc kurināmā sadedzināšanas). Kā blakusproduktus ir iespējams ražot sintētisko gāzi un ūdeņradi.
- **Trūkumi.** Ievērojami enerģijas zudumi sorbenta reģenerācijas dēļ.
- **Izaicinājumi.** Augsti kapitālieguldījumi un prasības infrastruktūrai var kavēt plašāku ieviešanu.

CO₂ uztveršana pēc sadegšanas ir tehnoloģija, kurā CO₂ uztver no dūmgāzēm pēc kurināmā sadegšanas. Šī tehnoloģija ir veiksmīgi integrējama esošajās spēkstacijās, padarot to par dzīvotspējīgu emisiju samazināšanas iespēju bez nepieciešamības būtiski mainīt infrastruktūru. CO₂ uztveršana pēc sadegšanas galvenokārt balstīta dažādās sorbcijas metodēs: ķīmiskās absorbcijas, adsorbcijas un membrānu atdalīšanas metodēs [142].

Visizplatītākā CO₂ uztveršanas pēc sadegšanas metode ir saistīta ar **ķīmisko absorbciju** – amīnu bāzes šķīdinātāju izmantošanu, piemēram, monoetanolamīna (MEA), dietanolamīnu (DEA) vai metildietanolamīnu (MDEA) izmantošanu, kas reaģē ar CO₂, veidojot savienojumu, kuru var atdalīt un reģenerēt. Process ietver divus galvenos posmus: absorbciju, kurā CO₂ tiek uztverts šķīdinātājā, un reģenerāciju, kurā šķīdinātāju karsē, lai atbrīvotu uztverto CO₂, ļaujot šķīdinātāju izmantot atkārtoti [143], [144].

Adsorbcijas procesos CO₂ molekulas selektīvi atdala no dūmgāzu maisījuma, veidojot ķīmisku saiti ar sorbentu vai adsorbējoties pie adsorbenta virsmas, piemēram, aktivētās ogles, zeolītiem, metālorganiskām virsmām, materiāliem uz silikona bāzes u. c. Šajā gadījumā ļoti svarīga ir piemērotu adsorbentu izvēle. Šo adsorbentu galvenās īpašības ir zemas izejvielu izmaksas, liels īpatnējās virsmas laukums, poru struktūra un tilpums, kā arī ļoti augsta izturība pret straujām temperatūras un spiediena izmaiņām, ko pieprasa izmantojamās uztveršanas metodes, t. i., spiediena maiņas adsorbcija (PSA), temperatūras maiņas adsorbcija (TSA), vakuuma maiņas adsorbcija (VSA) un vakuuma spiediena maiņas adsorbcija (VPSA). Starp citām adsorbcijai būtiskām īpašībām ir jāmin arī laba reģenerējamība un elektroniskās īpašības [144], [145], [146], [147].

Gāzu atdalīšanas laikā, izmantojot **membrānu** tehnoloģiju, membrāna darbojas kā filtrs, kas caurlaiž konkrētas molekulas (piemēram, CO₂), bet neļauj membrānā iekļūt citām molekulām (piemēram, CH₄ un H₂O). Atkarībā no izmantotās procesa inženiertehniskās konfigurācijas gāzu atdalīšana, izmantojot membrānas, var notikt vienpakāpes procesā ar vienu membrānas moduli vai divpakāpju (vai daudzpakāpju) procesā ar diviem (vai vairākiem) membrānu moduļiem, kas izvietoti virknē vai paralēli. Membrānās balstītus CO₂ uztveršanas procesus pēc kurināmā sadedzināšanas var īstenot, izmantojot divas dažādas pieejas: izmantojot membrānu kontaktorus, lai pastiprinātu uz absorbciju balstītu uztveršanu, vai izmantojot gāzu atdalīšanas membrānas, lai selektīvi atdalītu CO₂ no dūmgāzēm. Organiskās (polimēru) membrānas, neorganiskās membrānas un membrānas ar jauktu matricu (MMM) ir galvenās membrānas, ko izmanto CO₂ uztveršanai pēc kurināmā sadegšanas. Galvenie materiāli ir metālorganiskie karkasi (MOF), oglekļa molekulārie sieti (CMS), nanokompozītu membrānas, membrānas uz jonu šķidruma (IL) bāzes un atvieglotas transportēšanas membrānas

(FTM). Šo inovāciju mērķis ir uzlabot efektivitāti un risināt problēmas, kas saistītas ar membrānu tehnoloģiju ieviešanu efektīvai CO₂ uztveršanai [147], [148], [149], [150], [151], [152], [153].

- **CO₂ uztveršanas efektivitāte.** Atkarībā no izmantotās metodes spēj uztvert 60–95 % CO₂ (absorbīcija – 85–90 %, adsorbīcija – līdz 95 % pilotiekārtās, esošās membrānu tehnoloģijas – 60–75 %, jaunās – līdz 90 %).
- **Priekšrocības.** Labi attīstīta tehnoloģija, ar pierādītu lietojumu plaša mēroga komerciālos objektos.
- **Trūkumi.** Zems CO₂ parciālais spiediens dūmgāzēs ierobežo CO₂ atdalīšanu. Komerciāli pieejamās amīna skruberu iekārtas bieži vien darbojas nelielā mērogā, tāpēc ir nepieciešams būtisks kapacitātes palielinājums. Turklāt amīna skrubera procedūra prasa ievērojamu enerģiju, izraisot aptuveni 30 % kopējās jaudas zudumu.
- **Izaicinājumi.** Augsts enerģijas patēriņš un ekspluatācijas izmaksas joprojām ir nozīmīgs izaicinājums, tādēļ jāpilnveido sorbentu un membrānu sniegums. Lai gan pašlaik oglekļa uztveršana pēc kurināmā sadegšanas izceļas ar savu pielāgojamību un rentabilitāti, oglekļa uztveršanas tehnoloģiju attīstības tendences liecina, ka, turpinoties attīstībai, dzīvotspējīgākas var kļūt CO₂ atdalīšanas pirms sadegšanas un kurināmā metodes.

Kurināmā sadedzināšana skābekļa vidē rada priekšnosacījumus veiksmīgai CO₂ uztveršanai: fosilā kurināmā vai biomasas sadedzināšanai izmanto tīru skābekli un reciklētas dūmgāzes. Tā kā kurināmais tiek sadedzināts tīra skābekļa vidē, nevis gaisā, sadegšanas procesā veidojas dūmgāzu plūsma, kas sastāv galvenokārt no CO₂ un ūdens tvaika. Pēc šāda procesa ūdens tvaiku var kondensēt un atdalīt, atstājot CO₂ plūsmu, ko var uztvert un uzglabāt vai izmantot citiem mērķiem. Izmantojot skābekļa kurināmā sadedzināšanas metodi energosistēmās, ir iespējams samazināt izplūdes dūmgāzu un slāpekļa gāzu emisiju (NO_x) daudzumu, vienlaikus uzlabojot arī katlu efektivitāti. Tomēr viena no galvenajām problēmām šādā veida uztveršanas tehnoloģijās ir tīra skābekļa nodrošināšana, kas tiek atdalīts gaisa atdalīšanas iekārtā, izmantojot energoietilpīgu un dārgu procesu. Tāpēc ir ļoti svarīgi izpētīt potenciāli jaunas iespējas gaisa atdalīšanai, piemēram, ķīmiskās cirkulācijas (angļu val. *chemical looping*) metodes un membrānas, kas transportē skābekli un jonus. Svarīgs ieguvums no kurināmā sadedzināšana skābekļa vidē ir tas, ka to var izmantot gan jaunās, gan esošajās elektrostacijās, un to var izmantot arī ar dažāda veida kurināmā veidiem, piemēram, fosilajiem, lignocelulozes biomasas vai cietajiem sadzīves atkritumiem [154], [155], [156], [157].

- **CO₂ uztveršanas efektivitāte** ir līdz pat 99 % CO₂ koncentrācija dūmgāzēs.
- **Priekšrocības.** Piesārņojošo vielu emisijas ir minimālas, jo degšana nenotiek gaisa vidē. Papildus tam samazinās uztveršanas procesa tehnoloģisko iekārtu skaits un sarežģītība.
- **Trūkumi.** Augsts enerģijas patēriņš CO₂ saspiešanai un O₂ iegūšanai samazina kopējo energoefektivitāti. Turklāt pastāv koroziņas risks.
- **Izaicinājumi.** Augsti kapitālieguldījumi skābekļa atdalīšanas iekārtām.

Tiešās uztveršanas no gaisa (no angļu valodas – *direct air capture (DAC)*) tehnoloģijas pamatā CO₂ tiek uztverts pa tiešo no atmosfēras. Šajā procesā izmanto ķīmiskas vai fizikālas uztveršanas metodes, lai atdalītu CO₂ no gaisa un pēc tam uzglabātu to pazemē vai pārvērstu lietderīgos produktos. Šīs tehnoloģijas ir šķidro sorbentu sistēmas; cieto sorbentu sistēmas, uztverot CO₂ uz porainu materiālu virsmas; elektroķīmiskās metodes. Savukārt izpētes līmenī atrodas kriogēnās un membrāntehnoloģijas, kas izmanto gaisa atdzesēšanu CO₂ kondensācijai vai selektīvas membrānas filtrēšanai. Tiešās uztveršanas no gaisa tehnoloģijas bieži tiek veidotas kā mobilas iekārtas, kas ļauj pārvirzīt iekārtu pēc nepieciešamības uz konkrētiem objektiem un ģeolokācijām, attiecīgi pielāgojot iekārtas darbību konkrētās vietas gaisa raksturlielumiem [157], [158], [159].

- **CO₂ uztveršanas efektivitāte:** līdz pat 99 % CO₂ koncentrācija dūmgāzēs.
- **Priekšrocības:** augsta integrējamība dažādos objektos un lokācijās.
- **Trūkumi:** augstas kapitālizmaksas un darbināšanas izmaksas.
- **Izaicinājumi:** efektīvu sorbentu piemeklēšana un DAC tehnoloģiju integrēšana ar atjaunojamiem energoavotiem.

Oglekļa dioksīda transportēšana

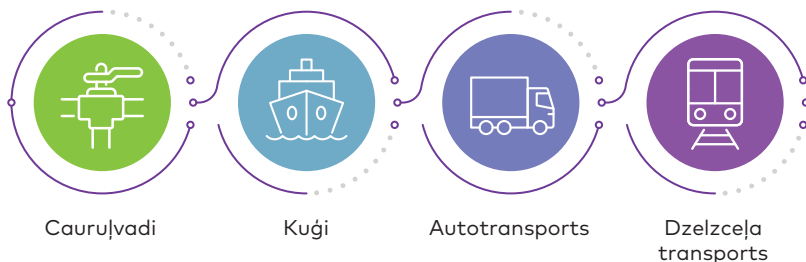
Lai nodrošinātu atdalītās CO₂ plūsmas nonākšanu tā izmantošanas vai noglabāšanas vietā, tiek nodrošināta CO₂ transportēšana. Var runāt par četriem uztvertā CO₂ transportēšanas veidiem:

- transportēšana pa jūras un sauszemes cauruļvadiem;
- transportēšana ar kuģiem;
- transportēšana pa sauszemi ar automašīnām;
- transportēšana pa sauszemi ar dzelzceļa transportu.

Transportēšanas veida izvēlē ir būtiski ņemt vērā tādus faktorus kā CO₂ emisiju avotu tuvums izraudzītajai CO₂ izmantošanas vai uzglabāšanas vietai, transportējamā CO₂ daudzums un agregātstāvoklis pēc uztveršanas posma, kā arī ar transportēšanas infrastruktūras izveidi un ekspluatāciju saistītie izdevumi [160].

1.25. attēls.

Oglekļa dioksīda transportēšanas iespējas.



Koncentrētajai oglekļa dioksīda plūsmai, kas rodas CO₂ uztveršanas procesā, visā transportēšanas fāzē jāatbilst noteiktiem parametriem, kurus nosaka CO₂ transportēšanas metode. Ņemot vērā to, ka oglekļa dioksīdam ir unikālas īpašības superkritiskajā agregātstāvoklī, tā transportēšanas infrastruktūrai ir nepieciešamas arī dažādas tehniskās prasības [138].

Superkritiskais oglekļa dioksīds (sCO_2) attiecas uz oglekļa dioksīdu, kas atrodas temperatūrā un spiedienā, kuri pārsniedz kritisko punktu – virs $31,1\text{ }^\circ\text{C}$ un $7,38\text{ MPa}$ – un kur tam piemīt gan gāzes, gan šķidruma īpašības. Šajā stāvoklī CO_2 demonstrē gāzes difūzijas un viskozitātes pazīmes, vienlaikus tam piemīt augsts blīvums ($\sim 600\text{ kg/m}^3$), šķidruma šķīdības īpašības, padarot to izdevīgu dažādiem rūpnieciskiem lietojumiem, kā arī nodrošinot, ka lielāks CO_2 daudzums tiek noglabāts.

Katrai CO₂ uztveršanas tehnoloģijai piemīt atšķirīgas CO₂ plūsmas īpašības un plūsmas tīrība un līdz ar to mainās arī CO₂ superkritiskā apgabala vērtības.

Dažādu piemaisījumu (H_2 , H_2S , H_2O , CO , N_2 , O_2 , CH_4 , Ar , SO_x , u. c.) esamība CO_2 maina kritiskā punkta stāvokli un rada slēgtu divfāžu plūsmas ķēdi, apgrūtinot CO_2 saspiešanu un transportēšanu [138], [161]. Apkopojums par piemaisījumu avotiem no dažādām uztveršanas metodēm un to ietekmi uz transportēšanas posmu ir redzams 1.4. tabulā.

Lai nodrošinātu vienotas prasības CO₂ plūsmas transportēšanai un vēlāk arī iesūkņēšanai uzglabāšanas rezervuāros, ir izstrādāti vairāki ISO standarti [162].

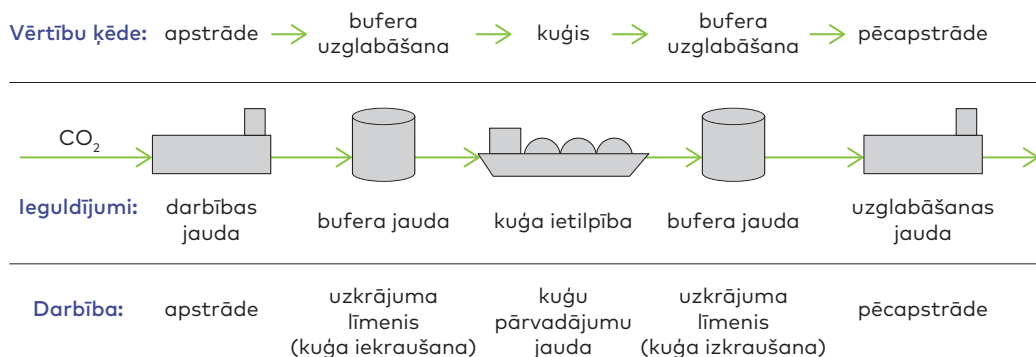
Šobrīd visizplatītākais CO₂ transportēšanas veids ir cauruļvadi, īpaši projektos, kur ir jānodrošina CO₂ plūsmas CO₂ nepārtraukta transportēšana. CO₂ transportēšanai lielos attālumos (gan pa sauszemi, gan jūru) cauruļvadi parasti ir paredzēti darbam divās dažādās fāzēs: superkritiskajā un blīvā šķidruma fāzē atkarībā no spiediena un temperatūras. Šīs fāzes nodrošina visaugstāko efektivitāti (tehniskā nodrošinājumu un izmaksu dēļ) CO₂ transportēšanai pa cauruļvadiem. Turpretī CO₂ transportēšana gāzveida fāzē pa cauruļvadiem ir tehniski iespējama, tomēr, ievērojot CO₂ zemo blīvumu,

1.4. tabula

Piemaisījumu avoti CO₂ plūsmā un ietekmes

Ietekme	Piemaisījums	CO ₂ uztveršana pēc kurināmā sadedzināšanas	CO ₂ uztveršana pirms kurināmā sadedzināšanas	CO ₂ uztveršana, kurināmo sadedzinot skābekļa vidē
Korozija	H ₂ O	Pirms saspiešanas: augsts mitruma saturs līdz 5 % no masas. Pēc saspiešanas: <2200 ppmv. Nepieciešama žāvēšana.	Atkarībā no šķīdinātāja. <600 ppmv. Papildu žāvēšana nav nepieciešama.	Augsts mitruma saturs līdz 20 % no svara atkarībā no mitruma satura kurināmajā.
Korozija un saspiešana	O ₂	Zems, <2–3 %	Zems, <2–3 %	Augsts, <5 %
Korozija un veselības un drošības riski	H ₂ S	Zems līmenis	Zems, līdz 100 ppm (atkarībā no uztveršanas metodes)	Zems līmenis
Saspiešana	N ₂	Zems, <2–3 %	Zems, <2–3 %	Augsts, <6 %
	H ₂	Zems, <2–3 %	Zems, <2–3 %	Augsts, <5 %
	Ar	Zems, <2–3 %	Zems, <2–3 %	
	CH ₄	Zems, <2–3 %	Zems, <2–3 %	Augsts, <5 %
Veselības un drošības riski	HCN			
Saspiešana	O ₂	Zems, <2–3 %	Zems, <2–3 %	Augsts, <5 %
Korozija	CO	Zems (20 ppm)	Zems (400 ppm)	Zems (50 ppm)
Veselības un drošības riski	SO ₂	Nepieciešams SO ₂ līmenis <10 ppmv, lai samazinātu amīnu zudumus.	Zems	Augsts SO ₂ atkarībā no sēra satura kurināmajā
	NO _x	Zems (<20 ppm)	Tuvu nulles līmenim	Augstāks līmenis (<100 ppm)
	Hg	Zem nosakāmiem līmeņiem	Zem nosakāmiem līmeņiem	Jānodrošina atdalīšana
	Amīni, glikols, NH ₃ , CH ₃ OH			

būtu nepieciešami liela diametra cauruļvadi [161]. Spriežot pēc līdz šim īstenotajiem projektiem, CO₂ transportēšanas pa cauruļvadiem spiediens var svārstīties no 0,5 MPa līdz 20 MPa, bet temperatūra – no -55 °C līdz 30 °C [163]. Projektējot CO₂ cauruļvadus, jāņem vērā spiediena un temperatūras profili, kā arī CO₂ fizikālās īpašības blīvās vai superkritiskās fāzēs. CO₂ piemaisījumi var ietekmēt cauruļvadu integritāti, tāpēc rūpīgi jānovērš korozijas un fāžu izmaiņu ietekme – CO₂ plūsmas tīrība, transportējot to pa cauruļvadiem, ir vismaz 96 %



1.26. attēls.

CO₂ transportēšanas pa jūru piegādes ķēdes elementi [171].

[164], [165], [166]. Cauruļvadu sistēmu izmantošana CO₂ transportēšanai ir īpaši attīstīta reģionos, kur ir pieejami gāzes un naftas vadi, kas samazina transportēšanas sistēmu infrastruktūras izveides kapitālieguldījumus [167]. CO₂ transportēšanas pa cauruļvadiem īpatnējās izmaksas var svārstīties no 0,25 EUR/t līdz 55,82 EUR/t atkarībā no transportējamā CO₂ daudzuma un attāluma [168].

Transportēšana ar kuģiem ir piemērots risinājums CO₂ transportēšanai lielos attālumos, jo īpaši gadījumos, kad cauruļvadu sistēmas nav pieejamas un CO₂ transportēšana līdz iesūkknēšanai vai izmantošanas vietai ir epizodiska. Kuģi var transportēt tīru CO₂ (CO₂ tīrības pakāpe vismaz 99,5 %) šķidrā veidā zema spiediena un zemas temperatūras apstākļos (-45 °C līdz -50 °C) [168], [169]. Ņemot vērā izvirzītos transportēšanas apstākļus, uztvertā CO₂ plūsma pirms iepildīšanas kuģos tiek apstrādāta, lai novērstu piemaisījumu klātbūtni, sašķidrināta un atdzesēta [170]. Šī iemesla dēļ CO₂ transportēšanas posms ietver ne vien pašu transportēšanu pa ūdeni, bet arī kondicionēšanas (CO₂ dehidrēšanas) posmu, buferzonu CO₂ uzglabāšanai pirms ielādēšanas kuģī, buferzonu CO₂ īstermiņa uzglabāšanai pirms iesūkknēšanas, apstrādes vai izlādes (sk. 1.26. att.).

Transportēšana pa sauszemi tiek nodrošināta pa dzelzceļu vai autoceļiem. Abi šie transportēšanas veidi bieži kļūst arī par neatņemamiem elementiem kombinētās transportēšanas sistēmās – nodrošinot piekļuvi no emisiju avota līdz ostai vai gāzes vadam. No ekonomiskā viedokļa autoceļu un dzelzceļa transporta izmantošana ir racionāla tikai mazu attālumu, pastāvošās dzelzceļa infrastruktūras gadījumos [138]. Šo transportēšanas veidu gadījumā papildus ir jāņem vērā ceļu kravnesības nosacījumi un drošības apsvērumi, atrodoties vienotos ceļu apgabalos ar sabiedriskiem transportlīdzekļiem un apdzīvoto vietu tuvumā u. c. [172].

Oglekļa dioksīda uzglabāšana pazemes rezervuāros

Ja oglekļa dioksīds netiek rūpnieciski atkārtoti izmantots, tad oglekļa dioksīda ģeoloģiskā uzglabāšana ģeoloģiskajos rezervuāros ir noslēdzošais posms oglekļa dioksīda uztveršanas un uzglabāšanas

**1.27. attēls.**

Potenciālās CO₂ ģeoloģiskās uzglabāšanas vietas.

saimniecībā. CO₂ uzglabāšanas efektivitāte ir atkarīga no dažādiem faktoriem, tostarp no piemērotu uzglabāšanas vietu izvēles, izpratnes par uzglabāšanas mehānismiem un tehnisko un ekonomisko izaicinājumu risināšanas. Šobrīd ir apzinātas četras ģeoloģisko veidojumu struktūras, kas ir piemērotas CO₂ uzglabāšanai: sālsūdens slāņu rezervuāri, naftas un gāzes rezervuāri, bazalta veidojumi un ogļu slāņkopas, kā arī okeāni [138].

Nemot vērā, ka CO₂ ģeoloģiskās uzglabāšanas nozare atrodas agrīnā attīstības stadijā, īpaši pētot CO₂ stabilitāti slāņos vai CO₂ migrācijas mehānismus, vairākās Eiropas Savienības valstīs (Somijā, Lietuvā, Vācijā, Austrijā) pastāvēja ierobežojumi šādas tehnoloģijas ieviešanai. Latvijā liegums darbojas kopš 2013. gada [173]. Tomēr pēdējo gadu laikā notiek aktīvs darbs pie normatīvo aktu izmaiņām, kas ļautu CO₂ uzglabāt Latvijas ģeoloģiskajos slāņos. Latvijā ir augsts CO₂ ģeoloģiskās uzglabāšanas ieviešanas potenciāls, jo valsts teritorijā atrodas vairāki desmiti uzglabāšanas rezervuāru jeb kolektoru – visā teritorijā izplatītie kembrija sistēmas Deimenas svītas un Cirmas slāņkopas nogulumi. Šos nogulumus veido viendabīgs smilšakmens slānis ar labām filtrācijas un ietilpības īpašībām. Turklāt tie atrodas zem necaurīdīga ordovika māla slāņa, padarot to piemērotu CO₂ uzglabāšanai [174], [175], [176]. Sākotnēji šie ģeoloģiskie rezervuāri pētīti dabasgāzes uzglabāšanai, tostarp darbībā esošā Inčukalna pazemes gāzes krātuve.

CO₂ uztveršanas, transportēšanas un uzglabāšanas tehnoloģiju attīstība Latvijā

Neskatoties uz oglekļa dioksīda uztveršanas, transportēšanas un uzglabāšanas tehnoloģiju augsto potenciālu CO₂ emisiju atmosfērā samazināšanā, tehnoloģiju izmantošanā praksē nav plaši izplatīta augsto kapitālieguldījumu, ekspluatācijas izmaksu un potenciālo vides risku dēļ. CO₂ uztveršanas, transportēšanas un uzglabāšanas

tehnoloģiju atdzimšana jeb tehnoloģiskā renesanse notika līdz ar CO₂ uztveršanas, transportēšanas un uzglabāšanas tehnoloģiju atdzimšana jeb tehnoloģiskā renesanse notika līdz ar Eiropas Parlamenta un Padomes Regulas (ES) 2024/1735 – Neto nulles emisiju industrijas akta – pieņemšanu 2024. gada jūnijā. Šis akts veicina ES klimata un enerģētikas mērķu sasniegšanu līdz 2030. gadam un pāreju uz klimatneitralitāti, vienlaikus uzlabojot rūpniecības konkurētspēju, radot augstas kvalitātes darbavietas un stiprinot ES enerģētikas autonomiju. Īpaši izaicinoši šis ir tā saucamajiem “grūti dekarbonizējamiem sektoriem” (angļu val. *hard-to-abate*), kuru darbība ir atkarīga no fosilā kurināmā un/vai energoietilpīgiem ražošanas un/vai specifiskiem tehnoloģiskiem procesiem (kuģniecība, aviācija un smagā rūpniecība, piemēram, tērauda un cementa rūpniecība). Grūti dekarbonizējamās nozares Eiropā saskata risinājumus zaļā ūdeņraža tehnoloģiju, biodegvielas un e-degvielas, tiešās gaisa uztveršanas (angļu val. *direct air capture*) tehnoloģijas, kā arī oglekļa dioksīda uztveršanas, transportēšanas un uzglabāšanas tehnoloģiju ieviešanā.

Latvijas gadījumā Neto nulles emisiju industrijas akta pieņemšana ir radījusi skaidrāku ietvaru cementa ražošanas uzņēmuma SIA “SCHWENK Latvija” jau ilgstoši īstenotajai tehnoloģiskajai attīstībai cementa ražošanas oglekļa pēdas mazināšanā. Uzņēmums ir vienīgais cementa ražotājs Latvijā un savas darbības rezultātā rada ~ 8 % Latvijas CO₂ emisiju, 2/3 no emisijām radot ķīmiskā procesā kaļķakmens apdedzināšanas laikā. 2024. gada novembrī uzņēmums paziņoja par Brocēnu cementa rūpnīcas dekarbonizāciju, izmantojot CO₂ uztveršanas tehnoloģijas un kļūstot par pirmo uzņēmumu Latvijā, kas ieviesīs CO₂ uztveršanas tehnoloģijas. Plānots, ka no 2025. gada pavasara līdz decembrim CO₂ uztveršanas tehnoloģijas strādās pārbaudes režīmā, uztverot aptuveni divas tonnas CO₂ dienā, bet pilna mēroga oglekļa uztveršana Brocēnu cementa rūpnīcā uzsāksies ar 2030. gadu, sasniedzot aptuveni 800 tūkstošus tonnu uztvertā CO₂ gadā un tiecoties uz pilnīgu cementa ražošanas dekarbonizāciju nākotnē. Šobrīd “SCHWENK Latvija” kopā ar sadarbības partneriem apzina un pēta piemērotākās uztvertā CO₂ ģeoloģiskās uzglabāšanas iespējas un tālākas izmantošanas iespējas jaunu produktu radīšanā.

1.4. Klimata pārmaiņu mazināšanas ilgtspējas vērtējums enerģētikas sektorā

Klimata pārmaiņu mazināšana ir viens no galvenajiem mērķiem ilgtspējīgas attīstības kontekstā, un enerģētikas sektoram šajā procesā ir īpaši nozīmīga loma. Enerģijas ražošana un patēriņš joprojām ir galvenie SEG emisiju avoti gan globālā, gan reģionālā līmenī.

Lai veicinātu pāreju uz klimatneitrālu un ilgtspējīgu energoapgādi, ir būtiski izvērtēt, cik lielā mērā ieviestās vai plānotās tehnoloģijas, politikas un risinājumi veicina vides, sociālo un ekonomisko ilgtspēju [177].

1.4.1. ANO Ilgtspējas attīstības mērķi enerģētikas sektorā

Apvienoto Nāciju Organizācijas Ilgtspējīgas attīstības mērķi (IAM) sniedz strukturētu pieeju, kas palīdz valstīm un reģioniem izvērtēt un integrēt ilgtspējas principus dažādās nozarēs, tostarp enerģētikā. Īpaša uzmanība tiek pievērsta mērķiem, kas saistīti ar pieejamu un ilgtspējīgu enerģiju (IAM 7), rīcību klimata jomā (IAM 13), kā arī ar rūpniecības attīstību, inovācijām un infrastruktūru (IAM 9). Enerģētikas infrastruktūras modernizācija un jaunu tehnoloģiju ieviešana ir cieši saistīta ar pāreju uz ilgtspējīgāku ražošanu un patēriņu (IAM 12), kā arī ar ilgtspējīgas pilsētvides veidošanu (IAM 11), nodrošinot energoefektīvus risinājumus ēkās, transportā un komunālajos pakalpojumos [178].

Ilgtspējas vērtējums enerģētikas sektorā kalpo kā instruments, lai noteiktu, kā izvēlētie risinājumi ietekmē klimata mērķu sasniegšanu, kā tie saskan ar ekonomiskās attīstības un sociālās labklājības nodrošināšanu, un cik lielā mērā tie atbilst globālajiem ilgtspējas standartiem.

ANO ilgtspējīgas attīstības mērķis – atjaunojamā enerģija

Uz enerģētikas sektoru vistiešāk attiecas ANO Ilgtspējas attīstības mērķis Nr. 7, kas saistīts ar pieejamu un tīru enerģijas nodrošināšanu

1.28. attēls.

Apvienoto Nāciju Organizācijas Ilgtspējīgas attīstības mērķi enerģētikas sektorā [179].



ikvienam, līdz 2023. gadam pasaules iedzīvotājiem nodrošinot piekļuvi uzticamai, ilgtspējīgai un mūsdienīgai enerģijai. Lai arī enerģija šajās dienās ir vispārzināms jēdziens un pašsaprotami, ka ikvienā mājsaimniecībā, ražotnē vai patērētājs ik dienas var patērēt kādu noteiktu daudzumu enerģiju, statistika rāda, ka progress šajā jomā ir nepietiekams un dažās pasaules vietās pat bremzējoša rakstura. Iemesls enerģijas nepietiekamībai ir saistīts ar globālo krīzi, piemēram, *Covid-19* pandēmiju un karu Ukrainā, kas ir būtiski ietekmējuši elektroapgādes pieejamību un investīciju dinamiku šajā sektorā, īpaši attīstības valstīs [180].

ANO IAM 7 mērķi iedalīti vairākos apakšmērķos, un tie saistīti ar vispārēju piekļuvi elektroenerģijai un tīrai ēdiena pagatavošanai, atjaunojamās enerģijas īpatsvars kopējā enerģijas gala patēriņā, energoefektivitātes uzlabojumi, finansiāls atbalsts attīstības valstīm tīras enerģijas attīstībai un atjaunojamās enerģijas jaudas palielināšana.

2022. gadā piekļuve elektroenerģijai un tīrai ēdiena pagatavošanai globāli bija pieejama 91 % pasaules iedzīvotāju, tomēr tendences un atsevišķi ģeopolitiskie aspekti ietekmē to, ka līdz 2030. gadam 660 miljoniem cilvēku joprojām nebūs piekļuves elektrībai, bet 1,8 miljardiem – tīrai ēdiena gatavošanai [180].

Atjaunojamās enerģijas īpatsvars kopējā enerģijas galapatēriņā 2021. gadā sasniedza 18,7 %. Elektroenerģijas sektorā atjaunojamo energoresursu daļa bija 28,2 %, taču progresu būtiski kavē zema atjaunojamās enerģijas integrācija siltumapgādes un transporta sektoros. Līdz ar to ir nepieciešama mērķtiecīga rīcība, tostarp atbalsta stiprināšanā gan normatīvā, gan politiskā līmenī. Liela nozīme ir arī uzkrāšanas tehnoloģiju izmantošanai, kas ļautu labāk izmantot atjaunojamās energoresursus un līdzsvarot piedāvājumu ar pieprasījumu [180].

Starptautiskā finanšu plūsma tīras enerģijas ieviešanai attīstības valstīs 2022. gadā sasniedza 15,4 miljardus ASV dolāru, atpaliekot no 2016. gada līmeņa, un prognozētais samazinājums 2023. gadā apdraud IAM7 mērķa sasniegšanu, īpaši mazāk attīstītajās valstīs. Tajā pašā laikā atjaunojamās enerģijas jaudas pasaulē turpina pieaugt par aptuveni 8,1 % gadā, bet, lai šis pieaugums turpinātos un būtu ilgtspējīgs, ir nepieciešama arī infrastruktūras attīstība, tostarp enerģijas uzkrāšanas risinājumi, lai nodrošinātu sistēmu elastību un nepārtrauktību [180].

Enerģētikas sektors spēlē nozīmīgu lomu IAM7 mērķa sasniegšanā. Lai nodrošinātu ilgtspējīgu un visiem pieejamu enerģiju, jāuzlabo energoefektivitāte, straujāk jāintegrē atjaunojamie energoresursi visos sektoros, jāveicina decentralizēti energoapgādes risinājumi (piemēram, jāveido energocentri, kopienas) un jānodrošina stabils finansējums, lai sekmētu enerģētikas sektora attīstību. Enerģijas uzkrāšanas tehnoloģijas un citi elastīgi risinājumi kļūs

par nozīmīgu instrumentu energoefektīvas un ilgtspējīgas sistēmas veidošanā.

Latvijas gadījumā IAM 7 īstenošana notiek, balstoties Nacionālajā enerģētikas un klimata plānā 2021.–2030. gadam, kurā paredzēti pasākumi atjaunojamās enerģijas izmantošanas un energoefektivitātes veicināšanai, energodrošības stiprināšanai un enerģētikas inovāciju ieviešanai. Ir atbalstīta atjaunojamo energoresursu tehnoloģiju izmantošana mājāsaimniecībās un rūpniecībā, uzlabota ēku energoefektivitāte, attīstīta transporta elektrifikācija un uzlādes infrastruktūra. Līdz 2027. gadam plānots veicināt enerģijas pašaizpildes, atbalstīt emisiju mazināšanu transportā un ēkās, attīstīt atkrastes vēja projektus, kā arī stiprināt reģionālo ekonomiku pāreju uz klimatneitralitāti. Politikas ieviešanu atbalsta arī stratēģiskie dokumenti, tostarp klimatneitralitātes stratēģija līdz 2050. gadam un Ēku atjaunošanas ilgtermiņa stratēģija. Šajā mērķu kategorijā Latvija starp citām pasaules valstīm uzrāda virzību uz ilgtspējīgu attīstības mērķu sasniegšanu vai to saglabāšanu [181], [182].

ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķis – ražošana, inovācijas un infrastruktūra

Globālā mērogā progress virzībā uz IAM 9 mērķiem, tostarp enerģētikas sektora kontekstā, ir nevienmērīgs. Pēc spēcīgas atgūšanās 2021. gadā ražošanas sektora izaugsme kopš 2022. gada ir stagnējusi ģeopolitisko satricinājumu, inflācijas un pieaugošo enerģijas izmaksu dēļ, kas kavē arī “zaļās” (*green transition*) pārkārtošanās tempu. Kaut arī CO₂ intensitāte ražošanā no 2015. līdz 2021. gadam samazinājās par 16 %, kopējās emisijas turpina pieaugt, sasniedzot rekordlīmeni 2021. gadā, kas norāda, ka energoefektivitātes uzlabojumi un pāreja uz tīru enerģiju vēl nav pietiekami strauji. Lielas atšķirības pastāv arī reģionālā līmenī – attīstītās valstis ievērojami apsteidz mazattīstītās gan ražošanas jaudas ziņā, gan pētniecības un inovāciju potenciālā. Lai panāktu būtisku izrāvienu, īpaši enerģētikas nozarē, ir mērķtiecīgi jāiegulda mazoglekļa tehnoloģijās, jāuzlabo energoefektivitāte, jānodrošina maziem uzņēmumiem piekļuve finansējumam un jāattīsta augsto tehnoloģiju rūpniecība [180].

Attiecībā uz IAM 9 (ilgtspējīgas industrializācijas, inovāciju un infrastruktūras veicināšana) attīstību Latvijā enerģētikas sektorā būtiska nozīme ir atbalstam jaunu produktu un tehnoloģiju izstrādei, īpaši energoefektīvu un videi draudzīgu risinājumu ieviešanā ražošanā un infrastruktūrā. Ir attīstīta pētniecības un attīstības infrastruktūra viedās specializācijas jomās, tostarp enerģētikā, kas sekmē inovatīvu tehnoloģiju izstrādi un ieviešanu. Turpmākie mērķi ietver arī integrētas, ilgtspējīgas transporta sistēmas attīstību ar dzelzceļu kā videi draudzīgu alternatīvu, kā arī atbalstu digitalizācijai un inovācijām, kas veicina energoefektivitāti uzņēmējdarbībā. Šie pasākumi kopumā veicina gan energoefektīvas infrastruktūras

attīstību, gan pāreju uz klimatneitrālu tautsaimniecību. Pēc jaunākā ilgtspējas novērtējuma attiecībā uz ilgtspējīgas attīstības mērķiem IAM 9 galvenie izaicinājumi Latvijā saglabājas un mēreni pieaug, īpaši attiecībā uz inovāciju kapacitāti un reģionālo infrastruktūras līdzsvarotību [182], [183].

ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķis – ilgtspējīgas pilsētas un kopienas

Pasaulē vairāk nekā puse iedzīvotāju dzīvo pilsētās, un līdz 2050. gadam šis īpatsvars palielināsies līdz gandrīz 70 %. Tomēr pilsētas saskaras ar pieaugošiem izaicinājumiem – no augošas nabadzības, graustu izplatības un sabiedriskā transporta pieejamības trūkuma līdz kritiskās infrastruktūras apdraudējumam un pakalpojumu pārtraukumiem katastrofu dēļ. 2022. gadā 24,8 % pilsētu iedzīvotāju dzīvoja graustos vai tam pielīdzināmos apstākļos (pieaugums kopš 2015. gada. Tikai sešiem no desmit pasaules pilsētu iedzīvotājiem ir piekļuve sabiedriskajam transportam, bet pilsētas turpina izplesties ātrāk, nekā tās kļūst blīvāk apdzīvotas, ietekmējot dabu. Katru gadu vidēji tiek iznīcināti vai bojāti vairāk nekā 100 000 infrastruktūras objektu un traucēti 1,6 miljoni pamatpakalpojumu. Vienlaikus ir vērojami uzlabojumi gaisa kvalitātē un riska pārvaldības stratēģiju ieviešanā vietējā līmenī [180].

Latvijā mērķa IAM 11 kontekstā tiek īstenoti pasākumi, lai padarītu pilsētas un apdzīvotas vietas iekļaujošas, drošas, noturīgas un ilgtspējīgas. Turpinās dzīvojamo ēku energoefektivitātes uzlabošana, noteiktas minimālās prasības ēkām, paplašināts mājokļu atbalsts ģimenēm, tostarp plānots attīstīt zemu izmaksu īres mājokļus. Administratīvi teritoriālā reforma un reģionālās stratēģijas veicina līdzsvarotu attīstību, bet iedzīvotāju iesaiste tiek stiprināta ar sabiedrības līdzdalības budžetu un iedzīvotāju padomēm.

Videi draudzīga attīstība tiek nodrošināta ar regulāru gaisa kvalitātes monitoringu, atkritumu šķirošanas uzlabošanu un ilgtspējīgas vides politikas dokumentu ieviešanu. Nākotnes iecerēs ietilpst arī sociālo mājokļu fonda atjaunošana, sabiedriskā transporta sistēmas vienkāršošana un katastrofu datu pārvaldības uzlabošana. Pēc ilgtspējas novērtējuma šajā kategorijā saistībā ar IAM 11 mērķiem secināts, ka izaicinājumi saglabājas, taču tiek turpināta to risināšana ar dažādiem politikas un praktiskiem instrumentiem [182], [184].

ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķis – atbildīgs patēriņš un ražošana

ANO IAM 12 iezīmē ilgtspējīgu patēriņu un ražošanu un ir cieši saistīts ar enerģētikas sektoru, jo šī nozare ir viena no galvenajām dabas resursu un fosilā kurināmā patērētājām, kā arī atbild par būtisku daļu no SEG emisijām. Energoietilpīgās ražošanas un patēriņa sistēmas veicina planētas trīskāršo krīzi – klimata pārmaiņas,

bioloģiskās daudzveidības samazināšanos un piesārņojumu. Vienlaikus IAM 12 iezīmē iespējas samazināt resursu un enerģijas patēriņu visos ražošanas posmos, virzoties uz aprites ekonomiku un inovācijām energoefektivitātē.

Dati liecina, ka iekšzemes materiālu patēriņš un materiālu pēda kopš 2015. gada pieaug, pārtikas atkritumu un e-atkritumu apjoms ir milzīgs, bet tikai neliela daļa tiek pienācīgi apsaimniekota. Tajā pašā laikā fosilā kurināmā subsīdijas kopš 2015. gada ir trīskāršojušās, sasniedzot 1,53 triljonus USD 2022. gadā, būtiski kavējot pāreju uz klimatneitrālu enerģētiku. Lai gan valstis ievieš ilgtspējas politikas un uzņēmumi arvien biežāk publicē ilgtspējas ziņojumus, progress ir nevienmērīgs un būtiski izaicinājumi saglabājas.

Enerģētikas sektoram šis mērķis rada pienākumu ne tikai optimizēt resursu patēriņu un veicināt tīras tehnoloģijas, bet arī pārskatīt finansējuma plūsmas, pārtraucot fosilā kurināmā atbalstu un pārorientējot ieguldījumus uz ilgtspējīgu enerģiju. Katrs enerģētikas infrastruktūras un produktu dzīves cikla posms ir iespēja ieviest efektīvākas, klimatam un videi draudzīgākas pieejas [180].

Latvija ir apņēmusies virzīties uz klimatneitrālu ekonomiku, samazinot cilvēka radīto ietekmi uz vidi un atbildīgi apsaimniekojot dabas resursus. Šis apņemšanās skaidri sasaistās ar enerģētikas sektoru, kurš ir viens no galvenajiem emisiju un resursu patēriņa avotiem. Tiek īstenoti būtiski pasākumi – gan vides politikas līmenī, gan praktiskā darbībā –, kas veicina ilgtspēju un atbildīgu resursu izmantošanu arī enerģētikas nozarē. Tas ietver zaļo publisko iepirkumu, valsts kapitālsabiedrību pienākumu ziņot par vides un ilgtspējas aspektiem, kā arī inovāciju un aprites risinājumu attīstību.

Īpaši būtisks ir Nacionālais enerģētikas un klimata plāns 2021.–2030. gadam, kas sasaista IAM 12 ar enerģētikas politiku, paredzot efektīvāku resursu izmantošanu, emisiju samazinājumu un pāreju uz atjaunīgajiem energoresursiem. Enerģētikas sektors tiek iesaistīts arī aprites ekonomikas virzienā, piemēram, resursu produktivitātes uzlabošanā, sadarbības platformu izveidē reģionos, un atkritumu samazināšanā, kas saistās ar enerģijas ražošanas blakusproduktiem. Valsts virzība uz bioloģisko atkritumu apsaimniekošanas sistēmas ieviešanu un depozīta sistēmu palīdz ne tikai samazināt vides piesārņojumu, bet arī radīt sinerģiju ar enerģijas ražošanu no atkritumiem.

Tādējādi Latvijā IAM 12 tiek īstenots ar ciešu sasaisti ar enerģētikas sektoru: gan politikas plānošanā, gan praktisku instrumentu ieviešanā, vienlaikus veicinot arī sabiedrības izpratni un ilgtspējīgu izvēļu pieprasījumu. Šajā mērķu kategorijā Latvijai joprojām pastāv lielas problēmas un stagnācija [182], [185].

ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķis – rīcība klimata jomā

2023. gadā tika pārspēti visi līdz šim reģistrētie klimata rādītāji – pasaules vidējā temperatūra sasniedza 1,45 °C, kas ir bīstami

tuvu Parīzes nolīguma noteiktajai 1,5 °C robežai. Klimata krīze ik dienas skar miljoniem cilvēku, tostarp pieaug ekstrēmu laikapstākļu izraisītu katastrofu biežums un ietekme. Šī realitāte uzsvēr nepieciešamību pēc tūlītējas un mērķētas rīcības enerģētikas sektorā, lai samazinātu SEG emisijas un virzītos uz klimatneitrālu enerģētikas sistēmu [180].

Lai sasniegtu neto nulles emisiju līmeni līdz 2050. gadam, ir jāveicina [180]:

- pāreja no fosilajiem uz atjaunīgajiem energoresursiem;
- energoefektivitātes paaugstināšana visās tautsaimniecības nozarēs;
- enerģijas uzkrāšanas tehnoloģiju attīstība;
- plaša mēroga investīcijas viedajās energosistēmās.

Pēc jaunākajiem datiem, SEG emisiju koncentrācija atmosfērā turpina pieaugt, neskatoties uz attīstīto valstu emisiju mazināšanos, un CO₂ līmenis jau pārsniedz pirms industriālo laikmetu par 150 %. Tas nozīmē, ka globālā enerģētikas sistēma vēl nav pielāgojusies klimata mērķiem, un nepieciešami daudz ambiciozāki pasākumi, lai izvairītos no klimata krīzes saasināšanās.

Klimata politikas integrācija kļūst arvien plašāka – 129 valstis, tostarp ES dalībvalstis, ir izstrādājušas valsts līmeņa stratēģijas katastrofu riska mazināšanai, kurās ietverta arī saskaņošana ar Parīzes nolīgumu un ilgtspējas mērķiem. Tas nozīmē, ka enerģētikas politikas plānošana arvien biežāk tiek pakārtota klimata mērķiem, iekļaujot risku mazināšanas, pielāgošanās un pārejas aspektus.

Tajā pašā laikā klimata izglītība vēl ir nepietiekama – tikai trešdaļa pasaules mācību programmu piemin klimata pārmaiņas vai ilgtspēju. Tas norāda uz nepieciešamību stiprināt izpratni par klimatrīcību enerģētikas izglītībā, īpaši inženierzinātnēs un profesionālajā izglītībā, lai sagatavotu speciālistus pārejai uz ilgtspējīgu enerģētiku [180].

Klimata finansējums, kas paredzēts pārejai uz ilgtspējīgām sistēmām, tostarp enerģētikā, vēl joprojām ir nepietiekams – 2021. gadā sasniegti tikai aptuveni 90 % no solītajiem 100 miljardiem USD. Tas kavē attīstības valstu iespējas ieviest tīras enerģijas risinājumus, tāpēc nākotnes uzdevums ir uzlabot finansējuma mobilizēšanu, arī Latvijā, piemēram, izmantojot ES fondu un “zaļā finansējuma” mehānismus [180].

Latvija, tāpat kā citas ES dalībvalstis, ir apņēmusies samazināt SEG emisijas vismaz par 55 % līdz 2030. gadam, salīdzinot ar 1990. gada līmeni, un sasniegt klimatneitralitāti līdz 2050. gadam. Šie mērķi ir iekļauti vairākos stratēģiskos dokumentos, piemēram, Nacionālajā enerģētikas un klimata plānā 2021.–2030. gadam, kā arī Klimatneitralitātes stratēģijā līdz 2050. gadam. Šīs apņemšanās tieši ietekmē Latvijas enerģētikas sektoru, nosakot prioritātes

energoefektivitātes uzlabošanā, pārejā uz atjaunojamajiem energoresursiem un energoapgādes drošības stiprināšanā [186].

Saskaņā ar apakšmērķiem Latvija ir veikusi būtiskus pielāgošanās pasākumus, lai mazinātu klimata pārmaiņu ietekmi uz tautsaimniecību, tostarp enerģētikas sektoru. Ir veikts plūdu riska novērtējums, apstiprināts Valsts civilās aizsardzības plāns un uzlabota agrinās brīdināšanas sistēma. Šie pasākumi ir nozīmīgi arī enerģētikas infrastruktūras aizsardzībai pret ekstremāliem laikapstākļiem, piemēram, spēcīgām vētrām, karstuma viļņiem un lieta-vām, kas var radīt apdraudējumu energopiegādēm [186].

Klimata mērķi Latvijā ir skaidri integrēti nacionālajās politikās. Enerģētikas sektorā tas nozīmē atbalstu atjaunojamās enerģijas attīstībai, tostarp saules un vēja enerģijai, kā arī biomasas un biogāzes izmantošanai. Vienlaikus notiek aktīva ēku siltināšanas programma, lai samazinātu enerģijas zudumus un emisijas apkures sektorā. Tiek stiprināta arī enerģijas tirgus infrastruktūra un veicināti ieguldījumi viedajās tehnoloģijās, digitalizācijā un inovācijās, kas palīdzēs panākt energoefektīvāku un noturīgāku energosistēmu [186].

Latvija veicina sabiedrības izpratni par klimata pārmaiņām un to ietekmi. Tiek rīkotas informatīvas kampaņas, stiprināta klimata izglītība, kā arī attīstīts tiešsaistes klimata pārmaiņu portāls *klimatam.lv*, kas piedāvā piekļuvi datiem un prognozēm. Šāda pieeja veicina informētu lēmumu pieņemšanu arī enerģētikas nozarē – gan pašvaldību līmenī, plānojot siltumapgādi un infrastruktūras attīstību, gan uzņēmumiem, investējot klimatneitrālos risinājumos [186].

Jāatzīmē, ka Latvija ir uzsākusi Klimata likuma izstrādi, kas kalpos kā ietvarlikums visiem ar klimatu saistītajiem pasākumiem, tostarp enerģētikas politikai. Turpinās arī investīcijas klimatneitralitāti veicinošos projektos – ēku renovācijā, elektromobilitātē, atjaunojamo energoresursu izmantošanā, kā arī reģionālajā zaļajā transformācijā. Tas apliecina, ka IAM 13 īstenošana Latvijā cieši saistās ar mērķtiecīgu enerģētikas sektora pārveidi uz ilgtspējīgiem un klimatnoturīgiem pamatiem. Šajā mērķu kategorijā Latvijā joprojām pastāv problēmas un stagnācija [182], [186].

Klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumu ilgtspējas vērtējums ir būtisks, lai nodrošinātu līdzsvarotu attīstību visos aspektos – vides, sociālajā un ekonomiskajā. ANO IAM kalpo kā strukturēta sistēma, kas palīdz orientēties un noteikt prioritātes enerģētikas transformācijā.

1.4.2. Ilgtspējas novērtējums reģionālajā līmenī

Ilgtspējīga attīstība ir viens no ES pamatuzdevumiem. Ir pagājuši jau vairāk nekā 20 gadi, kopš tā tika iekļauta Amsterdamas līgumā kā vispārējs ES politikas mērķis. ES definē ilgtspējīgu

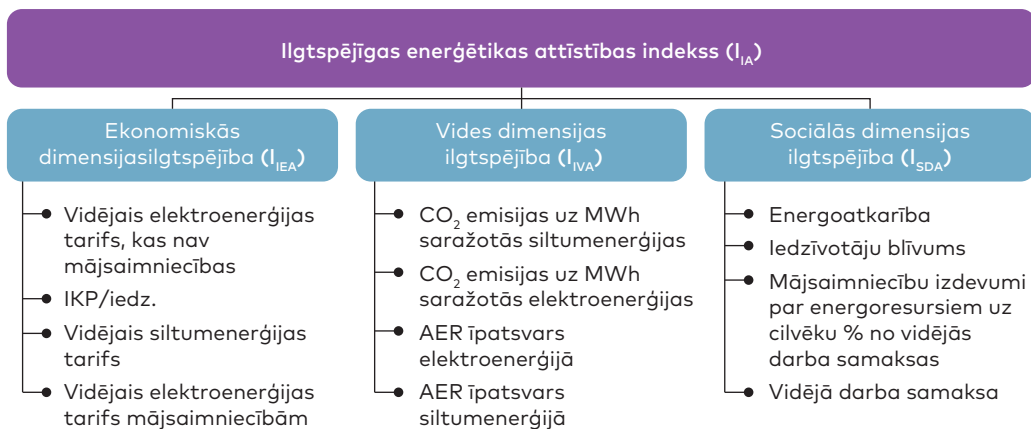
attīstību kā attīstību, kuras pamatā ir līdzsvarota ekonomikas izaugsme un cenu stabilitāte, konkurētspējīga sociālā tirgus ekonomika, kuras mērķis ir pilnīga nodarbinātība un sociālais progress, kā arī augsta līmeņa vides aizsardzība un vides kvalitātes uzlabošana [187]. Pieaugot likmēm klimata pārmaiņu jomā, ES ir saskatījusi vajadzību pēc aktīvākas rīcības un izstrādājusi jaunu stratēģiju – Eiropas zaļo kursu. Šī kursa mērķis ir padarīt Eiropas ekonomiku klimatneitrālu, neaizmirstot arī sociālo un ekonomisko ilgtspējības dimensiju – uzlabot iedzīvotāju dzīves kvalitāti pasargājot cilvēku dabisko dzīves vidi [14]. Viens no četriem Eiropas zaļā kursa fokusa punktiem ir enerģētikas sektors. Pašreiz enerģijas ražošana un izmantošana veido vairāk nekā 75 % no ES radītajām SEG emisijām. Enerģijas sektors konsekventi ir būtisks klimata pārmaiņu mazināšanas un vides politikas spēka pielikšanas punkts arī Latvijā.

Ne tikai Eiropas zaļais kurss virza uz ilgtspējību attīstību, bet arī valstiskā līmenī ir plānošanas dokuments, kas paredz virzību uz ilgtspējīgu attīstību. Lai sasniegtu ilgtermiņa mērķi ir izvirzīti uzdevumi, kas paredz veicināt resursu efektīvāku izmantošanu un samazināt fosilo un neilgtspējīgu resursu lietošanu, vienlaicīgi ieviešot atjaunojamu un inovatīvu resursu izmantošanu un pieejamību visām sabiedrības grupām. Plāns paredz arī stimulēt pētniecību un inovāciju, kas sekmētu iepriekš minēto uzdevumu īstenošanu.

Kā jau iepriekš minēts, tad viens no svarīgiem ANO Ilgtspējas attīstības mērķiem, kas raksturo enerģētikas sektora virzību uz ilgtspēju, ir ekonomiski pieejama un tīra enerģija. Mērķi tiek arī saistīti ar specifiski raksturojošiem indikatoriem. Šie indikatori izmantojami nacionālā mērogā, taču attīstība visā valstī nenotiek vienmērīgi, piemēram, ir acīmredzami, ka Latvijā ekonomiskā un sociālā aktivitāte koncentrējas Rīgā un Pierīgā. ES mērogā viena no galvenajām iniciatīvām, kas koncentrējas uz reģionu atbalstu

1.29. attēls.

Ilgtspējīgas enerģētikas attīstības indekss.



un iesaistīšanu klimata pārmaiņu mērķu sasniegšanā ir Pilsētas mēru pakts. Tā mērķis ir apgādāt pilsētas ar metodikām un rīkiem, kas nepieciešami pilsētas ilgtspējīgas enerģētikas rīcības plānu izveidei.

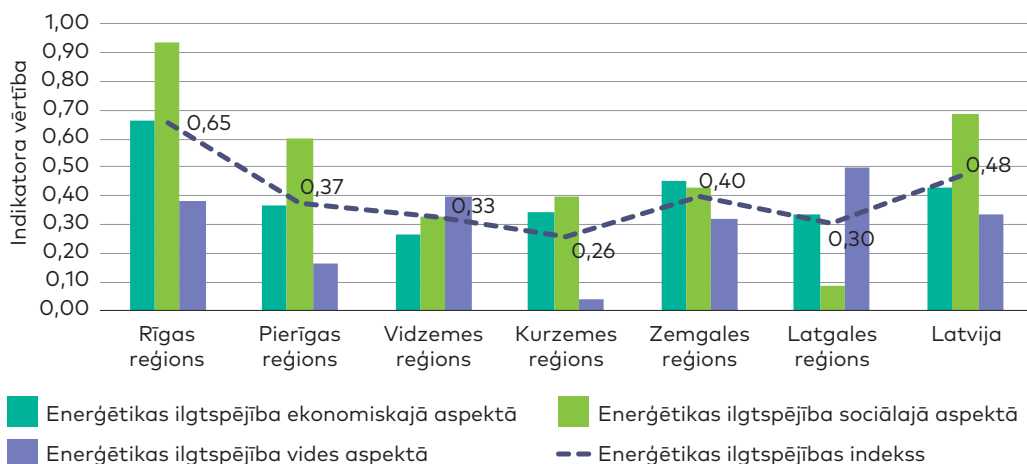
Valsts līmenī tiek plānoti pasākumi, kas virzīs tautsaimniecību uz ilgtspējīgu attīstību. Vienotais enerģētikas ilgtspējīgas attīstības indekss apvieno trīs galveno ilgtspējības aspektu indikatorus. Reģionālās ilgtspējas novērtēšanai arvien biežāk lieto vienoto enerģētikas ilgtspējas attīstības indeksu, kas integrē trīs būtiskākos ilgtspējības aspektus: vides kvalitāti, sociālo labklājību un ekonomisko attīstību. Šāda pieeja ļauj ne vien identificēt reģiona virzību uz videi draudzīgāku energoapgādi, bet arī novērtēt iedzīvotāju dzīves kvalitāti un vietējās ekonomikas noturību [188], [189].

Reģionu raksturojumam katrā ilgtspējas dimensijā iespējams izvēlēties atbilstošākos indikatorus, ņemot vērā konkrētā novērtējuma mērķi un datu pieejamību. Šajā gadījumā ekonomiskā aspekta novērtēšanai izmantoti tādi rādītāji kā iekšzemes kopprodukts (IKP), IKP uz vienu iedzīvotāju, vidējais elektroenerģijas un siltumenerģijas tarifs mājāsaimniecībām. Vides aspektu raksturo indikatori, kas atspoguļo enerģijas ražošanas ietekmi uz vidi, tostarp CO₂ emisijas uz vienu MWh saražotās elektroenerģijas un siltumenerģijas, kā arī atjaunojamo energoresursu īpatsvars enerģijas ražošanā. Sociālās dimensijas novērtējumā iekļauti tādi rādītāji kā reģiona energoatkarības pakāpe, iedzīvotāju skaits un blīvums, mājāsaimniecību izdevumi par energoresursiem kā daļa no vidējās darba samaksas, kā arī pati vidējā darba samaksa.

Izmantojot atlasītos indikatorus, noteiktas vērtības izvēlētajās aspektu kategorijās un aprēķināts ilgtspējīgas enerģētikas attīstības indekss.

1.30. attēls.

Enerģētikas ilgtspējības indikators un tā komponentes Latvijas statistiskās plānošanas reģionos [190].



1.30. attēlā parādīts enerģētikas ilgtspējības novērtējums Latvijas reģionos, ņemot vērā trīs galvenos ilgtspējas aspektus – ekonomisko, sociālo un vides –, kā arī aprēķinot kopējo enerģētikas ilgtspējības indeksu. Visaugstākais kopējais indekss ir Rīgas reģionā (0,65), ko veido augsti rādītāji gan ekonomiskajā, gan sociālajā dimensijā, lai gan vides aspekts ir salīdzinoši zemāks. Arī Pierīgas reģionam ir augsti ekonomiskie un sociālie rādītāji, taču zems vides aspekta novērtējums, kā rezultātā kopējais indekss sasniedz tikai 0,37. Vidzemes un Kurzemes reģioniem raksturīgi zemi rādītāji visos aspektos, un Kurzemē kopējais enerģētikas ilgtspējas indekss ir zemākais – tikai 0,26. Zemgales reģionā ir vērojams līdzsvarots sniegums, īpaši izceļoties ar augstāko vides aspekta rādītāju (0,40), kas veido salīdzinoši labu kopējo ilgtspējas līmeni (0,40). Savukārt Latgales reģionam raksturīgs zems ekonomiskais un sociālais novērtējums, bet augstāks vides aspekts, kas liecina par potenciāli “zaļāku” enerģētikas struktūru, tomēr kopējais indekss ir tikai 0,30. Valsts vidējais indekss (0,48) norāda uz kopumā mērenu, taču nevienmērīgu ilgtspējas līmeni starp reģioniem.

Vienotais enerģētikas ilgtspējas attīstības indekss apvieno trīs galvenās ilgtspējas dimensijas – vides, sociālo un ekonomisko –, izmantojot šo kategoriju atbilstošus indikatorus. Šāda pieeja ļauj izveidot salīdzinošu kopējo rādītāju, kas atspoguļo ne tikai reģiona “zaļumu” jeb vides ilgtspēju, bet arī iedzīvotāju labklājības un ekonomiskās attīstības līmeni.

Analizējot rezultātus, redzams, ka Rīgas reģions būtiski pārsniedz Latvijas vidējo enerģētikas ilgtspējas indeksu. Jāņem vērā, ka galarezultātus lielā mērā ietekmē izvēlēto indikatoru specifika un pieejamība reģionālā griezumā. Indekss ļauj veidot ne tikai vispārēju priekšstatu par reģionu kopējo ilgtspējas līmeni, bet arī analizēt katru ilgtspējas aspektu atsevišķi, sniedzot dziļāku ieskatu stiprajās un vājajās pusēs.

1.4.3. Dzīves cikla analīze kā instruments ilgtspējas novērtēšanai

Ilgtspējīgas siltumapgādes risinājumi Eiropas līmenī ir attīstījušies vairāku desmitu gadu garumā. Būtiska nozīme tajos ir atjaunojamo energoresursu pieaugošai izmantošanai centralizētajā siltumapgādē, kas ļauj būtiski samazināt fosilo resursu izmantošanu un oglekļa emisijas. Pētījumi liecina, ka šāda pāreja var samazināt apkures un dzesēšanas izmaksas līdz pat 15 %, kas ES līmenī gadā nozīmē ap 100 miljardu EUR ietaupījumu. Līdztekus atjaunojamo energoresursu ieviešanai, nozīmīgs izaicinājums ir arī zemas temperatūras centralizētās siltumapgādes sistēmu (CSS) attīstība [191].

Zemas temperatūras CSS ir īpaši svarīgas nākotnes viedajās enerģijas sistēmās, jo tās ļauj samazināt siltuma zudumus, efektīvāk izmantot rūpniecisko atlikumsiltumu, veicināt elektroenerģijas tīkla balansēšanu un nodrošināt ekonomiskus ieguvumus, ja tās tiek pareizi ieviestas. Piemēram, Helsinku gadījuma izpētē secināts, ka, pazeminot sistēmas padeves temperatūru no 80–110 °C līdz konstantai 65 °C, iespējams panākt izmaksu un emisiju samazinājumu līdz pat 4 %. Agrākie novērtējumi liecina, ka siltuma zudumi zemas temperatūras CSS var būt līdz pat 75 % mazāki nekā vidējas temperatūras sistēmās. Papildu ieguvumi ir mazāka materiālu termiskā slodze, iespēja efektīvi izmantot siltuma akumulāciju un paaugstināt elektroenerģijas ieguvu tvaika koģenerācijas stacijās [191].

Tomēr, lai ieviestu šādas zemas temperatūras sistēmas, ir būtiski nodrošināt klientu siltummezglu pareizu darbību bez temperatūras kļūdām, kā arī nepārtrauktu uzraudzību un regulēšanu. Jaunākās automatizētās mērījumu sistēmas būtiski uzlabo kļūdu noteikšanu, padarot to ātrāku un lētāku, kas sekmē efektīvāku sistēmu darbību. Tādējādi zemas temperatūras CSS atbilst vispārējiem ilgtspējības kritērijiem, taču to interpretācija var atšķirties atkarībā no politikas plānošanas un lēmumu pieņemšanas vajadzībām [191].

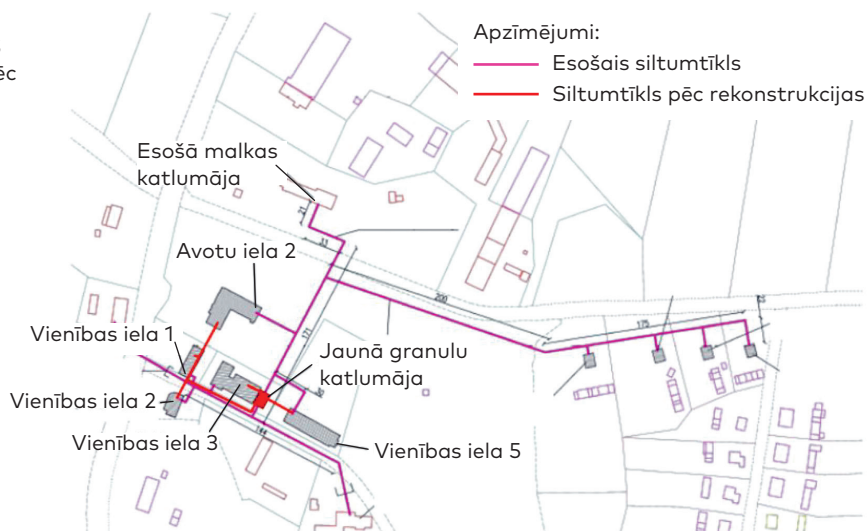
Šī imeosla dēļ īpaša uzmanība tiek pievērsta dažādu siltumapgādes sistēmu ilgtspējas un vides ietekmes novērtēšanas pieejām, izceļot dzīves cikla novērtējuma (*LCA*) metodi kā instrumentu videi draudzīgāko risinājumu identificēšanai zemas temperatūras siltumapgādes attīstībā pašvaldību līmenī [191].

Lai izvērtētu dažādu siltumapgādes attīstības scenāriju ietekmi uz vidi, izmantota dzīves cikla novērtējuma (*LCA*) metode, kas balstīta ISO 14044 standartā. Balstoties *LCA* pieejā siltumapgādei, izvērtēts pilotprojekts zemas temperatūras centralizētās siltumapgādes ieviešanai Gulbenes novada Beļavas pagastā. Pilotprojektā veikta esošās siltumtīkla sistēmas rekonstrukcija. Sākotnēji siltumenerģija tika ražota šķeldas katlumājā, kas, kā norādīts arī citos pētījumos, ir konkurētspējīgs siltumenerģijas ražošanas veids Baltijas valstīs salīdzinājumā ar elektriskajiem katliem [191]. Rekonstrukcijas mērķis bija palielināt siltumapgādes sistēmas efektivitāti un siltuma blīvumu. Pirms rekonstrukcijas tīkls apkalpoja deviņas ēkas ar kopējo apsildāmo platību 4467 m², bet pēc rekonstrukcijas tam pievienotas piecas ēkas ar kopējo platību 4067 m², no kurām trīs ēkas renovētas. Tika pieņemts, ka zemāka piegādes temperatūra nodrošinās pietiekamu iekštelpu klimatu. Būtiski rekonstrukcijā bija siltumtīkla garuma samazinājums no 917 m līdz 491 m, veco mezglu un komponentu nomaiņa (vārsti, sūkņi), vecās katlumājas un malkas katla nomaiņa uz granulu katlu ar automātisku barošanas un uzglabāšanas sistēmu, tādējādi paaugstinot efektivitāti [191].

Vecajā siltumtīklā tika izmantota akmens vates izolācija, savukārt jaunajā – rūpnieciski ražota poliuretāna putu izolācija.

1.31. attēls.

Analizētais CSS tīkls pirms un pēc rekonstrukcijas.

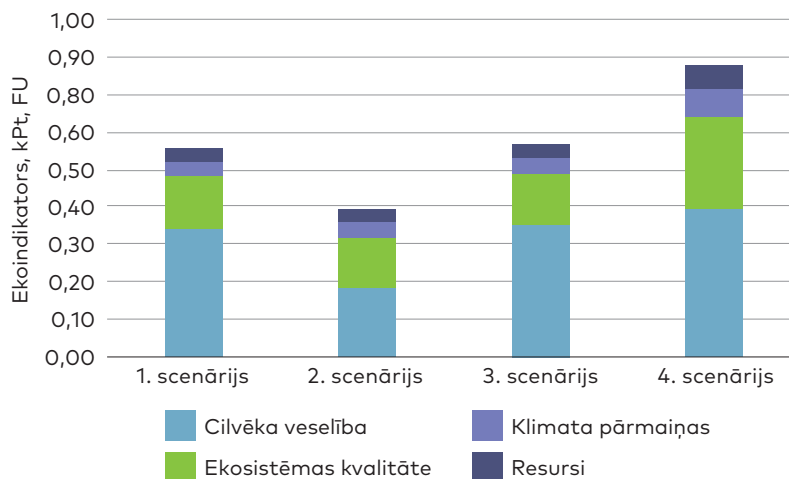


Jaunā katlumāja uzstādīta modulārā konteinerā, un siltumenerģiju nodrošina granulu katls. Turpgaitas un atgaitas temperatūra tika samazināta no 90/60 °C līdz 60/35 °C, kas atbilst literatūrā ieteiktajam, lai izvairītos no ievērojama sūkņēšanas jaudas un karstā ūdens siltummaiņa izmaksu pieauguma. Literatūras analīze liecina, ka temperatūras pazemināšanai ir tieša ietekme uz siltuma zudumiem, sūkņēšanas jaudu un iekārtu ekspluatācijas izmaksām, tomēr ietekme uz elektroenerģijas patēriņu var atšķirties. Atsevišķi pētījumi Zviedrijā rāda, ka tas var ietekmēt gan sūkņēšanas patēriņa samazinājumu, gan pieaugumu atkarībā no sistēmas parametriem. Tomēr, ja temperatūru starpība starp turpgaitu un atgaitu nemainās, sūkņēšanas patēriņš būtiski nepalielināsies [191].

Atrodamie secinājumi iesaka palielināt atjaunojamo energoresursu izmantošanu elektroenerģijas bilanci, jo, palielinoties elektroenerģijas pieprasījumam, siltumenerģijas turpgaitas un atgaitas temperatūras pazemināšana var radīt lielākas CO₂ emisijas. Šī iemesla dēļ pilotprojektā tika apsvērta saules paneļu iekļaušana sistēmā, kas var gan aizstāt fosilo kurināmo, gan samazināt CO₂ emisijas. Tādējādi dzīves cikla novērtējumā tika iekļauts arī ar saules paneļiem papildināts scenārijs [191].

Tika analizēti četri scenāriji vienā Latvijas pašvaldībā – Gulbenes novada Beļavas pagastā [191]:

- 1. scenārijs – jauna zemas temperatūras CSS ar 60/35 °C turpgaitas/atgaitas temperatūras režīmu;
- 2. scenārijs – 1. scenārijs + saules paneļu integrācija;
- 3. scenārijs – jauna CSS ar tradicionālo 90/60 °C temperatūras režīmu;



1.32. attēls.

Scenāriju ietekmes novērtējuma rezultāts.

- 4. scenārijs – esošā siltumapgādes sistēma ar 90/60 °C temperatūras režīmu.

Visos scenārijos modelētas gan sistēmas būvniecības, gan ekspluatācijas fāzes. *LCA* rezultāti aprēķināti ar *SimaPro 9.0* programmatūru, izmantojot *IMPACT 2002+* metodi. Novērtējums ietvēra ietekmes uz cilvēku veselību, ekosistēmu kvalitāti, resursu izmantošanu un klimata pārmaiņām.

LCA rezultāti atspoguļoti kā ekoindikatora punkti (kPt) attiecībā pret funkcionālo vienību. Par funkcionālo vienību šim pētījumam izvēlēta apkāmes siltumapgādes infrastruktūra, kas kalpo, lai apmierinātu mājāsaimniecības vajadzības telpu apkurei un karstā ūdens sagatavošanai standarta ģimenei 240 mājokļos 50 gadu laikā. No visiem četriem salīdzinātajiem scenārijiem viszemākā videi radītā ietekme ir konstatēta 2. scenārijā – zemas temperatūras centralizētās siltumapgādes sistēmā, kas papildināta ar saules paneļiem (0,791 kPt). Tas norāda uz būtisku uzlabojumu salīdzinājumā ar pārējiem risinājumiem. Savukārt 4. scenārijs – esošā, nmodernizētā sistēma – uzrādīja visaugstāko ietekmi visās vides kategorijās, sasniedzot 1,134 kPt, īpaši cilvēku veselības un klimata pārmaiņu aspektos. 1. un 3. scenārijs uzrāda līdzīgus rezultātus – attiecīgi 1,119 kPt un 1,134 kPt, kas liecina, ka tikai temperatūras samazināšana no 90/60 °C līdz 60/35 °C nesniedz būtisku vides ieguvumu [191].

Visos scenārijos lielāko daļu no kopējās ietekmes (93–96 %) veidoja enerģijas plūsmas, savukārt infrastruktūras ieguldījumiem bija salīdzinoši neliela nozīme. Vides ietekme visbiežāk koncentrējās cilvēku veselības kategorijā, kam sekoja ekosistēmas kvalitāte. Klimata pārmaiņu ietekmes rādītāji visos scenārijos bija nedaudz augstāki nekā resursu kategorijā. Tas uzsvēr nepieciešamību ne tikai modernizēt siltumtīklu un samazināt temperatūru, bet arī kombinēt šos

risinājumus ar atjaunojamās elektroenerģijas avotiem, piemēram, saules paneļiem, lai panāktu būtisku emisiju un vides sloga samazinājumu [191].

Pētījums apliecina, ka tikai temperatūras samazināšana siltumapgādes tīklā nav pietiekama – būtiski ir ieviest papildu atjaunjamo energoresursu risinājumus, piemēram, saules kolektorus vai siltumsūkņus, kā arī uzlabot ēku energoefektivitāti. *LCA* metodoloģija sniedz daudzpusīgu skatījumu un var kalpot kā atbalsts pašvaldībām lēmumu pieņemšanā par infrastruktūras modernizāciju. Rezultāti ir tieši piemērojami Latvijas kontekstam, uzlabojot plānošanu pārejai uz klimatneitrālu siltumapgādi.

Izmantotā literatūra

- [1] Klimata un enerģētikas ministrija, "Enerģētikas stratēģija." May 2025.
- [2] "Glossary:Carbon dioxide equivalent." Accessed: Jun. 16, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Carbon_dioxide_equivalent
- [3] "Latvia's National Inventory Document under the UNFCCC and Paris Agreement." 2025.
- [4] Klimata un enerģētikas ministrija, "Par siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšanas un oglekļa dioksīda piesaistes saistību izpildi." 2024.
- [5] LVĢMC, "Kopsavilkums par 2024. gada siltumnīcefekta gāzu inventarizāciju." 2024.
- [6] IPCC, "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2, Energy." Accessed: Feb. 06, 2024. [Online]. Available: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf
- [7] European Environment Agency, "Centrālā datu krātuve." Accessed: Jun. 19, 2025. [Online]. Available: https://cdr.eionet.europa.eu/lv/eu/mmr/art07_inventory/ghg_inventory/envzfkvaa/LVA_2024_2022_11032024_075928_started.xlsx/manage_document
- [8] Official statistics portal of Latvia, "Energy balance, TJ, thousand toe (NACE Rev.2) 2008 - 2023," ENB060, 2024. Accessed: Feb. 04, 2025. [Online]. Available: <https://stat.gov.lv/en/statistics-themes/business-sectors/energy/tables/enb060-energy-balance-tj-thousand-toe-nace-rev2>
- [9] Official statistics portal of Latvia, "Fuel consumed by autoproducer heat plants and CHP in breakdown by kind of activity (NACE Rev.2), TJ 2009 - 2023." Accessed: Feb. 04, 2025. [Online]. Available: <https://stat.gov.lv/en/statistics-themes/business-sectors/energy/tables/enb170-fuel-consumed-autoproducer-heat-plants-and>
- [10] Darío R. Gómez and John D. Watterson, "Stationary_Combustion.pdf."
- [11] "Siltumnīcefekta gāzu inventarizācijas sistēmas, prognožu sistēmas un sistēmas ziņošanai par pielāgošanos klimata pārmaiņām izveidošanas un uzturēšanas kārtība," LIKUMI.LV. Accessed: Jun. 25, 2025. [Online]. Available: <https://likumi.lv/doc.php?id=336733>
- [12] Eurostat, "Greenhouse gas emission accounts." Accessed: Jul. 04, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Greenhouse_gas_emission_accounts
- [13] "Sixth Assessment Report – IPCC." Accessed: Jul. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
- [14] European Commission, "The European Green Deal." Accessed: Dec. 12, 2024. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- [15] "Fit for 55: Delivering on the proposals – European Commission." Accessed: Jul. 04, 2025. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal/fit-55-delivering-proposals_en
- [16] Ekonomikas ministrija, "Nacionālais enerģētikas un klimata plāns 2021.–2030. gadam" Accessed: Feb. 02, 2025. [Online]. Available: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.em.gov.lv%2Fsites%2Fem%2Ffiles%2Fempl_220120_nekp20301_0.docx&wdOrigin=BROWSELINK
- [17] Oficiālās statistikas portāls, "Elektriskā jauda un saražotā elektroenerģija no atjaunīgiem energoresursiem 1990–2023," Oficiālās statistikas portāls. Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: https://data.stat.gov.lv:443/pxweb/lv/OSP_PUB/START__NOZ__EN__ENA/ENA040/
- [18] Utilitas, "Targale Windpark." Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: <https://targalewindpark.com/lv/>

- [19] K. Pētersone, "Cik vēja parku tiek plānots - dati par IVN," *Zajā brīvība*. Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.zalabriviba.lv/cik-veja-parku-tiek-planots-dati-par-ivn/>
- [20] Ekonomikas ministrija, "Informatīvais ziņojums par sauszemes vēja parku turpmāko attīstību valstī." Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: https://tapportals.mk.gov.lv/legal_acts/452e4fa0-9819-41f5-a596-c0719d5edd50
- [21] Aizsardzības ministrija, "Par vēja parku attīstību Latvijā un aizsardzības nozares operacionālajām vajadzībām." Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: https://tapportals.mk.gov.lv/public_participation/ef12074d-d5b9-434f-bf3b-64e12498c2f6
- [22] Oficiālās statistikas portāls, "Koģenerācijas staciju sadalījums pēc patērētā kurināmā veida 2007 - 2023," Oficiālās statistikas portāls. Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: https://data.stat.gov.lv:443/pxweb/lv/OSP_PUB/START__NOZ__EN__ENB/ENB130/
- [23] Augstsprieguma tīkls, "Elektroenerģijas tirgus apskats." Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.ast.lv/lv/electricity-market-review?year=2023&month=13>
- [24] O. Edenhofer *et al.*, Eds., *Renewable energy sources and climate change mitigation: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press, 2012.
- [25] International Renewable Energy Agency, "Wind energy." Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>
- [26] European Commission. Joint Research Centre., *Clean Energy Technology Observatory, Wind energy in the European Union: status report on technology development, trends, value chains and markets : 2022*. LU: Publications Office, 2022. Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/855840>
- [27] B. Koffi, A. Cerutti, M. Duerr, A. Iancu, A. Kona, and G. Janssens-Maenhout, "CoM Default Emission Factors for the Member States of the European Union." Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: <https://eu-mayors.ec.europa.eu/sites/default/files/2022-10/JRC-CoM-EF-CoMW-EF-2017.pdf>
- [28] K. Skenteris, S. Mirasgedis, and C. Tourkolias, "Implementing hedonic pricing models for valuing the visual impact of wind farms in Greece," *Economic Analysis and Policy*, vol. 64, pp. 248–258, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.eap.2019.09.004.
- [29] M. I. Dröes and H. R. A. Koster, "Wind turbines, solar farms, and house prices," *Energy Policy*, vol. 155, p. 112327, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112327.
- [30] V. Kati *et al.*, "The overlooked threat of land take from wind energy infrastructures: Quantification, drivers and policy gaps," *Journal of Environmental Management*, vol. 348, p. 119340, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119340.
- [31] "REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe." Accessed: Sep. 06, 2023. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en
- [32] A. Mertins and T. Wawer, "How to use biogas?: A systematic review of biogas utilization pathways and business models," *Bioresour. Bioprocess.*, vol. 9, no. 1, p. 59, Dec. 2022, doi: 10.1186/s40643-022-00545-z.
- [33] L. Sever, "Circular bioeconomy," European Biogas Association.
- [34] S. Alberici, W. Grimme, and G. Toop, "Feasibility of REPowerEU 2030 targets, production potentials in the Member States and outlook to 2050," © 2022 Guidehouse Netherlands B.V., 2022.
- [35] European Biogas Association, "European Biomethane Map 2024." Accessed: Jan. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.europeanbiogas.eu/european-biomethane-map-2024/>

- [36] I. Angelidaki *et al.*, "Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives," *Biotechnol Adv*, vol. 36, no. 2, pp. 452–466, 2018, doi: 10.1016/j.biotechadv.2018.01.011.
- [37] M. R. Atelge *et al.*, "A Critical Overview of the State-of-the-Art Methods for Biogas Purification and Utilization Processes," *Sustainability*, vol. 13, no. 20, p. 11515, Oct. 2021, doi: 10.3390/su132011515.
- [38] F. M. Baena-Moreno, M. Rodríguez-Galán, F. Vega, L. F. Vilches, and B. Navarrete, "Review: recent advances in biogas purifying technologies," *International Journal of Green Energy*, vol. 16, no. 5, pp. 401–412, Apr. 2019, doi: 10.1080/15435075.2019.1572610.
- [39] J. Witte, A. Calbry-Muzyka, T. Wieseler, P. Hottinger, S. M. A. Biollaz, and T. J. Schildhauer, "Demonstrating direct methanation of real biogas in a fluidised bed reactor," *Applied Energy*, vol. 240, pp. 359–371, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.230.
- [40] T. L. Dupnock and M. A. Deshusses, "Biological Co-treatment of H₂S and reduction of CO₂ to methane in an anoxic biological trickling filter upgrading biogas," *Chemosphere*, vol. 256, p. 127078, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127078.
- [41] D. Rusmanis, R. O'Shea, D. M. Wall, and J. D. Murphy, "Biological hydrogen methanation systems – an overview of design and efficiency," *Bioengineered*, vol. 10, no. 1, pp. 604–634, Jan. 2019, doi: 10.1080/21655979.2019.1684607.
- [42] S. Fu, I. Angelidaki, and Y. Zhang, "In situ Biogas Upgrading by CO₂-to-CH₄ Bioconversion," *Trends in Biotechnology*, vol. 39, no. 4, pp. 336–347, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.tibtech.2020.08.006.
- [43] R. Iglesias *et al.*, "Biogas from Anaerobic Digestion as an Energy Vector: Current Upgrading Development," *Energies*, vol. 14, no. 10, p. 2742, May 2021, doi: 10.3390/en14102742.
- [44] G. Benjaminsson, J. Benjaminsson, and R. B. Rudberg, "Power to Gas – a Technical Review," *SGC Rapport*, no. 284, 2013.
- [45] T. Antukh, I. Lee, S. Joo, and H. Kim, "Hydrogenotrophs-Based Biological Biogas Upgrading Technologies," *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 10, p. 833482, Apr. 2022, doi: 10.3389/fbioe.2022.833482.
- [46] M. A. Voelklein, D. Rusmanis, and J. D. Murphy, "Biological methanation: Strategies for in-situ and ex-situ upgrading in anaerobic digestion," *Applied Energy*, vol. 235, pp. 1061–1071, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.11.006.
- [47] K. Baransi-Karkaby, M. Hassanin, S. Muhsein, N. Massalha, and I. Sabbah, "Innovative ex-situ biological biogas upgrading using immobilized biomethanation bioreactor (IBBR)," *Water Science and Technology*, vol. 81, no. 6, pp. 1319–1328, Mar. 2020, doi: 10.2166/wst.2020.234.
- [48] K. Ghaib and F.-Z. Ben-Fares, "Power-to-Methane: A state-of-the-art review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 433–446, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.08.004.
- [49] M. Götz *et al.*, "Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review," *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 1371–1390, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.07.066.
- [50] M. U. Sieborg, B. D. Jønson, M. T. Ashraf, L. Yde, and J. M. Triolo, "Biomethanation in a thermophilic biotrickling filter using cattle manure as nutrient media," *Bioresource Technology Reports*, vol. 9, p. 100391, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.biteb.2020.100391.
- [51] M. B. Jensen, S. Poulsen, B. Jensen, A. Feilberg, and M. V. W. Kofoed, "Selecting carrier material for efficient biomethanation of industrial biogas-CO₂ in a trickle-bed reactor," *Journal of CO₂ Utilization*, vol. 51, p. 101611, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jcou.2021.101611.
- [52] A. Francisco López, T. Lago Rodríguez, S. Faraji Abdolmaleki, M. Galera Martínez, and P. M. Bello Bugallo, "From Biogas to Biomethane: An In-Depth Review of Upgrading Technologies That Enhance Sustainability and Reduce Greenhouse Gas Emissions," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 6, p. 2342, Mar. 2024, doi: 10.3390/app14062342.

- [53] M. Mehrpooya, B. Ghorbani, and A. Manizadeh, "Cryogenic biogas upgrading process using solar energy (process integration, development, and energy analysis)," *Energy*, vol. 203, p. 117834, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117834.
- [54] N. Akhlaghi and G. Najafpour-Darzi, "A comprehensive review on biological hydrogen production," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 43, pp. 22492–22512, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.182.
- [55] T. T. Q. Vo, D. M. Wall, D. Ring, K. Rajendran, and J. D. Murphy, "Techno-economic analysis of biogas upgrading via amine scrubber, carbon capture and ex-situ methanation," *Applied Energy*, vol. 212, pp. 1191–1202, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.12.099.
- [56] J. De Vrieze *et al.*, "The hydrogen gas bio-based economy and the production of renewable building block chemicals, food and energy," *New Biotechnology*, vol. 55, pp. 12–18, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.nbt.2019.09.004.
- [57] B. Bensmann, R. Hanke-Rauschenbach, I. K. Peña Arias, and K. Sundmacher, "Energetic evaluation of high pressure PEM electrolyzer systems for intermediate storage of renewable energies," *Electrochimica Acta*, vol. 110, pp. 570–580, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.electacta.2013.05.102.
- [58] G. Luo and I. Angelidaki, "Integrated biogas upgrading and hydrogen utilization in an anaerobic reactor containing enriched hydrogenotrophic methanogenic culture," *Biotech & Bioengineering*, vol. 109, no. 11, pp. 2729–2736, Nov. 2012, doi: 10.1002/bit.24557.
- [59] J. B. Holm-Nielsen, T. Al Seadi, and P. Oleskowicz-Popiel, "The future of anaerobic digestion and biogas utilization," *Bioresource Technology*, vol. 100, no. 22, pp. 5478–5484, Nov. 2009, doi: 10.1016/j.biortech.2008.12.046.
- [60] B. Lecker, L. Illi, A. Lemmer, and H. Oechsner, "Biological hydrogen methanation – A review," *Bioresource Technology*, vol. 245, pp. 1220–1228, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.08.176.
- [61] J. Zabranska and D. Pokorna, "Bioconversion of carbon dioxide to methane using hydrogen and hydrogenotrophic methanogens," *Biotechnology Advances*, vol. 36, no. 3, pp. 707–720, May 2018, doi: 10.1016/j.biotechadv.2017.12.003.
- [62] Z. Kušnere, "NO ATKRITUMIEM VEIDOTU FILTRMATERIĀLU IZMANTOŠANA BIOMETANIZĀCIJĀ," *Promocijas darbs*, p. 113, 2024.
- [63] L. Rachbauer, G. Voith, G. Bochmann, and W. Fuchs, "Biological biogas upgrading capacity of a hydrogenotrophic community in a trickle-bed reactor," *Applied Energy*, vol. 180, pp. 483–490, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.07.109.
- [64] M. Burkhardt, T. Koschack, and G. Busch, "Biocatalytic methanation of hydrogen and carbon dioxide in an anaerobic three-phase system," *Bioresource Technology*, vol. 178, pp. 330–333, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.biortech.2014.08.023.
- [65] M. Thema *et al.*, "Biological CO₂-Methanation: An Approach to Standardization," *Energies*, vol. 12, no. 9, p. 1670, May 2019, doi: 10.3390/en12091670.
- [66] A. Alitalo, M. Niskanen, and E. Aura, "Biocatalytic methanation of hydrogen and carbon dioxide in a fixed bed bioreactor," *Bioresource Technology*, vol. 196, pp. 600–605, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.biortech.2015.08.021.
- [67] S. Savvas, J. Donnelly, T. Patterson, Z. S. Chong, and S. R. Esteves, "Biological methanation of CO₂ in a novel biofilm plug-flow reactor: A high rate and low parasitic energy process," *Applied Energy*, vol. 202, pp. 238–247, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.134.
- [68] T. L. Dupnock and M. A. Deshusses, "Detailed investigations of dissolved hydrogen and hydrogen mass transfer in a biotrickling filter for upgrading biogas," *Bioresource Technology*, vol. 290, p. 121780, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121780.
- [69] M. Germec, A. Demirci, and I. Turhan, "Biofilm reactors for value-added products production: An in-depth review," *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, vol. 27, p. 101662, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.bcab.2020.101662.

- [70] I. Bassani, P. G. Kougiass, and I. Angelidaki, "In-situ biogas upgrading in thermophilic granular UASB reactor: key factors affecting the hydrogen mass transfer rate," *Bioresource Technology*, vol. 221, pp. 485–491, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2016.09.083.
- [71] I. Bassani, P. G. Kougiass, L. Treu, H. Porté, S. Campanaro, and I. Angelidaki, "Optimization of hydrogen dispersion in thermophilic up-flow reactors for ex situ biogas upgrading," *Bioresource Technology*, vol. 234, pp. 310–319, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.03.055.
- [72] M. T. Ashraf, M. U. Sieborg, L. Yde, C. Rhee, S. G. Shin, and J. M. Triolo, "Biomethanation in a thermophilic biotrickling filter — pH control and lessons from long-term operation," *Bioresource Technology Reports*, vol. 11, p. 100525, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.biteb.2020.100525.
- [73] P. T. Sekoai *et al.*, "Microbial cell immobilization in biohydrogen production: a short overview," *Critical Reviews in Biotechnology*, vol. 38, no. 2, pp. 157–171, Feb. 2018, doi: 10.1080/07388551.2017.1312274.
- [74] Y. Kourkoutas, A. Bekatorou, I. M. Banat, R. Marchant, and A. A. Koutinas, "Immobilization technologies and support materials suitable in alcohol beverages production: a review," *Food Microbiology*, vol. 21, no. 4, pp. 377–397, Aug. 2004, doi: 10.1016/j.fm.2003.10.005.
- [75] M. B. Mogensen *et al.*, "Reversible solid-oxide cells for clean and sustainable energy," *Clean Energy*, vol. 3, no. 3, pp. 175–201, Nov. 2019, doi: 10.1093/ce/zkz023.
- [76] R. Yukesh Kannah *et al.*, "Techno-economic assessment of various hydrogen production methods – A review," *Bioresource Technology*, vol. 319, p. 124175, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2020.124175.
- [77] P. Patrizio, S. Leduc, D. Chinese, E. Dotzauer, and F. Kraxner, "Biomethane as transport fuel – A comparison with other biogas utilization pathways in northern Italy," *Applied Energy*, vol. 157, pp. 25–34, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.07.074.
- [78] Q. Sun, H. Li, J. Yan, L. Liu, Z. Yu, and X. Yu, "Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 521–532, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.06.029.
- [79] M. Banja, M. Jégard, V. Motola, and R. Sikkema, "Support for biogas in the EU electricity sector – A comparative analysis," *Biomass and Bioenergy*, vol. 128, p. 105313, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.biombioe.2019.105313.
- [80] N. Lawson, M. Alvarado-Morales, P. Tsapekos, and I. Angelidaki, "Techno-Economic Assessment of Biological Biogas Upgrading Based on Danish Biogas Plants," *Energies*, vol. 14, no. 24, p. 8252, Dec. 2021, doi: 10.3390/en14248252.
- [81] Klimata un enerģētikas ministrija, *Nacionālais enerģētikas un klimata plāns 2021.-2030. gadam (atjaunotais)*. Accessed: Sep. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.kem.gov.lv/lv/nacionalais-energetikas-un-klimata-plans-2021-2030-gadam>
- [82] L. Yin, "Clean as Water: a Hydrogen-Fueled Future," Harvard Technology Review. Accessed: Jul. 04, 2025. [Online]. Available: <https://harvardtechnologyreview.com/2024/11/01/clean-as-water-a-hydrogen-fueled-future/>
- [83] M. Awad *et al.*, "A review of water electrolysis for green hydrogen generation considering PV/wind/hybrid/hydropower/geothermal/tidal and wave/biogas energy systems, economic analysis, and its application," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 87, pp. 213–239, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.aej.2023.12.032.
- [84] M. Nasser, T. F. Megahed, S. Ookawara, and H. Hassan, "A review of water electrolysis-based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems," *Environ Sci Pollut Res*, vol. 29, no. 58, pp. 86994–87018, Dec. 2022, doi: 10.1007/s11356-022-23323-y.
- [85] A. Franco and C. Giovannini, "Recent and Future Advances in Water Electrolysis for Green Hydrogen Generation: Critical Analysis and Perspectives," *Sustainability*, vol. 15, no. 24, p. 16917, Dec. 2023, doi: 10.3390/su152416917.

- [86] C. Haoran, Y. Xia, W. Wei, Z. Yongzhi, Z. Bo, and Z. Leiqi, "Safety and efficiency problems of hydrogen production from alkaline water electrolyzers driven by renewable energy sources," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 54, pp. 700–712, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.08.324.
- [87] A. Ursua, L. M. Gandia, and P. Sanchis, "Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends," *Proc. IEEE*, vol. 100, no. 2, pp. 410–426, Feb. 2012, doi: 10.1109/JPROC.2011.2156750.
- [88] H. Tüysüz, "Alkaline Water Electrolysis for Green Hydrogen Production," *Acc. Chem. Res.*, p. acs.accounts.3c00709, Feb. 2024, doi: 10.1021/acs.accounts.3c00709.
- [89] J. Gómez and R. Castro, "Green Hydrogen Energy Systems: A Review on Their Contribution to a Renewable Energy System," *Energies*, vol. 17, no. 13, p. 3110, Jun. 2024, doi: 10.3390/en17133110.
- [90] J. Zhang *et al.*, "Comparison of onshore/offshore wind power hydrogen production through water electrolysis by life cycle assessment," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 60, p. 103515, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.seta.2023.103515.
- [91] C. SUNDIN, "Environmental Assessment of Electrolyzers for Hydrogen Gas Production." KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY SCHOOL OF ENGINEERING SCIENCES IN CHEMISTRY, BIOTECHNOLOGY AND HEALTH, 2019.
- [92] H. F. Araújo, J. A. Gómez, and D. M. F. Santos, "Proton-Exchange Membrane Electrolysis for Green Hydrogen Production: Fundamentals, Cost Breakdown, and Strategies to Minimize Platinum-Group Metal Content in Hydrogen Evolution Reaction Electrocatalysts," *Catalysts*, vol. 14, no. 12, p. 845, Nov. 2024, doi: 10.3390/catal14120845.
- [93] S. Ghosh and S. Basu, "Solid Oxide Electrolysis Cell for Hydrogen Generation: General Perspective and Mechanism," in *Climate Action and Hydrogen Economy: Technologies Shaping the Energy Transition*, M. Goel and G. Sen, Eds., Singapore: Springer Nature, 2024, pp. 231–260. doi: 10.1007/978-981-99-6237-2_14.
- [94] G. Guandalini, S. Campanari, and M. C. Romano, "Power-to-gas plants and gas turbines for improved wind energy dispatchability: Energy and economic assessment," *Applied Energy*, vol. 147, pp. 117–130, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.02.055.
- [95] Eiropas Komisija, *Ūdeņraža stratēģija klimatneitrālai Eiropai*. 2020. Accessed: Sep. 03, 2024. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/ALL/?uri=CELEX:52020DC0301>
- [96] M. Robinius, S. Cerniauskas, R. Madlener, C. Kockel, A. Praktiknjo, and D. Stolten, "Economics of Hydrogen," in *The Palgrave Handbook of International Energy Economics*, M. Hafner and G. Luciani, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 75–102. doi: 10.1007/978-3-030-86884-0_4.
- [97] Y. Zhao, V. McDonell, and S. Samuelsen, "Experimental assessment of the combustion performance of an oven burner operated on pipeline natural gas mixed with hydrogen," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 47, pp. 26049–26062, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.011.
- [98] S. Samanta, D. Roy, S. Roy, A. Smallbone, and A. Paul Roskilly, "Modelling of hydrogen blending into the UK natural gas network driven by a solid oxide fuel cell for electricity and district heating system," *Fuel*, vol. 355, p. 129411, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2023.129411.
- [99] A. Kotchourko and T. Jordan, *Hydrogen Safety for Energy Applications: Engineering Design, Risk Assessment, and Codes and Standards*. Butterworth-Heinemann, 2022.

- [100] Conexus Baltic Grid, "Dabaszgāzes pārvades sistēmas operatora ikgadējā novērtējuma ziņojums par 2023. gadu," 2024. Accessed: Oct. 03, 2024. [Online]. Available: https://www.conexus.lv/uploads/filedir/Zinojumi/2023_PSO_ikgad_nov_zinojums-27-06_.pdf
- [101] Ministru kabinets, *Noteikumi par prasībām biometāna un gāzveida stāvoklī pārvērstas sašķidrinātās dabaszgāzes ievadīšanai un transportēšanai dabaszgāzes pārvades un sadales sistēmā*. Accessed: Oct. 03, 2024. [Online]. Available: <https://likumi.lv/doc.php?id=335532>
- [102] International Energy Agency, "Global Hydrogen Review 2023 – Analysis," Sep. 2023. Accessed: Sep. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>
- [103] Rīgas satiksme, "Ūdenraža uzpildes stacija." Accessed: Sep. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.rigassatiksme.lv/lv/pakalpojumi/udenraza-uzpildes-stacija/>
- [104] A. Vilciņa and Dienas Bizness, "Ūdenraža izmantošana Baltijā - pagaidām vēl bērnu autiņos," Dienas Bizness. Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.db.lv/zinas/udenraza-izmantosana-baltija-pagaidam-vel-bernu-autinos-516079>
- [105] "Share of energy consumption from renewable sources in Europe." Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/share-of-energy-consumption-from>
- [106] "Baltic states: Energy independence Baltic states." Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.freiheit.org/era-russian-energy-manipulations-over>
- [107] E. Hossain, H. Faruque, Md. Sunny, N. Mohammad, and N. Nawar, "A Comprehensive Review on Energy Storage Systems: Types, Comparison, Current Scenario, Applications, Barriers, and Potential Solutions, Policies, and Future Prospects," *Energies*, vol. 13, no. 14, p. 3651, Jul. 2020, doi: 10.3390/en13143651.
- [108] T.-T. Nguyen, V. Martin, A. Malmquist, and C. A. S. Silva, "A review on technology maturity of small scale energy storage technologies," *Renew. Energy Environ. Sustain.*, vol. 2, p. 36, 2017, doi: 10.1051/rees/2017039.
- [109] H. Jafarizadeh, E. Yamini, S. M. Zolfaghari, F. Esmaeilion, M. E. H. Assad, and M. Soltani, "Navigating challenges in large-scale renewable energy storage: Barriers, solutions, and innovations," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 2179–2192, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.08.019.
- [110] Massachusetts Institute of Technology, "The Future of Energy Storage." Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2022/05/The-Future-of-Energy-Storage.pdf>
- [111] "Small Modular Reactors as Renewable Energy Sources | SpringerLink." Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-92594-3>
- [112] H. L. Ferreira, R. Garde, G. Fulli, W. Kling, and J. P. Lopes, "Characterisation of electrical energy storage technologies," *Energy*, vol. 53, pp. 288–298, May 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.02.037.
- [113] P. Wei *et al.*, "Progress in Energy Storage Technologies and Methods for Renewable Energy Systems Application," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 9, p. 5626, May 2023, doi: 10.3390/app13095626.
- [114] Muhammad H. Rashid, "Energy Systems in Electrical Engineering," SpringerLink. Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: <https://link.springer.com/series/13509>
- [115] L. I. M. Asri, W. N. S. F. W. Ariffin, A. S. M. Zain, J. Nordin, and N. S. Saad, "Comparative Study of Energy Storage Systems (ESSs)," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1962, no. 1, p. 012035, Jul. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1962/1/012035.
- [116] K. Mongird *et al.*, "Energy Storage Technology and Cost Characterization Report," PNNL--28866, 1573487, Jul. 2019. doi: 10.2172/1573487.

- [117] J. Davies, F. Dolci, D. Klassek-Bajorek, C. R. Ortiz, and R. E. Weidner, "Current Status of Chemical Energy Storage Technologies," JRC Publications Repository. Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC118776>
- [118] Y.-G. Guo, *Nanostructures and Nanomaterials for Batteries: Principles and Applications*. Singapore: Springer Singapore, 2019. doi: 10.1007/978-981-13-6233-0.
- [119] Artelys *et al.*, *Study on energy storage: contribution to the security of the electricity supply in Europe*. Publications Office of the European Union, 2020. Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: <https://data.europa.eu/doi/10.2833/077257>
- [120] G. Lota, M. Graś-Ligocka, Ł. Kolanowski, and K. Lota, "Flow Batteries: Recent Advancement and Challenges," in *Handbook of Energy Materials*, R. Gupta, Ed., Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 1–21. doi: 10.1007/978-981-16-4480-1_50-1.
- [121] EU research result, "Computer aided desing for next generation flow batteries | H2020," CORDIS | European Commission. Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/875565/reporting>
- [122] Z. H. Lv, Q. Li, R. W. Huang, H. M. Liu, and D. Liu, "Fuzzy comprehensive evaluation for grid-connected performance of integrated distributed PV-ES systems," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 40, p. 012033, Aug. 2016, doi: 10.1088/1755-1315/40/1/012033.
- [123] I. Odesanmi, "A Study of Long Duration Energy Storage Technologies' Readiness as Grid-balanc- ing Solutions".
- [124] European Commission. Joint Research Centre., *Clean Energy Technology Observatory, Solar fuels in the European Union: status report on technology development, trends, value chains & markets : 2023*. LU: Publications Office, 2023. Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/753483>
- [125] G. Shahgholian and A. Fathollahi, "Advancing Load Frequency Control in Multi-Resource Energy Systems Through Superconducting Magnetic Energy Storage," *AppliedMath*, vol. 5, no. 1, p. 1, Jan. 2025, doi: 10.3390/appliedmath5010001.
- [126] A. Aghmadi and O. A. Mohammed, "Energy Storage Systems: Technologies and High-Power Applications," *Batteries*, vol. 10, no. 4, p. 141, Apr. 2024, doi: 10.3390/batteries10040141.
- [127] "Energy Storage." Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.irena.org/energy-transition/Technology/Energy-Storage>
- [128] "Energy storage. Grid-scale storage," IEA. Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/electricity/grid-scale-storage>
- [129] D. A. Elalfy, E. Gouda, M. F. Kotb, V. Bureš, and B. E. Sedhom, "Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends," *Energy Strategy Reviews*, vol. 54, p. 101482, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.esr.2024.101482.
- [130] "CO₂ Battery," Energy Dome. Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: <https://energydome.com/co2-battery/>
- [131] Admin, "Energy Dome successfully launches first CO₂ Battery long-duration energy storage plant in the world," Energy Dome. Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: <https://energydome.com/energy-dome-successfully-launches-first-co2-battery-long-duration-energy-storage-plant-in-the-world/>
- [132] S. Sharma, V. Yadav, and R.R.Joshi, *An Overview on Energy Storage Options for Renewable Energy Systems*. 2010.
- [133] K. Dolge, A. S. Toma, A. Grāvelsiņš, and D. Blumberga, "Realizing Renewable Energy Storage Potential in Municipalities: Identifying the Factors that Matter," *Environmental and Climate Technologies*, vol. 27, no. 1, pp. 271–288, Jan. 2023, doi: 10.2478/rtuct-2023-0021.

- [134] Y. Yao, Y. Wang, X. Xiang, and X. Xie, "A review of offshore carbon dioxide geological storage from a source-sink perspective," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 222, p. 115989, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.rser.2025.115989.
- [135] "Carbon Dioxide Capture and Storage — IPCC." Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/>
- [136] H. G. Darabkhani, H. Varasteh, and B. Bazooyar, "Main technologies in CO₂ capture," in *Carbon Capture Technologies for Gas-Turbine-Based Power Plants*, Elsevier, 2023, pp. 19–38. doi: 10.1016/B978-0-12-818868-2.00002-3.
- [137] P. Mitra, S. M. M. Ahmed, D. M. Mahmud, and M. Zeyad, "An Overview of the Progress of CO₂ Capture Technologies," in *2022 11th International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE)*, Eskisehir, Turkey: IEEE, Sep. 2022, pp. 142–147. doi: 10.1109/ICPSE56329.2022.9935495.
- [138] E. National Academies of Sciences *et al.*, "Sequestration of Supercritical CO₂ in Deep Sedimentary Geological Formations," in *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda*, National Academies Press (US), 2018. Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK541452/>
- [139] A. D. Kamble, V. K. Saxena, P. D. Chavan, and V. A. Mendhe, "Co-gasification of coal and biomass an emerging clean energy technology: Status and prospects of development in Indian context," *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 29, no. 2, pp. 171–186, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.ijmst.2018.03.011.
- [140] P.-C. Kuo and W. Wu, "Thermodynamic analysis of a combined heat and power system with CO₂ utilization based on co-gasification of biomass and coal," *Chemical Engineering Science*, vol. 142, pp. 201–214, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.ces.2015.11.030.
- [141] K. H. Smith, J. J. Stanislawski, M. L. Swanson, and N. S. Siefert, "Biomass and coal cofiring gasification with pre-combustion carbon capture: Impact of mixed feedstocks on CO₂ absorption using a physical solvent," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 141, p. 104300, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.ijggc.2024.104300.
- [142] M. Kong *et al.*, "A review on development of post-combustion CO₂ capture technologies: Performance of carbon-based, zeolites and MOFs adsorbents," *Fuel*, vol. 371, p. 132103, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2024.132103.
- [143] Y. Zhang and S.-J. Park, "Imidazolium-optimized conductive interfaces in multilayer graphene nanoplatelet/epoxy composites for thermal management applications and electroactive devices," *Polymer*, vol. 168, pp. 53–60, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.polymer.2019.01.086.
- [144] O. Akeeb, L. Wang, W. Xie, R. Davis, M. Alkasrawi, and S. Toan, "Post-combustion CO₂ capture via a variety of temperature ranges and material adsorption process: A review," *Journal of Environmental Management*, vol. 313, p. 115026, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115026.
- [145] E. E. Ünveren, B. Ö. Monkul, Ş. Sarioğlu, N. Karademir, and E. Alper, "Solid amine sorbents for CO₂ capture by chemical adsorption: A review," *Petroleum*, vol. 3, no. 1, pp. 37–50, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.petlm.2016.11.001.
- [146] J. Wang *et al.*, "Recent advances in solid sorbents for CO₂ capture and new development trends," *Energy Environ. Sci.*, vol. 7, no. 11, pp. 3478–3518, Oct. 2014, doi: 10.1039/C4EE01647E.
- [147] A. Allangawi *et al.*, "Carbon Capture Materials in Post-Combustion: Adsorption and Absorption-Based Processes," *C*, vol. 9, p. 17, Jan. 2023, doi: 10.3390/c9010017.
- [148] W. U. Mulk *et al.*, "Breaking boundaries in CO₂ capture: Ionic liquid-based membrane separation for post-combustion applications," *Journal of CO₂ Utilization*, vol. 75, p. 102555, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.jcou.2023.102555.

- [149] P. Gkotsis, E. Peleka, and A. Zouboulis, "Membrane-Based Technologies for Post-Combustion CO₂ Capture from Flue Gases: Recent Progress in Commonly Employed Membrane Materials," *Membranes*, vol. 13, no. 12, p. 898, Dec. 2023, doi: 10.3390/membranes13120898.
- [150] L. Wang, Y. Zhou, S. Zha, S. Zhang, and J. Jin, "An Ionic Covalent Organic Framework Membrane with Confined Mobile Carriers for Stable and Efficient Carbon Dioxide Capture," *ACS Sustainable Chem. Eng.*, vol. 12, no. 51, pp. 18475–18484, Dec. 2024, doi: 10.1021/acssuschemeng.4c08684.
- [151] X. He, "A review of material development in the field of carbon capture and the application of membrane-based processes in power plants and energy-intensive industries," *Energy, Sustainability and Society*, vol. 8, no. 1, p. 34, Nov. 2018, doi: 10.1186/s13705-018-0177-9.
- [152] B. Zhu *et al.*, "Boosting membrane carbon capture via multifaceted polyphenol-mediated soldering," *Nat Commun*, vol. 14, no. 1, p. 1697, Mar. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-37479-9.
- [153] I. S. Omodolor, H. O. Otor, J. A. Andonegui, B. J. Allen, and A. C. Alba-Rubio, "Dual-Function Materials for CO₂ Capture and Conversion: A Review," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 59, no. 40, pp. 17612–17631, Oct. 2020, doi: 10.1021/acs.iecr.0c02218.
- [154] Y. Yuan, L. Wang, Y. Zhuang, Y. Wu, and X. Bi, "Energy and Economic Assessment of Oxy-Fuel Combustion CO₂ Capture in Coal-Fired Power Plants," *Energies*, vol. 17, no. 18, p. 4626, Sep. 2024, doi: 10.3390/en17184626.
- [155] E. Hanson, C. Nwakile, and V. O. Hammed, "Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technologies: Evaluating the effectiveness of advanced CCUS solutions for reducing CO₂ emissions," *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 18, p. 100381, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.rsurfi.2024.100381.
- [156] J. Podder, B. Patra, F. Pattnaik, S. Nanda, and A. Dalai, "A Review of Carbon Capture and Valorization Technologies," *Energies*, vol. 16, p. 2589, Mar. 2023, doi: 10.3390/en16062589.
- [157] A. E. Geweda, M. E. Zayed, M. Y. Khan, and A. B. S. Alqaity, "Mitigating CO₂ emissions: A review on emerging technologies/strategies for CO₂ capture," *Journal of the Energy Institute*, vol. 118, p. 101911, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.joei.2024.101911.
- [158] F. Bisotti, K. A. Hoff, A. Mathisen, and J. Hovland, "Direct Air capture (DAC) deployment: A review of the industrial deployment," *Chemical Engineering Science*, vol. 283, p. 119416, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ces.2023.119416.
- [159] K. An, K. Li, C.-M. Yang, J. Brechtel, and K. Nawaz, "A comprehensive review on regeneration strategies for direct air capture," *Journal of CO₂ Utilization*, vol. 76, p. 102587, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jcou.2023.102587.
- [160] M. Pal, V. Karaliūtė, and S. Malik, "Exploring the Potential of Carbon Capture, Utilization, and Storage in Baltic Sea Region Countries: A Review of CCUS Patents from 2000 to 2022," *Processes*, vol. 11, no. 2, p. 605, Feb. 2023, doi: 10.3390/pr11020605.
- [161] J. Gušča, "Latvijas energoavotu attīstība. Oglekļa dioksīda uzglabāšanas procesu ietekmes izpēte," 2011, Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: <https://ortus.rtu.lv/science/lv/publications/10813>
- [162] A. A. A. Razak, I. M. Saaid, M. A. Md. Yusof, N. Husein, M. F. Zaidin, and K. Mohamad Sabil, "Physical and chemical effect of impurities in carbon capture, utilisation and storage," *J Petrol Explor Prod Technol*, vol. 13, no. 5, pp. 1235–1246, May 2023, doi: 10.1007/s13202-023-01616-3.
- [163] ISO standard, "ISO 27913:2024," ISO. Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/84840.html>
- [164] H. Dashti, J. Underschultz, A. Garnett, V. Honari, M. Sedaghat, and V. Rudolph, "A Review of Recent Advances in Cost-Effective Infrastructure System Design of the CO₂ Distribution to CCS Injection Wells," in *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, Brisbane, Australia: SPE, Oct. 2018, p. D022S005R004. doi: 10.2118/192059-MS.

- [165] A. K. Sleiti and W. A. Al-Ammari, "CO₂ transportation," in *Emerging Carbon Capture Technologies*, Elsevier, 2022, pp. 279–319. doi: 10.1016/B978-0-323-89782-2.00013-2.
- [166] A. K. Sleiti, W. A. Al-Ammari, L. Vesely, and J. S. Kapat, "Carbon Dioxide Transport Pipeline Systems: Overview of Technical Characteristics, Safety, Integrity and Cost, and Potential Application of Digital Twin," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 144, no. 9, p. 092106, Sep. 2022, doi: 10.1115/1.4053348.
- [167] M. Yazdanpanah, L. Galliot, S. Perrin, G. Moulie, L. Teberikler, and S. Raurich, "CO₂ Specifications: Review of Status and Challenges in CO₂ Transport and Storage Hubs," *SSRN Journal*, 2025, doi: 10.2139/ssrn.5063963.
- [168] A. Terenzi, "Carbon Dioxide Pipeline Transportation & Network," laurea, Politecnico di Torino, 2018. Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: <https://webthesis.biblio.polito.it/7781/>
- [169] C. Jayarathna, A. Mathisen, K. Knudsen, R. Skagestad, N. H. Eldrup, and G. Nysæter, "GHG Emissions from CO₂ Ship Transportation Chain," *SSRN Journal*, 2021, doi: 10.2139/ssrn.3821134.
- [170] M. D. Solomon, M. Scheffler, W. Heineken, M. Ashkavand, and T. Birth-Reichert, "Pipeline Infrastructure for CO₂ Transport: Cost Analysis and Design Optimization," *Energies*, vol. 17, no. 12, p. 2911, Jun. 2024, doi: 10.3390/en17122911.
- [171] R. Burgass and A. Chapoy, "Dehydration requirements for CO₂ and impure CO₂ for ship transport," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 572, p. 113830, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.fluid.2023.113830.
- [172] V. S. Bjerketvedt, A. Tomasgard, and S. Roussanaly, "Optimal design and cost of ship-based CO₂ transport under uncertainties and fluctuations," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 103, p. 103190, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.ijggc.2020.103190.
- [173] ABS, "CO₂ Impurities and LCO₂ Carrier Design-Practical Considerations.pdf." Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/publications/knowledgecenter/CO2%20Impurities%20and%20LCO2%20Carrier%20Design-Practical%20Considerations.pdf>
- [174] "Par piesārņojumu," LIKUMI.LV. Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: <https://likumi.lv/doc.php?id=6075>
- [175] J. Krūmiņš, M. Kļaviņš, A. Dēliņa, R. Damkevics, and V. Segliņš, "Potential of the Middle Cambrian Aquifer for Carbon Dioxide Storage in the Baltic States," *Energies*, vol. 14, no. 12, p. 3681, Jun. 2021, doi: 10.3390/en14123681.
- [176] Eiropas revīzijas palāta, "Kā ES iestādes un struktūras aprēķina, samazina un izlīdzina to radītās siltumnīcefekta gāzu emisijas.pdf." : Eiropas Savienības Publikāciju birojs, 2014.
- [177] "ES un ANO – kopīgi mērķi ilgtspējīgai nākotnei - Eiropas Komisija." Accessed: Jul. 01, 2025. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/sustainable-development-goals/eu-and-united-nations-common-goals-sustainable-future_lv
- [178] "ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķu īstenošana Latvijā | Ministru kabinets." Accessed: Jul. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.mk.gov.lv/lv/iam-istenosana-latvija>
- [179] "17 ilgtspējīgas attīstības mērķi | Ministru kabinets." Accessed: Jul. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.mk.gov.lv/lv/17-ilgtspējigas-attistibas-merki>
- [180] General Assembly and Economic and Social Council, "Progress towards the Sustainable Development Goals." Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: <https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2024/SG-SDG-Progress-Report-2024-advanced-unedited-version.pdf>
- [181] Ministru kabinets, "ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķu īstenošana Latvijā | IAM7." Accessed: Jul. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.mk.gov.lv/lv/iam-istenosana-latvija>

- [182] J. D. Sachs, G. Lafortune, G. Fuller, and G. Iablonski, "SUSTAINABLE DEVELOPMENT REPORT 2025 Financing Sustainable Development to 2030 and Mid-Century," 2025, *Dublin University Press*. doi: 10.25546/111909.
- [183] Ministru kabinets, "ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķu īstenošana Latvijā | IAM9." Accessed: Jul. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.mk.gov.lv/lv/iam-istenosana-latvija>
- [184] Ministru kabinets, "ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķu īstenošana Latvijā | IAM11." Accessed: Jul. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.mk.gov.lv/lv/iam-istenosana-latvija>
- [185] Ministru kabinets, "ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķu īstenošana Latvijā | IAM12." Accessed: Jul. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.mk.gov.lv/lv/iam-istenosana-latvija>
- [186] "ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķu īstenošana Latvijā | IAM13." Accessed: Jul. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.mk.gov.lv/lv/iam-istenosana-latvija>
- [187] UN General Assembly (70th sess. : 2015-2016), Ed., *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development: resolution*. New York: UN, 21. Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: <https://digitallibrary.un.org/record/3923923>
- [188] M. Brown and B. Sovacool, "Developing an 'Energy Sustainability Index' to Evaluate American Energy Policy," *Interdisciplinary Science Reviews*, vol. 32, Dec. 2007, doi: 10.1179/030801807X211793.
- [189] D. Krajnc and P. Glavič, "A model for integrated assessment of sustainable development," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 43, no. 2, pp. 189–208, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.resconrec.2004.06.002.
- [190] D. Slišāne, G. Gaumīgs, D. Lauka, and D. Blumberga, "Assessment of Energy Sustainability in Statistical Regions of Latvia using Energy Sustainability Index," *Environmental and Climate Technologies*, vol. 24, no. 2, pp. 160–169, Sep. 2020, doi: 10.2478/rtuect-2020-0063.
- [191] M. Feofilovs, I. Pakere, and F. Romagnoli, "Life Cycle Assessment of Different Low-Temperature District Heating Development Scenarios: A Case Study of Municipality in Latvia," *Environmental and Climate Technologies*, vol. 23, no. 2, pp. 272–290, Nov. 2019, doi: 10.2478/rtuect-2019-0068.



02

TRANSPORTA SEKTORS

Ievads

01 Enerģētikas sektors

02	TRANSPORTA SEKTORS	98
2.1.	Transporta sektora SEG emisiju audits	100
2.1.1.	Transporta sektora SEG emisijas Eiropas Savienībā	100
2.1.2.	Transporta sektora SEG emisijas Latvijā	102
2.1.3.	Transporta sektora SEG emisiju aprēķins	104
2.2.	Klimata pārmaiņu mazināšanas tehnoloģiskie risinājumi	104
2.2.1.	Nacionālais enerģētikas un klimata plāns	107
2.2.2.	Transporta attīstības pamatnostādnes	109
2.2.3.	Pasākumi klimata pārmaiņu mazināšanai	111
2.2.4.	Šķēršļi un iespējas ieviešanai praksē	114
2.3.	Klimata pārmaiņu mazināšanas ilgtspējas vērtējums	116
2.3.1.	Saskare ar ANO ilgtspējīgas attīstības mērķiem (diagramma)	116
2.3.2.	Iespējamā ietekme uz vidi un lauku attīstību	117
2.3.3.	Pārvaldības un politikas sinerģijas	118

03 Rūpniecības sektors

04 Lauksaimniecības sektors

05 ZIZIMM

06 Atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektors

Izmantotā literatūra

Summary

Transports sektors ieņem nozīmīgu lomu Eiropas pārejā uz klimatneitrālu ekonomiku līdz 2050. gadam, jo tas rada ievērojamu daļu SEG emisiju – aptuveni 24 % no kopējām emisijām Eiropas Savienībā (ES) [1]. Eiropas zaļais kurss iezīmē ambiciozu ceļvedi klimatneitralitātes sasniegšanai, paredzot dažādas iniciatīvas transporta sektora dekarbonizācijai. Šis process ir būtisks ne tikai, lai sasniegtu ES izvirzīto mērķi samazināt SEG emisijas vismaz par 55 % līdz 2030. gadam, bet arī lai nodrošinātu ilgtermiņa pilsētvides un infrastruktūras ilgtspēju [2].

Lai veicinātu šo pāreju, nepieciešama inovatīvu tehnoloģiju un ilgtspējīgu prakšu ieviešana transporta jomā. Elektromobiļi, kuru izplatību būtiski veicina ES politika, veido vienu no galvenajiem šīs stratēģijas elementiem. Tomēr pāreja uz elektrotransportu ir jāpapildina ar atjaunojamās enerģijas infrastruktūras attīstību, nodrošinot, ka elektroenerģija, ar kuru tie tiek darbināti, nāk no zemu oglekļa emisiju avotiem [3]. Papildus tam energoefektīvu sabiedriskā transporta sistēmu attīstība un ilgtspējīgas mobilitātes veicināšana, piemēram, velobraukšana un koplietošanas transporta risinājumi, ir būtiski priekšnoteikumi, lai mazinātu atkarību no fosilā kurināmā un samazinātu emisijas [4].

Digitālā transformācija transporta sektorā kalpo kā būtisks virzītājspēks klimatneitralitātes mērķu sasniegšanā. Digitālie risinājumi spēj uzlabot darbības efektivitāti, nodrošināt optimizētu satiksmes pārvaldību un piedāvāt viedās mobilitātes iespējas, kas kopumā veicina emisiju samazinājumu [1]. Turklāt politikas iniciatīvas, kas veicina ieguldījumus multimodālā transporta infrastruktūrā, var veicināt sabiedriskā transporta lietojuma pieaugumu, samazinot privāto automašīnu izmantošanu un ar to saistītās emisijas [5].

Šī pāreja nav tikai tehnoloģiska rakstura jautājums – tā prasa visaptverošu pieeju, kas risina arī sociāli ekonomiskos izaicinājumus un nodrošina, ka neaizsargātās sabiedrības grupas netiek atstātas novārtā. ES Taisnīgas pārkārtošanās fonds ir izveidots, lai mazinātu pārejas radīto sociālekonomisko ietekmi, atbalstot investīcijas tajos reģionos un sektoros, kuri var saskarties ar būtiskām pārmaiņām pārejā uz klimatneitrālu ekonomiku [6]. Ilgtspējīga transporta attīstības ietvaros ir būtiski nodrošināt darba vietu radīšanu un sabiedrības iesaisti, kas palīdz veicināt sabiedrības atbalstu un nodrošina vienlīdzīgu piekļuvi jaunajiem mobilitātes risinājumiem [6].

Transporta sektora pārveide ir būtiska, lai Eiropa sasniegtu savus 2050. gada klimatneitralitātes mērķus. Lai pāreja būtu veiksmīga, nepieciešama koordinēta rīcība, apvienojot tehnoloģiskās inovācijas, ilgtspējīgu pilsētplānošanu, digitālos risinājumus un sociāli ekonomisko dimensiju. Šī daudzslāņainā pieeja atklāj ne tikai izaicinājumus, bet arī ievērojamas iespējas radīt tīrāku, ilgtspējīgāku un iekļaujošāku nākotni Eiropas transporta sistēmās [7].

2.1. Transporta sektora SEG emisiju audits

Transporta sektors ir būtisks SEG emisiju avots visā pasaulē, veidojot ievērojamu daļu no kopējām emisijām dažādos reģionos. Ir konstatēts, ka transporta nozare rada lielāku emisiju īpatsvaru salīdzinājumā ar vairumu citu sektoru, kas uzsver tās nozīmi klimata pārmaiņu mazināšanas stratēģijās [8], [9], [10]. Tradicionālo fosilo degvielu izmantošanas pieaugums transportlīdzekļiem, strauja urbanizācija un pieprasījuma pēc pārvadājumiem pieaugums vēl vairāk saasina emisiju problēmas, radot nepieciešamību visaptveroši analizēt transporta sektora lomu SEG emisiju rašanās procesos [11], [12].

Pētījumi liecina, ka lielceļu transports, īpaši tādās valstīs kā Amerikas Savienotās Valstis, rada vairāk nekā 80 % no visām transporta sektora SEG emisijām. Šo īpatsvaru pamatā veido vieglās pasažieru automašīnas un kravas furgoni [13]. Elektromobiļu izplatība iezīmē daudzsoļošu alternatīvu tradicionālajiem iekšdedzes dzinēju transportlīdzekļiem, piedāvājot iespēju samazināt enerģijas patēriņu un SEG emisijas, jo palielinās bezemisiju transportlīdzekļu tirgus [8], [14]. Tomēr, neskatoties uz transportlīdzekļu tīrāku tehnoloģiju progresu, prognozes liecina, ka transporta emisijas saglabāsies augstas, ja netiks īstenota mērķtiecīga politika un strukturālas pārmaiņas, it īpaši strauji augošās ekonomikās [15], [16].

Valstīm, saskaroties ar dubulto izaicinājumu – ekonomiskās izaugsmes un vides ilgtspējas nodrošināšanu –, kļūst arvien svarīgāk atdalīt ekonomisko darbību no oglekļa emisijām transporta nozarē. Pētījumi pierāda, ka politika, kas vērsta uz transporta veidu maiņu un energoefektivitātes uzlabošanu, var ievērojami samazināt transporta oglekļa intensitāti [17], [18]. Turklāt integrētas pieeja, kas ietver pilsētplānošanu, sabiedriskā transporta optimizāciju un alternatīvo degvielu ieviešanu, ir būtiska, lai sasniegtu plašākus klimata mērķus [11], [19], [20].

Kopumā SEG emisiju mazināšana transporta sektorā prasa starpdisciplināru sadarbību, apvienojot tehnoloģisko progresu ar ilgtspējīgas politikas ietvariem. Pētījumi arī turpmāk būs nozīmīgi, lai padziļināti izprastu transporta izaugsmes, enerģijas patēriņa un SEG emisiju savstarpējo saistību, tādējādi virzot pasaules pāreju uz zemu oglekļa emisiju nākotni [21], [22], [16].

2.1.1. Transporta sektora SEG emisijas Eiropas Savienībā

Transporta sektors ir nozīmīgs SEG emisiju avots arī Eiropā, ievērojami ietekmējot reģiona centienus mazināt klimata pārmaiņas. Lielceļu transports vien veido aptuveni 72 % no visām transporta

sektora emisijām ES [23], [24]. Šis sektors ir kļuvis par centrālu tematu klimata politikas diskusijās, akcentējot nepieciešamību pēc efektīviem emisiju mazināšanas pasākumiem. Pašreizējie novērtējumi liecina, ka transports ir atbildīgs par gandrīz ceturtdaļu no kopējām SEG emisijām ES, kas prasa visaptverošas stratēģijas šī kritiski svarīgā sektora dekarbonizācijai [24].

Pēdējos gados ES ir ieviesusi virkni politikas pasākumu, kuru mērķis ir samazināt transporta SEG emisijas, tostarp ambiciozus mērķus samazināt emisijas vismaz par 60 % līdz 2050. gadam, salīdzinot ar 1990. gada līmeni [25]. Viens no galvenajiem virzieniem šo mērķu sasniegšanai ir elektromobiļu ieviešana. Lai arī pastāv izaicinājumi, kas saistīti ar enerģētikas sektora emisijām, elektrotransporta plašāka lietošana piedāvā iespēju mazināt atkarību no fosilā kurināmā un samazināt kopējo transporta emisiju apjomu [26], [8]. Efektīvas stratēģijas, piemēram, ieguldījumi elektrotransporta infrastruktūrā un atbalsts tīrajām enerģijas tehnoloģijām, ir būtiskas šīs pārejas nodrošināšanai [8].

Tajā pašā laikā svarīgi ir arī pielāgošanās pasākumi, ņemot vērā klimata pārmaiņu ietekmi uz transporta sektora darbību un noturību [27]. Valstīm ir ieteikts stiprināt transporta infrastruktūras noturību pret ekstremāliem laikapstākļiem un vienlaikus veicināt sabiedrisko un nemotorizēto transporta veidu izmantošanu, lai mazinātu sastrēgumus un emisijas [28], [29]. Holistiska pieeja, kurā transporta plānošanā tiek integrētas dzīves cikla analīzes (*LCA*), palīdz politikas veidotājiem novērtēt transporta sistēmu pilnu vides ietekmi, tādējādi virzoties uz efektīvāku emisiju mazināšanas stratēģiju izstrādi [30], [31].

Transporta sektors Eiropā vienlaikus rada gan būtiskus izaicinājumus, gan sniedz iespējas klimata pārmaiņu mazināšanai globālā mērogā. Lai sasniegtu ES klimata mērķus un nodrošinātu ilgtspējīgu nākotni, ir jāaskaņo efektīva politikas izstrāde ar tehnoloģiskajām inovācijām, veidojot noturīgu un ilgtspējīgu transporta infrastruktūru, kas apmierina esošās un nākotnes mobilitātes vajadzības, vienlaikus būtiski samazinot SEG emisijas [24], [32].

Neskatoties uz kopējiem ES centieniem, transporta emisijas 2019. gadā bija par 24 % augstākas nekā 2000. gadā, un transports joprojām ir vienīgais sektors, kurš pēdējā desmitgadē uzrāda būtisku emisiju kāpumu. Pētījumi liecina, ka līdz šim panākto emisiju kritumu citos sektoros (enerģētikā, rūpniecībā) faktiski kompensē transporta pieprasījuma pieaugums. Transporta dekarbonizācijas progress dažādās valstīs ļoti atšķiras un lielā mērā ir atkarīgs no nacionālo politiku efektivitātes. Vairums valstu, īpaši Austrumeiropā, atpaliek bezemisiju transportlīdzekļu infrastruktūras nodrošināšanā, un tas kavē strauju emisiju samazināšanu. Tāpat dati rāda, ka energoefektivitātes un atjaunīgo resursu pieaugums transportā pagaidām nespēj pilnībā neitralizēt ekonomiskās

izaugsmes un mobilitātes pieprasījuma radīto emisiju pieaugumu. Dekarbonizācijas temps nav vienmērīgs, un Austrumeiropas valstīm var būt nepieciešami no Ziemeļvalstīm vai Rietumeiropas atšķirīgi risinājumi. Piemēram, pētījumā secināts, ka dažādiem reģioniem jāpielāgo atšķirīgi mehānismi – Ziemeļvalstīs, Rietumeiropā un Austrumeiropā optimālās politikas var atšķirties. Līdz ar to vienota pieeja visiem var nedot labākos rezultātus, jo valstu sākumpunkti un iespējas atšķiras [22], [34].

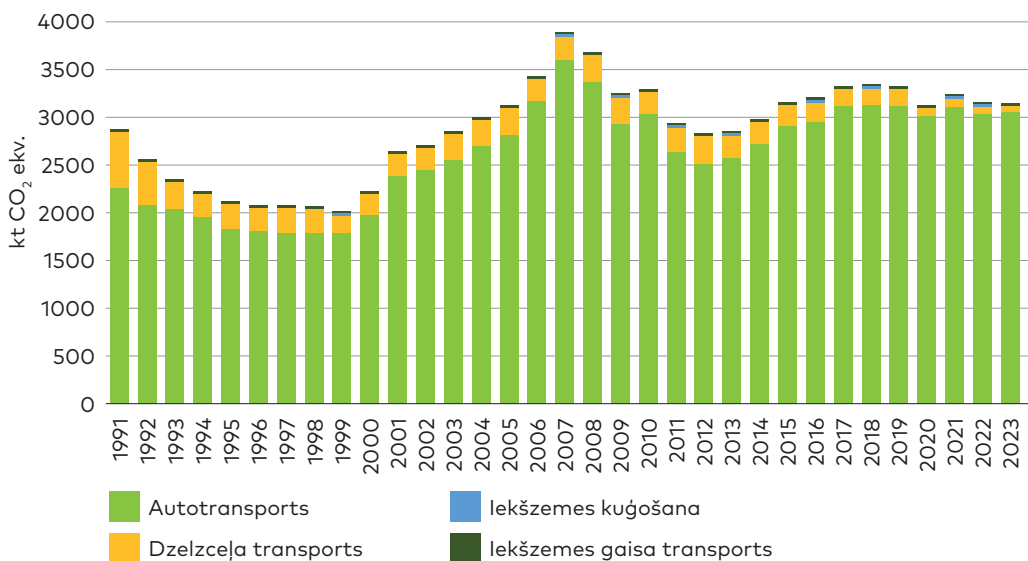
2.1.2. Transporta sektora SEG emisijas Latvijā

Transporta sektors ir viens no galvenajiem SEG emisiju avotiem Latvijā. 2023. gadā tas veidoja 31,4 % no kopējām SEG emisijām [35], saglabājoties kā otrais lielākais emisiju devējs pēc enerģētikas sektora. SEG emisiju dinamika transporta sektorā Latvijā laika posmā no 1990. līdz 2023. gadam atspoguļo dažādus makroekonomiskus, politiskus un tehnoloģiskus posmus. No 1990. līdz 1999. gadam kopējās emisijas būtiski samazinājās. No 2000. līdz 2007. gadam emisijas pieauga strauji, sasniedzot maksimumu 2007. gadā. Tās bija par 27,5 % lielākas nekā 1990. gadā. Šo kāpumu noteica strauja ekonomikas izaugsme, automobiļu skaita palielināšanās un kravu pārvadājumu apjoma pieaugums. Piemēram, 2007. gadā kravu apgrozība (autotransports un dzelzceļš) bija par 73,7 % lielāka nekā 2000. gadā.

2008.–2009. gadā ekonomikas krīzes dēļ bija vērojama emisiju samazināšanās – saruka gan pasažieru, gan kravu pārvadājumi. No

2.1. attēls.

Transporta sektora emisijas [35].



2013. līdz 2018. gadam atkal bija vērojams stabils emisiju kāpums, ko izraisīja pasažieru apgrozības palielināšanās par 21,7 %, salīdzinot ar 2013. gadu. Kopējās transporta sektora emisijas 2023. gadā palielinājās par 3,2 %.

Transporta ir cieši saistīts ar mobilitāti, ekonomisko aktivitāti un enerģijas patēriņu. Tā dekarbonizācija ir viens no galvenajiem mērķiem ceļā uz klimatneitralitāti. Emisiju struktūrā dominē CO₂, kas veido vairāk nekā 98 % no transporta sektora emisijām.

Transporta emisijas veido vairāki apakškomponenti:

- ceļu transports – dominējošais avots, kas veido vairāk nekā 97 % no kopējām transporta emisijām. Tajā ietilpst vieglais pasažieru transports, kravas automašīnas un autobusi;
- iekšzemes aviācija – emisiju apjoms salīdzinoši neliels (0,1 % no kopējām transporta emisijām 2023. gadā), taču pastāvīgs;
- dzelzceļš un iekšzemes kuģošana – emisijas ir zemas un stabilas (2,4 % 2023. gadā), pateicoties elektrifikācijai un mazajam apjomam;
- iekšzemes kuģošana – emisiju apjoms ir salīdzinoši neliels (0,1 % no kopējā transporta sektora emisijām 2023. gadā);
- starptautiskā aviācija un kuģniecība – tiek uzskaitītas atsevišķi (tā sauktie “bunkuri”) un neietilpst nacionālajās SEG kopsummās, taču politikas ietvaros tiek ņemtas vērā.

Transporta sektorā galvenokārt tiek izmantoti šādi energoresursi:

- dīzeļdegviela – dominē kravas transportā un sabiedriskajā transportā;
- benzīns – plaši izmantots vieglajās automašīnās;
- LPG (sašķidrinātā naftas gāze) – neliels, bet pieaugošs īpatsvars;
- biodegvielas – tiek piejauktas fosilajām degvielām, sadedzināšanas aspektā tās uzskata par nulles emisiju degvielām.

Latvijā transporta sektora SEG emisiju apjomu būtiski ietekmē transportlīdzekļu veids. Galvenais emisiju avots ceļu transportā ir vieglās pasažieru automašīnas, kas veido lielāko daļu no kopējā transportlīdzekļu skaita valstī. Šīs automašīnas visbiežāk darbojas ar benzīnu, lai gan pēdējo gadu laikā pieaudzis arī dīzeļdzinēju īpatsvars.

Kravas automašīnas un autobusi veido ievērojamu daļu no kopējām emisijām, jo tie pārsvarā izmanto dīzeļdegvielu, kuras emisiju faktors ir augstāks nekā benzīnam. Lielākie emisiju apjomi šajā grupā rodas no intensīvas ekspluatācijas un lielāka degvielas patēriņa uz vienību pārvadātās kravas vai pārvadāto pasažieru skaita.

Elektrisko transportlīdzekļu īpatsvars Latvijas autoparkā vēl ir zems, taču ir vērojama pozitīva pieauguma tendence. Šo pieaugumu sekmē ES klimata politika, nacionālie atbalsta mehānismi un investīcijas uzlādes infrastruktūrā. Elektromobiļu ieviešana var nākotnē

būtiski mazināt transporta emisijas, īpaši gadījumā, ja elektroenerģijas ražošanā dominēs atjaunojamie energoresursi.

Tomēr būtisks emisiju ierobežošanas šķērslis ir Latvijas autoparka novecošanās. Liela daļa transportlīdzekļu ir tehniski un morāli novecojuši, tiem ir zema energoefektivitāte un augsta emisiju intensitāte. Tā rezultātā transportlīdzekļu modernizācija un pāreja uz videi draudzīgākām tehnoloģijām ir viena no prioritātēm emisiju samazināšanas kontekstā.

2.1.3. Transporta sektora SEG emisiju aprēķins

SEG emisiju aprēķins transporta sektorā tiek veikts saskaņā ar IPCC 2006. gada vadlīnijām [36], [37] un gaisa piesārņotāju emisiju inventarizācijas rokasgrāmatu [38], ievērojot vairākus metodiskos līmeņus (*Tier 1–3*) atkarībā no datu pieejamības un specifikas.

Transporta sektora emisiju aprēķinu pamatā ir degvielas patēriņa dati, kas pārvērsti emisiju daudzumā, izmantojot atbilstošus emisijas faktorus (EF). Aprēķinu pamatvienādojums ir:

$$E_m = EF \times B_q, \quad (2.1.)$$

kur

E_m – kopējās emisijas (kt);

EF – emisijas koeficients (t/TJ);

B_q – degvielas daudzums termiskajās vienībās (TJ).

2.2. Klimata pārmaiņu mazināšanas tehnoloģiskie risinājumi

Transporta sektora dekarbonizācija ES ir daudzslāņains izaiņinājums, kas prasa inovatīvu stratēģiju un mērķētu regulējumu kombināciju, lai efektīvi samazinātu SEG emisijas. Ņemot vērā, ka transports veido būtisku daļu no kopējām emisijām Eiropas reģionā, nepieciešami efektīvi politikas un tehnoloģiskie risinājumi, kas virza transporta veidu attīstību ilgtspējīgākā virzienā.

Viens no emisiju mazināšanas pamatmehānismiem ir pakāpeniska pāreja no iekšdedzes dzinēju transportlīdzekļiem uz elektrotransportu (ET). Elektromobiļi ekspluatācijas laikā rada būtiski mazāk emisiju, un straujie akumulatoru tehnoloģiju uzlabojumi samazina to ražošanas izmaksas, padarot arī elektriskos kravas transportlīdzekļus ekonomiski konkurētspējīgākus. Vienlaikus īpaši svarīgi ir nodrošināt elektroenerģijas ražošanas pārorientēšanu uz atjaunojamiem resursiem, jo ET oglekļa pēda ir tieši atkarīga no izmantotās elektroenerģijas emisiju intensitātes. Visaptverošas

uzlādes infrastruktūras attīstība ir priekšnoteikums ne tikai ET izplatībai, bet arī koplietošanas transporta sistēmu ieviešanai, kas samazina pieprasījumu pēc akumulatoru ražošanas izejmateriāliem.

ES regulatīvie instrumenti, piemēram, CO₂ emisiju standarti ražotājiem, nodrošina elastīgu pieeju atbilstības nodrošināšanā un vienlaikus veicina inovācijas energoefektivitātes uzlabošanā. Tomēr šiem standartiem jāiet roku rokā ar ticamiem testēšanas mehānismiem, kas atspoguļo reālus ekspluatācijas apstākļus.

Nenovērtējama ir arī bezmotorizētās pārvietošanās nozīme emisiju mazināšanā. Pandēmijas laikā un pēc tās aktualizējās nepieciešamība pēc infrastruktūras, kas veicina pārvietošanos ar velosipēdiem un kājām, it īpaši pilsētvidē. Šīs iniciatīvas ir izrādījušās efektīvas SEG emisiju samazināšanā. Eiropas Aprites ekonomikas rīcības plāns akcentē ilgtspējas integrāciju transporta nozarē, rosinot pasākumus, kas vienlaikus veicina gan emisiju mazināšanu, gan resursu efektīvu izmantošanu transportlīdzekļu ražošanā un piegādes ķēdēs.

Transporta sektora dekarbonizācija Eiropā prasa koordinētu pieeju, apvienojot jaunu tehnoloģiju attīstību, efektīvus normatīvos regulējumus un aktīvās mobilitātes veicināšanu. Šo instrumentu sinerģija, papildināta ar pētniecību un inovācijām, būs izšķiroša, lai būtiski samazinātu SEG emisijas un veicinātu pāreju uz klimatneitrālu transporta sistēmu. Eiropai virzoties uz šo mērķi, kļūst arvien skaidrāks, ka transporta emisiju būtiska samazināšana ir sasniedzama, ja tiek īstenoti visaptveroši un sistēmiski risinājumi.

Ceļu transports joprojām ir viens no galvenajiem SEG emisiju avotiem ES, veidojot gandrīz piekto daļu no kopējām emisijām. Neskatoties uz efektivitātes uzlabojumiem un politikas centieniem, ceļu transporta emisijas kopš 1990. gada ir būtiski pieaugušas, kas norāda uz nepieciešamību pēc kardinālām pārmaiņām tehnoloģiju, uzvedības un sistēmiskās pieejas līmenī.

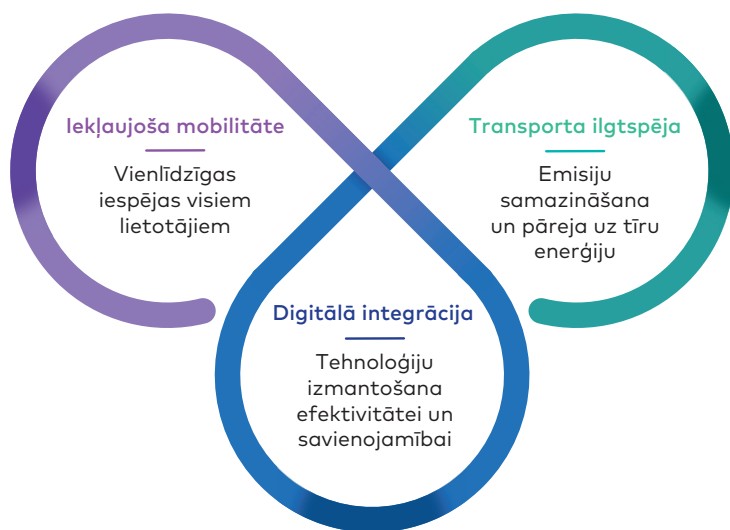
Ilgttermiņā nozīmīgs emisiju samazinājums nav sasniedzams tikai ar nelielām uzlabojumu korekcijām. Nepieciešamas transformējošas pārmaiņas – pāreja uz elektromobilitāti, sistemātiska atkarības mazināšana no iekšdedzes dzinējiem, kā arī atjaunojamās elektroenerģijas plašāka izmantošana transporta sektorā. Piemēram, Eiropas Vides aģentūras pētījumā par ceļu transporta dekarbonizāciju secināts, ka, lai elektromobiļi sniegtu klimatam labumu, ir elektrība jāražo ar zemu emisiju intensitāti. Svarīga ir arī infrastruktūras attīstība, tostarp uzlādes punktu pieejamība gan pilsētvidē, gan ārpus tās [40]. Pētījumā uzsvērts, ka līdzšinējie klimata politikas pasākumi, piemēram, ES CO₂ emisiju normatīvie standarti, energopakalpojumu līgumu (*ESCO*) piemērošana un dažādi fiskālie stimuli tostarp subsīdijas elektrotansportlīdzekļu iegādei, ir devuši ievērojamu ieguldījumu tirgus attīstībā un zemu emisiju tehnoloģiju ieviešanā ceļu transportā. Tomēr ilgtspējīgai izaugsmei ar šiem soļiem vien nepietiek. Ziņojumā uzsvērts, ka turpmākajai rīcībai

jābūt vienlaikus konsekventai un prognozējamai, kā arī politiski saskaņotai starp dažādiem pārvaldības līmeņiem – no valsts līdz pašvaldību līmenim. Vienlaikus īpaša uzmanība jāpievērš sociālajai taisnīgumam, lai nodrošinātu, ka pāreja uz klimatneitrālu transportu ir pieejama visām sabiedrības grupām. Lai transporta sektora dekarbonizācija būtu efektīva un ilgtspējīga, ir būtiski ne tikai tehnoloģiski aizstāt fosilās degvielas ar alternatīviem energoresursiem, bet arī mērķtiecīgi mainīt pašus pārvietošanās paradumus. Jāpārorientējas no individuāla transportlīdzekļa lietošanas uz kolektīviem, koplietotiem un nemotorizētiem mobilitātes risinājumiem, kas mazina emisijas un vienlaikus uzlabo dzīves kvalitāti pilsētvidē [39].

Ilgtspējīgas mobilitātes politikas būtu jāveido kā savstarpēji papildinošu pasākumu kopums. Tajā ietilpst gājēju un velobraucēju infrastruktūras pilnveidošana, sabiedriskā transporta pievilcības un pieejamības uzlabošana, kā arī pilsētvides plānošana, kas samazina nepieciešamību pēc garām ikdienas pārvietošanās distancēm. Papildus tam jāveicina mobilitātes kā pakalpojuma (*"Mobility as a Service"*) ieviešana, kas integrē dažādus pārvietošanās veidus vienotā, lietotājam draudzīgā platformā.

Vienlaikus jāņem vērā vairāki nākotnes izaicinājumi, kas var kavēt šo pārmaiņu tempu. Starp tiem īpaši nozīmīgi ir uzlādes un alternatīvās degvielas uzpildes infrastruktūras trūkums ārpus lielajām apdzīvotajām vietām, investīciju jaunās tehnoloģijās ilgie atmaksāšanās termiņi, kā arī izejmateriālu piegādes drošība, īpaši saistībā ar elektromobilitātes izplatību. Jārisina arī digitālās nevienlīdzības un piekļūstamības jautājumi, kas var ierobežot noteiktu iedzīvotāju grupu iespējas pilnvērtīgi iesaistīties ilgtspējīgas mobilitātes risinājumos.

Tomēr šie izaicinājumi reizē piedāvā arī plašas iespējas. Transporta sistēmas pārveide par noturīgāku, energoefektīvāku un sociāli



2.2. attēls.

Ilgtspējīgas un viedas mobilitātes attīstības virzieni.

iekļaujošu var sniegt ne tikai nozīmīgu ieguldījumu emisiju mazināšanā, bet arī veicināt veselīgāku, drošāku un ekonomiski dinamiskāku sabiedrību.

Lai veicinātu transporta sektora zaļo un digitālo pāreju, būtiska nozīme ir sistēmiskai pieejai, kuras pamatā ir ilgtspējīgas un viedas mobilitātes ieviešana. Šī pieeja paredz ne tikai emisiju samazināšanu, bet arī efektivitātes un savienojamības uzlabošanu visos transporta veidos. Tādējādi tiek stiprināta gan klimatneitralitātes sasniegšanas kapacitāte, gan arī ES iekšējā konkurētspēja.

Ilgspējīgas un viedas mobilitātes attīstībai nepieciešami koordinēti pasākumi trīs savstarpēji saistītos virzienos: transporta ilgtspējas paaugstināšana, digitālo tehnoloģiju integrācija un pieejamības nodrošināšana visiem iedzīvotājiem un reģioniem [40].

Pirmajā virzienā uzsvars likts uz emisiju samazināšanu, tostarp pāreju uz nulles emisiju transportlīdzekļiem, oglekļa mazietilpīgas degvielas ieviešanu, kā arī modālo pāreju uz sabiedrisko un dzelzceļa transportu, kur tas ir iespējams. Vienlaikus jāizveido visaptveroša uzlādes un alternatīvās degvielas infrastruktūra, nodrošinot tās pieejamību ne tikai pilsētās, bet arī lauku reģionos.

Otrajā virzienā galvenā uzmanība pievērsta digitalizācijai – gan datu atvērtībai un savietojamībai, gan viedai satiksmes vadībai, autonomo transportlīdzekļu ieviešanai un mobilitātes kā pakalpojuma koncepta izstrādei. Šāda digitalizācija ļauj optimizēt transporta plūsmu, samazināt sastrēgumus, kā arī uzlabot loģistikas efektivitāti, vienlaikus mazinot vides slodzi.

Trešajā virzienā tiek uzsvērtā iekļaujošas mobilitātes nepieciešamība, kas nodrošina vienlīdzīgas iespējas visiem, tostarp cilvēkiem ar ierobežotām pārvietošanās spējām, reģionālajiem lietotājiem un sociāli mazāk aizsargātām grupām. Politikas veidotājiem jānodrošina, ka mobilitātes pārveide notiek sociāli godīgi un ietverot visas sociālās grupas.

Kopumā ilgtspējīgas un viedas mobilitātes ieviešana prasa ilgtermiņa investīcijas, pārdomātu pilsētvides plānošanu, kā arī pārvaldības struktūru, kas spēj nodrošināt saskaņotu rīcību dažādos līmeņos un nozarēs. Šī pieeja ne tikai samazina vides ietekmi, bet arī veicina inovācijas, ekonomisko noturību un sabiedrības labklājību kopumā.

Lai sasniegtu iepriekš aprakstītos ES mērķus nacionālā līmenī, Latvija ir izstrādājusi vairākus stratēģiskus dokumentus, tostarp Nacionālo enerģētikas un klimata plānu (NEKP).

2.2.1. Nacionālais enerģētikas un klimata plāns

Transporta sektors Latvijā ir viens no lielākajiem SEG emisiju avotiem un rada būtisku slogu gan klimatam, gan gaisa kvalitātei. NEKP nosaka Latvijas stratēģisko redzējumu attiecībā uz klimata

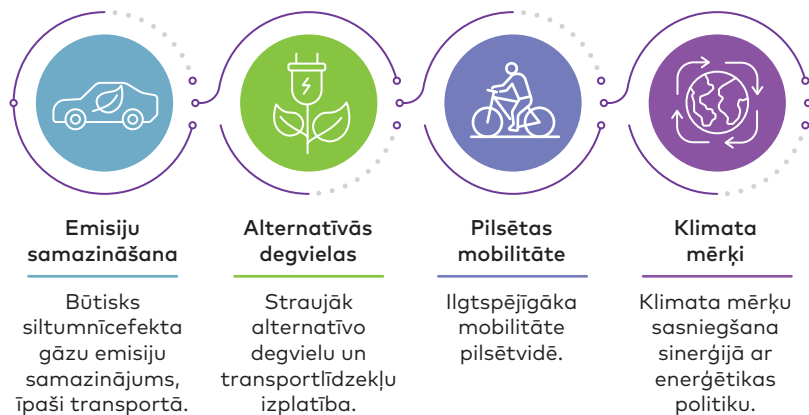


pārmaiņu mazināšanu un enerģētikas attīstību 2021.–2030. gadam, izvirza vairākus mērķus un konkrētus pasākumus emisiju samazināšanai transportā.

NEKP mērķis ir veicināt ilgtspējīgas mobilitātes attīstību, samazināt atkarību no fosilajiem energoresursiem un būtiski mazināt SEG emisijas transporta jomā.

Līdz 2030. gadam paredzēts:

- panākt ievērojamu pāreju uz alternatīviem degvielas veidiem, tostarp elektrību, ūdeņradi un biometānu;
- palielināt bezemisiju transportlīdzekļu īpatsvaru, īpaši pilsētvidē;



2.3. attēls.
NEKP sagaidāmie rezultāti transporta jomā.

- modernizēt sabiedrisko transportu un uzlabot dzelzceļa infrastruktūru;
- attīstīt videi draudzīgus pārvietošanās paradumus, īpaši veicinot velotransportu un pārgājieni iespējas [41].

Līdz 2030. gadam NEKP īstenošana transporta sektorā paredz panākt:

- būtisku SEG emisiju samazinājumu, jo īpaši autotransporta jomā;
- straujāku alternatīvo degvielu un transportlīdzekļu izplatību;
- ilgtspējīgāku mobilitāti pilsētvidē;
- klimata mērķu sasniegšanu sinerģijā ar enerģētikas un vides kvalitātes politiku [41].

Šie NEKP izvirzītie mērķi ET īpatsvara palielināšana, sabiedriskā transporta modernizācija utt.) tieši sakrīt ar turpmāk apskatītajiem tehnoloģiskajiem risinājumiem, nodrošinot politisku ietvaru to ieviešanai.

2.2.2. Transporta attīstības pamatnostādnes

Transporta attīstības pamatnostādnes 2021.–2027. gadam (TAP2027) nosaka Latvijas transporta politikas stratēģiskos virzienus, lai nodrošinātu ilgtspējīgu, efektīvu un klimatneitrālu mobilitātes sistēmu, vienlaikus sekmējot valsts ekonomisko izaugsmi un sabiedrības labklājību. Transporta politika balstīta ilgtspējas principos, kas ietver cilvēku mobilitātes vajadzību apmierināšanu, dabas resursu saglabāšanu un līdzsvarotu attīstību reģionos. TAP2027 uzsvērts, ka transporta sistēmai jābūt drošai, pieejamai, viedai un klimatnoturīgai. Ilgtspējīgas mobilitātes risinājumi paredz sabiedriskā transporta, mikromobilitātes un digitalizētu mobilitātes pakalpojumu attīstību [42].

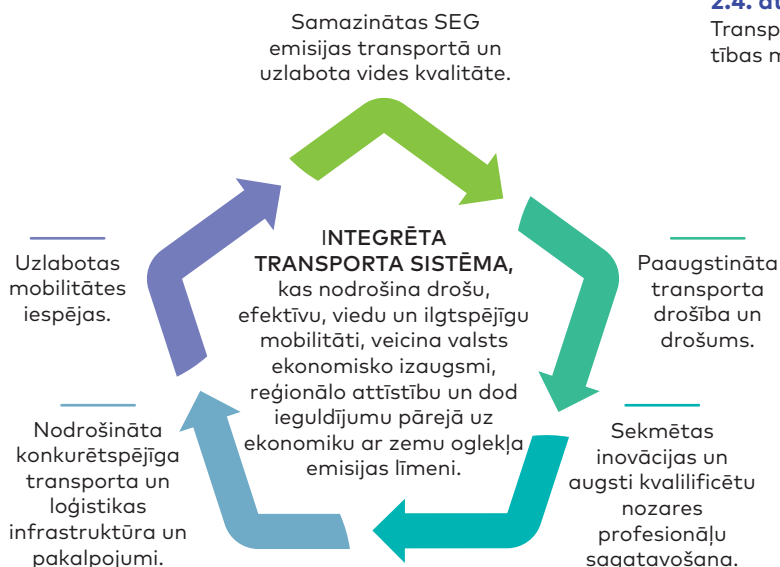
Saskaņā ar Eiropas zaļo kursu Latvija ir apņēmusies panākt klimatneitralitāti līdz 2050. gadam, samazinot transporta sektora SEG emisijas par 90 % salīdzinājumā ar 1990. gadu. Līdz 2030. gadam plānots panākt vismaz 6 % SEG emisiju samazinājumu ne-ETS sektoros (tostarp transportā), salīdzinot ar 2005. gadu.

Transporta sektors ir viens no lielākajiem SEG emisiju un gaisa piesārņojuma avotiem. TAP2027 paredz, ka šo problēmu risināšanai nepieciešama būtiska pāreja uz tīriem un energoefektīviem risinājumiem, tostarp:

- alternatīvo degvielu ieviešana (elektrība, biometāns, ūdeņradis u. c.);
- bezemisiju transportlīdzekļu plašāka izmantošana;
- sabiedriskā transporta attīstība, īpaši ar dzelzceļu kā mugurkaulu;
- dzelzceļa elektrifikācija;

2.4. attēls.

Transporta attīstības mērķi [42].



Multimodālā sabiedriskā transporta tīkla ar dzelzceļu kā sabiedriskā transporta "mugurkaulu" attīstība

- Dzelzceļa infrastruktūras modernizēšana
- Jauni dzelzceļa reģionālie pasažieru maršruti
- Valsts reģionālo un vietējo autoceļu pārbūve
- Mobilitātes punktu izveide
- Vienota sabiedriskā transporta biļešu sistēma

Starptautiskās savienojamības uzlabošana

- *Rail Baltica* dzelzceļa līnijas attīstība
- Lidostu attīstība
- Gaisa satiksmes vadība
- Valsts galveno autoceļu pārbūve
- 5G mobilo sakaru pārklājums gar *VIA Baltica* un *Rail Baltica*

Loģistikas pakalpojumu konkurētspējas paaugstināšana

- Transporta un loģistikas nozares eksporta pakalpojumu virzība starptautiskā tirgū un Latvijas iekļaušanās mūsdienīgās globālās piegādes ķēdēs
- Ostu infrastruktūras modernizēšana

Drošas un ilgtspējīgas transporta sistēmas pilnveidošana

- Ceļu satiksmes drošības uzlabošana
- Mikromobilitātes attīstības veicināšana, tostarp veloinfrastruktūras attīstība
- Viedās tehnoloģijas satiksmes plūsmas regulēšanai
- Alternatīvo degvielu infrastruktūras izveide
- Dzelzceļa ritošā sastāva modernizācija un atjaunošana
- Atsevišķu dzelzceļa tīkla posmu elektrifikācija un esošo līniju modernizācija pasažieru pārvadājumu nodrošināšanai

Pētniecības un inovāciju izmantošana, pētnieku un politikas veidotāju sadarbība un mūsdienu prasībām atbilstošu transporta nozares speciālistu sagatavošana

- Nozares popularizēšanas pasākumi
- Sekmēt pētniecības un inovācijas attīstību transporta nozarē un veicināt sadarbību starp transporta nozares pārstāvjiem
- Speciālisti nozarei

- mikromobilitātes un gājēju kustības veicināšana;
- pārvadājumu novirzīšana no autotransporta uz dzelzceļu un ūdensceļiem.

2.2.3. Pasākumi klimata pārmaiņu mazināšanai

Transporta sektors Latvijā ir viens no galvenajiem SEG emisiju avotiem. Lai gan ES zaļais kurss un klimata politikas rāmis paredz pakāpenisku pāreju uz klimatneitrālu mobilitāti līdz 2050. gadam, būtiski ir ieviest konkrētus emisiju samazināšanas pasākumus nacionālā līmenī [43].

Saskaņā ar Eiropas zaļo kursu un *Fit for 55* pakotni Latvijai līdz 2030. gadam jāsamazina emisijas transporta sektorā vismaz par 17 %, salīdzinot ar 2005. gada līmeni, savukārt līdz 2050. gadam jāpanāk klimatneitralitāte. Lai to sasniegtu, nepieciešama daudzveidīgu emisiju mazināšanas pasākumu ieviešana, kas aptver gan tehnoloģiskus risinājumus, gan uzvedības maiņu un politikas instrumentu pielāgošanu.

Elektromobilitāte kā dekarbonizācijas virziens

Iekšdedzes dzinēju aizstāšana ar elektrotransportu ir viena no redzamākajām stratēģijām SEG emisiju samazināšanai. Pētījumi rāda, ka elektromobiļi rada ievērojami mazākas emisijas visā dzīves ciklā, īpaši, ja elektroenerģija iegūta no atjaunojamiem resursiem.

Piemēram, aprites cikla analīzes salīdzinošā analīze starp elektriskajiem un iekšdedzes transportlīdzekļiem vairākos reģionos apliecina, ka elektromobiļi rada par 60–75 % mazāk CO₂ emisiju nekā benzīna vai dīzeļdzinēju analogi [44]. Tomēr šī priekšrocība ir atkarīga no valsts elektroenerģijas ražošanas oglekļa intensitātes. Latvijā, kur elektroenerģijas portfelis ietver ūdens un vēja komponentus, elektromobiļu emisiju profils ir īpaši labvēlīgs.

Latvijā veikts ekoeftektivitātes pētījums par elektromobiļu izmantošanu pēdējās jūdzes piegādē apliecina, ka pāreja uz elektriskajiem transportlīdzekļiem sniedz ne tikai vides ieguvumus (emisiju un trokšņa samazinājumu), bet ir arī finansiāli izdevīga. Analīze parādīja, ka elektrisko piegādes automobiļu ekspluatācija ir ekonomiski izdevīgāka, īpaši ņemot vērā samazinātās ārējās izmaksas, piemēram, oglekļa emisiju monetizāciju. Autori iesaka izmantot brīvprātīgos oglekļa kredītu tirgus, lai pilnībā novērtētu oglekļa cenas ietekmi un vēl vairāk uzlabotu elektromobiļu ekonomisko izdevīgumu [45]. Elektrotransporta ieviešana komerciālajā sektorā, īpaši piegādes un loģistikas jomā, var dot tūlītēju emisiju samazinājumu, īpaši pilsētvidē. Pētījums par elektrisko piegādes furgonu lietošanu

Rīgā pierāda, ka šāda pāreja ļauj būtiski samazināt ārējās izmaksas, tostarp trokšņa, gaisa piesārņojuma un SEG emisiju apjomu. Šīs priekšrocības papildina arī zemākas ekspluatācijas izmaksas un augstāka efektivitāte [45].

CO₂ pārstrāde sintētiskajā degvielā

CO₂-to-fuel tehnoloģijas piedāvā iespēju izmantot nozares emisijas kā resursu jaunas, klimatneitrālas degvielas radīšanai. Šī pieeja īpaši nozīmīga smagajam autotransportam, aviācijai un kuģniecībai, kur elektrifikācija ir tehnoloģiski sarežģītāka.

Papildus elektromobilitātei nozīmīgs potenciāls ir CO₂ pārveidošanai par sintētisko degvielu (CO₂-to-fuel), īpaši smagajā transportā un aviācijā. Latvijā veiktais sistēmdinamikas modelējums liecina, ka, izmantojot 15 % no nozares CO₂ emisijām etanola ražošanai ar zaļo ūdeņradi, iespējams samazināt līdz pat 12 % transporta sektora emisiju [46]. Šī tehnoloģija ļauj vienlaikus dekarbonizēt gan rūpniecību, gan transportu, tomēr tās efektivitāte atkarīga no ūdeņraža cenas un atbalsta politikas [46].

Biodegvielu un atjaunīgo degvielu izmantošana

Biodegvielas ir nozīmīgs pārejas risinājums, jo ļauj uzlabot esošā autoparka emisiju profilu bez tehnoloģiskām izmaiņām.

Latvijā jau izmanto FAME (taukskābju metilesteru) līdz 7 % piejaukumu dīzeļdegvielai, taču emisiju samazinājums ir relatīvi neliels (aptuveni 1,3 %). Savukārt HVO (hidroapstrādāta augu eļļa) izmantošana, pat 20 % piejaukuma gadījumā, ļauj samazināt emisijas līdz 17,7 % visa degvielas cikla ietvaros. Pilnīga pāreja uz 100 % HVO dotu pat 80 % emisiju samazinājumu. Turklāt otrās paaudzes biodegvielu attīstība piedāvā iespēju izmantot lauksaimniecības atliekas un noteiktus ūdeņus kā izejvielas, samazinot konkurenci ar pārtikas sektoru. Biodegvielu piejaukšana fosilajam kurināmajam samazina transporta nozares SEG emisijas, jo biodegvielu sadedzināšanas ciklā emitētais CO₂ uzskatāms par neitrālu (biogēnas izcelsmes). Īstenojot šādu pasākumu, būtiski mainās degvielas patēriņa struktūra – samazinās fosilā dīzeļdegviela un pieaug pieprasījums pēc biodegvielas, kas jāpārvalda, attīstot vietējo ražošanu vai importējot biodegvielu.

Pāreja uz sabiedrisko un koplietošanas transportu

Kā alternatīva tehnoloģiskajiem risinājumiem tiek piedāvāta arī cilvēku pārvietošanās paradumu maiņa – pāreja no privātā uz sabiedrisko transportu.

Uzvedības maiņa ir vēl viens būtisks SEG emisiju samazināšanas virziens. Sistēmdinamikas modelēšana Latvijā rāda, ka pāreja no privātā uz sabiedrisko transportu iespējama, ja tiek nodrošināts labāks pakalpojumu klāsts: uzlabots komforts, uzticamība, biežums un pieklūstamība [47]. Paralēli jāattīsta koplietošanas mehānismi (piemēram, *car-sharing*, *bike-sharing*), lai samazinātu nepieciešamību pēc privāta transportlīdzekļa īpašumtiesībām.

Dzelzceļa elektrifikācija un modernizācija

Dzelzceļa transportam ir stratēģiska loma emisiju samazināšanā, jo tas ir viens no efektīvākajiem sauszemes transporta veidiem. Latvijā būtiski izvērtēt trīs potenciālos dekarbonizācijas ceļus:

- **BEMU (*battery electric multiple units*)** daļēja ieviešana ļauj elektrificēt zemas intensitātes līnijas bez pilnas infrastruktūras izbūves. Tas samazina investīciju slogu un palielina mobilitātes elastību;
- **pilna elektrifikācija** var samazināt emisijas par vairāk nekā 70 %, taču prasa augstas sākotnējās investīcijas. Šādas sistēmas visefektīvākas ir uz noslogotākajām līnijām;
- **modernizācija no 3,3 kV uz 25 kV sistēmu** būtiski paaugstina energoefektivitāti, samazina elektroenerģijas zudumus un ekspluatācijas izmaksas ilgtermiņā.

Aizstājot dīzeļdegvielas vilcienus ar *BEMU* tehnoloģiju neelektrificētās līnijās, samazinās dīzeļdegvielas patēriņš pasažieru pārvadājumos un attiecīgi arī CO₂ emisijas. Tajā pašā laikā pieaug elektroenerģijas pieprasījums vilcienu darbībai, tomēr, ja elektrība ir no atjaunojamiem avotiem, kopējās emisijas būtiski sarūk. Pareizs, ka infrastruktūras kalpošanas laikā (≥30 gadi) *BEMU* vilcieni nodrošinās ievērojamu ilgtermiņa emisiju samazinājumu.

Dzelzceļš ir viens no energoefektīvākajiem pārvietošanās veidiem. Latvijā apsverami trīs galvenie risinājumi: pilnīga elektrifikācija noslogotajās līnijās, daļēja elektrifikācija ar *BEMU* vilcieniem mazāk noslogotajās trasēs, kā arī 3,3 kV sistēmas modernizācija uz 25 kV, kas ļauj samazināt zudumus un palielināt pārvades jaudu. Dzelzceļa attīstība ir būtiska arī kravu pārvadājumu sektora dekarbonizācijai.

Integrētas politikas un ārējo izmaksu internalizācija

Efektīva SEG emisiju samazināšana nav iespējama bez atbilstošas politiskās vides. Ārējo izmaksu, tostarp gaisa piesārņojuma, klimata izmaiņu, trokšņa un sabiedrības veselības izmaksu, internalizācija ir instruments, kas ļauj padarīt fosilās degvielas patēriņu ekonomiski neizdevīgāku.

Efektīvu emisiju samazināšanas pasākumu īstenošana prasa arī ārējo izmaksu internalizāciju. Pētījums par Latviju parāda, ka ārējo izmaksu (gaisa piesārņojums, troksnis, klimata pārmaiņas un *WTT* emisijas) samazināšanās ir proporcionāla elektromobiļu īpatsvara pieaugumam autoparkā [43]. Tādējādi politikas veidotājiem jāizstrādā fiskāli un normatīvi instrumenti, kas veicina elektromobiļu pieņemšanu un ārējo izmaksu iekļaušanu degvielas cenā.

Latvijas transporta sektora dekarbonizācija prasa daudzdimensionālu pieeju, kas vienlaikus aptver infrastruktūras modernizāciju, tehnoloģiju ieviešanu, sabiedrības uzvedības maiņu un fiskālo stimulu korekciju. Pasākumu savstarpēja papildināšana ļauj ne tikai samazināt emisijas, bet arī uzlabot mobilitātes kvalitāti, samazināt atkarību no importētiem energoresursiem un veicināt lauku teritoriju attīstību.

2.2.4. Šķēršļi un iespējas ieviešanai praksē

Ilgtermiņīgas transporta politikas un tehnoloģiskie risinājumi Latvijā sastopas ar virkni izaicinājumu, kas saistīti gan ar infrastruktūras nepietiekamību, gan ar sabiedrības uzvedības modeļiem un ierobežotiem finansiālajiem resursiem. Vienlaikus identificējamas arī vairākas iespējas, kuras, pienācīgi izmantojot, var ievērojami paātrināt klimata pārmaiņu mazināšanai nepieciešamo pasākumu ieviešanu.

Tehnoloģiskās infrastruktūras nepilnības

Viens no būtiskākajiem šķēršļiem elektromobilitātes attīstībai Latvijā ir nepietiekami attīstīta uzlādes infrastruktūra, īpaši ārpus

2.5. attēls.

Ilgtermiņīgas transporta pārejas izaicinājumi Latvijā.



lielajām pilsētām. Līdztekus tam augstās elektromobiļu iegādes izmaksas un vēl joprojām salīdzinoši ierobežotais piedāvājums tirgū bremzē iedzīvotāju un uzņēmumu pāreju uz elektriskajiem transportlīdzekļiem [43].

Elektrības maisījuma oglekļa intensitāte

Vēl viens izaicinājums ir Latvijas elektroenerģijas ražošanas struktūra. Lai gan elektromobiļi ir potenciāli zemu emisiju tehnoloģija, tās efektivitāte klimata mērķu sasniegšanā būtiski atkarīga no izmantotā elektroenerģijas avota. Pētījumi rāda, ka valstīs ar fosilajās degvielās balstītu elektroenerģijas maisījumu elektromobiļu emisijas dzīves cikla laikā var būt līdzīgas vai pat augstākas nekā moderniem iekšdedzes dzinēja motora transportlīdzekļiem [44].

Sabiedrības uzvedības inerce un uztveres šķēršļi

Latvijā, kā daudzviet pasaulē, liela daļa iedzīvotāju transportlīdzekļu izvēli balsta ērtības, uzticamības un ieraduma faktoros. Pētījumā, kurā izmantota sistēmdinamikas modelēšana, secināts, ka tikai ar ekonomiskiem stimuliem nav iespējams būtiski mainīt cilvēku izvēli par labu sabiedriskajam transportam [47]. Lai pārvarētu šo uzvedības inerci, nepieciešami arī psiholoģiski un sociāli pasākumi, piemēram, komunikācijas kampaņas, kas veicina pozitīvu attieksmi pret ilgtspējīgu mobilitāti.

Institucionālās nepilnības un politikas koordinācijas trūkums

Latvijā trūkst vienotas ilgtspējīgas mobilitātes stratēģijas, kas savstarpēji sasaistītu klimata mērķus, transporta attīstības plānus un reģionālo attīstību. Daudzās jomās nepieciešams labāks starpnozaru koordinācijas mehānisms starp transporta, enerģētikas, vides un reģionālās attīstības institūcijām [46].

Iespējas ilgtspējīgai pārejai

Neskatoties uz minētajiem šķēršļiem, Latvijā pastāv vairāki priekšnoteikumi veiksmīgai pārejai uz klimatneitrālu mobilitāti:

- pieaugošs sabiedrības atbalsts ilgtspējīgai attīstībai un atvērtība tehnoloģiju inovācijām;
- ES fondu pieejamība, īpaši Taisnīgas pārejas fonda ietvaros, ko var izmantot uzlādes infrastruktūras izbūvei un sabiedriskā transporta modernizācijai;
- uzņēmējdarbības vide, kurā attīstās elektromobilitātes un CO₂ pārstrādes tehnoloģiju ieviešanai nepieciešamie inženiertehniskie un ražošanas resursi.

Piemēram, modelējot CO₂-to-fuel ieviešanas scenārijus Latvijā, secināts, ka ar atbilstošu politisko un investīciju atbalstu iespējams būtiski samazināt emisijas un vienlaikus radīt jaunas darba

vietas [46]. Lai pārvarētu minētos šķēršļus un pilnībā izmantotu iespējas, nepieciešama koordinēta rīcība un ieguldījumi. Šis aspekts padziļināti aplūkots turpmākajā ilgtspējas izvērtējumā.

2.3. Klimata pārmaiņu mazināšanas ilgtspējas vērtējums

Transporta sektora pārejas uz klimatneitralitāti ilgtspējība jāvērtē daudzdimensionāli – ne tikai pēc emisiju samazinājuma, bet arī pēc atbilstības ANO ilgtspējīgas attīstības mērķiem (IAM), ietekmes uz vides sistēmu noturību un cikliskumu, kā arī uz aprites cikla analīzes (LCA) principiem. Šī pieeja ļauj analizēt ne tikai rezultātus, bet arī to ilgtspējību ilgtermiņā.

2.3.1. Saskare ar ANO ilgtspējīgas attīstības mērķiem (diagramma)

Transporta emisiju mazināšanas politika Latvijā tieši ietekmē vairākus IAM (sk. 2.6. att.).

IAM Nr.	Mērķis	Saskares piemēri
7 7	Pieejama un tīra enerģija	ET pāreja uz AER balstītu uzlādi
9 9	Inovācijas un infrastruktūra	Uzlādes tīkla attīstība un CO ₂ -to-fuel ražotnes
7 11	Ilgspējīgas pilsētas	Multimodālās mobilitātes ieviešana
15 13	Klimata rīcība	SEG emisiju samazināšana, dekarbonizācija
8 8	Cienīgs darbs un ekonomikas izaugsme	Jaunas darba vietas elektromobilitātē un degvielas pārstrādē

2.6. attēls.
Klimata pārmaiņu mazināšanas politikas sasaistes ar IAM.

2.3.2. Iespējamā ietekme uz vidi un lauku attīstību

Klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumi transporta sektorā būtiski ietekmē gan apkārtējo vidi, gan lauku teritoriju attīstību. Šīs ietekmes izpaužas kā tieši vides kvalitātes uzlabojumi (piemēram, gaisa tīrības un trokšņa līmeņa uzlabošanās), kā arī netiešas sociāl-ekonomiskās pārmaiņas, kas ietekmē lauku teritoriju ilgtspēju un iedzīvotāju dzīves kvalitāti.

Gaisa kvalitātes uzlabošanās un trokšņa samazinājums

Viens no nozīmīgākajiem pozitīvajiem aspektiem ir gaisa kvalitātes uzlabojums, kas rodas, samazinot iekšdedzes dzinēju transportlīdzekļu lietošanu. Elektromobiļi nerada lokālās izplūdes (piemēram, NO_x un PM daļiņas), kas ir īpaši svarīgi blīvi apdzīvotās vietās ar sliktu gaisa apmaiņu. Pētījumā par ārējām izmaksām Latvijā norādīts, ka iekšdedzes dzinēju transportlīdzekļi rada būtiskas izmaksas sabiedrībai gaisa piesārņojuma un trokšņa dēļ, savukārt akumulatoru elektrotransportlīdzekļi šīs izmaksas ievērojami samazina [43]. Lauku apvidos, kur bieži nav pieejamas centralizētas sabiedriskā transporta alternatīvas, minētie uzlabojumi izpaužas ilgtermiņā, it īpaši tad, ja tiek attīstīts vietējo elektromobiļu uzlādes tīkls un veicināta dalītās mobilitātes risinājumu (piemēram, koplietošanas automobiļu) ieviešana.

Dekarbonizācijas tehnoloģiju ekonomiskā ietekme uz reģioniem

Transporta sektora dekarbonizācijai nepieciešamo tehnoloģiju elektromobiļi, CO₂ pārveidošana kurināmajā, uzlādes staciju izbūvē) ieviešana var būt stimuls ekonomiskai attīstībai reģionos. Piemēram, CO₂-to-fuel tehnoloģiju lokalizācija lauku teritorijās varētu radīt jaunas darba vietas, īpaši, ja tiek izmantoti vietējie atjaunojamās elektroenerģijas resursi (biomasa, saules vai vēja enerģija) [46], [49].

Turklāt sinerģija starp lauksaimniecības sektorā radītajām emisijām un CO₂ pārstrādes iespējām rada potenciālu veidot lokālus slēgtus oglekļa aprites ciklus, piemēram, izmantojot fermentācijas emisijas degvielas ražošanai.

Sociālais taisnīgums un reģionālā pieejamība

Lauku teritorijās bieži trūkst sabiedriskā transporta infrastruktūras, kas var padziļināt sociālās nevienlīdzības, ja pāreja uz ilgtspējīgu mobilitāti notiek bez pienācīga atbalsta mehānisma. Sistēmdinamikas modelēšanas rezultāti liecina, ka sabiedriskā transporta pieejamības un kvalitātes uzlabošana ir kritisks priekšnoteikums, lai sekmētu iedzīvotāju pāreju no privātā transporta uz sabiedrisko transportu arī ārpus pilsētām [47]. Šo izaicinājumu risināšanai nepieciešami mērķēti politikas instrumenti. Piemēram, var ieviest subsīdijas uzlādes punktu ierīkošanai mazapdzīvotos reģionos, veicināt mobilitātes koplietošanas platformu attīstību un

palielināt sabiedriskā transporta finansējumu lauku apvidos. Šādi pasākumi nodrošinātu, ka ilgtspējīgas mobilitātes priekšrocības ir pieejamas visiem reģioniem un sabiedrības grupām, mazinot nevienlīdzību starp pilsētām un laukiem.

2.3.3. Pārvaldības un politikas sinerģijas

Pāreja uz klimatneitrālu transportu nav iespējama bez visaptverošas un integrētas politikas pieejas. Transporta sektora dekarbonizācija prasa sinhronizētu rīcību dažādos pārvaldības līmeņos un sektoros, kur centrālo vietu ieņem “izvairīšanās – pārorientācija – uzlabošana” (*avoid-shift-improve*) ietvars.

Šī sistēmiskā pieeja paredz trīs stratēģisko rīcību virzienus.

- **Izvairīšanās** – ceļojumu nepieciešamības mazināšana, piemēram, veicinot attālinātu darbu vai telpisko plānošanu, kas samazina vajadzību pārvietoties. Tomēr modelēšanas pētījumi Rīgas gadījumā liecina, ka šie pasākumi dod mazāku pieešanu, jo tos lieto tikai šaurs iedzīvotāju loks un ietekme uz kopējām emisijām ir ierobežota [47], [48].
- **Pārorientācija** – pārorientēšanās no privātā transporta uz sabiedrisko un aktīvo mobilitāti (gājēji, velosipēdi). Šī stratēģija ir īpaši efektīva, ja tiek ieviesta laikus. Agrīna pāreja uz sabiedrisko transportu nodrošina ievērojamu kumulatīvo emisiju samazinājumu līdz 2050. gadam. Turklāt simulācijas rāda, ka sabiedriskā transporta pieejamības un komforta uzlabošana ir galvenais nosacījums lietotāju paradumu maiņai [47].
- **Uzlabošana** – tehnoloģiskie uzlabojumi, piemēram, pāreja uz elektromobiļiem, sintētisko degvielu vai efektīvākiem

Vairāk ietekmīga



Mazāk ietekmīga

Uzlabošana

Tehnoloģiskie uzlabojumi, piemēram, elektromobiļi

Pārorientācija

Pāreja uz sabiedrisko transportu un aktīvo mobilitāti

Izvairīšanās

Samazina ceļojumu nepieciešamību, bet ierobežota ietekme

2.7. attēls.

Transporta emisiju samazināšanas stratēģijas.

iekšdedzes dzinējiem. Šie pasākumi rada vislielāko ietekmi ilgtermiņā. Piemēram, Rīgas gadījumā ievērojamu emisiju samazinājumu nodrošināja tādi pasākumi kā iekšdedzes dzinēju aizliegums no 2035. gada un atjaunojamo degvielu īpatnsvara palielināšana, tostarp *HVO* piejaukums [46], [47].

Kombinēta stratēģiju piemērošana (*avoid + shift + improve*) dod vislielāko emisiju samazinājumu. Scenāriju analīze parāda, ka neviena no stratēģijām atsevišķi nespēj nodrošināt pietiekamu samazinājumu, lai sasniegtu klimatneitralitātes mērķus, tādēļ daudzslāņaina pieeja, kas aptver telpisko plānošanu, tehnoloģiju atbalstu un uzvedības maiņu, ir obligāts nosacījums [33], [48].

Vietējo pašvaldību transporta sektors veido tikai nelielu daļu no valsts kopējām emisijām, tādēļ to rīcība vien nav pietiekama. Viena laikus pašvaldības var būt eksperimentālas platformas pilotprojektu ieviešanai un sabiedrības iesaistei. Tieši tāpēc ir būtiski, lai vietējā rīcība būtu sasaistīta ar nacionāla līmeņa politiku, piemēram, NEKP, kā arī ar Eiropas klimata un transporta politikas ietvariem.

Šī nepieciešamība pēc koordinētas pieejas sasaucas ar starp-institucionālās koordinācijas nozīmi. Līdzsvarota pārvaldība, kurā politika tiek īstenota gan horizontāli (starp sektoriem), gan vertikāli (pašvaldības – valsts – ES), ir būtiska efektīvu klimata pasākumu īstenošanai transporta nozarē.

Pētījumi liecina, ka Latvijā politikas koordinācija transporta jomā ir fragmentēta, īpaši starp vides, enerģētikas un transporta sektoriem [46]. Šī fragmentācija kavē efektīvu resursu pārdali un integrētu mērķu izvirzīšanu, piemēram, attiecībā uz uzlādes infrastruktūras attīstību, sabiedriskā transporta reorganizāciju vai ilgtspējīgu degvielu ieviešanu.

Efektīva pārvaldība prasa kopīgus rādītājus, datubāzes un starp-nozaru indikatorus, kas ļauj novērtēt politikas ietekmi un elastīgi to pielāgot. Sistēmdinamikas modelēšana var būt noderīgs rīks, lai simulētu politikas scenārijus un izprastu to ietekmi dažādos laika horizontos [47].

Tradicionālā subsīdiu pieeja balstās darbībā, taču ilgtspējīgas pārvaldības perspektīvā ir vēlams ieviest rezultātos balstītus mehānismus, piemēram, emisiju samazinājuma kvotas, reālo mobilitātes paradumu uzraudzību un ārējo izmaksu internalizācijas sistēmas [43].

Izmantotā literatūra

- [1] Tsakalidis, A., Gkoumas, K., & Ferenc, P. (2020). Digital transformation supporting transport decarbonisation: technological developments in EU-funded research and innovation. *Sustainability*, 12(9), 3762. <https://doi.org/10.3390/su12093762>.
- [2] Sikora, A. (2020). European green deal – legal and financial challenges of the climate change. *Era Forum*, 21(4), 681-697. <https://doi.org/10.1007/s12027-020-00637-3>.
- [3] Zhang, R. and Hanaoka, T. (2022). Cross-cutting scenarios and strategies for designing decarbonization pathways in the transport sector toward carbon neutrality. *Nature Communications*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31354-9>.
- [4] Din, A., Rahman, I., Vega-Muñoz, A., Elahi, E., Salazar-Sepúlveda, G., Contreras-Barraza, N., ... & Alhrahsheh, R. (2023). How sustainable transportation can utilize climate change technologies to mitigate climate change. *Sustainability*, 15(12), 9710. <https://doi.org/10.3390/su15129710>.
- [5] Victoria, M., Zhu, K., Brown, T., Andresen, G., & Greiner, M. (2020). Early decarbonisation of the European energy system pays off. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20015-4>.
- [6] Sarkki, S., Ludvig, A., Nijnik, M., & Kopiy, S. (2022). Embracing policy paradoxes: EU's just transition fund and the aim "to leave no one behind". *International Environmental Agreements Politics Law and Economics*, 22(4), 761-792. <https://doi.org/10.1007/s10784-022-09584-5>.
- [7] Maestosi, P., Andreucci, M., & Civiero, P. (2021). Sustainable urban areas for 2030 in a post-COVID-19 scenario: focus on innovative research and funding frameworks to boost transition towards 100 positive energy districts and 100 climate-neutral cities. *Energies*, 14(1), 216. <https://doi.org/10.3390/en14010216>.
- [8] Minucci, A., Ferreira, Á., & Fernandes, P. (2020). Impact of the increase in electric vehicles on energy consumption and GHG emissions in Portugal, 521–537. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58808-3_38.
- [9] Wang, X., Qin, B., Wang, H., Dong, X., & Duan, H. (2022). Carbon mitigation pathways of urban transportation under cold climatic conditions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(8), 4570. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084570>.
- [10] Ün, Ç. (2023). Investigation of alternative vehicle applications for reducing greenhouse gas emissions in urban public transport: the case of Adana province. *European Mechanical Science*, 7(4), 220-229. <https://doi.org/10.26701/ems.1344141>.
- [11] Muhsen, A. and Oakil, A. (2021). Sustainable transport in Riyadh: potential trip coverage of the proposed public transport network. <https://doi.org/10.30573/ks--2021-dp17>.
- [12] Xiao, B. and Xu, C. (2023). Can policy instruments achieve synergies in mitigating air pollution and CO₂ emissions in the transportation sector?. *Sustainability*, 15(19), 14651. <https://doi.org/10.3390/su151914651>.
- [13] Lee, J. and Madanat, S. (2017). Optimal policies for greenhouse gas emission minimization under multiple agency budget constraints in pavement management. *Transportation Research Part D Transport and Environment*, 55, 39-50. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.009>.
- [14] Li, W., Li, H., Zhang, H., & Sun, S. (2016). The analysis of CO₂ emissions and reduction potential in China's transport sector. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2016/1043717>.
- [15] Wang, X., Zhou, Y., Bi, Q., Cao, Z., & Wang, B. (2022). Research on the low-carbon development path and policy options of China's transportation under the background of dual carbon goals. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.905037>.

- [16] Zhi-min, P., Wu, Q., Wang, D., & Li, M. (2019). Temporal-spatial pattern and influencing factors of China's province-level transport sector carbon emissions efficiency. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(1), 233-247. <https://doi.org/10.15244/pjoes/102372>.
- [17] Zhu, X. and Li, R. (2017). An analysis of decoupling and influencing factors of carbon emissions from the transportation sector in the Beijing-Tianjin-Hebei area, China. *Sustainability*, 9(5), 722. <https://doi.org/10.3390/su9050722>.
- [18] He, H., Gao, Y., & Wang, X. (2024). Applying the hypothetical extraction method to investigate intersectoral carbon emission linkages of China's transportation sector. *Sustainability*, 16(10), 4046. <https://doi.org/10.3390/su16104046>.
- [19] Mellquist, A., Pirie, J., Smith, A., Stenning, J., Vanacore, E., & Willander, M. (2017). Decarbonising the Swedish road transport sector. *International Journal of Energy Production and Management*, 2(3), 251-262. <https://doi.org/10.2495/eq-v2-n3-251-262>.
- [20] Jiang, M., Wang, B., Hao, Y., Chen, S., & Wen, Y. (2023). The analysis of the potential through the mode change of transport from road to waterway. *E3s Web of Conferences*, 441, 03007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344103007>. Zheng
- [21] Zheng, J., Hu, Y., Dong, S., & Li, Y. (2019). The spatiotemporal pattern of decoupling transport CO₂ emissions from economic growth across 30 provinces in China. *Sustainability*, 11(9), 2564. <https://doi.org/10.3390/su11092564>.
- [22] Somers, M., Batan, L., Al-Alawi, B., & Bradley, T. (2022). A Colorado-specific life cycle assessment model to support evaluation of low-carbon transportation fuels and policy. *Environmental Research Infrastructure and Sustainability*, 2(1), 011001. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac3f2a>.
- [23] Axsen, J., Plötz, P., & Wolinetz, M. (2020). Crafting strong, integrated policy mixes for deep CO₂ mitigation in road transport. *Nature Climate Change*, 10(9), 809-818. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0877-y>.
- [24] Plötz, P., Wachsmuth, J., Sprei, F., Gnann, T., Speth, D., Neuner, F., ... & Link, S. (2023). Greenhouse gas emission budgets and policies for zero-carbon road transport in Europe. *Climate Policy*, 23(3), 343-354. <https://doi.org/10.1080/14693062.2023.2185585>.
- [25] Hegedić, M., Štefanić, N., & Nikšić, M. (2018). Assessing the environmental impact of the self-propelled bulk carriage through LCA. *Promet - Traffic&transportation*, 30(3), 257-266. <https://doi.org/10.7307/ptt.v30i3.2445>.
- [26] Minucci, I., Hadiyanto, H., Warsito, B., Hilmawan, E., Santosa, J., & Sugiyono, A. (2023). Implementation of electric vehicles to support energy conservation and efficiency improvement in the transportation sector in Indonesia. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 1268(1), 012051. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1268/1/012051>.
- [27] Mircea, I. and Bălănescu, M. (2017). National GHG emissions projections from industrial processes – metal industry. *Journal of the American Romanian Academy of Arts and Sciences*, 1(1), 99-103. <https://doi.org/10.14510/araj.2017.4130>.
- [28] Marrone, P. and Orsini, F. (2018). Evaluating green strategies for the reduction of climate-altering gas emissions using LCA, 1151. <https://doi.org/10.3390/proceedings2151151>.
- [29] Aniegbunem, G. and Kraj, A. (2023). Economic analysis of sustainable transportation transitions: case study of the University of Saskatchewan ground services fleet. <https://doi.org/10.20944/preprints202301.0111.v1>.
- [30] Fonseca-Soares, D., Elizário, S., Galvinicio, J., & Ramos-Ridao, Á. (2023). Life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions calculation for urban rail transit systems: the case of Pernambuco Metro. *Applied Sciences*, 13(15), 8965. <https://doi.org/10.3390/app13158965>.
- [31] Burton, T., Powers, S., Burns, C., Conway, G., Leach, F., & Senecal, K. (2022). A data-driven greenhouse gas emission rate analysis for vehicle comparisons. *Sae International Journal of Electrified*, 12(1). <https://doi.org/10.4271/14-12-01-0006>.

- [32] Müller-Langer, F., Majer, S., & O'Keeffe, S. (2014). Benchmarking biofuels—a comparison of technical, economic and environmental indicators. *Energy Sustainability and Society*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s13705-014-0020-x>.
- [33] Dolge K., Barisa A., Kirsanovs V., Blumberga D. The status quo of the EU transport sector: Crosscountry indicatorbased comparison and policy evaluation. *Appl Energy*. 2023;334:120700. doi:10.1016/j.apenergy.2023.120700.
- [34] Dolge K, Blumberga D. Composite Transport Sustainability Index: Cross-country Assessment Towards Climate Neutrality in the Context of the European Green Deal Targets. Presented at: *International Conference on Applied Energy 2021*; November 29 – December 5, 2021; Thailand/Virtual. Paper ID: 720.
- [35] Kopsavilkums par 2025. gada siltumnīcefekta gāzu inventarizāciju. Rīga, 2025. Informācija par Latvijas SEG emisijām.
- [36] 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 1. General Guidance and Reporting. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol1.html>
- [37] 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2. Energy. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>.
- [38] EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 EEA Report 06/2023 Technical guidance to prepare national emission inventories. European Environment Agency. 2023. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 | European Environment Agency's home page.
- [39] Transport and environment report 2021 Decarbonising road transport – the role of vehicles, fuels and transport demand. European Environmental Agency, 2022.
- [40] Sustainable and Smart Mobility Strategy – putting European transport on track for the future. European Commission, 2020.
- [41] Latvijas Nacionālais enerģētikas un klimata plāns 2021.–2030. gadam. Rīga, 2024.
- [42] Transporta attīstības pamatnostādnes 2021.–2027.gadam. Satiksmes ministrija. Ministru kabinets, 2021.
- [43] Mendziņš, K., & Barisa, A. (2022). *External Costs of Passenger Cars and Light Commercial Vehicles in Latvia*. *Environmental and Climate Technologies*, 26(1), 1145–1157. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2022-0086>.
- [44] Mendziņš, K., & Barisa, A. (2024). *Electric vs. Internal Combustion Vehicles: A Multi-Regional Life Cycle Assessment Comparison for Environmental Sustainability*. *Environmental and Climate Technologies*, 28(1), 855–862. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2024-0065>.
- [45] Scedrovs, A., Mendzins, K., Barisa, A. & Feofilovs, M. (2024). Electrifying the Last Mile Delivery by Eco-Efficiency Analysis: Case Study of Latvia. *Environmental and Climate Technologies*, 28(1), 2024. 367-378. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2024-0029>.

-
- [46] Valdmanis, G., Bazbauers, G., Bataitis, M., Bohvalovs, G., Lilo, J., Blumberga, A., & Blumberga, D. (2022). *CO₂-to-Fuel – Business and Institutional Aspects of Implementation Dynamics*. Environmental and Climate Technologies, 26(1), 1182–1195. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2022-0089>.
- [47] Safronova, A., Barisa, A., & Kirsanovs, V. (2022). *Incorporating User Behaviour Into System Dynamics Modelling: A Case Study of Private vs. Public Transport in Latvia*. Environmental and Climate Technologies, 26(1), 294–305. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2022-0022>.
- [48] Safronova A, Barisa A. Climate neutrality through scenario analysis: A local authority perspective. *J Environ Manage*. 2025;383:125365. doi:10.1016/j.jenvman.2025.125365.
- [49] Valdmanis, G. Transporta dekarbonizācija, izmantojot elektrifikāciju un sintētiskās degvielas (2024). [Doctoral dissertation, Riga Technical University]. RTU Press.



RŪPNIECĪBAS SEKTORS

Ievads

01 Enerģētikas sektors

02 Transporta sektors

03	RŪPNIECĪBAS SEKTORS	124
3.1.	Rūpniecības sektora SEG emisiju audits	126
3.1.1.	Cementa rūpniecības emisijas	128
3.1.2.	Stikla ražošanas sektora emisijas	133
3.1.3.	Citi karbonātu lietošanas veidi	135
3.1.4.	Kurināmā izmantošana neenerģētiskām vajadzībām un šķīdinātāju izmantošana	135
3.1.5.	OSNV izmantošana	136
3.2.	Rūpniecības sektora dekarbonizācijas tehnoloģiskie paņēmieni	138
3.2.1.	Izejvielu nomaiņa minerālu rūpniecībā	139
3.2.2.	Oglekļa uztveršana un uzglabāšana	142
3.2.3.	Ūdeņraža izmantošana	146
3.2.4.	Elektrifikācija	147
3.2.5.	Energopatēriņa mazināšanas pasākumi	148
3.2.6.	Neaugsmes (<i>Degrowth</i>)	149
3.2.7.	OSNV aizstājēju emisiju samazināšana	150
3.3.	Klimata pārmaiņu mazināšanas ilgtspējas vērtējums rūpniecības sektorā	152
3.3.1.	ANO ilgtspējas attīstības mērķi rūpniecības sektorā	152
3.3.2.	Vides, sociālais un ekonomiskais novērtējums	154

04 Lauksaimniecības sektors

05 ZIZIMM

06 Atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektors

Izmantotā literatūra

Summary

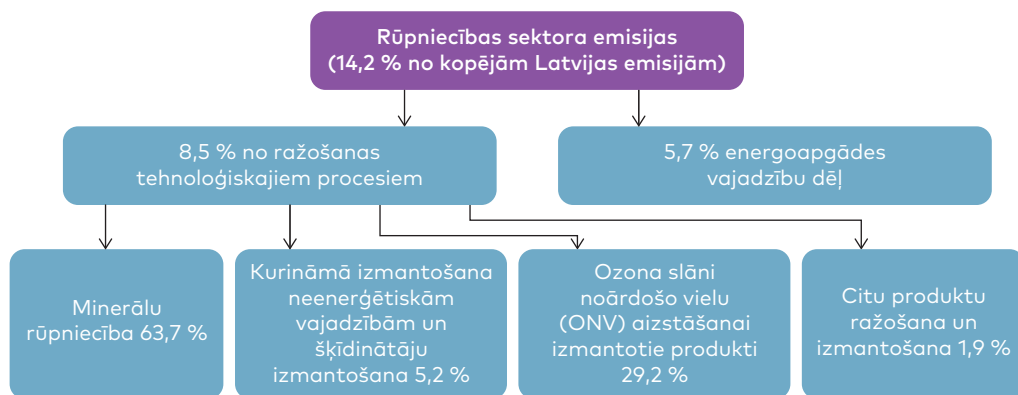
Rūpniecības sektora aktivitātes rada SEG emisijas divos veidos: ražošanas tehnoloģiskajā procesā (ši emisijas tiek uzskaitītas rūpniecisko procesu un produktu izmantošanas jeb RPPI sektorā) un uzņēmumu energoapgādē (šīs emisijas tiek uzskaitītas enerģētikas sektorā). 2022. gadā apstrādes rūpniecība veidoja 13,52 % [1] no Latvijas kopējās pievienotās vērtības. Savukārt ar rūpniecības sektoru saistītās emisijas šajā gadā, summējot abus emisiju veidus, veidoja 14,2 % no kopējām Latvijas emisijām (ieskaitot netiešās emisijas, neieskaitot ZIZIMM), kur 8,5 % no kopējām emisijām radās ražošanas tehnoloģiskajos procesos, bet 5,7 % – energoapgādes vajadzību dēļ [2]. Kā redzams, būtiski ir rūpniecības sektorā samazināt abu veidu emisijas.

Smagā rūpniecība (tērauda un dzelzs, cementa, ķīmisko vielu un plastmasas rūpniecība) to ražošanas procesa specifikas dēļ veido vislielāko rūpniecisko emisiju daļu pasaulē [3], [4]. Arī Latvijā liela daļa RPPI sektora emisiju tiek radītas minerālu rūpniecības sektorā (sk. 3.1. att.). Vienlaikus ražojošās nozares būtiski sekmē valsts ekonomisko izaugsmi, un attīstības plānos arvien tiek paredzēts, ka jākāpina uzņēmumu izaugsme un produktivitāte [5]. Latvijas un ES līmenī rūpniecības sektora klimatneitralitātes nodrošināšana tiek uzskatīta par būtisku izaicinājumu [6], it īpaši vienlaikus saglabājot uzņēmumu konkurētspēju.

Atšķirībā no citiem tautsaimniecības sektoriem, kuros galvenās emisiju samazināšanas stratēģijas saistītas ar enerģijas patēriņa samazināšanu un pāreju uz atjaunojamiem energoresursiem, rūpniecības sektora dekarbonizāciju sarežģī tas, ka daļa emisiju neizbēgami rodas tehnoloģiskajā procesā. Šī iemesla dēļ, piemēram, cementa ražošanu dēvē par nozari, kurā ir īpaši grūti īstenot SEG emisiju mazināšanas pasākumus [7]. Tomēr arvien vairāk tiek rasti un pārbaudīti risinājumi rūpniecības sektora emisiju samazināšanai un kompensēšanai. Pētījumi par globālās sasilšanas ierobežošanu zem 2 grādu pieauguma, paredz, ka tādas tehnoloģijas kā oglekļa

3.1. attēls.

Rūpniecības sektora radīto SEG emisiju avoti (izveidots, balstoties [2] datos).



dioksīda uztveršana, transportēšana, uzglabāšana un izmantošana (CCSU) un ūdeņraža izmantošana ļaus samazināt emisijas smagajā rūpniecībā, savukārt elektrifikācijas kāpināšana veicinās emisiju samazināšanu vieglajā rūpniecībā [3].

Rūpniecības sektora emisijas tiek iedalītas ETS un ne-ETS emisijās. Daļa no SEG emisiju radītājiem pakļauti ES regulējumam, ar kuru izveidota emisiju kvotu sistēma. Vairāki Latvijā nozīmīgi rūpniecības uzņēmumi piedalās ETS sistēmā obligātā kārtā un ikgadēji sagatavo un verificē ziņojumus par radītajām SEG emisijām. Emisiju samazināšanu ETS iesaistītajos uzņēmumos motivē regulējums, kur pakāpeniski tiek samazināts uzņēmumiem pieejamais emisiju kvotu apjoms. Ne-ETS emisiju būtiskākais avots ir ozona slāni noārdošo vielu aizstājēji, tādēļ šobrīd plānotie rīcībpolitikas pasākumi lielākoties vērsti uz šo vielu patēriņa mazināšanu [8].

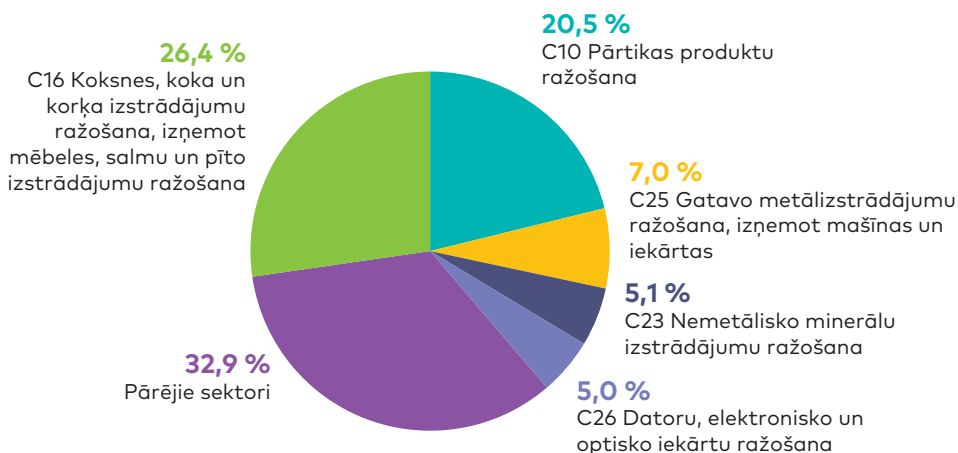
Turpmākajās nodaļās vispirms apskatīta esošā situācija rūpniecības sektorā SEG emisiju kontekstā, tad raksturotas tehnoloģijas un risinājumi emisiju samazināšanai, kā arī ņemtas vērā to vides, sociālās un ekonomiskās ietekmes.

3.1. Rūpniecības sektora SEG emisiju audits

Rūpniecības sektora SEG emisiju profils ir atkarīgs no galvenajām Latvijas industriālās attīstības tendencēm. Latvijā plaši attīstītas nozares, kas saistītas ar vietēji pieejamo dabas resursu izmantošanu, piemēram, kokapstrādes un pārtikas nozares, kas kopā veido gandrīz pusi no Latvijas rūpniecības produkcijas izlaides (sk. 3.2. att.). Vairāk nekā 5 % kopējās produkcijas izlaides (kas izteikta EUR, lai būtu iespējams salīdzināt dažādās nozares) pārsniedz arī gatavo metālizstrādājumu (7 %), nemetālisko minerālu izstrādājumu (5,1 %) un datoru, optisko un elektronisko izstrādājumu (5 %) izstrādājumu (5,1 %) un datoru, optisko un elektronisko izstrādājumu (5 %)

3.2. attēls.

Apstrādes rūpniecības produkcijas izlaides procentuālais daļījums 2022. gadā (izveidots, balstoties [9] statistikā).



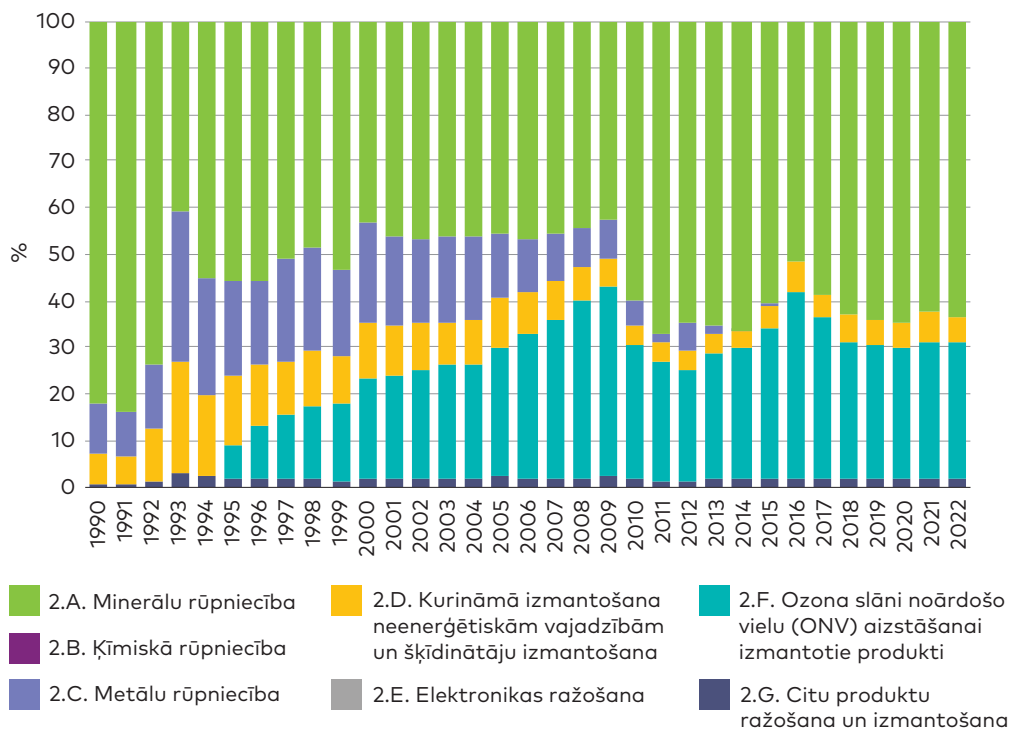
nozares. Savukārt pārējās 15 apakšnozares kopā veido 32,9 % no apstrādes rūpniecības produkcijas izlaides.

No visiem šiem apstrādes rūpniecības uzņēmumiem ražošanas tehnoloģiskajos procesos SEG emisijas rada tikai skaitliski maza daļa, taču visi tie uzņēmumi, kuri savās ražotnēs paši nodrošina energoapgādi, rada emisijas, kas tiek uzskaitītas enerģētikas sektorā. Šo SEG emisiju audits veikts Enerģētikas nodaļā (sk. 1. nodaļu). Rūpniecībā enerģijas patēriņš cieši saistīts ar ražošanas tehnoloģijām un to efektivitāti, tāpēc šajā nodaļā ņemti vērā tehnoloģiskie pasākumi rūpniecības energopatēriņa mazināšanai.

Latvijā ražošanas tehnoloģiskā procesa emisijas rodas galvenokārt no minerālu rūpniecības (tostarp cementa, kaļķakmens, stikla ražošanas, keramikas). Atšķirībā no citām valstīm Latvijā tehnoloģisko procesu emisijas nerada ķīmiskā rūpniecība. Kopš 2014. gada nav arī attīstīta metālu rūpniecība, un kopš 2016. gada par to nav ziņotas emisijas. Vēl viens nozīmīgs RPPI emisiju avots ir ozonu noārdošo vielu aizstāšanai izmantotie produkti, kur fluorētās gāzes tiek izmantotas dzesēšanai un gaisa kondicionēšanai, kā putu radītāji, ugunsdrošības līdzekļi un aerosoli. Emisijas mazākā mērā rada arī kurināmā izmantošana neenerģētiskām vajadzībām (smērvielu, parafīna izmantošana, šķīdinātāju lietošana, karbamīda lietošana, asfalta segumu klāšana) un citu gāzu izmantošana (SF₆ lietošana elektrības aprīkojumā un N₂O izmantošana anestēzijā) [2].

3.3. attēls.

Rūpniecības sektora radīto SEG emisiju dinamika [izveidots, balstoties [9] statistikā].



Kopš 1990. gada izmaiņas rūpniecības sektora emisiju struktūrā vērojamas iepriekš minētā metālrāžošanas apjomu samazinājuma dēļ, kā arī būtiski ir palielināties ozona slāni noārdošo vielu lietojums¹ (sk. 3.3. att.). Savukārt SEG emisijas uzņēmumu energoapgādes dēļ rodas visās uzskaites kategorijās: melno un krāsaino metālu ražošanā, ķīmisko vielu ražošanā, celulozes, papīra un poligrāfijas nozarēs, pārtikas, dzērienu un tabakas rūpniecībā, kā arī nemetālisko minerālu industrijā un citos rūpniecības apakšsektoros.

Ņemot vērā Latvijas ievērojamo bioresursu potenciālu, viens no rūpniecības attīstības perspektīvajiem virzieniem ir biorafinēriju attīstība. Lai gan šobrīd Latvijā nav tādu biorafinēriju, kuru ražošanas procesos radītās emisijas tiktu ziņotas kā rūpniecības sektora emisijas, tādas varētu izveidot nākotnē. Ņemot vērā, ka biorafinērijās kā galveno izejvielu izmanto biomasu, potenciālās emisijas arī lielākoties ir biogēnas, taču plašākā kontekstā būtu jāparedz, lai emisijas, kas rodas no izejvielu piegādes (transports) un šādu rūpnīcu energoapgādes arī būtu oglekļneitrālas.

Turpmāk padziļināti skatīti Latvijai nozīmīgākie emisiju avoti rūpniecības sektorā un to iemesli. Minerālu rūpniecībā ar tehnoloģisko procesu saistītās oglekļa emisijas rodas no karbonātu izejvielu izmantošanas, piemēram, kalcinēšanas vai skābju izraisītām reakcijām. Šīs emisijas rodas galvenokārt cementa klinkera, kaļķa un stikla ražošanā, arī keramikas ražošanā un izmantojot sodu. No minerālu ražošanas tehnoloģiskajiem procesiem galvenokārt rodas CO₂ emisijas, taču var rasties arī CH₄ emisijas un atsevišķās nozarēs – arī N₂O emisijas [10]. Šīs emisijas tiek uzskatītas par maznozīmīgām un šobrīd netiek uzskaitītas sistemātiski, taču, ja pieejama informācija par tām, tad tās būtu jāiekļauj uzskaitē [11].

Lai veiktu minerālmateriālu ražošanas SEG emisiju auditu, izmantota starptautiski atzītā Apvienoto Nāciju Organizācijas Klimata pārmaiņu starpvaldību padomes (KPSP) metodika [11], kur pieejami gan vispārīgi aprēķina vienādojumi karbonāta izejvielu lietošanas radītām emisijām, gan katram karbonātu veidam specifiskie aprēķina koeficienti. Rūpniecības sektora SEG emisiju aprēķinam jāapzina SEG emisijas radošās aktivitātes apjoms un jāreizina tas ar īpatnējo emisijas faktoru. RPPI sektora gadījumā aktivitātes apjoma dati attiecas uz izmantotās izejvielas (karbonātu) vai saražotās produkcijas apjomu, tādēļ dažādu rūpniecības apakšsektoru ziņā aprēķins var mazliet atšķirties. Ja tiek īstenota CO₂ uztveršana un noglabāšana, tad arī tas jāņem vērā, nosakot galējo emisiju apjomu.

¹ OSNV aizstājēvielu pieaugums jāskatās kopā ar sasniegto ozona slāņa noārdīšanās apturēšanu.

3.1.1. Cementa rūpniecības emisijas

Cementa ražošanas process (sk. 3.4. att.) sastāv no diviem galvenajiem posmiem: cementa klinkera ražošanas un cementa

klinkera apjomu, pat ja tas paredzēts eksportam, nevis vietējam patēriņam. Savukārt, ja cementu ražo, daļēji vai pilnībā izmantojot importētu klinkeru, par importētā klinkera daļu CO₂ emisijas netiek pieskaitītas valstī radītām emisijām, jo tās tiek attiecinātas uz klinkera ražotājvalsti.

2. detalizācijas līmeņa pieejā tiek izmantoti precīzi dati par saražoto klinkera apjomu un valsts specifiskais emisijas faktors. Savukārt 3. līmeņa pieejā tiek izmantoti rūpnīcai specifiski dati, tiek aprēķināts viss karbonātu ievades apjoms un sastāvs, tiek izmantots karbonāta veidam raksturīgais emisijas faktors un sasniegtā kalcinēšanas daļa.

Klinkera ražošanas procesā rodas arī cementa krāšņu putekļi, kas netiek izmantoti cementa ražošanā. Arī par šo procesu ir jānosaka CO₂ emisijas. Šīs emisijas tiek ņemtas vērā 2. un 3. detalizācijas līmeņa aprēķinos.

Ja cementa ražotnē tiek uzstādītas oglekļa uztveršanas tehnoloģijas, jāņem vērā, ka uztvertais CO₂ ir tehnoloģiskajā procesā un enerģijas nodrošināšanā radītā CO₂ summa. Būtiski ir uzskaitīt precīzi nodalīt šīs daļas, kā arī nodrošināt, ka neveidojas dubulta uzskaitē.

Latvijā, lai noteiktu cementa ražošanas radītās SEG emisijas, izmanto 2. detalizācijas līmeņa pieeju, kuras pamatā ir dati par saražotā klinkera un cementa krāsns putekļu apjomu. Tehnoloģiskajā procesā radītās CO₂ emisijas tiek aprēķinātas, reizinot vietēji saražotā klinkera apjomu tonnās ar klinkera emisijas faktoru (tonnas CO₂ / tonnu klinkera) un krāsns putekļu korekcijas faktoru (sk. 3.1. vienādojumu).

$$CO_{2 \text{ emisijas}} \left[t_{CO_2} \right] = M_{cl} \left[t_{klinkera} \right] \times EF_{cl} \left[\frac{t_{CO_2}}{t_{klinkera}} \right] \times CF_{ckd}, \quad (3.1.)$$

kur

CO_{2 emisijas} – kopējās cementa klinkera ražošanas CO₂ emisijas uzskaites gadā, tonnas CO₂;

M_{cl} – saražotā klinkera masa, tonnas;

EF_{cl} – klinkera ražošanas emisijas faktors, tonnas CO₂ / tonnu klinkera;

CF_{ckd} – emisiju korekcijas faktors klinkera putekļu dēļ, bez mērvienības.

Zinot, ka Latvijā ir tikai viena cementa ražotne, CO₂ emisiju apjoma aprēķins veikts SIA “SCHWENK Latvija” klinkera ražošanas apjomiem un nepieciešamie dati pieejami uzņēmuma SEG emisiju atskaitēs, ko tas ikgadēji sniedz ES ETS sistēmas ietvaros. Savukārt saražotā klinkera apjoma pārrēķinu no galaprodukta (dažādu veidu cementa produkcijas) apjoma veic pats uzņēmums, jo tie nepieciešami ETS emisiju ziņošanas sistēmā un saražotais klinkers netiek atsevišķi svērts nepārtrauktā ražošanas procesa dēļ.

Zinot klinkera ražošanas aktivitātes datus, SEG emisiju aprēķiniem vēl jānosaka klinkera ražošanas emisijas faktoru. Kalcinējot

kaļķakmeni (CaCO_3), no katra kaļķakmens mola izdalās viens mols CO_2 . Izsakot to masas vienībās, no katras kalcinētās kaļķakmens tonnas izdalās 439,7 kg CO_2 . Tas ietverts klinkera ražošanas emisijas faktora aprēķinā kā CO_2 un CaO molmasas attiecība. Atbilstoši KPSP metodikai Latvijai raksturīgais klinkera ražošanas emisijas faktors tiek noteikts, izmantojot 3.2. vienādojumu, jo no SIA "SCHWENK Latvija" pieejami saražotā klinkera CaO un MgO satura mērījumi [2]. CKD korekcijas faktors izmantojams, lai ņemtu vērā to klinkera putekļu daļu, kas nenonāk galaproduktā. Klinkera ražošanas emisijas faktoru EF_{clc} var aprēķināt, izmantojot vai neizmantojot klinkera putekļu korekciju (izvēle atkarīga no emisijas faktora lietošanas mērķa), kā arī precīzu datu trūkuma gadījumā var izmantot KPSP noteikto korekcijas standartvērtību 1,02.

$$EF_{clc} \left[\frac{t_{\text{CO}_2}}{t_{\text{klinkera}}} \right] = \left(0,785 \left[\frac{t_{\text{CO}_2}}{t_{\text{CaO}}} \right] \times CaO_{\text{satur}} \left[\frac{t_{\text{CaO}}}{t_{\text{klinkera}}} \right] \right) \times CKD_{\text{korekcija}}, \quad (3.2.)$$

kur

EF_{clc} – klinkera ražošanas emisijas faktors ar korekciju klinkera putekļu dēļ, tonnas CO_2 / tonnu klinkera;

0,785 – CO_2 un CaO molmasas attiecība;

CaO_{satur} – kalcija oksīda masas daļa klinkera sastāvā, $t_{\text{CaO}}/t_{\text{klinkera}}$;

$CKD_{\text{korekcija}}$ – korekcijas faktors klinkera putekļu dēļ, bez mērvienības.

Lai precīzi aprēķinātu emisiju korekcijas faktoru klinkera putekļu dēļ, izmantojams 3.3. vienādojums. Tas ņem vērā klinkera putekļu un saražotā klinkera attiecību, sākotnējā karbonāta procentuālo daļu klinkera putekļos, kalcinācijas frakciju, karbonāta izmantošanas emisijas faktoru un klinkera ražošanas emisijas faktoru (kas nav koriģēts).

$$CF_{ckd} = 1 + \left(\frac{M_d}{M_{cl}} \right) \times C_d \times F_d \times \left(\frac{EF_c}{EF_{cl}} \right), \quad (3.3.)$$

kur

CF_{ckd} – emisiju korekcijas faktors klinkera putekļu dēļ, bez mērvienības;

M_d – klinkera putekļu apjoms, t;

M_{cl} – saražotā klinkera apjoms, t;

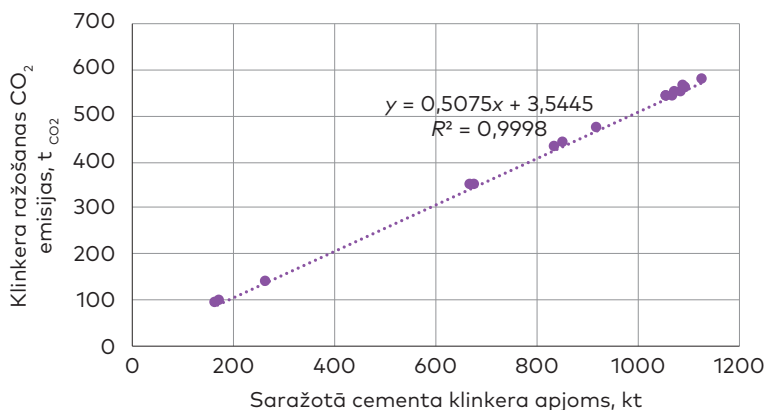
C_d – sākotnējā karbonāta frakcija klinkera putekļos;

F_d – sākotnējā karbonāta kalcinācijas frakcija;

EF_c – CaCO_3 emisiju faktors, tonnas CO_2 / tonnu karbonāta;

EF_{cl} – klinkera emisijas faktors bez korekcijas par klinkera pelniem, tonnas CO_2 / tonnu klinkera.

Klinkera ražošanā nepieciešamo CaO var iegūt arī no citiem avotiem, ne tikai kaļķakmens kalcinācijā. Jaunākie pētījumi liecina, ka arvien vairāk tiek meklētas alternatīvas izejvielas (plašāk sk. 3.2. nodaļā). Izmantojot alternatīvos CaO avotus, tiek samazināts nepieciešamais kaļķakmens apjoms un tiek emitēts mazāk CO_2 .

**3.6. attēls.**

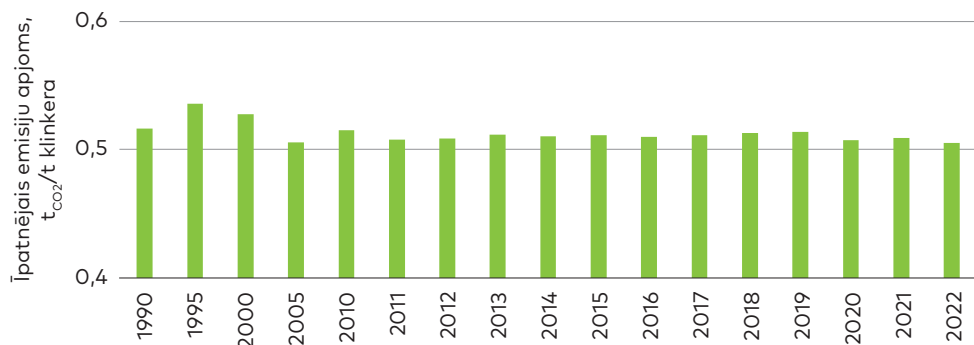
CO₂ emisiju daudzums atkarībā no saražotā cementa klinkera apjoma.

Skatoties emisiju izmaiņas atkarībā no saražotā cementa klinkera apjoma (sk. 3.6. att.), vērojama ļoti pārliecinoša sakarība – emisiju pieaugums ir lineāri atkarīgs no klinkera ražošanas apjomiem ($r^2 = 0,9998$). Īpatnējo emisiju apjoms uz vienu tonnu saražotā klinkera, kas šajā gadījumā sakrīt ar klinkera ražošanas CO₂ emisiju faktoru (sk. 3.7. att.), kopš 20. gadsimta deviņdesmitajiem gadiem ir mainījies ļoti maz, neskatoties uz to, ka rūpnīca nomainīja ražošanas tehnoloģiju no mitrā uz sauso procesu. Apskatot cementa rūpniecības CO₂ emisiju izmaiņas atkarībā no valsts ekonomiskās izaugsmes (jo uzņēmumam specifiskie izaugsmes rādītāji nav pieejami konkurences apstākļu dēļ), nav vērojama sakarība starp CO₂ emisiju intensitāti un ekonomikas izaugsmi (IKP, 2020. gada salīdzināmajās cenās). Tas nozīmē, ka cementa rūpniecības tehnoloģisko procesu īpatnējās emisijas nav saistītas ar ekonomiskajiem faktoriem un galvenie īpatnējo emisiju apjoma ietekmētāji ir tehnoloģiskie ierobežojumi. Absolūto emisiju ziņā sektora virzītājspēks ir cementa un betona pieprasījums noieta tirgos.

Ir iespējams analizēt atšķirības aprēķināto emisiju apjomos, kādas rada dažādu detalizācijas līmeņu izmantošana. Jau minēts, ka Latvijā cementa rūpniecības sektora tehnoloģisko procesu

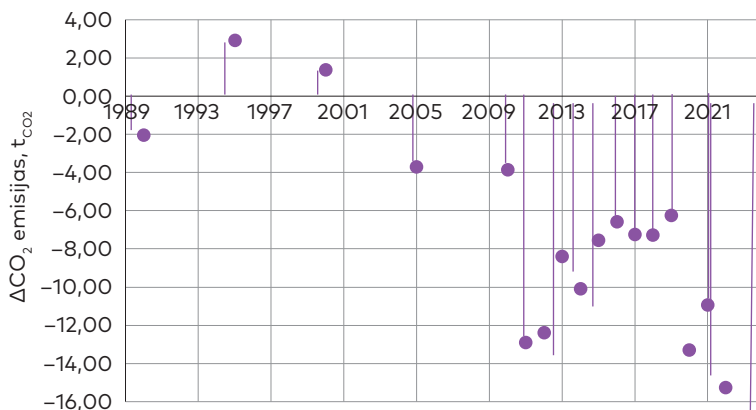
3.7. attēls.

Īpatnējo emisiju apjoms uz vienu tonnu saražotā klinkera.



3.8. attēls.

Atšķirības (Δ), kas rodas, izmantojot 2. detalizācijas līmeņa pieeju, salīdzinot ar 1. detalizācijas līmeņa pieeju (negatīvās vērtības norāda daudzumu, par kādu emisijas tika ziņotas precīzāk).



emisiju aprēķinam izmanto 2. detalizācijas līmeņa pieeju. Diemžēl nav iespējams salīdzināt ar 3. detalizācijas līmeņa pieeju, jo trūkst nepieciešamo mērījumu datu, taču ir iespējams salīdzināt ar 1. detalizācijas līmeņa jeb vienkāršoto pieeju. Ja Latvijā nebūtu pieejami SIA "SCHWENK Latvija" veiktie klinkera CaO sastāva laboratoriskie mērījumi, tad, izmantojot 1. detalizācijas līmeņa pieeju, tiktu pieņemts vispārīgs klinkera putekļu daudzums un CaO sastāvs un aprēķinos tiktu izmantots atšķirīgs emisijas faktors nekā 2. detalizācijas līmeņa pieejā. 3.8. attēlā parādītas atšķirības (Δ), kas rodas, izmantojot precīzāko jeb 2. detalizācijas līmeņa pieeju. Lai gan redzams, ka apskatītajā periodā dažas reizes ir aprēķināts un ziņots lielāks emisiju apjoms, nekā izmantojot noklusējuma vērtības, taču ir pozitīvi, ka pēdējā desmitgadē, izmantojot detalizēto aprēķina pieeju, ir bijis iespējams precīzāk uzskaitīt klinkera ražošanas CO_2 emisijas un tādā veidā "ietaupīt" emisijas jeb nepārvērtēt emisijas, kas pat par 15 t_{CO_2} pārsniedz faktiskās (2022. gadā).

3.1.2. Stikla ražošanas sektora emisijas

Šajā nozarē ietilpst daudz dažādu stikla veidu ražošana. Biežāk izplatītie stikla veidi sastāv no silīcija dioksīda (SiO_2), nātrijs oksīda (Na_2O), kalcija oksīda (CaO), kā arī nelielā daļā citām sastāvdaļām [11]. Stikla ražošanā galvenais tehnoloģiju izcelsmes CO_2 emisiju avots ir karbonātu lietošana – karsējot stikla ražošanā nepieciešamos karbonātus, izdalās CO_2 . Pasaulē plašāk izmantotie karbonāti ir kaļķakmens (CaCO_3), dolomīts ($\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2$) un nātrijs karbonāts (Na_2CO_3) [11]. Kopš 2014. gada, kad stikla ražošanā Latvijā tika pārtraukta kaļķakmens izmantošana, būtiski ir samazinājušās stikla rūpniecības emisijas. Kopš 2015. gada lielāko daļu emisiju rada nātrijs karbonāta lietošana stikla šķiedras ražošanā [2].

KPSP metodikā stikla rūpniecības emisiju noteikšanai pieejamas dažādu detalizācijas līmeņu aprēķina pieejas. Vispārīgajā jeb 1. detalizācijas līmenī emisijas aprēķināmas, balstoties pieņēmumos par izmantoto karbonātu un saražotā stikla apjomu, kā arī pieņemot standarta emisijas faktoru. Par stikla ražošanas izejvielu var izmantot arī stikla atkritumus, tāpēc emisiju aprēķina vienādojumā iekļauts arī pārrēķins, ņemot vērā pārstrādājamā stikla (kaletes) apjomu (sk. 3.4. vienādojumu, kas veidots atbilstoši KPSP metodikai [11]).

$$CO_{2 \text{ emisijas}} \left[t_{CO_2} \right] = M_g \left[t_{stikla} \right] \times EF_i \left[\frac{t_{CO_2}}{t_{stikla}} \right] \times (1 - CR), \quad (3.4.)$$

kur

$CO_{2 \text{ emisijas}}$ – kopējās stikla ražošanas CO_2 emisijas uzskaites gadā, tonnas CO_2 ;

M_g – saražotā stikla masa, tonnas;

EF_i – stikla ražošanas standarta emisijas faktors, tonnas CO_2 / tonnu stikla;

CR – pārstrādājamā stikla daļa, masas daļa.

Savukārt 2. detalizācijas līmeņa aprēķinos izmantota tāda pati pieeja, bet aprēķinos emisijas tiek skatītas atsevišķu stikla ražošanas apakšsektoru griezumā.

Latvijas gadījumā stikla ražošanas nozares emisiju ziņošanai izmanto 3. detalizācijas līmeni (sk. 3.5. vienādojumu [11]), kur būtiskākā atšķirība ir pieejamo datu augstā detalizācija, savukārt emisiju faktoriem tiek pieņemtas KPSP definētās standartvērtības par katru karbonātu veidu. Tiek pieņemts, ka karbonāts tiek 100 % kalcinēts.

$$CO_{2 \text{ emisijas}} \left[t_{CO_2} \right] = M_i \left[t_{karbonāts} \right] \times EF_i \left[\frac{t_{CO_2}}{t_{karbonāta}} \right] \times F_i, \quad (3.5.)$$

kur

$CO_{2 \text{ emisijas}}$ – kopējās stikla ražošanas CO_2 emisijas uzskaites gadā, tonnas CO_2 ;

M_i – izmantotā karbonāta veida i masa, tonnas;

EF_i – karbonāta veida i emisijas faktors, tonnas CO_2 / tonnu karbonāta;

F_i – karbonāta veida i sasniegtā kalcinācijas daļa, masas daļa.

Aprēķiniem izmantotie dati iegūstami no uzņēmumu SEG emisiju atskaitēm, ko tie ik gadu sagatavo ES SEG emisiju monitoringa sistēmas ietvaros. Latvijā CO_2 emisijas no stikla šķiedras ražošanas tiek aprēķinātas, balstoties NMGOS mērījumu datus, kas ir pieejami “2-Gaiss” datubāzē, jo aktivitātes dati un emisijas faktori nav pieejami [2].

Izmantojot standarta emisiju faktorus no nacionālā inventarizācijas ziņojuma [2] un aktivitātes datus par Na_2CO_3 patēriņu no SEG atskaitēm (pieejami 2024. gada dati), stiklšķiedras ražošanas emisiju aprēķins pēc 3.5. vienādojuma sakrīt ar ES ETS pieejas rezultātiem. Savukārt NIR norādītie 2022. gada rezultāti atšķiras – ir

mazāks emisiju apjoms nekā ES ETS sistēmas ietvaros, aprēķinot stikla šķiedras ražošanas emisijas. Atšķirības tiek skaidrotas ar to, ka ES ETS ietvaros Na_2CO_3 lietojums notekūdeņu neitralizācijai tiek skaitīts pie stikla ražošanas, bet *NIR* ietvaros tiek ziņots kā citi karbonātu izmantošanas veidi.

3.1.3. Citi karbonātu lietošanas veidi

Citi emisiju avoti industrijās, kas izmanto karbonātus, ietver keramiku un nātrija karbonāta lietošanu. Piemēram, stikla šķiedras ražošanā nātrija karbonātu izmanto notekūdeņu neitralizēšanai (uzskaitīts pie citiem karbonātu lietošanas veidiem). Šajā gadījumā emisiju aprēķinā izmantojamais aktivitātes apjoms ir Na_2CO_3 izmantošanas apjoms, kā stikla šķiedras ražotājs to ikgadēji ziņo SEG emisiju atskaitēs (vēsturiskie dati pieejami Latvijas *NIR* ziņojumā [2]), savukārt emisiju faktors tiek pieņemts kā standarta vērtība nātrija karbonāta sadalīšanās procesā – $0,415 \text{ t CO}_2 / \text{t karbonāta}$ [11].

Galvenie keramikas sektora produkcijas veidi ir ķieģeļi, dakstiņi un bruģis, tehniskās keramiskās caurules, ugunsizturīgus māla izstrādājumi, keramzīts un flīzes. Galvenās izejvielas ir dažādu veidu māls un kaļķakmens piedevas. Vispirms izejvielas sasmalcina, apdedzina krāsnīs, lai iegūtu pulveri. Tad pievieno palīgvielas un izejmateriālu formē, apstrādā un glazē (ja nepieciešams). Galaproduktu iegūst, apdedzinot sagatavi keramikas krāsnī.

Tieši māla izmantošana ir galvenais keramikas nozares emisiju avots. Apdedzinot māla izstrādājumus, notiek karbonātu kalcinēšana un izdalās CO_2 emisijas. Līdzīgi kā cementa un stikla rūpniecības gadījumā, arī abi keramikas nozares emisijas radošie uzņēmumi piedalās ES ETS un ikgadēji ziņo radīto emisiju apjomus. Latvijā keramikas sektora emisijas veido māla un kaļķakmens piedevu patēriņš ķieģeļu un plākšņu ražotāju aktivitātēs [2]. Lai noteiktu keramikas sektora radīto SEG emisiju apjomu, izmanto 2. detalizācijas līmeņa pieeja, kur aktivitātes apjoms (māla un kaļķakmens patēriņš) tiek reizināts ar atbilstošo emisijas faktoru. Latvijas emisiju ziņojumos ir norādīts ikgadējais māla patēriņš, taču ražotņu individuālie emisijas faktori doti ES ETS emisiju atskaitēs. Atsevišķs aprēķins nepieciešams par kaļķakmens piedevu izmantošanas radīto emisiju apjomu.

3.1.4. Kurināmā izmantošana neenerģētiskām vajadzībām un šķīdinātāju izmantošana

Rūpniecības sektora aktivitātēs CO_2 emisijas rodas arī no dažādu fosilo izejvielu produktu (kā parafīnu vaska, smērvielu un karbamīda) lietošanas. Savukārt no šķīdinātāju lietošanas un asfaltēšanas

var rasties CO₂, NMGOS, CO, SO₂ vai NO_x emisijas. Šīs emisijas aprēķina, galvenokārt izmantojot 1. detalizācijas līmeņa pieeju (izņemot šķīdinātāju lietošanu, kur tiek izmantoti arī valstij specifiski dati). Dati par kopējo valstī izmantoto smērvielu apjomu (TJ) pieejami Latvijas energobilancē. Lai noteiktu uz rūpniecības sektoru attiecināmo emisiju apjomu, ir jāveic papildu aprēķini.

3.1.5. OSNV izmantošana

Lai aizsargātu ozona slāni no noārdīšanās, līdz ar Monreālas protokola ieviešanu divas ozona slānim kaitīgu vielu klases (hlorfluorogļūdeņražus (CFC, HCFC)) paredzēts izslēgt no aprites. Lai vienlaikus turpinātu nodrošināt, piemēram, dzesēšanas iekārtu darbību, plaši tiek izmantoti ozona slāni noārdošo vielu (OSNV) aizstājēji. Tās lielākoties ir SEG un rada ietekmi uz globālo sasilšanu. Fluorēto SEG grupai attiecināta tādu sintētisko gāzu kā fluorogļūdeņraži (HFC), perfluorogļūdeņraži (PFC), sēra heksafluorīds (SF₆) un slāpekļa trifluorīds (NF₃) emisijas [15]. Fluorētās gāzes izceļas ar īpaši spēcīgu ietekmi uz siltumnīcefektu un klimata pārmaiņām. Piemēram, slāpekļa trifluorīda emisijām ir 17 400 reižu, bet sēra heksafluorīda – 24 300 reižu lielāks globālās sasilšanas potenciāls 100 gadu periodā nekā CO₂ [16].

Šis ir viens no retajiem sektoriem, kur kopš 1990. gada Latvijā bijis nozīmīgs emisiju pieaugums, taču tas loģiski skaidrojams ar



3.9. attēls.
Fluorēto SEG
lietojuma piemēri
(izveidots, balstoties [15] datos).

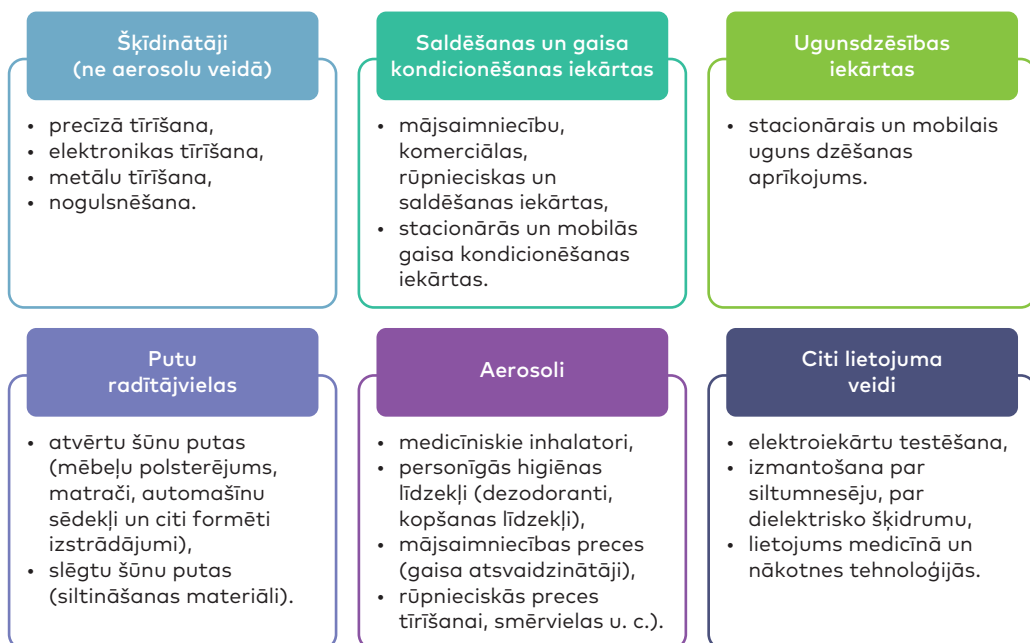
ozona slāņa aizsardzības pasākumiem, kā arī ar to, ka šādas vielas tiek izmantotas gan industriālos, gan māsaimniecību ledusskapjos, gaisa kondicionētājos un šo produktu pieprasījums, mainoties klimatam, tikai palielinās [17]. OSNV aizstājēji, piemēram, dažādi fluorogļūdeņraži, veido lielāko daļu fluorēto SEG emisiju Latvijā līdz šim, bet ar PFC un NF₃ lietošanu saistītas emisijas Latvijā netiek ziņotas [18]. Latvijas emisiju inventarizācijā [18] tiek ņemti vērā deviņi fluorogļūdeņražu veidi, ko var izmantot dzesēšanai un kondicionēšanai, ugunsdzēsības aparātos, aerosolos un kā putu radītāji (sk. 3.9. att.).

Sektora SEG emisiju audits balstīts KPSP metodikā definētajā pieejā fluorēto OSNV emisiju aprēķinam. OSNV aizstājēju emisijas ir laikā dinamiska problēma, jo ir iespējams būtisks noilgums starp šo vielu izmantošanu un nonākšanu atmosfērā. Dažos lietojuma veidos, piemēram, izmantojot fluorogļūdeņražus ledusskapjos par dzesēšanas aģentu vai izmantojot tos kā rezerves ugunsgrēku dzesēšanas aģentu, ideālos apstākļos emisijas atmosfērā nemaz nenonāktu, taču realitātē iespējamās vielu noplūdes, kas aprēķinos tiek ņemtas vērā tuvināti. Savukārt citos gadījumos (kā izmantošana aerosolos) tiek pieņemts, ka emisijas ir momentānas, lai gan fiziski eksistē nelieli uzkrājumi un to izmantošanas novēlojums [19].

Precīzāki emisiju aprēķini iegūstami, ja tiek nodrošināts ļoti konkrēts vielu izmantošanas uzskaitījums un tiek ņemts vērā to dažāda lietošanas mērķis. KPSP metodikā sniegts detalizēts lietošanas mērķa apakškategoriju iedalījums (sk. 3.10. att.) [19].

3.10. attēls.

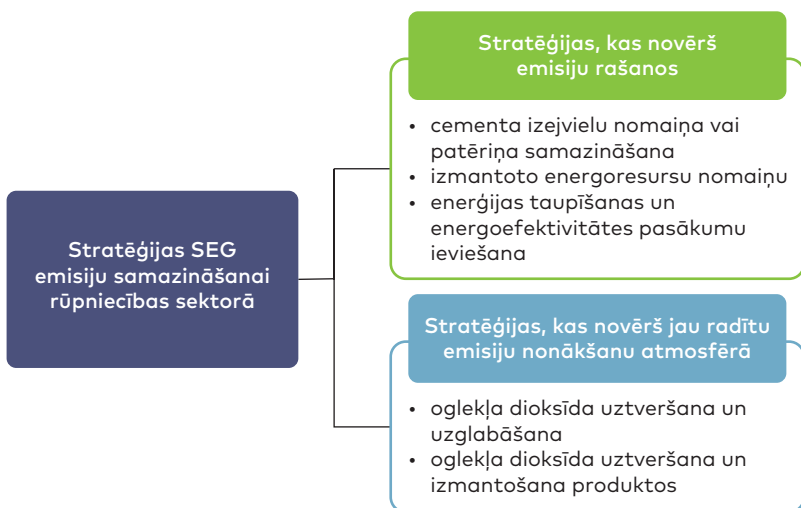
Aprēķinu metodikā ietvertie HFC lietojuma veidi un to apakškategorijas (izveidots, balstoties [19] datos).



Uzskaites precizitāte ir būtiskākā atšķirība starp dažādiem aprēķinu detalizācijas līmeņiem. 1. detalizācijas pakāpēs aprēķiniem izmanto dalījumu tikai lietojuma veidu līmenī, bet 2. detalizācijas pakāpēs aprēķiniem – arī apakškategoriju līmenī. Emisijas faktori ir zināmi vielu griezumā, bet citi izmantotie pieņēmumi lielākoties saistīti ar konkrētā lietošanas mērķa specifiku vai tiek pieņemti kā standarta vērtības. Līdz ar to lielākais neatkarīgais mainīgais šo emisiju aprēķinos ir vielu lietošanas apjoms.

3.2. Rūpniecības sektora dekarbonizācijas tehnoloģiskie paņēmieni

Rūpniecības sektora dekarbonizācija ir ļoti nozīmīga, lai sasniegtu ES noteikto mērķi 2050. gadā radīt nulles neto emisijas un varētu cerēt sasniegt klimata stabilizāciju [3]. SEG emisiju samazināšanas stratēģijas rūpniecības sektorā var iedalīt divās grupās: tādās, kas likvidē emisiju cēloni, un tādās, kas novērš radīto emisiju nonākšanu atmosfērā. Pirmās grupas stratēģijas ietver izejvielu nomaiņu vai patēriņa samazināšanu, izmantoto energoresursu nomaiņu, tehnoloģiju nomaiņu, piemēram, elektrifikāciju, enerģijas taupīšanas un energoefektivitātes pasākumu ieviešanu (sk. 3.11. att.). Plašākā skatījumā arī resursu patēriņa paradumu izmaiņas un betona sastāva izmaiņas (ja tiek samazināts kopējais pieprasījums pēc cementa klinķera) var ietekmēt emisiju apjomus [20]. Otrās grupas stratēģija ir visplašāk pazīstama kā oglekļa uztveršanas un uzglabāšanas prakse, taču zināmi arī piemēri par oglekļa dioksīda uztveršanu un izmantošanu produktos, tādā veidā samazinot gan ietekmi uz klimata



3.11. attēls.

Rūpniecības emisiju samazināšanas stratēģiju iedalījums.

pārmaiņām, gan veicinot citu rūpniecības nozaru attīstību. Atsevišķi izdalāma dabā balstītu risinājumu un negatīvu emisiju tehnoloģiju izmantošana, jo šīs stratēģijas cīnās ar emisijām kā sekām nevis ar to cēloni, turklāt tās tiek īstenotas kompensējoši, nevis tiešajā emisiju rašanās avotā [21].

Rūpniecības sektora SEG emisiju audita laikā kā būtiskākie emisiju avoti identificēti minerālu rūpniecība un ozona slāni noārdāmo vielu aizstājēju lietošana. Turpmāk tiek skatīti tehnoloģiskie risinājumi SEG emisiju mazināšanai rūpniecības sektorā – gan emisiju rašanās novēršanai, gan radītu emisiju izplūdes mazināšanai.

3.2.1. Izejvielu nomaiņa minerālu rūpniecībā

Kā skaidrots 3.1.1. nodaļā, cementa klinkera ražošanas process ir emisiju ietilpīgs, jo, lai nodrošinātu klinkera sastāvā nepieciešamo CaO , tiek izmantots kalcija karbonāts jeb kaļķakmens, tādēļ viena no emisiju mazināšanas alternatīvām ir klinkera ražošanā aizstāt kaļķakmeni, jo tas ir galvenais oglekļa avots šajā procesā. Alternatīvas cementa klinkera izejvielas var būt tādas, kuru pamatā ir fosfāti, magnija savienojumi, termiski aktivizēts pārstrādāts cements ar zemu oglekļa saturu [22]. Lai arī mazs daudzums MgO uzlabo klinkera ražošanas procesu, MgCO_3 emisiju faktors ir pat mazliet augstāks nekā CaCO_3 , tādēļ šī stratēģija ievērojamo samazinājumu nevar nodrošināt. Daļu procesam vajadzīgo izejmateriālu iespējams iegūt, atkārtoti izmantojot metālradošanas blakusproduktus, taču šo piedevu mērķis lielākoties ir cementa klinkera tehnisko prasību nodrošināšana, nevis emisiju samazināšana.

Ņemot vērā, ka klinkers veido tikai daļu no izejvielām galaproduktos – cementā un betonā –, būtiska nozīme arī emisiju ziņā ir klinkera proporcijai cementā. EN 206-1 standarts nosaka, ka minimālā cementa proporcija betonā, lai nodrošinātu pietiekamu izturību, ir vismaz 260 kg/m^3 [23]. Ja iespējams nodrošināt vajadzīgās betona īpašības ar mazāku cementa saistvielas apjomu, tad zemāks būs arī CO_2 emisiju apjoms pret kopējo izmantotā betona apjomu. Cementa klinkera daļu cementā iespējams samazināt, aizstājot daļu klinkera ar citiem cementējošiem materiāliem vai palielinot ķīmiski neaktīvo pildvielu proporciju.

Lai aizstātu klinkera daļu cementā, var izmantot vieglos pelnus, plāvu (metallurģijas blakusprodukts), kalcinētu kaolinīta mālu (metakaolīnu) [24]. Iespējams piemaisīt arī rūpniecības vai lauksaimniecības atkritumu pelnus, jo tiem ir zemas izmaksas, taču tas palielina sacietēšanas laiku un samazina cementa apstrādājamību [22]. Izmantojot kalcinētu mālu pucolānu², iespējams panākt emisiju samazinājumu gan lietoto izejvielu dēļ, gan samazinot procesam nepieciešamo siltumenerģijas apjomu. Kalcinētā māla lietošana

² Pucolāna pie-devas ir papildu cementējošo materiālu veids, ko pievieno cementam noteiktās proporcijās, lai panāktu betonam nepieciešamo īpašību kopumu, kā arī tas mazina betona maisījuma ietekmi uz vidi, jo parasti pucolāniem ir zemākas emisijas nekā klinkeram.

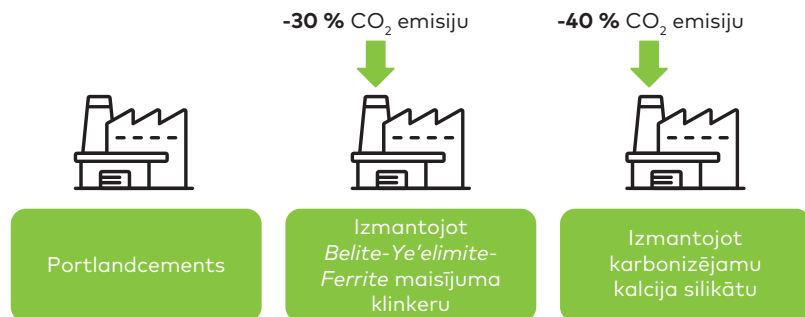
uzlabo ķīmiskās reakcijas un sistēmas reoloģisko uzvedību. Materiālu plašā pieejamība un tas, ka nepieciešamas tikai nelielas izmaiņas izmantotajās tehnoloģijās, veicina šādu materiālu izmantošanu plašākā mērogā, taču tas atkarīgs arī no iegūtā cementa tehniskajām īpašībām un no tā, vai un cik ātri tirgus pieņems jauninājumu [25]. Cementējošo materiālu alternatīvu lietošana var sniegt ne tikai emisiju samazinājumu, bet arī, piemēram, uzlabotu izturību [22].

Cita stratēģija cementa īpatnējo emisiju mazināšanai ir kaļķakmens kā pildvielas proporcijas palielināšana. Lai gan tiek ziņots par iespējamību aizstāt līdz pat 46 % no cementa klinkera ar kaļķakmeni, jāreķinās arī ar tādām iespējamām problēmām kā zemāka salizturība un izturība ķīmiski agresīvā vidē [26]. Lai palielinātu ķīmiski neaktīvo pildvielu proporciju, cementa klinkeram kā pildvielu var pievienot, piemēram, marmora atlikumus, kvarcu, dolomītu, granītu [22]. Šīs ķīmiski neaktīvās pildvielas tiek pievienotas, lai uzlabotu cementa īpašības, taču atsevišķos pētījumos pierādīts, ka, palielinot minerālu pulveru pildvielu proporciju, samazinās izturība pret karbonāciju (tā samazinot materiāla ilgmūžību), kā arī pārāk liela pildvielu proporcija var negatīvi ietekmēt cementa sūknējamību [22].

Paredzams, ka nākotnē, palielinoties papildu cementējošo materiālu pieejamībai, cementa ražošanā būs vērojama pāreja uz zemāku klinkera proporciju (vidēji līdz pat 71 % no cementa saturā). Protais, ne visi tirgus dalībnieki būs gatavi pāriet uz vēl zemāka klinkera sastāva cementu, bet tie varētu būt 40 % no tirgus, kas spētu ražot cementu ar 50 % klinkera saturu. [25]

Cementa sektorā attīstās arī inovatīvi materiāli jeb jauni cementi, piemēram, sārmu aktivizēti cementi, *Belite-Ye'elimite-Ferrite (BYF)* klinkers, karbonizējams kalcijsilikāts [25]. *BYF* klinkera gadījumā, pētījumos iegūts pat 30 % CO₂ emisiju samazinājums, salīdzinot ar portlandcementu, bet karbonizējama kalcijsilikāta gadījumā samazinājums varētu sasniegt 40 %³ (sk. 3.12. att.), jo šajās tehnoloģijās tiek izmantoti citi izejmateriāli [27]. Inovatīvu materiālu izmantošana industrijas praksē vēl nav plaši izplatīta, taču to izpēte arvien paplašinās (piemēram, sk. [28]). Inovatīvajām tehnoloģijām ir dažādi

³ Nepieciešama stiprināšana augsta CO₂ atmosfērā, tādēļ izmantojams rūpnieciski gatavotam betonam.



3.12. attēls. Potenciālais emisiju samazinājums, izmantojot inovatīvus cementa izejmateriālus.

ierobežojumi: tehnoloģiju gatavības līmenis, izejmateriālu pieejamība, cenu konkurence ar portlandcementu un pats kritiskākais – cementa lietošanas iespējas un radīto konstrukciju izturība.

Teorētiskā izpēte liecina, ka, izmantojot izejvielu aizstāšanas pieeju, cementa sektors varētu īstenot 2 grādu emisiju samazināšanas scenāriju, pat neizmantojot oglekļa uztveršanu un uzglabāšanu [25]. Lielāku emisiju samazinājumu iespējams sasniegt, izmantojot jau plaši pieejamos aizstājējmateriālus.

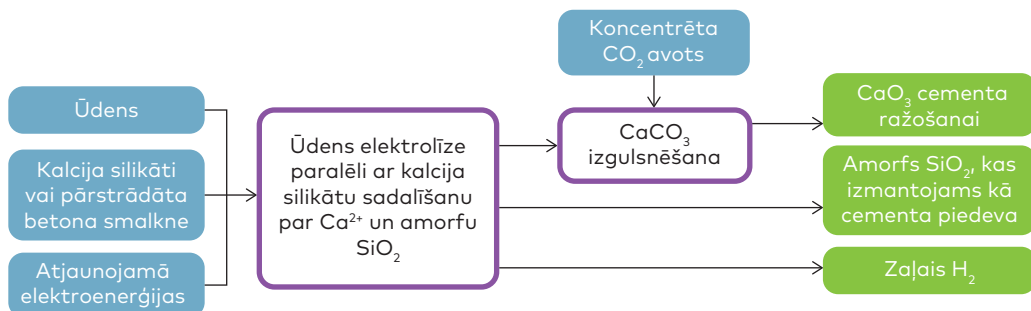
Lai gan inovatīvo cementu nozarē notiek aktīva izpēte, plašā mērogā šie materiāli vēl nav pilnvērtīgi tehnoloģiski un ekonomiski konkurētspējīgi. Arī betona ar zemu cementa klinkera sastāvu izmantošana saistīta ar ierobežotākām tehniskajām īpašībām, tāpēc ir jāturpina zinātniskā izpēte par to, kādas jaunas pieejas spētu vienlaicīgi nodrošināt cementam nepieciešamās īpašības un radīt mazāku ietekmi uz klimata pārmaiņām.

Līdz šim tika skaidrotas iespējas mainīt cementa klinkera un cementa izejvielu sastāvu, būtiski nemainot ražošanas tehnoloģiju. Cementa klinkera ražošana, karsējot kaļķakmeni, ir nozīmīgākais tehnoloģiskais process, kas cementa ražošanā rada CO₂ emisijas. Kaļķakmens karsēšanas tehnoloģija ir aptuveni 200 gadus sena, nostabilizējusies un plaši izmantota [29]. Pazīstams gan mitrais, gan saussais cementa klinkera ražošanas process. Viens no būtiskākajiem aspektiem tehnoloģijas izvēlē ir pieejamo izejvielu veids. Eiropā dominē sausās tehnoloģijas izmantošana, turklāt tā ir mazāk energoietilpīga un tai ir zemākas izmaksas nekā mitrajam procesam [14]. Arī Latvijas cementa rūpnīca Brocēnos izmanto sauso tehnoloģiju [30].

Tomēr nākotnes cementa ražošanas tehnoloģijas iezīmē vēl radikālākas izmaiņas. Izpētes stadijā [29] ir tehnoloģijas, kas paredz pilnībā dekarbonizēt klinkera ražošanu, aizstājot kaļķakmeni kā galveno cementa klinkera izejvielu ar dabā pieejamiem kalcija silikātiem. Tāpat par izejvielu iespējams izmantot arī smalkni, kas rodas, pārstrādājot no nojaukšanas darbiem iegūto betonu. Mākslīgā CaCO₃ ražošana norisinās, izmantojot elektroķīmisko procesu, turklāt, izmantojot atjaunojamo elektroenerģiju, iespējams

3.13. attēls.

Inovatīvas cementa ražošanas tehnoloģijas pie-mērs, balstoties [29] sniegtajā scenārijā.



samazināt gan cementa ražošanas īpatnējās emisijas, gan ražošanas izmaksas. Šajā gadījumā procesu shēma (sk. 3.13. att.) paredz izmantot ūdens elektrolīzi un CO₂ avotu, lai mākslīgi iegūtu CaCO₃. Elektrolīzes rezultātā rodas pH gradients un ir iespējams no kalcija silikātiem ekstrahēt Ca²⁺, savukārt, pievadot CO₂ avotu, iespējams radīt CaCO₃, amorfū (cietu) SiO un zaļo ūdeņradi (ja izmantota atjaunojamā elektroenerģija). Šādā procesā būtu iespējams ne tikai samazināt cementa klinkera ražošanas reakciju radītās CO₂ emisijas, bet piesaistīt CO₂, kas koncentrēts, piemēram, no gaisa vai no konvencionālā cementa klinkera ražošanas procesa, un veicināt apritīgu resursu izmantošanu.

Lai mazinātu keramikas sektora emisiju apjomus, iespējams samazināt oglekli saturošu palīgvielu izmantošanu, izmantot mālus ar zemāku oglekļa saturu, izmantot ekodizaina principus (dematerializācija, atkritumu neradīšana un mazināšana) un, kur vien tas iespējams, atkārtoti lietot izejmateriālus. Kā keramikas sektora emisiju samazināšanas tehnoloģiju iespējams izmantot arī oglekļa uztveršanu [31].

Lai gan Latvijā šobrīd netiek ražots metāls un "Liepājas metalurga" iekārtas tika pārdotas un pārvestas, ja kādreiz nākotnē Latvijā metāla ražošana atsāktos, labāko pieejamo tehnoloģiju pieeja paredz izmantot tiešās redukcijas metāla ražošanu, nevis novecojošo domnu tehnoloģiju. Tiešās redukcijas metālražošanā var izmantot zaļo ūdeņradi, kuram ir zemas SEG emisijas [32].

3.2.2. Oglekļa uztveršana un uzglabāšana

Pamatinformācija par CCUS metodes būtību sniegta jau 1. nodaļā. Līdz 2018. gadam oglekļa uztveršana biežāk izmantota industrijā (tādās nozarēs kā etanola, mēslojuma, ūdeņraža ražošana, kā arī dzelzs un tērauda ražošana) nekā enerģētikas sektorā [33]. Rūpniecības sektorā CCUS metode ir paredzēta, lai novērstu ražošanas tehnoloģiskā procesa laikā radušos emisiju nonākšanu atmosfērā. CCUS metodes izmantošana rūpniecības sektorā rada iespēju samazināt emisijas arī tad, ja izmantotās ražošanas tehnoloģijas nomaina nav tehniski iespējama vai nav ekonomiski samērīga [33]. Šī metode piemērota dažādiem ražošanas sektoriem, jo galvenie tehnoloģiskās piemērotības aspekti saistīti ar pieejamās CO₂ plūsmas tehniskajiem parametriem. Visefektīvāk to izmantot gadījumos, kur ir lieli punktveida emisiju avoti, tādi kā rūpnīcas, ar stabilu un augstu CO₂ koncentrācijas emisiju plūsmu. Piemēram, CO₂ koncentrācija rūpnīcu tehnoloģiskajā procesā radīto emisiju plūsmā parasti ir augstāka (14–33 %) nekā energoavotu dūmgāzu plūsmā (4–10 % dabasgāzes stacijās, 7–14 % ogļu elektrostacijās), kas ir izdevīgi CCUS iekārtu izvēlei [34], [35].

Piemērs. 2025. gadā Norvēģijā darbību uzsāka cementa ražotnē integrēta CCUS. Tā ir daļa no lielāka *Northern Lights* projekta, kas ietver oglekļa uztveršanu ražotnēs Breivīkā, Norvēģijā, un Gotlandē, Zviedrijā, un noglabāšanu Ziemeļjūras jūras gultnē [36].



3.14. attēls. *Northern Lights* projektā iesaistītās ražotnes [36].

Šobrīd CCUS tehnoloģiju ieviešanas galvenais dzinējspēks ir spēkā esošais normatīvais ietvars. Latvijai kā ES dalībvalstij ir saistošs ES regulējums SEG emisiju samazināšanas jomā, savukārt ES regulējuma mērķis ir konkurētspējas noturēšana, vienlaicīgi mazinot Eiropas ietekmi uz klimata pārmaiņām. KPSP emisiju ziņošanas metodika ļauj valstīm norādīt uztverto oglekļa dioksīda emisiju apjomu, taču līdz šim Latvijā tādu iekārtu nav bijis. 2025. gadā Latvijas lielākais cementa ražotājs SIA “SCHWENK Latvija” izmēģināja pirmo oglekļa uztveršanas iekārtu un Latvijas apstākļos testēja karstā kālija metodi oglekļa uztveršanai [37].

Oglekļa uztveršanas tehnoloģijās izmanto ķīmisko absorbciju, kur šķīdinātāji var būt, piemēram, karstā kālija karbonāts, mono-etanolamīns (MEA) vai atdzesēts amonjaks. Pētījumi, kas salīdzina dažādas CCUS izmantotās ķīmiskās absorbcijas metodes, lielākoties veikti par koģenerācijas stacijām. Pasaulē plašāk izmanto MEA [38], [39] metodi, kur oglekļa dioksīds tiek uztverts no dūmgāzēm. Ķīmiskās absorbcijas metodes priekšrocība ir tāda, ka CO₂ iespējams atdalīt zemā parciālspiedienā un koncentrācijā [34]. Lai gan ķīmiskās absorbcijas metode ir tehnoloģiski vismodernākais veids CO₂ atdalīšanai pēc kurināmā sadedzināšanas, lielo kapitālizmaksu dēļ tā nav plaši izplatīta [34], [39]. Karstā kālija karbonāta tehnoloģija sākotnēji izstrādāta gāzu attīrīšanai, taču šobrīd to izmanto arī kā

CO₂ uztveršanas tehnoloģiju. Lai gan no oglekļa uztveršanas un kondicionēšanas iekārtām ir iespējams atgūt siltumu, eksperimentāli noteikts, ka, izmantojot karstā kālija karbonāta tehnoloģiju koģenerācijas stacijā, kas nodrošina centralizēto siltumenerģiju, novērots kopējās efektivitātes kritums līdz pat 7 % [40], [41].

Enerģijas patēriņa pieaugums un energoefektivitātes samazinājums pēc iekārtas uzstādīšanas ir divi plaši izmantoti rādītāji (indikatorī), kas jāņem vērā, plānojot CCSU tehnoloģijas uzstādīšanu. Tipiski karstā kālija karbonāta procesa īpatnējais enerģijas patēriņš (attiecino uz tonnu uztvertā CO₂) ir augstāks nekā amīnu procesā. Tomēr modelējot un vienādos apstākļos salīdzinot MEA un karstā kālija karbonāta metodes CO₂ uztveršanai no biomasas koģenerācijas iekārtām [40], noteikts, ka koģenerācijas stacijas kopējā efektivitāte samazinās par 15–16 % MEA un par 9–10 % karstā kālija karbonāta metodes gadījumā. MEA metode rada mazāku saražotās elektroenerģijas samazinājumu, tā nodrošinot augstāku koģenerācijas stacijas ekslerģiju (~35 %) nekā karstā kālija karbonāta metodes gadījumā (~26 %). Lai pēc iespējas mazinātu CCSU tehnoloģiju radīto iekārtas enerģijas patēriņa pieaugumu, tiek izstrādāti un testēti uzlaboti šķīdinātāji un procesu konfigurācijas, kas palielina absorbcijas ātrumu. Veiksmīgākajos scenārijos sasniegts nepieciešamā reģenerācijas enerģijas patēriņa samazinājums līdz 2,03 GJ/t_{CO2}. Līdz ar to enerģijas patēriņa samazinājums rada izmaksu ietaupījumu (līdz pat 44 %, salīdzinot ar MEA tehnoloģiju) [34], [40].

Arī citām tehnoloģijām ir savi trūkumi un ierobežojumi. Piemēram, atdzesētā amonjaka process izmantojams tikai, ja pieejams zemas temperatūras dzesēšanas ūdens avots, un tas paredzēts tādām dūmgāzēm, kur CO₂ koncentrācija pārsniedz 15 vol. % [40], [42]. Amīnu procesā nav nepieciešama dūmgāzu saspiešana, taču ir augstāks īpatnējais siltumenerģijas patēriņš pret tonnu uztvertā CO₂, jo jāreģenerē uztvertais amīns [40]. Pētnieki [34] norāda, ja CO₂ koncentrācija dūmgāzēs pārsniedz 20 %, CCSU tehnoloģijas radītais papildu enerģijas patēriņš amīnu absorbcijas un membrānu atdalīšanas tehnoloģiju gadījumā ir vienlīdzīgs.

Papildus rūpniecības uzņēmumu emisiju novēršanai oglekļa uztveršanas tehnoloģija rūpniecības sektorā varētu nodrošināt negatīvas emisijas, izmantojot biomasas oglekļa uztveršanu. Šādas tehnoloģijas būtu interesantas lielākajiem koksnes produktu ražotājiem, jo šajās rūpnīcās vietējai energoapgādei kā kurināmo izmanto biomasas šķeldu, kas rada biogēnās CO₂ emisijas. Koksnes rūpniecības uzņēmumiem uzstādot oglekļa uztveršanas iekārtas, iegūtais emisiju ietaupījums tiktu ziņots enerģētikas sektorā, jo tur tiek ziņotas uzņēmumu energoapgādes emisijas. Līdz ar to šāda projekta ieviešana nedotu tiešu samazinājumu rūpniecības sektora emisiju bilancē, taču šajā gadījumā virzītājspēks projektu ieviešanai nav tikai atbilstības prasības, bet gan iespējamā ekonomiskā

motivācija par emisiju ietaupījuma daļas pārdošanu CO₂ kvotu tirgū. Paredzams, ka, oglekļa uztveršanas tehnoloģijām attīstoties, to cenas samazināsies pat par 30 %, salīdzinot ar pašreizējām cenām, un 2035. gadā tās jau būtu plaši izmantotas tehnoloģijas [43]. Lai nokļūtu līdz šādai realitātei, nepieciešama ne tikai tehnoloģiju attīstība, bet arī zināšanu trūkuma novēršana un normatīvā ietvara ierobežojumu samazināšana.

CCSU ieviešanā jāreķinās ar dažādiem izaicinājumiem – visbiežāk iespējams jau apskatītais rūpnīcu enerģijas patēriņa pieaugums uztveršanas iekārtu darbināšanas dēļ [43]. *CCSU* ieviešana var izraisīt arī atsitiena efektu un veicināt uzņēmumu turpināt fosilo energoresursu lietošanu, jo, atrisinot emisiju jautājumu, citu tehnoloģiju, piemēram, atjaunojamo energoresursu, ieviešana vairs nav saistoša [33]. Izaicinājumus *CCSU* projektu ieviešanai rada augstas nepieciešamās investīcijas, tehnoloģijas konkurētspēja ar citām alternatīvām un oglekļa transportēšanas un uzglabāšanas tehnoloģiskie šķēršļi [7], [44], [45]. Pasaulē īstenotajos *CCSU* projektos noteikts, ka oglekļa uztveršanas izmaksas var veidot pat 60–80 % no kopējām izmaksām [43]. Projekta ekspluatācijas izmaksas ietver ūdens, elektrības, tvaika un ķīmisko vielu izmaksas, ko patērē oglekļa uztveršanas iekārta, apkopes izmaksas un atalgojumu, kā arī potenciālās remonta izmaksas, kas var sasniegt aptuveni 4 % [43]. Savukārt *CCSU* projektu ieviešanas tehniskie riski saistīti ar potenciālām CO₂ noplūdēm, cauruļvadu koroziju un nepieciešamību pielāgot oglekļa uztveršanas tehnoloģiju konkrētās ražotnes vajadzībām, CO₂ koncentrācijai un citiem faktoriem [7].

Citi šķēršļi, kas ietekmē *CCSU* projektus, ir:

- regulējuma sarežģītība un nenoteiktība, kā dēļ nepieciešamas jaunas regulējuma reformas;
- nepietiekama informācija;
- nepietiekama politiskā griba;
- negatīva sabiedrības attieksme pret *CCSU* (negatīva asociācija ar fosilo kurināmo, informācijas par tehnoloģijām trūkums, vispārēja neuzticēšanās lēmumu pieņēmējiem);
- lielās izmaksas, jo katrs projekts ir individuāls [44].

Oglekļa uztveršana ir tikai pirmais posms atmosfēras CO₂ koncentrācijas mazināšanai. Būtiska ietekme uz sasniedzamo rezultātu ir arī uztvertā CO₂ turpmākajam lietojumam.

1. nodaļā skatīts CO₂ transportēšanas un noglabāšanas process, kas ir uzticamākais CO₂ ilgtermiņa uzglabāšanas aspektā. Uztverto CO₂ var uzskatīt arī par vērtīgu izejvielu, it īpaši rūpniecības kontekstā. Oglekļa dioksīda valorizācija ir process, kurā CO₂ izmanto augstas pievienotās vērtības produktu ražošanai. Iespējamās attīstības trajektorijas ir metanola, metāna un citu ķīmisko vielu ražošana, izmantojot no rūpniecības procesiem uztverto CO₂. Šāda CO₂ lietojuma trūkums ir tas, ka, izmantojot saražotās vielas, CO₂ tāpat tiek

emitēts, tādēļ to nevar uzskatīt par CO₂ ilgtermiņa uzglabāšanas metodi. No otras puses, šādi saražojot metanolu, tiktu samazināts fosilās izcelsmes izejvielu lietojums. Metanola ražošana ar CO₂ tiešās hidroģenēšanas metodi, var samazināt ietekmi uz vidi klimata pārmaiņu, fosilo resursu patēriņa un cilvēka toksicitātes kategorijās, salīdzinot ar konvencionālo ražošanas tehnoloģiju, kurā metanolu ražo no singāzes. Samazinājuma apjoms atkarīgs no tā, vai, piemēram, konkrētajā gadījumā tiek izmantoti atjaunojamie energoresursi un atjaunojamais ūdeņradis [46].

3.2.3. Ūdeņraža izmantošana

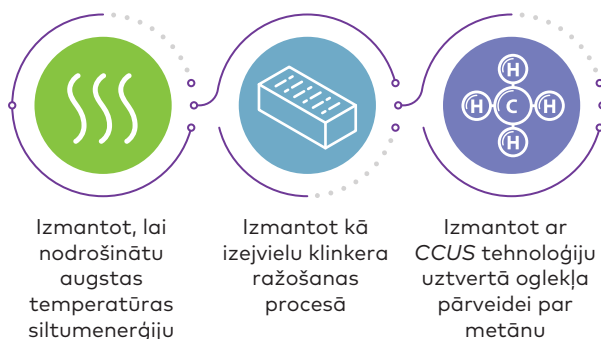
Amonjaku, metānu, metanolu un ūdeņradi var uzskatīt par bezoglekļa energonesējiem [47] (atkarībā no ražošanas metodes), kurus iespējams izmantot gan rūpniecībā, gan arī aizstājot fosilos energoresursus enerģētikā un transporta sektorā. Būtiska loma šeit ir ūdeņradim, kas lietojams gan tiešā veidā enerģijas ražošanai, gan kā izejviela amonjaka un metāna ražošanai. Lai gan ūdeņraža izmantošanai elektroenerģijas akumulācijai ir liels potenciāls, šī lietojuma trūkums ir zema efektivitāte, pārveidojot to atpakaļ elektroenerģijā, izmantojot kurināmā šūnas [21], [47]. Tā kā rūpniecības sektora 100 % elektrifikācija šobrīd būtu pārāk liels izaicinājums, vēja un saules atjaunojamās elektroenerģijas pārprodukcijas akumulācija ūdeņraža formā un izmantošana rūpniecības energoapgādei ir izdevīgs risinājums nozares emisiju samazināšanai, kā arī energoresursu diversifikācijai. Lai gan šobrīd vērojama izaugsme ūdeņraža tehnoloģiju ziņā, tā joprojām uzskatāma par jaunattīstības metodi un paredzams, ka plašāku izplatību tā varētu sasniegt pēc 2050. gada [3].

Atkarībā no ražošanai izmantotās izejvielas un metodes ūdeņraža ražošanas tehnoloģijas tiek iedalītas tā sauktajās pelēkajās, zilajās un zaļajās (sk. plašāku aprakstu 1. nodaļā). Rūpniecības sektora kontekstā svarīgi, ka, ūdeņradi sadedzinot, ir iespējams nodrošināt augstas temperatūras siltumenerģiju (vairāk nekā 1000 °C), kas nepieciešama ražošanas tehnoloģiskajos procesos, piemēram, cementa ražotnēs [3].

Turklāt cementa ražošanas tehnoloģiskā procesa dekarbonizācijai ūdeņradi var izmantot ne tikai kā kurināmo, bet arī kā izejvielu klinkera ražošanā. Izmantojot ūdeņradi, kaļķakmens kalcinācijas vietā notiktu kaļķakmens hidroģenēšana. Procesu simulācija ārzemju gadījuma piemēram [38], ja cementu ražo, izmantojot kā kurināmo ogles, parādījusi, ka tādā veidā būtu iespējams samazināt klinkera ražošanas enerģijas patēriņu par 37,65 % un oglekļa dioksīda emisijas par 47,76 %. Turklāt šādi tiktu nodrošināts arī ietekmes uz vidi samazinājums citās kategorijās, jo tiek likvidēta nepieciešamība pēc oglekļa uztveršanas.

3.14. attēls.

Ūdeņraža lietojuma piemēri rūpniecības procesu dekarbonizācijai.



Ūdeņradi var izmantot ar CCUS tehnoloģiju uztvertā oglekļa pārveidei par metānu, tā samazinot nepieciešamību pēc oglekļa uzglabāšanas. Neatkarīgi no izvēlēta lietojuma veida oglekļa aprites ziņā ir svarīgi, lai ūdeņraža ieguves process neveido CO₂ emisijas. Pelēkā ūdeņraža ražotnēs kā blakusprodukts rodas CO₂, tāpēc šādu ražotņu veidošana, lai nosegtu Latvijas paredzamo ūdeņraža patēriņu, tikai pārvietotu CO₂ emisiju radīšanas punktu (piemēram, no rūpniecības, kur fosilie energoresursi tiktu aizstāti ar ūdeņradi, uz enerģijas pārveides sektoru) un nerisinātu problēmu [7]. Sintētiskā metāna ražošanas potenciāla dēļ norādīts [48], ka ūdeņraža ar zemu ietekmi uz vidi pieejamība būtiski veicina arī CCUS attīstību. Zaļā jeb no atjaunojamajiem energoresursiem ražota ūdeņraža izmantošana Latvijā stiprinātu vietējo pašnodrošinājumu. 2024. gadā tika izziņoti plāni Liepājas ostā ražot ūdeņradi, izmantojot elektroenerģiju no atkrastes vēja parkiem, un produktu eksportēt [49].

3.2.4. Elektrifikācija

Vēsturiski rūpniecības uzņēmumos tehnoloģisko procesu un apkures nodrošināšanai lielākoties izmantots kurināmais, savukārt elektroenerģiju izmanto proporcionāli mazāk un galvenokārt ražošanas iekārtām. Tas skaidrojams kā ar tehnoloģiskajiem ierobežojumiem, tā arī ar ekonomiskajiem apsvērumiem, jo elektroenerģija ir augstvērtīgs energoresurss (augstāka ekserģija), un tas lielākoties atspoguļojas arī cenā par enerģijas vienību.

Latvijā rūpniecības nozares uzņēmumos izmanto gan tādus fosilos kurināmos kā dabasgāze, dīzeļdegviela u. c., gan dažāda veida koksnes biomasu [50]. Līdz šim dekarbonizācijai plašāk izmantota kurināmā nomainas stratēģija, kur fosilais kurināmais aizstāts ar biomasas sadedzināšanas tehnoloģijām. Tomēr, virzoties uz arvien pilnvērtīgāku pieejamo dabas resursu izmantošanu un ilgtspējīgas bioekonomikas paradigmu, ES līmenī tiecas neizmantot augstvērtīgu koksni par energoresursu. Lai gan šādas izmaiņas ir stratēģiski

pamatotas, tās vienlaikus rada arī izaicinājumus koksnes kurināmā tirgos, var veicināt cenu kāpumu un radīt neērtības uzņēmumiem. Līdz ar to uzņēmēji var būt atvērtāki arī tādām dekarbonizācijas stratēģijām kā tiešā elektrifikācija, kas līdz šim Latvijā tika izmantota relatīvi mazāk. Arī straujā tehnoloģiju, automatizācijas un attālinātas procesu vadības attīstība paver jaunas iespējas un veicina uzņēmēju interesi par tehnoloģiju nomaiņu. Elektroiekārtu izmantošana tehnoloģiju un apkures energoapgādei uzņēmumos atsevišķos gadījumos var nodrošināt pat augstāku kopējo lietderību un līdz ar to daļēji kompensēt elektroenerģijas kā energoresursa augstākas īpatnējās izmaksas. Tomēr, kurināmā katliem bieži ir augstāka efektivitāte (virs 80 %), tādēļ tajos saražotais tvaiks var būt lētāks nekā elektriskajā katlā ražotais, un pirms pārejas ir rūpīgi jāizvērtē kopējā efektivitāte [3].

Rūpniecības sektora elektrifikācija var izpausties kā (1) apkures energoavota nomaiņa uz siltumsūkņiem, indukcijas apkuri, infrasarkanu apkuri; (2) elektroenerģijas izmantošanu tādās specifiskās ražošanas iekārtās kā lāzerkausēšana, elektriskā loka krāsnis; (3) atsevišķos gadījumos ar ultravioletās gaismas un elektronu stariem var nodrošināt netermiskas alternatīvas sildīšanai [3]. Rūpniecības uzņēmumu energosistēmās iespējams integrēt augstas temperatūras siltumsūkņus [21]. Aprēķināts, ka, lai nodrošinātu 80 % rūpniecības sektora SEG emisiju samazinājumu, piemēram, Japānā būtu jānodrošina 66 % rūpniecības elektrifikācija [51].

Rūpniecības elektrifikācija iet vienotā solī ar elektroenerģijas akumulācijas sistēmu nepieciešamību. Tas izriet arī no Latvijas un ES nospraustajiem mērķiem atjaunojamās enerģijas jomā – pieaugot mainīgo resursu elektroenerģijas ģenerēšanas kapacitātei, ir jāattīsta arī enerģijas uzkrāšanas jaudas. Viens no būtiskiem apsvērumiem rūpniecības elektrifikācijas izvēlei ir elektrības izmaksas. Kā pozitīvs aspekts jāmin tas, ka Latvijas rūpniecības uzņēmumi pēdējos gados ir aktīvi izmantojuši iespējas saņemt atbalstu saules elektroenerģijas iekārtu uzstādīšanai, tā samazinot savu atkarību no energoapgādes tīkla. Latvijas enerģētikas stratēģijā līdz 2050. gadam norādīts, ka energointensīvu nozaru attīstība, ieskaitot industriālo elektrifikāciju, palielinās nākotnes elektroenerģijas patēriņa prognozes Latvijā, taču neradīs tiešu ietekmi uz citu energoresursu patēriņu [52]. Plašākā mērogā būtu jāņem vērā potenciālais fosilo energoresursu patēriņa samazinājums, ieviešot elektrifikāciju.

3.2.5. Energopatēriņa mazināšanas pasākumi

Lielākā daļa rūpniecības sektora SEG emisiju ir saistīta ar tehnoloģiskajiem procesiem, taču arī emisijas rūpniecības energoapgādes dēļ ir nozīmīgas, turklāt to mazināšanas pasākumi var būt elastīgāki

un plašāk izmantojami nekā izmaiņas ražošanas tehnoloģijās. Lai gan uzņēmumu energoapgādes radītās SEG emisijas tiek ziņotas enerģētikas sektorā, uzņēmumu lēmumi par energoapgādi nav atraujami no kopējās uzņēmuma darbības un attīstības politikas.

Pētījumā [53] novērtēts, kā energoefektivitātes uzlabošana, atjaunīgo energoresursu izmantošanas palielināšana, siltuma atgūšanas tehnoloģiju izmantošana un procesu optimizācija un automatizācija varētu sekmēt klimatneitralitātes sasniegšanu. Pētījuma rezultāti liecina, ka ieviešot minēto pasākumu kopumu, ir iespējams koksnes produktu un pārtikas ražošanas nozarēs 2030. gadā sasniegt enerģijas patēriņa samazinājumu salīdzinājumā ar atsaucenes scenāriju, taču nemetālisko minerālizstrādājumu sektorā paredzams enerģijas patēriņa pieaugums. Tomēr visos scenārijos tiek sasniegts atjaunojamo energoresursu daļas pieaugums.

Būtiskākā ietekme uz pasākumu ieviešanu ir projektu kopējām izmaksām un atmaksāšanās laikam. Balstoties rūpniecības uzņēmumu aptaujā, pētījumā [54] norādīts, ka Latvijas uzņēmumi ir atvērti atjaunojamo energoresursu tehnoloģiju ieviešanai, it īpaši, ja ir pieejami finansiāli atbalsta mehānismi. Rūpniecības nozares emisiju samazinājumu var panākt ar tādām rīcībpolitikām kā veiktspējas standarti, subsīdijas, nodokļu atlaides, brīvprātīgās vienošanās, līmeņatzīmju informācijas nodrošināšana, aprites ekodizains un paplašinātā ražotāja atbildības sistēma [55]. Tāpat kā citos sektoros, arī rūpniecības sektorā būtiski ir veicināt izpratni un informētību par oglekļneitralitāti kopumā un par pieejamo tehnoloģisko risinājumu lomu tās sasniegšanā [35].

2022. gadā Latvijas keramikas nozare radīja 13,18 kt CO₂ emisiju, kas radās, sadedzinot kurināmo (dabasgāzi, akmeņogles, biomasu), nevis tieši no ražošanas procesa. Kā tehnoloģiskais risinājums keramikas nozares netiešo emisiju mazināšanai ir elektrifikācija. Eiropas mēroga pētījumā [6] noteikts, ka 78 % kopējās rūpniecības enerģijas patēriņa ir iespējams nodrošināt ar elektroenerģiju, izmantojot pašlaik pieejamās tehnoloģijas, savukārt paredzams, ka ar nākotnē pieejamām tehnoloģijām varēs nodrošināt pat 99 % no kopējā patēriņa. Paralēli attīstot arī atjaunojamās elektroenerģijas ražošanas jaudas, ar elektrifikāciju būtu iespējams samazināt arī CO₂ emisijas par 50–78 % un gandrīz pilnībā izvairīties no rūpniecības emisijām, kas saistītas ar energoapgādi [6].

3.2.6. Neaugsmes (*Degrowth*)

Viens no cementa ražošanas radīto SEG emisiju izejumiem ir vispārējais pieprasījums pēc betona. Šis pieprasījums ir saistīts ar globālās urbanizācijas pieaugumu un tās radīto betona pieprasījuma pieaugumu [12], [25]. Tā vietā, lai pieņemtu, ka būvniecības nozares

uzņēmējdarbības praksē varētu notikt strauja revolūcija, uzsvērtā [12] nepieciešamība pēc pārmaiņām visā vērtību ķēdē. Stratēģijas pieprasījuma mazināšanai cementa nozarē ietver materiālefektīvu dizainu, materiālu atkritumu samazināšanu, augsta oglekļa satura materiālu aizstāšanu ar zema oglekļa satura materiāliem un aprītes ekonomikas pieejas lietošanu (piemēram, produktu ilgmūžības, atkārtotas izmantošanas, atjaunošanas vienkāršības un pārstrādes uzlabošana) [3].

Arī fluorēto gāzu noplūdes emisijas pieaug tāpēc, ka pieaug šo gāzu patēriņš aukstumapgādē un citur. Jebkura pāreja uz ilgtspējību var būt efektīva tikai tad, ja tehnoloģiskos sasniegumus papildina tālejošas dzīvesveida izmaiņas [56].

3.2.7. OSNV aizstājēju emisiju samazināšana

Rūpniecības sektora SEG emisiju samazinājuma pasākumi neatbilst tikai uz dekarbonizāciju uzņēmumos. Kā redzams no rūpniecības sektora SEG emisiju audita, būtiska nozīme ir OSNV aizstājēju lietošanai. Lai gan ir zināms, ka fluorēto gāzu emisijām ir spēcīga ietekme uz siltumnīcefektu, to patēriņš globāli turpina pieaugt, jo pieaug pieprasījums pēc dzesēšanas un jo šādi izpaužas neparedzētās Monreālas protokola blakusparādības un šī brīža klimata apņemšanos vājie punkti [15]. Šo emisiju samazināšana ir neizbēgami nepieciešama, lai virzītos uz ES klimata mērķiem, tādēļ diskurss par fluorūdeņražu emisiju mazināšanu ir aktuāls ES līmenī. Piemēram, 2024. gadā tika pieņemti notikumi par fluorēto gāzu emisiju pakāpenisku samazināšanu līdz to pilnīgai izslēgšanai 2050. gadā [57].

Tehnoloģiskie paņēmieni emisiju samazināšanai ieviešami: (1) fluorēto gāzu ražošanas procesā; (2) gāzu lietošanas fāzē; (3) gāzu apsaimniekošanas fāzē; (4) fluorēto gāzu iznīcināšanas fāzē. Uzlabojumus fluorēto gāzu ražošanā var sasniegt, maksimāli samazinot noplūdes, īstenojot noplūžu ķīmisko kontroli, novēršot tiešas emisijas gaisā no ražotnes, tā vietā īstenojot, piemēram, fluorogļūdeņražu sadedzināšanu. Šo risinājumu ieviešana pamatā saistīta ar darbības procedūru uzlabošanu fluorēto gāzu ražošanas uzņēmumos (sk. 3.12. att.). Putu, šķīdinātāju, ugunsdzēsamo aparātu un citu produktu ražošanā jau šobrīd ir iespējama arī fluorēto gāzu kā izejvielas nomaīņa ar tādām vielām, kurām ir zems GSP (un nākotnē potenciāli būs pieejamas aizstājējvielas, kas nerada ietekmi uz klimata pārmaiņām) [15].

Ņemot vērā, ka Latvijā OSNV emisijas rodas no produktu lietošanas, SEG ietaupījumu var sasniegt, īstenojot pasākumus, kas attiecināmi uz fluorēto gāzu lietošanas fāzi. Fluorēto gāzu lietošanas fāzē arī pieejami skaitliski lielākā daļa iespējamo risinājumu. Viena no galvenajām stratēģijām ir fluorēto gāzu aizstāšana ar ogļūdeņražiem vai halogēnu nesaturošiem aukstumaģentiem. Siltumsūkņos

un ūdens sildītājos iespējams aizstāt fluorētos aukstumaģentus ar CO_2 un zema GSP vielu maisījumiem [58]. Noliktavās ar saldēšanas sistēmām, kuru jauda pārsniedz 1 MW, plaši kā aukstumaģentu izmanto amonjaku. Dažādu produktu – putu materiālu, saspiestā gaisa aerosolu, medicīnas aerosolu – ražošanā ir iespējams aizstāt fluorētās gāzes ar citām alternatīvām, kurām ir zems vai nulles GSP. Medicīnas aerosolu gadījumā pat iespējams atteikties no aerosoliem ar gāzi, tā vietā izmantojot sausā pulvera inhalatorus (taču tie neatbilst atsevišķu pacientu grupu, tādu kā bērni un seniori, vajadzībām). Ugunsdzēsšanas aparātos bieži fluorētās gāzes aizstāj ar CO_2 , putām vai pulveri. Produktu pēclietošanas posmā vissvarīgāk ir nodrošināt atbilstošu rīcību ar nolietotajiem produktiem tā, lai novērstu gāzes noplūdes un pēc iespējas nodrošinātu gāzes atgūšanu no produkta un atkārtotu izmantošanu [15].

Arī elektroapgādes sistēmās līdz šim vidējā sprieguma slēgiekārtās tika izmantota SF_6 , taču, attīstoties tehnoloģijām, ir izveidotas drošas alternatīvas, kas nesatur SEG, bet gan, piemēram, gaisa un vakuuma tehnoloģiju, kas nodrošina izolāciju un elektriskā loka dzēšanu. Aprites cikla analīze alternatīvam automātiskā slēdža dizainam, kur SF_6 vietā izmantots superkritiskais CO_2 , parādīja, ka iespējams par 99,9 % samazināt CO_2 noplūdes un ierīces dzīves laikā samazināt CO_2 emisijas par 100–150 tonnām, salīdzinot ar SF_6 lietošanu, atkarībā no tā, vai iekārta tiek uzstādīta ārā vai iekštelpās [59].

Standartizētu reģenerācijas tehnoloģiju trūkuma dēļ fluorētās gāzes dzīves cikla beigās galvenokārt tiek iznīcinātas, taču attīstās arī šo gāzu reģenerācijas izpēte, lai tās būtu iespējams atkārtoti izmantot atbilstoši aprites ekonomikas principiem [60]. Pēc kalpošanas laika beigām fluorētās gāzes var iznīcināt, izmantojot sadedzināšanu, katalītisko oksidāciju, plazmas vai termisko degradēšanu.

3.16. attēls.

Fluorēto gāzu emisiju samazināšanas iespējas dažādos aprites cikla posmos.

Adaptēts no [15].



3.3. Klimata pārmaiņu mazināšanas ilgtspējas vērtējums rūpniecības sektorā

Rūpniecības sektors neapšaubāmi ir nozīmīgs mūsdienu sabiedrības ikdienas nodrošināšanai – sākot no pārtikas un patēriņa precēm līdz pat cementa nodrošināšanai būvniecības vajadzībām. Iepriekšējās nodaļās secināts, ka rūpniecības sektora radītās emisijas ir nozīmīgas un to mazināšana ir izaicinājums, tādēļ ir svarīgi laikus izvērtēt, vai tehnoloģiskie risinājumi rūpniecības sektora dekarbonizācijai ir ilgtspējīgi gan vides, gan sociālajā un ekonomiskajā dimensijā.

3.3.1. ANO Ilgtspējas attīstības mērķi rūpniecības sektorā

Kā vadmotīvs ilgtspējas novērtējumam izmantots Apvienoto Nāciju Organizācijas Ilgtspējīgas attīstības mērķu (IAM) ietvars. Attiecībā uz klimata pārmaiņu mazināšanu un rūpniecības sektoru visvairāk jāizceļ tādi mērķi kā IAM 8 “Cienīgs darbs un ekonomiskā izaugsme”, IAM 9 “Ražošana, inovācijas un infrastruktūra”, IAM 12 “Atbildīgs patēriņš un ražošana”, IAM 13 “Rīcība klimata jomā”.

IAM 8 “Cienīgs darbs un ekonomiskā izaugsme” mērķis ir noturīgas, iekļaujošas un ilgtspējīgas ekonomiskās izaugsmes veicināšana, kā arī pilnīgas un produktīvas nodarbinātības un cienīga darba nodrošināšana visiem iedzīvotājiem [61]. Šī mērķa ietvaros izvirzīti apakšmērķi, kas vērsti uz ekonomiskās izaugsmes uzturēšanu un uzlabošanu (mazāk attīstītajās valstīs), produktivitātes celšanu, tostarp modernizācijas un automatizācijas ceļā, kā arī nodrošinot labvēlīgus darba apstākļus un darba iespējas visām darbaspējīgajām personām. Lai gan IAM 8 piemin ražošanas produktivitātes un efektivitātes celšanu, būtiskāks šī mērķa uzsvars ir uz strādājošo iespējām, tiesībām un nodarbinātību kopumā. Rūpniecības procesu un produktu izmantošanas sektora SEG emisiju samazināšana ietekmēs IAM 8 sasniegšanu, jo tādā veidā tiek uzturēta un



3.17. attēls.

Rūpniecības sektora emisiju samazinājuma ietekme uz ilgtspējīgas attīstības mērķiem.

veicināta rūpniecības sektora konkurētspēja, kas savukārt nodrošina stabila darbavietas strādājošajiem. Nodrošinot rūpniecības modernizāciju un automatizāciju, paveras iespējas arī plašākai elektrifikācijai. Savukārt pieprasījums pēc atjaunojamā ūdeņraža un citiem bezoglekļa enerģijas nesējiem var veicināt jaunu uzņēmumu attīstību un jaunu darbavietu izveidi.

IAM 9 “Ražošana, inovācijas un infrastruktūra” fokusējas uz rūpniecības sektora infrastruktūras uzturēšanu un attīstīšanu, kā arī inovāciju un pētniecības veicināšanu. Līdzīgi kā IAM 8, arī IAM 9 apakšmērķos pieminēta modernizācija, ekonomiskās izaugsmes uzturēšana, taču lielāks uzsvars likts uz infrastruktūras un tehnoloģiju virzienu, nevis cilvēkresursiem. Šajā gadījumā rūpniecisko procesu un produktu izmantošanas sektora emisiju samazināšana un IAM 9 sasniegšana ir viena otru papildinošas, jo virzība uz rūpniecības modernizāciju veicina tehnoloģiju nomaiņu un emisiju samazināšanu. Tāpat ir nepieciešamas inovācijas un inovāciju pārnese, lai ieviestu praksē dažādas SEG emisiju ziņā labākās pieejamās tehnoloģijas.

IAM 12 “Atbildīgs patēriņš un ražošana” tieši ietekmē būtiskākos rūpniecības sektora virzītājspēkus – ražošanas procesa attīstību un pieprasījumu pēc produkcijas. Kā IAM 8, tā IAM 12 paredz resursu patēriņa un ražošanas efektivitātes uzlabošanu. No vienas puses, mērķis veicināt atbildīgas ražošanas sistēmas, tostarp uzlabot resursu efektivitāti, attīstīt jaunus tehnoloģiskos risinājumus un izvēlēties ilgtspējīgus risinājumus, veicina rūpniecības sektora vides ilgtspēju. No otras puses, emisiju samazinājums nodrošina rūpniecības uzņēmumu optimizāciju un konkurētspēju ilgtermiņā, kā arī ierobežo klimata pārmaiņas un to potenciālās negatīvās sekas, kas var ietekmēt rūpniecības sektora darbību.

IAM 12 otra sadaļa – atbildīga patēriņa veicināšana – intuitīvi var šķist pretrunā ar rūpniecības nozares mērķiem par noieta pieaugumu. Tomēr mūsdienu pārtēriņa kultūrā ir būtiski atcerēties, ka uz Zemeslodes pieejamo resursu un izejvielu apjoms ir ierobežots, savukārt pasaules iedzīvotāju skaits un līdz ar to arī patēriņš pēdējā gadsimta laikā ir četrkārtšojies (tiek prognozēts, ka 2050. gadā iedzīvotāju skaits uz Zemes var sasniegt pat 9,7 miljardus [62]). Latvijā ir labi priekšnoteikumi šo IAM 12 aspektu sabalansēšanai – ir pieejams daudz vietējo atjaunojamo dabas resursu – gan lauksaimniecības, gan mežsaimniecības biomasa, ko iespējams izmantot kā pamatu rūpniecības sektora transformācijai ilgtspējas virzienā. Būtiski, ka pieejamas arī vietējās zināšanas un pieredze bioresursu izmantošanā un bioekonomikas īstenošanā.

Veicinot augstas pievienotās vērtības rūpniecības attīstību (un sekmējot Latvijas rūpniecības sektora konkurētspēju), kā arī īstenojot tādus vienkāršākos rūpniecības dekarbonizācijas pasākumus kā nelietderīgā enerģijas patēriņa samazināšana, ražotņu

elektrifikācija, atjaunojamo energoresursu integrēšana, būtu iespējams vienlaikus virzīties kā uz IAM 12, tā arī IAM 9 sasniegšanu. Savukārt uzņēmumi, kas rada SEG emisijas tehnoloģiskajos procesos Latvijā ir mazskaitlīgi, tāpēc ir iespējams tiem pievērst individuālu uzmanību. Jau šobrīd Nacionālajā enerģētikas un klimata plānā noteikti konkrēti mērķi emisiju samazinājumam rūpniecības sektora oglekļietilpīgajiem uzņēmumiem, kā arī redzams, ka lielākais Latvijas CO₂ emitējošais uzņēmums SIA "SCHWENK Latvija" ir viens no savas nozares līderiem pasaulē, jo jau aktīvi testē CO₂ uztveršanas iekārtas darbību.

IAM 13 "Rīcība klimata jomā" mērķis ir cīnīties pret klimata pārmaiņām, samazinot oglekļa emisijas. Ar IAM 13 saistītās rīcībpolitikas koncentrējas uz enerģētikas sektora pāreju uz atjaunojamajiem energoresursiem (kas tādēļ ir ciešā sasaistē arī ar IAM 7 "Pieejama un atjaunojama enerģija") un paredz palielināt elektrifikāciju, taču dekarbonizācija un elektrifikācija ieviešama dažādos veidos, un tam var būt gan papildinošs efekts, gan trūkumi [21].

Rūpniecības sektora emisiju mazināšana, gan mainot tehnoloģiskos procesus (uzstādot CCUS, samazinot rūpniecības īpatnējo enerģijas patēriņu), gan arī samazinot emisijas, kas saistītas OSNV aizstājēju lietošanu, tiešā veidā veicina IAM 13 un tā apakšmērķu sasniegšanu. Ar IAM 13 saistītās rīcībpolitikas ieviešana ietekmē rūpniecības sektora attīstību un ietekmē virzību uz IAM 8 mērķu sasniegšanu, jo, piemēram, nepieciešamas inovācijas klimata pārmaiņu mazināšanas risinājumu izstrādei. Tomēr jāņem vērā, ka IAM 8 ietvertā ekonomiskā izaugsme nonāk pretrunā ar IAM 13, turklāt tā arī negatīvi ietekmē IAM 14 "Dzīvība ūdenī" un IAM 15 "Dzīvība uz zemes" [21].

3.3.2. Vides, sociālais un ekonomiskais novērtējums

Lai izvērtētu rūpniecības procesu un produktu izmantošanas sektorā paredzamo tehnoloģisko risinājumu ietekmi uz vidi, sociālo un ekonomisko dimensiju, tika atlasīti divi Latvijas gadījumā lielākie, emisijas radošie apakšsektori: minerālu rūpniecība un OSNV aizstāšanai izmantoto produktu lietošana.

Rūpniecības sektora dekarbonizācijas tehnoloģiju ieviešanai nepieciešama arī veiksmīga rīcībpolitikas pasākumu izmantošana. Var izmantot politikas pasākumus ar dažādu ekonomisko ietekmi, piemēram, oglekļa nodokli, emisiju kvotu tirdzniecības sistēmu, atbalstu pētniecībai, nodokļu atvieglojumus un standartu ieviešanu [20]. Latvijas gadījumā līdz šim izmantota pienākuma noteikšana [63], ka uzņēmumiem, kas ar savu darbību rada būtiskas emisijas, kuras nav iespējams mazināt ražošanas tehnoloģijas dēļ, ir jāveic pasākumi šo emisiju neitralizēšanai. Kā jau skatīts 3.1. nodaļā,

galvenie Latvijas uzņēmumi, kur CO₂ emisijas rodas tehnoloģisko procesu dēļ, ir cementa ražotne, keramikas cepļi un stikla šķiedras ražotne, turklāt tās visas ir iesaistītas ES ETS un jau līdz šim ir bijušas augsti motivētas pēc iespējas samazināt radīto emisiju apjomus. Šobrīd skaidri iezīmējies SIA "SCHWENK Latvija" plāns uzstādīt oglekļa uztveršanas iekārtas, kuru paredzētā jauda nosegtu visas uzņēmuma radītās emisijas (gan no klinkera ražošanas tehnoloģiskā procesa, gan no energoapgādes). Šāda risinājuma sociālā un ekonomiskā ietekme ir pozitīva, jo tiek nodrošināta uzņēmuma turpmāka konkurētspēja pasaules tirgos (arvien vairāk patērētāju, it īpaši Skandināvijā, virzās uz būvniecības klimatneitralitāti), kas savukārt nodrošina stabilu darbavietu pieejamību strādājošajiem. Iepriekšējā nodaļā skatīti CCUS tehnoloģiju trūkumi attiecībā uz ražotņu kopējā enerģijas patēriņa pieaugumu un iekārtu augstajām izmaksām. Tomēr atšķirībā no citiem tautsaimniecības sektoriem, kur emisiju mazināšana var prasīt būtisku sabiedrības līdzfinansējumu (piemēram, valdības atbalstu ēku siltināšanai un elektromobilitātei), rūpniecības sektora specifika paredz gan uzņēmuma tiesības brīvi izlemt par vēlamu tehnoloģiju, gan finansiālo atbildību par to.

Ņemot vērā, ka pasaulē līdz šim ir maz cementa ražotņu ar integrētu CCUS, nav plaši pieejami empīriski novērtējumi par to, kādā apmērā oglekļa uztveršanas ieviešana samazina ietekmi uz vidi. Ir pieejami plašāki pētījumi par cementa ražošanas procesa radīto ietekmi uz veselību, kas galvenokārt ir cieto daļiņu piesārņojuma dēļ. Cieto daļiņu piesārņojums cementa ražošanā rodas gan izejmateriālu iegūšanas, gan izmantošanas un glabāšanas laikā. Sekundārās cieto daļiņu emisijas var rasties procesiem izmantotā kurināmā dēļ, piemēram, slāpekļa oksīda un sēra oksīda emisijas. Emisiju nonākšanu atmosfērā var ierobežot, izmantojot tādas vides piesārņojuma mazināšanas tehnoloģijas kā filtrēšana un cieto daļiņu uztveršana, piemēram, izmantojot elektrofiltrus. Uzņēmumā tādā veidā tiek nodrošināts dubults ieguvums, jo uztvertos izejmateriālu putekļus iespējams atgriezt atpakaļ ražošanas procesā. Cementa ražošanas ietekme uz vidi saistīta arī ar nozīmīgo resursu patēriņu, kas nepieciešams ražošanas nodrošināšanai.

Rūpniecības sektora radītās emisijas ietekmē globālo emisiju koncentrāciju, tā veicinot klimata pārmaiņas, taču šī saikne ir arī atpakaļejoša. Jau šobrīd novērojamās klimata pārmaiņu sekas ietekmē rūpniecības sektoru un paredzams, ka šī ietekme nākotnē palielināsies. Dažas no ietekmēm var būt pozitīvas, piemēram, pieaugošs pieprasījums pēc tīrām tehnoloģijām – vēja ģeneratoriem, saules paneļiem, biotehnoloģijām – veicina rūpniecības sektora attīstību. Rūpniecības sektors ir jaunu tehnoloģiju attīstības centrālais elements [3].

Savukārt, ieviešot pasākumus, lai mazinātu emisijas no OSNV aizstājēju izmantošanas, ekonomiskajā dimensijā paredzamas gan

papildu izmaksas, kas skars šo produktu lietotājus, gan arī potenciālie ietaupījumi no tehnoloģiju modernizācijas. Fluorēto gāzu jomā lietotājiem patēriņa samazināšanas pienākums uzlikts līdz ar ES regulu par fluorētajām siltumnīcefekta gāzēm, ar kuru groza Direktīvu (ES) 2019/1937 un atceļ Regulu (ES) Nr. 517/2014 [64]. Šo gāzu aprīte valstī tiek uzraudzīta un īstenota atbilstoši MK noteikumiem Nr. 704 [65], kuros ietverts pienākums operatoriem veikt iespējamās drošības pasākumus, lai novērstu noplūdes.

Jau iepriekš uzskaitīti daudzi un dažādi risinājumi fluorēto gāzu patēriņa samazināšanai, kas samazina emisijas. Produktu, kuros līdz šim izmantotas fluorētās gāzes, daudzveidības un plašākas izpētes trūkuma dēļ šobrīd nav iespējams noteikt vispārīgāmas šo risinājumu ietekmes uz vidi rādītāju vērtības. Pieejamie gadījuma izpētes piemēri liecina par fluorēto gāzu aizstāšanas noderīgumu ne tikai klimata pārmaiņu kontekstā. Protams, vislielāko efektu var sasniegt, aizstājot fluorētās gāzes ar alternatīvām, kurām ir nulles GSP. Zinātniskās izpētes ziņā gan šobrīd plašāk izplatīts dažādu aukstumnesēju reģenerācijas procesa ietekmes uz vidi novērtējums.

Lai gan fluorēto aukstumnesēju reģenerācija pēc izmantošanas ir vēlamākais no apsaimniekošanas veidiem aprītes cikla kontekstā, pēc reģenerācijas tie ir jāiznīcina vai jāzagatavo atkārtotai lietošanai. Gadījuma izpētē par dažādu fluorēto gāzu izmantošanu gaisa kondicionēšanai [66] salīdzinātas divas alternatīvas – sadedzināšana un atkārtota izmantošana. Rezultāti liecina, ka atkārtota izmantošana rada par 5,7 kg_{CO2}/kg_{aukstumaģenta} līdz 15,9 kg_{CO2}/kg_{aukstumaģenta} mazāk emisiju nekā gāzes iznīcināšana. Arī procesam nepieciešamais enerģijas apjoms ir zemāks atkārtotas izmantošanas scenārijā (82,5 MJ/kg_{aukstumaģenta} līdz 250,6 MJ/kg_{aukstumaģenta}) un attiecīgi arī izmaksas.

Citā pētījumā [67], kur tika simulēta fluorēto gāzu komponentu atgūšana no izlietotu gāzu maisījumiem, novērtēta reģenerācijas procesa vides ilgtspēja. Rezultāti gan pierādīja, ka iespējams atgūt līdz 30,3 % R-32 (ar 98 % tīrības pakāpi), gan arī, ka aukstumnesēja R-32 atgūšana no gāzu maisījuma rada mazāku ietekmi uz vidi nekā jaunas vielas ražošana. Vislielākā ietekme abos scenārijos ir uz ūdens ekotoksikoloģiju (fluorūdeņraža difūzo emisiju dēļ), taču reģenerācijas scenārijā ietekme ir aptuveni divas reizes mazāka.

Siltumsūkņu uzstādīšana ir labi zināma kā viena no potenciālajām enerģētikas sektora SEG emisiju mazināšanas stratēģijām. Tehnoloģija izmantojama kā māsaimniecībās, tā uzņēmumos fosilo energoresursu aizstāšanai. Jāņem gan vērā, ka lielākajā daļā siltumsūkņu joprojām kā aukstumnesējs tiek izmantotas fluorētās gāzes. Tādā veidā siltumsūkņu veicināšanas stratēģija var palielināt šo aukstumnesēju patēriņu un neapzināti pasliktināt emisiju situāciju. Pētījumā, kur simulēta siltumsūkņu ieviešana Vācijas māsaimniecībās [68], secināts, ka pāreja no gāzes apkures katla uz siltumsūkņa

izmantošanu ļauj samazināt kopējo ietekmi uz klimata pārmaiņām par 91 %. Arī vairumā citu izvērtēto ietekmes kategoriju, piemēram, ozona slāņa noārdīšanās, paskābināšanās, fotoķīmiskā ozona rašanās, eitrofikācija, ekotoksicitāte, toksicitāte cilvēkiem un energoresursi, vērojams ietekmes samazinājums. Tomēr fluorēto gāzu (konkrēti R410A, kuras GSP ir 2088) izmantošana rada ietekmi kategorijā "Klimata pārmaiņas" noplūžu aprites cikla laikā dēļ, kā arī aukstumnesēja ražošanas process rada ietekmi kategorijā "Ozona slāņa noārdīšanās", taču tā pielīdzināma ietekmei gāzes katla scenārijā.

Izmantotā literatūra

- [1] Centrālā statistikas pārvalde, 'Pievienotās vērtības īpatsvars pa darbības veidiem, %'. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://data.stat.gov.lv/pxweb/lv/OSP_PUB/START__VEK__IK__IKR/IKR020/table/tableViewLayout1/
- [2] 'Ministry of Climate and Energy of the Republic of Latvia. Latvia's National Inventory Document under the UNFCCC and Paris Agreement. 2024 submission.'
- [3] J. Rissman *et al.*, 'Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070', *Applied Energy*, vol. 266, p. 114848, May 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114848.
- [4] B. Shao, L. Zhang, and S. A. A. Shah, 'Barriers and Opportunities in Implementing Carbon Neutrality Goals in China's Heavy Industries', *Sustainability*, vol. 17, no. 2, p. 674, Jan. 2025, doi: 10.3390/su17020674.
- [5] Pārresoru koordinācijas centrs, 'Latvijas nacionālais attīstības plāns 2021.–2027. gadam', 2020.
- [6] S. Madeddu *et al.*, 'The CO₂ reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat)', *Environ. Res. Lett.*, vol. 15, no. 12, p. 124004, Dec. 2020, doi: 10.1088/1748-9326/abbd02.
- [7] 'Nicholas, S., Basirat, S. Carbon capture for Steel? Institute for Energy Economics and Financial Analysis, April 2024.'
- [8] 'Ministru kabineta rīkojums Nr. 573. Aktualizētais Nacionālais Enerģētikas un Klimata plāns 2021. - 2030. gadam. Latvijas Vēstnesis, 137, 17.07.2024.'
- [9] 'CSB'.
- [10] 'Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 3, Chapter 1 Introduction'.
- [11] 'Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 3, Chapter 2 Mineral_Industry'.
- [12] G. Habert *et al.*, 'Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries', *Nat Rev Earth Environ*, vol. 1, no. 11, pp. 559–573, Sept. 2020, doi: 10.1038/s43017-020-0093-3.
- [13] R. Anantharaman Fu., C., S. Roussanaly, and M. Voldsund, 'Design and performance of CEMCAP cement plant with MEA post combustion capture - D4.2.' Zenodo, 2018. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1150320>
- [14] F. Schorch, I. Kourti, B. M. Scalet, S. Roudier, and L. Delgado Sancho, 'Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide', 2013. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/CLM_Published_def_0.pdf
- [15] B. K. Sovacool, S. Griffiths, J. Kim, and M. Bazilian, 'Climate change and industrial F-gases: A critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options for reducing synthetic greenhouse gas emissions', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 141, p. 110759, May 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110759.
- [16] 'Greenhouse Gas Protocol. IPCC Global Warming Potential Values. Version 2.0. 07.08.2024.'
- [17] A. Mota-Babiloni, P. Makhnatch, and R. Khodabandeh, 'Recent investigations in HFCs substitution with lower GWP synthetic alternatives: Focus on energetic performance and environmental impact', *International Journal of Refrigeration*, vol. 82, pp. 288–301, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.06.026.
- [18] 'Ministry of Climate and Energy of the Republic of Latvia. Latvia's National Inventory Document under the UNFCCC and Paris Agreement. 2025 submission.'
- [19] 'Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 3, Chapter 7 Emissions of Fluorinated Substitutes for Ozone Depleting Substances'.

- [20] S. Kumar, A. Gangotra, and M. Barnard, 'Towards a Net Zero Cement: Strategic Policies and Systems Thinking for a Low-Carbon Future', *Curr Sustainable Renewable Energy Rep*, vol. 12, no. 1, p. 5, Mar. 2025, doi: 10.1007/s40518-025-00253-0.
- [21] I. B. Boa Morte, O. D. Q. F. Araújo, C. R. V. Morgado, and J. L. De Medeiros, 'Electrification and decarbonization: a critical review of interconnected sectors, policies, and sustainable development goals', *Energy Storage and Saving*, vol. 2, no. 4, pp. 615–630, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.enss.2023.08.004.
- [22] J. De Brito and R. Kurda, 'The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials', *Journal of Cleaner Production*, vol. 281, p. 123558, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123558.
- [23] 'En 206-1, 2000. Concrete – Part 1: Specification, Performance, Production and Conformity. Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium, p. 72'.
- [24] M. C. G. Juenger, R. Snellings, and S. A. Bernal, 'Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights', *Cement and Concrete Research*, vol. 122, pp. 257–273, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.05.008.
- [25] S. A. Miller, V. M. John, S. A. Pacca, and A. Horvath, 'Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050', *Cement and Concrete Research*, vol. 114, pp. 115–124, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.08.026.
- [26] Global Cement and Concrete Association, 'Limestone filler'. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://gccassociation.org/cement-and-concrete-innovation/clinker-substitutes/limestone-filler/>
- [27] E. Gartner and T. Sui, 'Alternative cement clinkers', *Cement and Concrete Research*, vol. 114, pp. 27–39, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.02.002.
- [28] J. L. Provis, 'Alkali-activated materials', *Cement and Concrete Research*, vol. 114, pp. 40–48, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.02.009.
- [29] X. K. Lu, W. Zhang, B. N. Ruggiero, L. C. Seitz, and J. Li, 'Scalable electrified cementitious materials production and recycling', *Energy Environ. Sci.*, vol. 17, no. 24, pp. 9566–9579, 2024, doi: 10.1039/D4EE03529A.
- [30] 'Atļauja A kategorijas piesārņojošai darbībai NR.LI14IA0005'.
- [31] Joint Research Centre, Directorate B – Fair and Sustainable Economy Circular Economy and Sustainable Industry Unit, 'Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Ceramic Manufacturing Industry', Aug. 2023. Accessed: Jan. 09, 2025. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2025-01/CER_D1_Updated_BW_web-bref.pdf
- [32] R. R. Wang, Y. Q. Zhao, A. Babich, D. Senk, and X. Y. Fan, 'Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry—An overview of challenges and opportunities', *Journal of Cleaner Production*, vol. 329, p. 129797, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129797.
- [33] S. Budinis, S. Krevor, N. M. Dowell, N. Brandon, and A. Hawkes, 'An assessment of CCS costs, barriers and potential', *Energy Strategy Reviews*, vol. 22, pp. 61–81, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.esr.2018.08.003.
- [34] A. Akinmoladun and O. S. Tomomewo, 'Advances and future perspectives in post-combustion carbon capture technology using chemical absorption process: A review', *Carbon Capture Science & Technology*, vol. 16, p. 100461, Sept. 2025, doi: 10.1016/j.ccst.2025.100461.
- [35] Z. Jiutian, W. Zhiyong, K. Jia-Ning, S. Xiangjing, and X. Dong, 'Several key issues for CCUS development in China targeting carbon neutrality', *Carb Neutrality*, vol. 1, no. 1, p. 17, Dec. 2022, doi: 10.1007/s43979-022-00019-3.
- [36] 'Facts and FAQ about Brevik CCS'. Accessed: Sept. 01, 2025. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://www.brevikccs.com/en/facts-and-faq>
- [37] Preses relīze, 'SCHWENK Latvija izzīņo gatavību dekarbonizēt cementa ražošanu Brocēnos'. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://schwenk.lv/pressrelease/schwenk-latvija-izzino-gatavibu-dekarbonizet-cementa-razosanu-brocenos/>

- [38] Y. Deng *et al.*, 'Techno-economic assessment of zero-carbon cement clinker production process based on limestone hydrogenation', *Energy Conversion and Management*, vol. 341, p. 120022, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.enconman.2025.120022.
- [39] J. Du *et al.*, 'Review on post-combustion CO₂ capture by amine blended solvents and aqueous ammonia', *Chemical Engineering Journal*, vol. 488, p. 150954, May 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.150954.
- [40] T. R. Kumar, J. Beiron, M. Biermann, S. Harvey, and H. Thunman, 'Plant and system-level performance of combined heat and power plants equipped with different carbon capture technologies', *Applied Energy*, vol. 338, p. 120927, May 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120927.
- [41] K. Gustafsson, R. Sadegh-Vaziri, S. Grönkvist, F. Levihn, and C. Sundberg, 'BECCS with combined heat and power: assessing the energy penalty', *International Journal of Greenhouse Gas Control*, p. 103434, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.ijggc.2021.103434.
- [42] H. Jilvero, 'Ammonia as an Absorbent of Carbon Dioxide in Post-Combustion Capture-an Experimental, Technical and Economic Process Evaluation', Doctoral Thesis, 2014. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://research.chalmers.se/en/publication/201381>
- [43] Z. Jiutian, W. Zhiyong, K. Jia-Ning, S. Xiangjing, and X. Dong, 'Several key issues for CCUS development in China targeting carbon neutrality', *Carbon Neutrality*, vol. 1, no. 1, p. 17, Dec. 2022, doi: 10.1007/s43979-022-00019-3.
- [44] K. Buure, L. Kainiemi, J. Levänen, and J. Gusca, 'Policy stagnation or reevaluation? Exploring the regulatory dimensions of carbon capture, utilisation and storage in Finland and the Baltic countries', *Energy Research & Social Science*, vol. 118, p. 103825, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.erss.2024.103825.
- [45] K. De Kleijne, S. V. Hanssen, L. Van Dinteren, M. A. J. Huijbregts, R. Van Zelm, and H. De Coninck, 'Limits to Paris compatibility of CO₂ capture and utilization', *One Earth*, vol. 5, no. 2, pp. 168–185, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.oneear.2022.01.006.
- [46] N. Meunier, R. Chauvy, S. Mouhoubi, D. Thomas, and G. De Weireld, 'Alternative production of methanol from industrial CO₂', *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 1192–1203, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.07.010.
- [47] J. Mitali, S. Dhinakaran, and A. A. Mohamad, 'Energy storage systems: a review', *Energy Storage and Saving*, vol. 1, no. 3, pp. 166–216, Sept. 2022, doi: 10.1016/j.enss.2022.07.002.
- [48] M. Bui *et al.*, 'Carbon capture and storage (CCS): the way forward', *Energy Environ. Sci.*, vol. 11, no. 5, pp. 1062–1176, 2018, doi: 10.1039/C7EE02342A.
- [49] I. Ozola and TV Kurzeme, 'Liepājā plāno attīstīt Latvijā pirmo ūdeņraža ražotni'. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://www.lsm.lv/raksts/zinas/ekonomika/09.04.2024-liepaja-plano-attistit-latvija-pirmo-udenraza-razotni.a549767/>
- [50] Centrālā Statistikas pārvalde, 'Energobilance, TJ, tūkst. toe (NACE 2. red.)'. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://data.stat.gov.lv/pxweb/lv/OSP_PUB/START_NOZ_EN_ENB/ENB060/table/tableViewLayout1/
- [51] S. Sakamoto *et al.*, 'Demand-side decarbonization and electrification: EMF 35 JMIP study', *Sustain Sci*, vol. 16, no. 2, pp. 395–410, Mar. 2021, doi: 10.1007/s11625-021-00935-w.
- [52] Klimata un enerģētikas ministrija, 'Ilgtērmiņa plānošanas vadlīnijas. Latvijas enerģētikas stratēģija 2050', 2025. Accessed: Sept. 01, 2025. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://www.kem.gov.lv/sites/kem/files/media_file/LV_Ener%C4%A3%C4%93tikas_strat%C4%93%C4%A3ija_05.2025.pdf
- [53] S. Allena-Ozolins, D. Jaunzems, I. Pakere, A. Blumberga, and G. Bazbauers, 'Decarbonisation Pathways of Industry in TIMES Model', *Environmental and Climate Technologies*, vol. 25, no. 1, pp. 318–330, Jan. 2021, doi: 10.2478/rtuct-2021-0023.
- [54] E. Kudurs, A. Tukulis, A. Dzals, and D. Blumberga, 'Are Industries Open for Renewable Energy?', *Environmental and Climate Technologies*, vol. 24, no. 3, pp. 447–456, Nov. 2020, doi: 10.2478/rtuct-2020-0115.

- [55] B. K. Sovacool, D. F. Del Rio, and W. Zhang, 'The political economy of net-zero transitions: Policy drivers, barriers, and justice benefits to decarbonization in eight carbon-neutral countries', *Journal of Environmental Management*, vol. 347, p. 119154, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119154.
- [56] T. Wiedmann, M. Lenzen, L. T. Keyßer, and J. K. Steinberger, 'Scientists' warning on affluence', *Nat Commun*, vol. 11, no. 1, p. 3107, June 2020, doi: 10.1038/s41467-020-16941-y.
- [57] 'Reducing emissions from fluorinated gases and ozone-depleting substances'. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://www.europarl.europa.eu/news/lv/press-room/20240112IPR16757/reducing-emissions-from-fluorinated-gases-and-ozone-depleting-substances>
- [58] B. Dai, C. Dang, M. Li, H. Tian, and Y. Ma, 'Thermodynamic performance assessment of carbon dioxide blends with low-global warming potential (GWP) working fluids for a heat pump water heater', *International Journal of Refrigeration*, vol. 56, pp. 1–14, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.11.009.
- [59] Y. Chen, S. Grijalva, Z. Jin, and L. Graber, 'Lifecycle Analysis of Greenhouse Gas Emissions: Comparing SF₆ and scCO₂ Circuit Breakers', in *2024 56th North American Power Symposium (NAPS)*, El Paso, TX, USA: IEEE, Oct. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/NAPS61145.2024.10741628.
- [60] D. Clijnk, V. Codera, J. O. Pou, J. Fernandez-Garcia, and R. Gonzalez-Olmos, 'Enhancing circular economy of waste refrigerants management using deep eutectic solvents', *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 41, p. e01062, Sept. 2024, doi: 10.1016/j.susmat.2024.e01062.
- [61] Apvienoto Nāciju Organizācija, 'Mūsu Pasaules Pārveidošana. ILGTSPĒJĪGAS ATTĪSTĪBAS DIENASKĀRTĪBA 2030. GADAM', no. A/RES/760/1.
- [62] United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division, 'World Population Prospects'. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://population.un.org/wpp/graphs?loc=900&type=Demographic%20Profiles&category=Line%20Charts>
- [63] Klimata un enerģētikas ministrija, 'Nacionālais enerģētikas un klimata plāns 2021.-2030.gadam', July 2024.
- [64] *EIROPAS PARLAMENTA UN PADOMES REGULA (ES) 2024/573 (2024. gada 7. februāris) par fluorētajām siltumnīcefekta gāzēm, ar kuru groza Direktīvu (ES) 2019/1937 un atceļ Regulu (ES) Nr. 517/2014.* [Tiešsaiste]. Pieejams: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202400573
- [65] Ministru kabineta noteikumi Nr. 704, 'Prasības darbībām ar ozona slāni noārdošām vielām un fluorētām siltumnīcefekta gāzēm', Rīgā . gada . oktobr 2021.
- [66] Y. Yasaka, S. Karkour, K. Shobatake, N. Itsubo, and F. Yakushiji, 'Life-Cycle Assessment of Refrigerants for Air Conditioners Considering Reclamation and Destruction', *Sustainability*, vol. 15, no. 1, p. 473, Dec. 2022, doi: 10.3390/su15010473.
- [67] D. Jovell, J. O. Pou, F. Llovel, and R. Gonzalez-Olmos, 'Life Cycle Assessment of the Separation and Recycling of Fluorinated Gases Using Ionic Liquids in a Circular Economy Framework', *ACS Sustainable Chem. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 71–80, Jan. 2022, doi: 10.1021/acssuschemeng.1c04723.
- [68] C. Vering *et al.*, 'The environmental performance of nationwide heat pump deployment in residential buildings in Germany', *Cell Reports Sustainability*, p. 100461, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.crsus.2025.100461.

LAUKSAIMNIECĪBAS SEKTORS

Ievads

01 Enerģētikas sektors

02 Transporta sektors

03 Rūpniecības sektors

04	LAUKSAIMNIECĪBAS SEKTORS	162
4.1.	Lauksaimniecības sektora SEG emisiju audits	164
4.2.	Klimata pārmaiņu mazināšanas tehnoloģiskie risinājumi	175
4.2.1.	Nacionālais enerģētikas un klimata plāns	176
4.2.2.	Kopējā lauksaimniecības politika	177
4.2.3.	Eiropas Komisijas vīzija lauksaimniecības un pārtikas nākotnei	179
4.2.4.	Oglekļa saistīga lauksaimniecība	181
4.2.5.	Pasākumi klimata pārmaiņu mazināšanai – klimatsaprātīga lauksaimniecība	188
4.3.	Klimata pārmaiņu mazināšanas ilgtspējas vērtējums	193
4.3.1.	Saikne ar ANO ilgtspējīgas attīstības mērķiem	193
4.3.2.	Izturētspējas un ilgtspējas rādītāji	194
4.3.3.	Aprites cikla analīze lauksaimniecības praksē	196
4.3.4.	Iespējamā ietekme uz vidi un lauku attīstību	198
4.3.5.	Pārvaldības un politikas sinerģijas – no darbības uz rezultātos balstītu atbalstu	200

05 ZIZIMM

06 Atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektors

Izmantotā literatūra

Summary

Lauksaimniecības nozare ir būtisks globālo siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju avots [1], [2]. Emisijas galvenokārt rodas no dažādām lauksaimniecības praksēm, piemēram, lopkopības, sintētisko mēslojumu lietošanas un zemes apsaimniekošanas veidiem, kas kopumā veicina oglekļa dioksīda (CO_2), metāna (CH_4) un slāpekļa oksīda (N_2O) emisiju [3]–[5]. Kaut arī lauksaimniecība ir būtiska pārtikas nodrošinājuma ziņā, tā vienlaikus rada ievērojamu ietekmi uz vidi, kļūstot par izaicinājumu klimata pārmaiņu mazināšanai, un prasa steidzamu un efektīvu emisiju samazināšanas stratēģiju ieviešanu. Vienlaikus jāuzsver lauksaimniecības sektora ievainojamība klimata pārmaiņu ietekmē, tādēļ pielāgošanās pasākumu īstenošana un ilgtspējīga lauksaimniecības attīstība, kas vienlaikus sekmē SEG emisiju mazināšanu, ir būtiska [6]. Starp identificētajām ilgtspējīgajām praksēm, kas minētas zinātniskajā literatūrā par lauksaimniecības sektora pielāgošanos klimata pārmaiņām, nereti minētas augu maiņa un saglabājošās lauksaimniecības attīstība, pateicoties šo metožu efektivitātei, jo tās ļauj uzlabot augsnes oglekļa uzkrāšanu [7], [8]. Tāpat kā būtiskās pieejas minētas inovācijas, uzlabota minerālmēsļu un citu izejvielu uzskaitē, kas kļūst par nozīmīgiem instrumentiem lauksaimniecības vides ietekmes izvērtēšanā, sniedzot iespēju pieņemt stratēģiskākus un uz ilgtspēju vērstus lēmumus [9], [10]. Nemot vērā, ka tradicionālās lauksaimniecības prakses joprojām lielā mērā paļaujas uz mēslojumu, kas rada ievērojamas slāpekļa oksīda emisijas, pāreja uz ilgtspējīgām metodēm kļūst par nepieciešamību [11]. Piemēram, tiek ieteikta saglabājošās aršanas tehnika, tostarp bezaršanas metožu, ieviešana, jo tās uzlabo augsnes veselību un vienlaikus samazina oglekļa pēdu [12]. Precīzās lauksaimniecības tehnoloģijas, piemēram, augsnes sensori, automātiskā mēslošana un attālināta lauku uzraudzība, demonstrē būtisku potenciālu SEG emisiju mazināšanā. Vienlaikus tās uzlabo lauksaimniecības efektivitāti, vides sniegumu un ļauj mērķēt politikas instrumentus uz reāliem rezultātiem [13]. Turklāt digitālās tehnoloģijas, kas veicina lauksaimniecības procesu pārvaldības modernizāciju, nodrošina precīzāku SEG emisiju mērīšanu un uzraudzību, tā atvieglojot gan politikas veidošanu, gan tās īstenošanu praksē [14]. Daudzi pētījumi uzsver konkrētu lauksaimniecības prakšu nozīmi SEG emisiju samazināšanā. Lai līdzsvarotu lauksaimniecības attīstību ar vides aizsardzības mērķiem, nepieciešamas politikas, kas ne tikai veicina ilgtspējīgu praksi, bet arī nodrošina ekonomiskus stimulus zemniekiem. Oglekļa saistīgās lauksaimniecības ieviešana prasa skaidri definētas metodoloģijas un pielāgojamās tehnoloģijas lauku apstākļiem. Pētījumos analizēti konkrēti risinājumi, tostarp bioogles, daudzgadīgo zālāju integrācija un datu uzskaites rīki, kas atvieglo rezultātorientētu atbalstu un emisiju samazinājuma kvantifikāciju. Šāda pieeja sekmē gan bioloģiskās daudzveidības saglabāšanu, gan oglekļa uzkrāšanu augsnē [15].

SEG emisiju mazināšana lauksaimniecībā prasa daudzdimensio-nālu pieeju, kas integrē inovatīvas tehnoloģijas, ilgtspējīgas apsaim-niekošanas prakses un atbilstošus politikas instrumentus. Sadarbība pētniecībā, pārvaldībā un saimnieciskajā praksē būs izšķiroša, lai sektors spētu virzīties pretī oglekļneitralitātei, vienlaikus nodroši-not pārtikas drošību un dabas kapitāla saglabāšanu.

Latvijā pielāgota pieeja SEG emisiju samazināšanas pasākumu novērtēšanai lauksaimniecībā ietver daudzlīmeņu metodiku, kuras pamatā ir *Delphi* metode un daudzkritēriju analīze. Šī pieeja ļauj izvērtēt emisiju mazināšanas pasākumus pēc to ekonomiskās, teh-niskās un sociālās efektivitātes, uzlabojot lēmumu pieņemšanu kli-mata viedajā lauksaimniecībā [16].

Lauksaimniecības sektors ir arī uzmanības centrā klimata un ilgt-spējas politikas veidošanā. To nosaka virkne savstarpēji saistītu faktoru.

- Vides ietekme – būtisks SEG emisiju avots.
- Pārtikas drošība – nepieciešamība pēc ilgtspējīgas pārtikas.
- Ekonomiskā loma – būtiska nozare, īpaši reģionos.
- Jutīgums pret klimata pārmaiņām – sausumi, plūdi un augsnes degradācija būtiski ietekmē ražu.
- Tehnoloģiskās iespējas – precīzā lauksaimniecība un digitālie rīki paver jaunas iespējas SEG pārvaldībai.
- Resursu pārvaldība – augsnes un ūdens resursu izsīkums prasa pārdomātu pieeju.
- Lauku attīstība – reformas ietekmē reģionālo ekonomiku un sociālo struktūru.
- Tirdzniecības prasības – vides standarti un klimata mērķi ietekmē eksporta iespējas.
- Patērētāju izvēles – pieaug pieprasījums pēc ilgtspējīgas pārtikas.
- Bioloģiskās daudzveidības saglabāšana – nepieciešama prakse, kas nodrošina ekosistēmu aizsardzību.

Šie aspekti kopumā iezīmē nepieciešamību pēc kompleksas un mērķētas pieejas, kuras pamatā ir līdzsvars starp produktivitāti, ilgtspēju un vides aizsardzību.

4.1. Lauksaimniecības sektora SEG emisiju audits

Lauksaimniecība ir viens no nozīmīgākajiem antropogēno SEG emisiju avotiem pasaulē. Šajā sektorā emisijas rodas no vairākām būtiskām darbībām, tostarp dzīvnieku gremošanas procesiem,

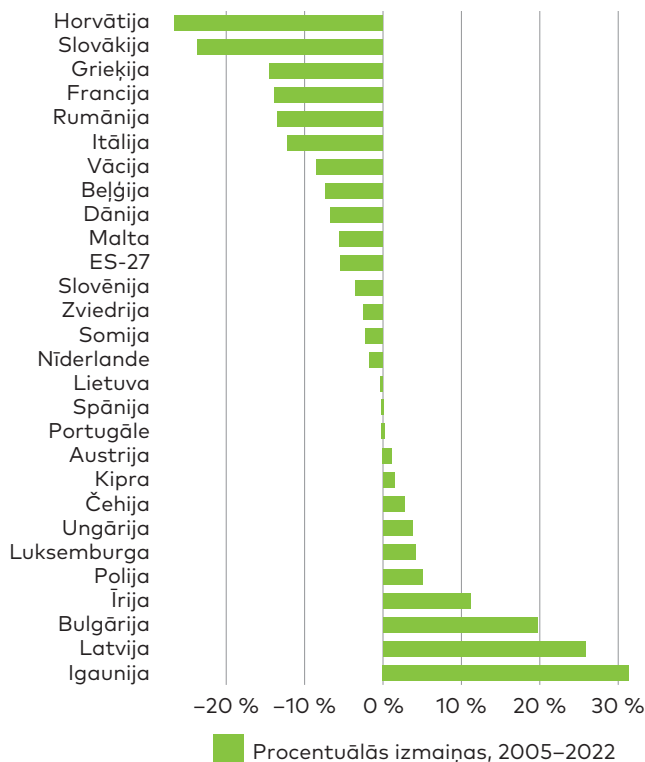
kūtsmēslu apsaimniekošanas, minerālmēslojuma lietošanas, kultūraugu atlieku sadedzināšanas un zemes izmantošanas izmaiņām, piemēram, mežu pārveides par lauksaimniecības zemi.

Viens no nozīmīgākajiem emisiju avotiem ir enteriskā fermentācija, kuras laikā atgremotāju gremošanas sistēmā rodas CH_4 . Kūtsmēslu apsaimniekošanā emisijas veido gan metāns, gan N_2O . Papildu emisiju avots ir kultūraugu atlieku sadedzināšana, kas izdala CO_2 un citas SEG. Zemes izmantošanas izmaiņas, īpaši mežu izciršana, vēl vairāk pastiprina emisijas, ievērojami palielinot CO_2 daudzumu atmosfērā.

Lauksaimniecības sektora SEG emisijas Eiropas Savienības dalībvalstīs

Lauksaimniecībā izmantojamās zemes aptver gandrīz pusi no Eiropas Savienības (ES) teritorijas, padarot to par vienu no nozīmīgākajām nozarēm vides aizsardzības un klimata politikas kontekstā. Vēsturiski lauksaimniecības prakse ir veidojusi daudzas no vērtīgākajām pusdabiski veidotajām dzīvotnēm, kas šodien nosaka ES ainavas daudzveidību un atbalsta bioloģisko daudzveidību.

Lauksaimniecības SEG emisiju dinamika dažādās ES valstīs uzrāda ievērojamas atšķirības. Šīs atšķirības atspoguļo ne tikai



4.1. attēls.

Izmaiņas lauksaimniecības sektora SEG emisiju apjomā, 2005–2022 (EU Agriculture) [24].

klimata un augsnes dažādību, bet arī atšķirīgas saimniekošanas sistēmas un intensitātes pakāpes. Intensīvi apsaimniekotās teritorijās emisijas uz vienības platību parasti ir augstākas [17], [18]. Detalizēts novērtējums, izmantojot daudzlīmeņu rādītājus un *TOPSIS* metodi, atklāj, ka SEG emisiju intensitāte starp ES dalībvalstīm būtiski atšķiras. Šī iemesla dēļ, balstoties tikai kopējos emisiju apjomos, nevar objektīvi novērtēt lauksaimniecības sektora efektivitāti vai progresu klimata mērķu sasniegšanā [19].

Laika gaitā lauksaimniecības emisiju apjomi ES ir mainījušies. Saskaņā ar ES SEG inventarizācijas ziņojumu [20] 2022. gada kopējās lauksaimniecības sektora SEG emisijas veidoja 366 Mt CO₂ ekv., kas ir par 24,2 % mazāk nekā 1990. gadā.

Laikposmā no 2005. līdz 2022. gadam SEG emisiju apjomi ES lauksaimniecībā svārstījās atkarībā no reģiona un piemērotās politikas. Efektīvi pasākumi, piemēram, agroekoloģisko prakšu veicināšana un pastāvīgo zālāju saglabāšana, ir palīdzējuši vienlaikus samazināt emisijas, uzlabot augsnes veselību un palielināt bioloģisko daudzveidību [21], [22]. Turklāt daudzgadīgo kultūraugu sistēmu integrēšana lauksaimniecības zemēs tiek uzskatīta par potenciāli spēcīgu instrumentu oglekļa piesaistei un nulles emisiju mērķu sasniegšanai [23].

Reģionāli vērojamas ievērojamas atšķirības lauksaimniecības sektora radītajās emisijās: dažās valstīs emisijas ir stabilizējušās vai pat samazinājušās, savukārt citās valstīs – pieaugušas (sk. 4.1. att.).

Lai nodrošinātu atbilstību ES apņēmībai līdz 2050. gadam kļūt klimatneitrālai, lauksaimniecības sektoram ir jāpielāgojas, ieviešot ilgtspējīgākas prakses un tehnoloģijas. Tas ietver pastiprinātu uzmanību oglekļa piesaistes praksēm, uzlabotu zemes izmantošanas pārvaldību un fosilā kurināmā lietošanas samazināšanu lauksaimniecības darbībās [22], [25], [26]. Turklāt visaptverošu SEG uzskaites un monitoringa sistēmu ieviešana ir būtiska, lai novērtētu emisiju samazināšanas stratēģiju progresu un efektivitāti dažādās ES dalībvalstīs [22].

SEG emisiju samazināšanas potenciāla analizē būtiska ir arī lauksaimniecības nozares ekoloģiskās efektivitātes izvērtēšana. Latvijā veikts novērtējums rāda, ka galvenās iespējas efektivitātes uzlabošanai saistītas ar mēslošanas praksi, augsnes apsaimniekošanu un enerģijas izmantošanas optimizēšanu saimniecībās [27].

Lauksaimniecības sektora SEG emisiju samazināšana Eiropā ir būtiska plašāku klimata mērķu sasniegšanai. Lauksaimniecības, ilgtspējas un SEG mazināšanas mijiedarbība prasa koordinētu pieeju, kas apvieno inovatīvas prakses, atbilstošus politikas rīkus un reģionālu sadarbību, lai panāktu būtisku emisiju samazinājumu un vienlaikus veicinātu pārtikas nodrošinājumu un noturību Eiropas lauksaimniecības sistēmās.

Lauksaimniecības sektora SEG emisijas Latvijā

Latvijā lauksaimniecība ir trešais lielākais emisiju sektors, veidojot 21,3 % no kopējām emisijām 2023. gadā [28] un ap 22,2 % 2022. gadā [29].

2023. gadā kopējais SEG emisiju apjoms no lauksaimniecības sektora veidoja 2127,98 kt CO₂ ekv.

Saskaņā ar Latvijas nacionālo siltumnīcefekta gāzu inventarizācijas ziņojumu [29] lauksaimniecības emisiju struktūra 2023. gadā bija šāda:

- lauksaimniecības dzīvnieku zarnu fermentācijas procesi (3.A) – 41,6 %
- kūtsmēsļu apsaimniekošana (3.B) – 7,6 %
- lauksaimniecības augsnes (3.D) – 47,1 %
- kalļķošana (3.G) – 3,3 %
- urīnvielas lietojums (3.H) – 0,4 %.

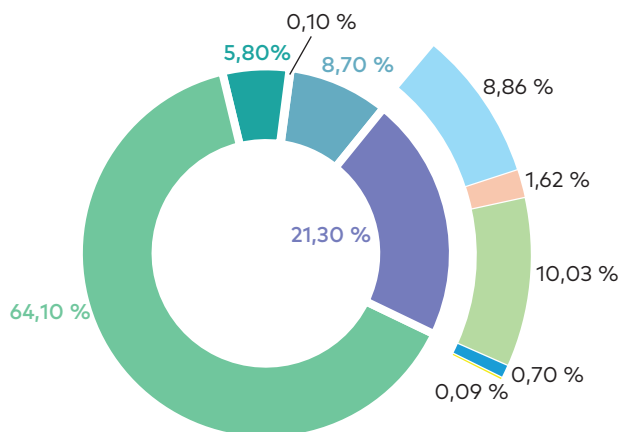
Latvijas SEG aprēķini balstīti IPCC 2006. gada vadlīnijās (4. sējums "AFOLU"), izmantojot 1. un 2. līmeņa metodoloģijas.

Tiešie un netiešie N₂O emisiju aprēķini veikti, ņemot vērā datus par mēslojuma lietojumu, kūtsmēsliem, kompostu, notekūdeņu dūņām un citiem organiskajiem mēslošanas līdzekļiem, kā arī slāpekļa zudumiem augsnē izskalošanās un atmosfēras ceļā.

Lauksaimniecības sektora emisiju iedalījums parādīts 4.3. attēlā.

SEG emisijas no lauksaimniecības sektora Latvijā ietver:

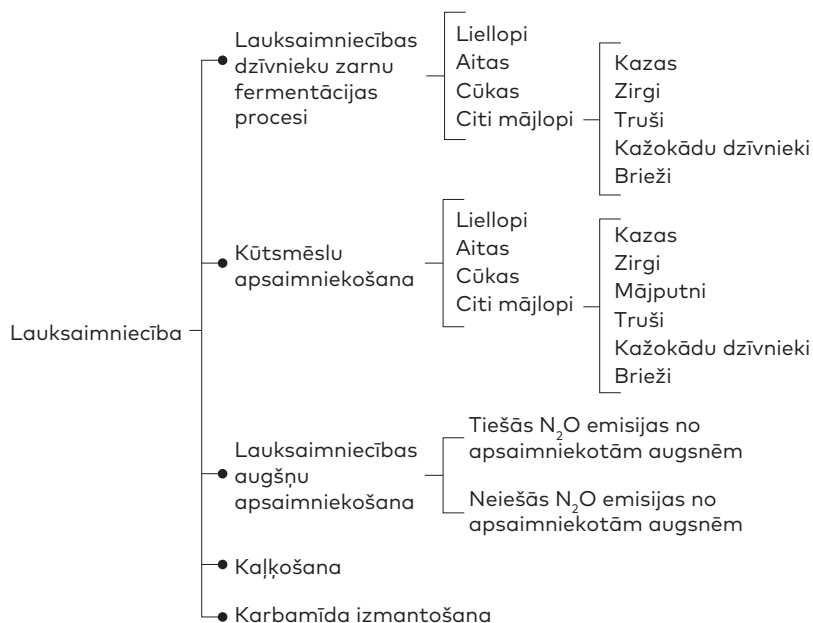
- CH₄ emisijas no mājlopu zarnu fermentācijas procesiem un kūtsmēsļu apsaimniekošanas;



4.2. attēls.

SEG emisijas un to sadalījums no kopējām SEG emisijām 2023. gadā.

- Lauksaimniecības sektors
- Atkritumu apsaimniekošanas sektors
- Rūpniecības sektors
- Enerģētikas sektors
- Netiešās emisijas
- Lauksaimniecības dzīvnieku zarnu fermentācijas procesi
- Kūtsmēsļu apsaimniekošana
- Augšņu apsaimniekošana
- Kalļķošana
- Karbamīda izmantošana



4.3. attēls.

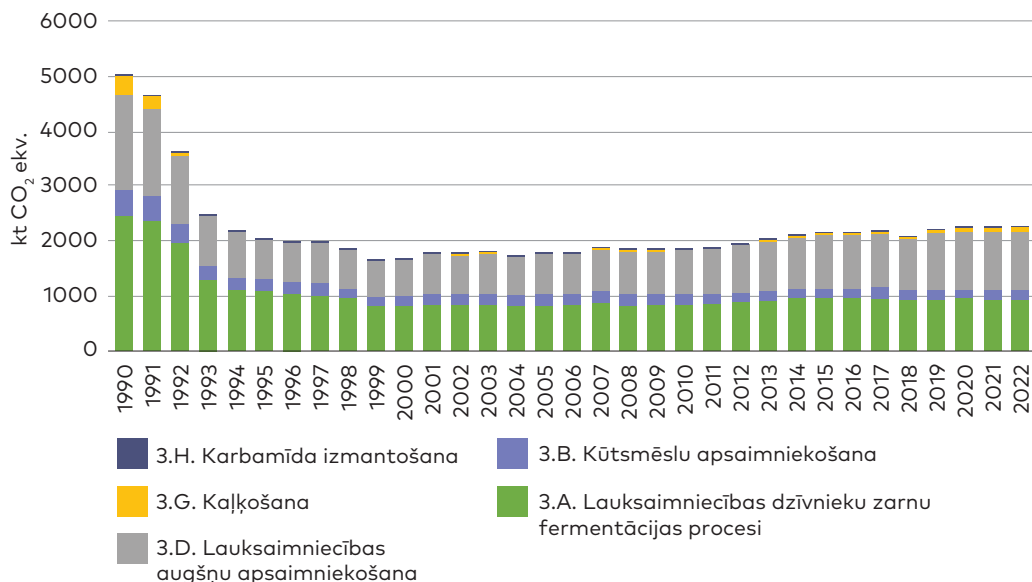
Lauksaimniecības sektora emisiju avotu iedalījums [29].

- N_2O emisijas no kūtsmēslu apsaimniekošanas un lauksaimniecības augsnes;
- CO_2 emisijas no kalķa un urīnvielas (karbamīda) lietošanas.

Emisijas no apsaimniekotām augsnēm ietver:

- tiešās N_2O emisijas no:
 - 1) sintētiskā slāpekļa (N) mēslojuma izmantošanas (FSN),
 - 2) kūtsmēslu, komposta, notekūdeņu dūņu un cita organiskā mēslojuma iestrādāšanas (FON),
 - 3) urīna un mēsliem (N), ko ganībās un aplokā nogulsņējuši ganību dzīvnieki (FPRP),
 - 4) N izdalīšanās no kultūraugu atliekām (FCR),
 - 5) organiskās augsnes kultivēšana aramzemēs un zālajos (FOS),
 - 6) N mineralizācija, kas saistīta ar augsnes organisko vielu zudumu zemes izmantojuma maiņas vai minerālaugšņu apsaimniekošanas rezultātā;
- netiešās N_2O emisijas no atmosfēras nogulsnēšanās un slāpekļa izskalošanās/noteces:
 - 1) iztvaikotais N no lauksaimniecībā izmantojamā N,
 - 2) N no mēslošanas līdzekļiem un citām lauksaimniecības izejvielām, kas tiek zaudētas izskalošanās un noteces rezultātā.

Sistēmdinamikas modelēšana Latvijā ir izmantota kā efektīvs instruments, lai analizētu dažādu politikas lēmumu ietekmi uz SEG emisiju samazināšanu lauksaimniecībā. Pētījuma rezultāti atklāj, ka, lai gan pastāv potenciāls mazināt emisijas, tas rūpīgi jāizvērtē, jo daļa politikas scenāriju uzrāda ierobežotu efektivitāti [30].



4.4. attēls.

Lauksaimniecības sektora emisijas 1990.–2022. gadā (kt CO₂ ekv.) [29].

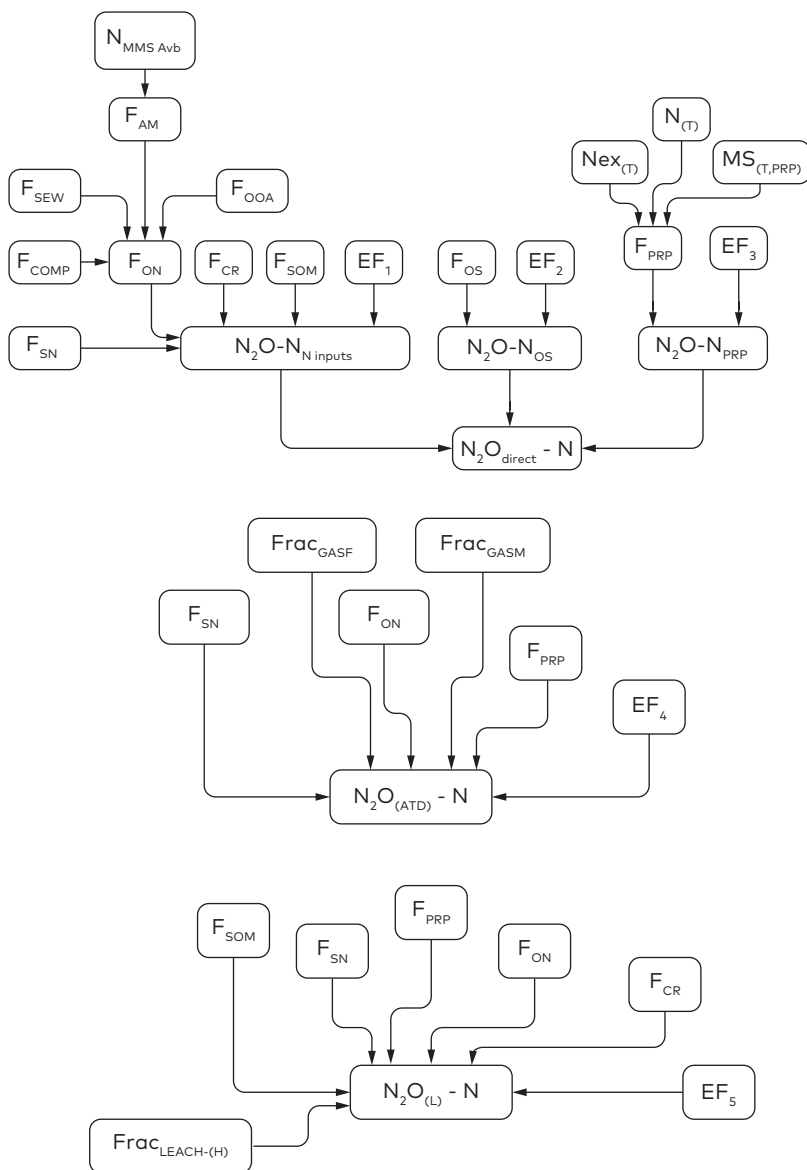
Analizējot SEG inventarizācijas ziņojumus, secināms, ka emisijas no lauksaimniecības augsnēm veidoja lielāko daļu no sektora kopējām emisijām – aptuveni 50 % 2018. gadā. Šis apakšsektors, kas galvenokārt sastāv no N₂O emisijām, bija būtiskākais emisiju avots Latvijas lauksaimniecības SEG struktūrā.

Tomēr laika gaitā šī proporcija būtiski mainījies. No 2018. līdz 2022. gadam emisiju apjoms no apsaimniekotām augsnēm ir samazinājies par aptuveni 36 %, kas norāda uz pozitīvu tendenci SEG samazināšanā šajā jomā. Iespējamie iemesli šādai tendencei ir precīzās lauksaimniecības tehnoloģiju ieviešana, kas ļauj optimizēt mēslojuma lietošanu; plašāka organisko mēslojumu integrācija un to efektīvāka pārvaldība; pastiprināta vides politikas ietekme, īpaši attiecībā uz ES atbalsta instrumentiem un kontroles mehānismiem; precīzāka emisiju uzskaitē. 2022. gadā emisijas no lauksaimniecības augšņu apsaimniekošanas veidoja 46,5 %, šī joma saglabājas kā dominējošais avots.

Lauksaimniecības augšņu apsaimniekošana ir viens no nozīmīgākajiem SEG emisiju avotiem lauksaimniecības sektorā Latvijā. Šīs emisijas galvenokārt rodas no slāpekli saturošo mēslojumu izmantošanas, organisko augšņu apsaimniekošanas un zemes lietošanas maiņas. Tās ietekmē gan CO₂, gan N₂O emisiju apjomu, būtiski ietekmējot klimata pārmaiņu dinamiku.

SEG emisijas no augsnēm veidojas šādos galvenajos procesos:

- tiešās N₂O emisijas rodas no minerālmēslu, kūtsmēslu un citu organisko mēslojumu iestrādes augsnē, kā arī no augu atliekvielu sadalīšanās un slāpekļa mineralizācijas procesiem;
- netiešās N₂O emisijas saistītas ar slāpekļa zudumiem iztvaikošanas (NH₃, NO_x) un izskalošanās (NO₃⁻) rezultātā;

**4.5. attēls.**

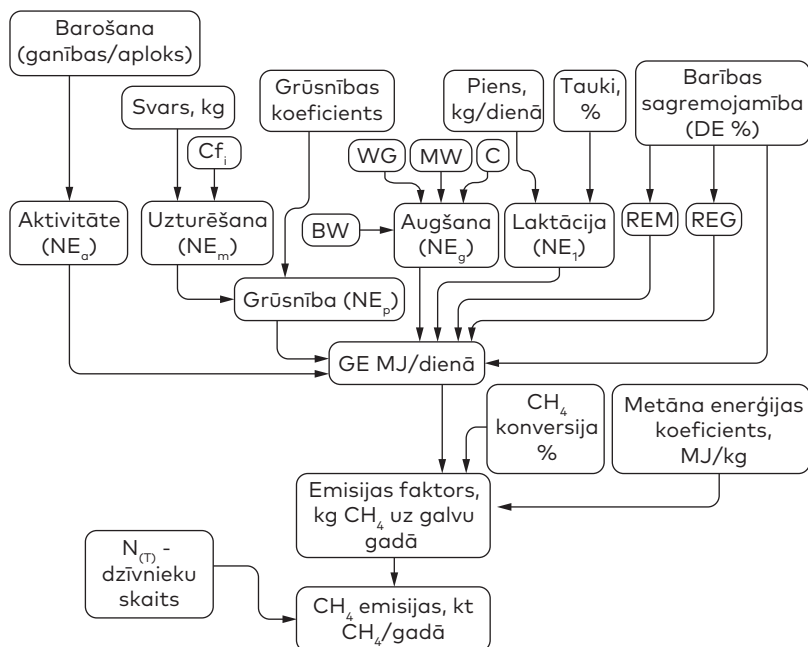
Lauksaimniecības
augšņu apsaim-
niekošanas SEG
emisiju aprēķins.

- CO₂ emisijas rodas no organisko augšņu uzaršanas, drenāžas un ilgstošas apsaimniekošanas;
- papildu emisijas rodas no mitrāju meliorācijas un zemes izmantošanas maiņas (piemēram, zālāju pārveidošana par aramzemi).

Inventarizācijas dati atklāj skaidras tendences emisiju izmaiņās. 2018. gadā tiešās N₂O emisijas no apsaimniekotām augsnēm bija 1389,88 kt CO₂ ekv., kas veidoja vairāk nekā 50 % no kopējām lauksaimniecības emisijām. 2020. gadā šīs emisijas bija samazinājušās

4.6. attēls.

SEG emisijas no lauksaimniecības dzīvnieku zarnu fermentācijas procesiem.



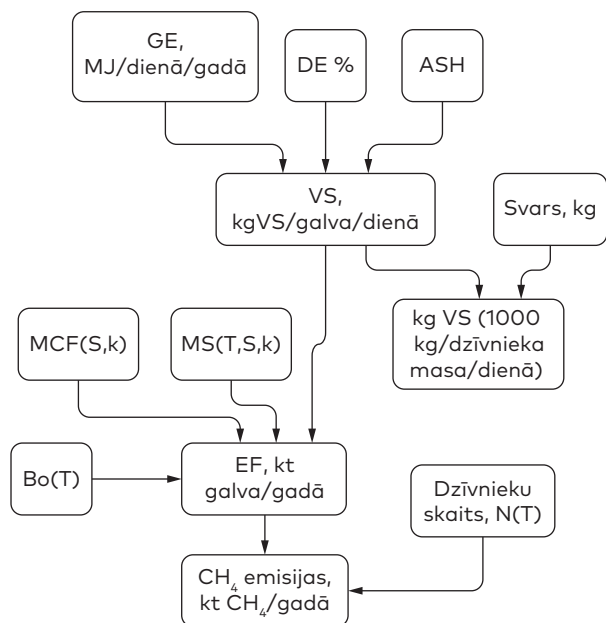
līdz 981,74 kt CO₂ ekv. jeb 51,6 % no nozares emisijām. 2022. gadā emisijas turpināja samazināties līdz 893,54 kt CO₂ ekv., veidojot 46,5 % no kopējām lauksaimniecības emisijām.

Lauksaimniecības dzīvnieku zarnu fermentācijas procesi 2022. gadā radīja 42,0 % no kopējām lauksaimniecības emisijām, kļūstot par otru nozīmīgāko emisiju avotu. Šis pieaugums ir daļēji skaidrojams ar metāna emisiju absolūtā apjoma pieaugumu, kas, salīdzinot ar 2018. gadu, palielinājās par vairāk nekā 11 %. Pieauguma iemesli var būt saistīti gan ar liellopu ganāmpulku pieaugumu, gan ar izmaiņām barības režīmā, kas ietekmē gremošanas procesā izdalīto metāna daudzumu. Dzīvnieku zarnu fermentācijas procesa SEG emisiju shēma parādīta 4.5. attēlā.

Kūtsmēslu apsaimniekošana veidoja 7,8 % no lauksaimniecības emisijām 2022. gadā, saglabājot mērenu, bet stabilu ietekmi. Lai gan šī daļa ir salīdzinoši neliela, tā tomēr piedāvā emisiju samazinājuma potenciālu, ieviešot inovatīvus kūtsmēslu pārstrādes un uzglabāšanas risinājumus (piemēram, biogāzes/biometāna ražošanu vai pārklātas uzglabāšanas sistēmas). Kūtsmēslu apsaimniekošanas SEG emisiju shēma parādīta 4.6. attēlā.

Aprēķinot kūtsmēslu apsaimniekošanas procesa SEG emisijas, tiek aprēķinātas arī N₂O emisijas.

Lai gan apjoma ziņā salīdzinoši nelielas, kaļķošanas un karbamīda izmantošanas emisijas ir neatņemama lauksaimniecības SEG emisiju struktūras sastāvdaļa. Tās ir tiešas CO₂ emisijas, kas rodas



4.7. attēls.

CH₄ emisijas no kūtsmēsliu apsaimniekošanas.

no ķīmiskajām reakcijām, kad noteiktas vielas nonāk saskarē ar augsnī. Šīs emisijas tiek uzskaitītas atbilstoši *IPCC* metodoloģijai, un tām ir noteikti emisijas koeficienti, balstoties izmantotā materiāla veidā un daudzumā.

2020. gadā kaļķošana un karbamīda izmantošana kopā veidoja aptuveni 2,3 % no kopējām lauksaimniecības emisijām. 2022. gadā šo avotu īpatsvars bija 3,7 %, kas atspoguļo nelielu, bet redzamu pieaugumu emisiju struktūrā. Kopējais emisiju apjoms šajās divās kategorijās 2022. gadā sasniedza ap 79,4 kt CO₂ ekv., sadaloties aptuveni uz pusi starp abām aktivitātēm. Pieauguma tendence galvenokārt saistīta ar intensīvāku augsnes pH neitralizēšanu, īpaši auglības uzturēšanai vieglākās augsnēs, kā arī karbamīda plašāku izmantošanu kā efektīvu un ekonomisku slāpekļa mēslojumu augkopībā, īpaši lielajās saimniecībās.

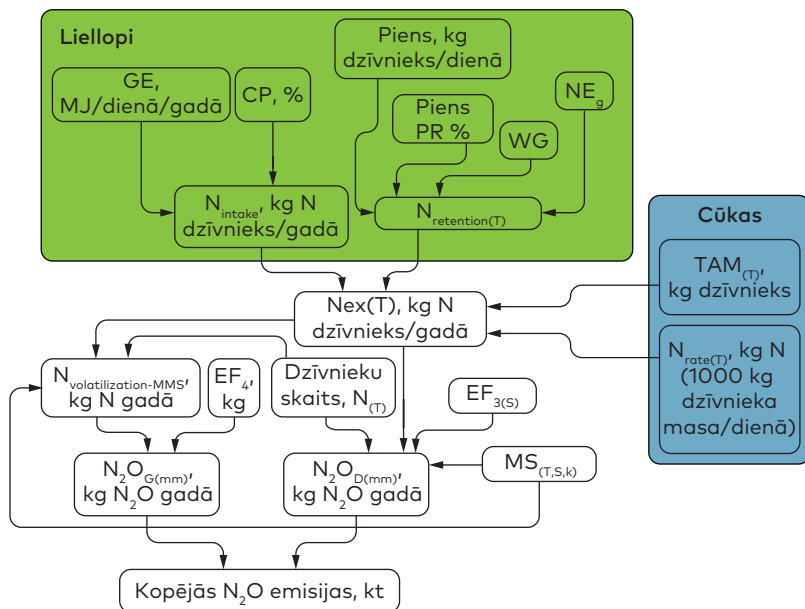
Lai gan šo avotu ietekme uz kopējo emisiju līmeni ir vismazākā, to specifiska uzskaitē un samazināšanas iespējas ir nozīmīgas, ja mērķis ir panākt visaptverošu SEG emisiju samazinājumu lauksaimniecībā.

Saskaņā ar 2022. gadā iesniegto SEG inventarizācijas ziņojumu 2020. gadā kopējās lauksaimniecības emisijas bija samazinājušās par aptuveni 54,9 %, salīdzinot ar 1990. gadu. Šo ievērojamo samazinājumu galvenokārt noteica:

- lauksaimnieciskās ražošanas samazināšanās pēc 1990. gada,
- mājlopu skaita kritums,
- kultūraugu audzēšanas apjoma samazināšanās,

4.8. attēls.

Kūtsmēsļu ap-saimniekošanas procesa N_2O emisijas.



- minerālmēsļu patēriņa sarukums.

Kopš 2005. gada vērojama pretēja tendence – lauksaimniecības emisiju pieaugums par 25,5 % līdz 2020. gadam. To galvenokārt veicināja:

- sējplatību paplašināšana,
- minerālmēsļu lietošanas intensifikācija,
- lauksaimniecības dzīvnieku produktivitātes pieaugums,
- ražošanas rādītāju uzlabošanās, īpaši augkopības sektorā.

Salīdzinot 2020. gadu ar 2019. gadu, emisijas pieauga par 2,2 %, liecinot par nelielu, bet noturīgu emisiju kāpumu, kas saistīts ar palielinātu slāpekļa minerālmēsļu izmantošanu kultūraugiem un intensīvāku dzīvnieku audzēšanu.

Analizējot SEG inventarizācijas ziņojumus par dažādiem gadiem [31]–[33], iezīmējas būtiskas strukturālas izmaiņas Latvijas lauksaimniecības emisiju profilā. Viena no skaidri redzamām tendencēm ir augsnes emisiju īpatsvara samazināšanās – ja 2018. un 2020. gadā tās veidoja vairāk nekā 50 % no kopējām lauksaimniecības SEG emisijām, tad 2022. gadā šis rādītājs bija 46,5 %. Tas var liecināt par uzlabotu mēslojuma lietošanas efektivitāti, iespējams, pateicoties precīzās lauksaimniecības tehnoloģiju ieviešanai un vides prasību ietekmei.

Vienlaikus vērojams absolūts un relatīvs pieaugums lauksaimniecības dzīvnieku zarnu fermentācijas procesu emisijām. Šīs emisijas, galvenokārt metāna formā, pieauga no 803,3 kt CO_2 ekv. 2018. gadā līdz 898,1 kt CO_2 ekv. 2022. gadā. Šajā gadā tās veidoja jau 42 % no

visām lauksaimniecības emisijām, kas norāda uz pieaugošu lopkopības sektora ietekmi uz kopējo emisiju līmeni.

Kūtsmēslu apsaimniekošanas emisijas saglabājās stabilas, veidojot ap 7,8–8 % no kopējām emisijām visā analizētajā periodā. Lai gan to īpatsvars nav dominējošs, tas tomēr ir būtisks un piedāvā iespējas emisiju samazināšanai, izmantojot modernizētus uzglabāšanas un apstrādes risinājumus.

Kopumā šīs izmaiņas norāda uz strukturālu emisiju pārbīdi no augkopības uz lopkopības izcelsmes avotiem, kas uzsver nepieciešamību pārskatīt SEG emisiju samazināšanas pasākumu līdzsvaru. Lai nākotnē nodrošinātu ilgtspējīgu emisiju samazinājumu lauksaimniecībā, īpaša uzmanība jāpievērš dzīvnieku audzēšanas SEG intensitātes mazināšanai, veicinot inovatīvas barošanas pieejas, metāna emisiju samazināšanas tehnoloģijas un uzlabotu kūtsmēslu pārvaldību.

Emisiju ietekmējošo darbību analīze

Lai samazinātu SEG emisijas lauksaimniecībā, prioritāras ir šādas rīcības jomas: lopkopības efektivitātes uzlabošana, mēslojuma lietošanas optimizēšana, konservējošās augsnes apstrādes ieviešana, kā arī ilgtspējīga zemes apsaimniekošana. Šīs pieejas ļauj sasniegt izvirzītos klimata mērķus, vienlaikus saglabājot ražošanas kapacitāti.

SEG emisiju samazināšanai lauksaimniecībā prioritāras ir šādas jomas: lopkopības efektivitātes uzlabošana, mēslojuma lietošanas optimizēšana, konservējošās augsnes apstrādes ieviešana un ilgtspējīga zemes apsaimniekošana. Šādas pieejas sniedz iespēju samazināt emisijas, vienlaikus saglabājot ražošanas apjomu un nodrošinot pārtikas drošību.

Inovatīvas lauksaimniecības prakses, piemēram, bezaršanas metodes un augu segu (*cover cropping*) izmantošana, uzlabo augsnes veselību un veicina oglekļa piesaisti, tā samazinot SEG emisijas [31], [35]. Papildus tam uzlabota lauksaimnieciskā produktivitāte, jo īpaši caur mērķētām, mazajiem lauksaimniekiem paredzētām iniciatīvām, var veicināt emisiju samazināšanu [36]. Ja šādas metodes netiek atbilstoši ieviestas, tradicionālā lauksaimniecība var radīt lielāku ražu uz augstāku emisiju rēķina [31], [36].

Telpiskā analīze parāda ievērojamas atšķirības emisiju intensitātē dažādās lauksaimniecības sistēmās. Piemēram, Ķīnā vērojamas būtiskas atšķirības starp augkopības un lopkopības radītajām emisijām, kas liecina par nepieciešamību pēc specifiski pielāgotām emisiju mazināšanas stratēģijām [37]. Šī pieeja palīdz arī labāk izprast dažādu praksi ietekmi uz vietējo klimatu un ekosistēmām un izstrādāt efektīvāku SEG uzskaites un emisiju pārvaldības politiku [38].

Tomēr daudzās lauksaimniecības sistēmās emisiju uzskaitē joprojām nav pilnīga, kas kavē uzraudzību un sarežģī efektīvas politikas

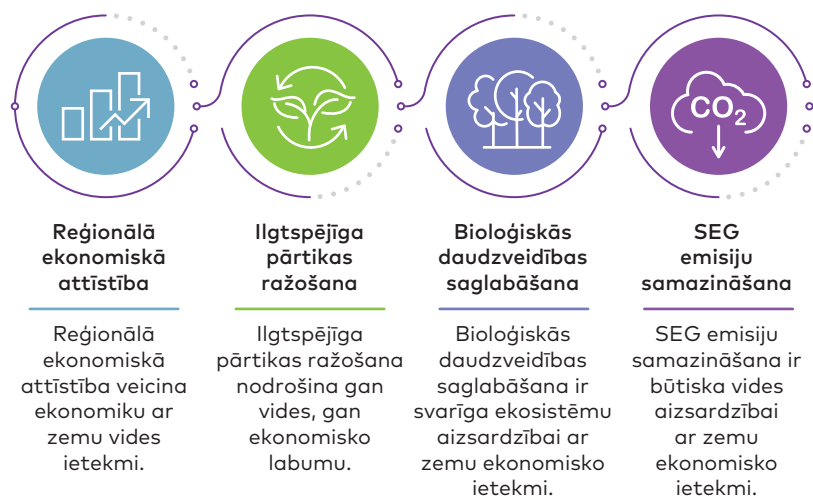
izstrādi [26]. Ja netiek īstenoti mērķēti mazināšanas pasākumi, izmaiņas ievērojami apdraud klimata mērķu sasniegšanu.

Kopumā lauksaimniecības emisiju jautājums vienlaikus ir gan izaicinājums, gan iespēja. Ilgtspējīgas apsaimniekošanas prakses, stingrāki normatīvie regulējumi un uzlabotas uzskaites sistēmas būs būtiski faktori ceļā uz efektīvu SEG emisiju samazināšanu, pārtikas drošības nodrošināšanu un ekosistēmu veselības saglabāšanu [39], [40].

4.2. Klimata pārmaiņu mazināšanas tehnoloģiskie risinājumi

Lauksaimniecības nozare ES un Latvijā saskaras ar pieaugošu nepieciešamību pārveidot ražošanas praksi tādā veidā, lai tā vienlaikus nodrošinātu pārtikas drošību, veicinātu noturību pret klimata pārmaiņām un SEG emisiju samazināšanu. Šo pieeju aptver klimatsaprātīgas lauksaimniecības (*Climate-Smart Agriculture*) koncepts.

Latvijas lauksaimniecības sektorā virzība uz klimatneitralitāti tiek saistīta ar tehnoloģiskiem uzlabojumiem un pārvaldības pasākumiem, kas sinhronizēti ar SEG mazināšanas un produktivitātes mērķiem. Pētījumos uzsvērtā nepieciešamība identificēt būtiskākos posmus šajā pārejā, lai veidotu efektīvas stratēģijas [41]. Lauksaimniecības sektora virzību uz klimatneitralitāti nosaka virkne normatīvo aktu un stratēģisko politikas dokumentu gan ES, gan nacionālajā līmenī. Šie regulējumi veido tiesisko un finansiālo ietvaru, kas nosaka gan emisiju samazināšanas mērķus, gan arī mehānismus atbalstam, uzraudzībai un oglekļa uzskaites attīstībai lauksaimniecībā.



4.9. attēls.

Lauksaimniecības sektora attīstība.

4.2.1. Nacionālais enerģētikas un klimata plāns

Nacionālais enerģētikas un klimata plāns līdz 2030. gadam (NEKP) izvirza vairākus stratēģiskus mērķus, kas tieši attiecas uz lauksaimniecības sektora lomu klimata pārmaiņu mazināšanā. Lauksaimniecības sektors ir identificēts kā sektors ar augstu potenciālu emisiju mazināšanā, vienlaikus nodrošinot pārtikas ražošanas ilgtspēju un zemes ilgtspējīgu izmantošanu.

NEKP nosaka vairākus stratēģiskus mērķus lauksaimniecības sektoram līdz 2030. gadam:

- SEG emisiju samazināšana lauksaimniecībā, īpaši CH₄ un N₂O emisiju jomā, samazinot to intensitāti uz vienību saražotās produkcijas;
- augsnes oglekļa krājumu saglabāšana un palielināšana, īpaši organiskajās augsnēs, tostarp mitrzemju atjaunošana un zālāju apsaimniekošanas veicināšana;
- ilgtspējīgas lauksaimniecības prakses ieviešana, tostarp precīzās lauksaimniecības un zinātnē balstītu tehnoloģiju ieviešana, agrotehnisko risinājumu modernizācija.

Viens no galvenajiem uzdevumiem ir panākt SEG emisiju samazinājumu [42]. Papildus tam plānā uzsvērtā nepieciešamība palielināt CO₂ piesaistes kapacitāti, lai kompensētu atlikušās emisijas [43]. NEKP lauksaimniecības sektoram ir izvirzīti 4.1. tabulā redzamie mērķi.

Ir paredzēts, ka arī 2030. gadā lauksaimniecības sektorā kā galvenais emisiju avots saglabāsies lauksaimniecības augšņu apsaimniekošana.

Ne mazāk svarīgs mērķis ir bioloģiskās daudzveidības principu integrēšana lauksaimnieciskajā ainavā, kas veicina ekosistēmu noturību, uzlabo augsnes veselību un atbalsta ilgtspējīgu zemes apsaimniekošanu. Vienlaikus paredzēts uzlabot emisiju monitoringa un pārvaldības sistēmas, ieviešot saimniecību līmenī zinātniskajos datos balstītus rīkus un uzskaites mehānismus [44].

NEKP ietvaros definētie pasākumi aptver gan ražošanas procesu optimizāciju, gan tehnoloģiju un zināšanu pārnesi. Viens no svarīgākajiem virzieniem ir mēslošanas un augsnes pārvaldības uzlabošana. Tiek plānota precīzās lauksaimniecības tehnoloģiju ieviešana, kas ļauj optimāli pielāgot mēslojuma lietošanu konkrētiem

4.1. tabula

NEKP lauksaimniecības sektora mērķi

Mērķrādītājs	Fakts 2021	Fakts 2022	Mērķis 2030
SEG emisiju apjoms (kt CO ₂ ekv.)	2252,96	2253,83	2176,33

augu augšanas apstākļiem. Tāpat liela uzmanība veltīta kūtsmēsļu apsaimniekošanas pilnveidei – mērķis ir samazināt emisijas, vienlaikus veicinot biogāzes ražošanu. Kūtsmēsļu pārstrāde biogāzē tiek uzskatīta par nozīmīgu emisiju mazināšanas un atjaunojamās enerģijas iegūšanas instrumentu [42].

Lai veicinātu oglekļa piesaisti, plānoti pasākumi ilgtspējīgai augsnes apsaimniekošanai. Tiek paredzēta segkultūru, starpkultūru un daudzgadīgo zālāju uzturēšana, kā arī bezaršanas vai minimālās augsnes apstrādes metožu ieviešana, kas uzlabo augsnes struktūru un sekmē organiskā oglekļa uzkrāšanos. Īpaša uzmanība pievērsta arī kūdras augšņu un meliorēto platību pārvaldībai, lai mazinātu emisijas no organiskajām augsnēm un uzlabotu ūdens režīmu [43], [44].

Turklāt NEKP paredz atbalstu bioloģiskās un integrētās lauksaimniecības attīstībai. Bioloģiskā saimniekošana, kas balstīta dabiskos ražošanas principos un samazina ķīmisko mēslojumu un pesticīdu izmantošanu, tiek atzīta par vienu no efektīvākajiem emisiju samazināšanas instrumentiem. Papildus tam agroekoloģiskās metodes – daudzveidīga augseka, dabisko buferjoslu veidošana un ainavas elementu integrēšana – veicina bioloģisko daudzveidību, uzlabo augsnes veselību un sekmē oglekļa piesaisti.

Klimatam draudzīga zemes izmantošana ietver arī ainavas pārstrukturēšanu, balstoties ekosistēmu saglabāšanā un atjaunošanā. Šajā kontekstā būtiska ir oglekļa saistīgās lauksaimniecības pieeju attīstīšana, kur pamatā ir uzskaites un atalgojuma mehānismi. Tiek plānots, ka saimniecības varēs saņemt kompensāciju par faktiskajiem emisiju samazināšanas rezultātiem vai piesaistīto oglekļa daudzumu [44].

4.2.2. Kopējā lauksaimniecības politika

Kopējā lauksaimniecības politika (KLP) ir viens no nozīmīgākajiem ES instrumentiem, kura mērķis ir veicināt ilgtspējīgu lauksaimniecības attīstību, vienlaikus nodrošinot klimatneitralitāti, pārtikas drošību un lauku telpas dzīvotspēju [45]. Kopējās lauksaimniecības politikas mērķi parādīti 4.11. attēlā.

Latvijas KLP stratēģiskais plāns 2023.–2027. gadam nosaka skaidru virzību uz ilgtspējīgu, klimatnoturīgu un videi draudzīgu lauksaimniecību. Klimata pārmaiņu mazināšana un pielāgošanās tām ir viens no deviņiem KLP mērķiem, kas strukturāli integrēts pasākumu un atbalsta mehānismu izstrādē [46].

KLP stratēģiskais plāns tieši sasaistīts ar Eiropas zaļā kursa mērķiem, paredzot, ka vismaz 40 % no kopējā KLP budžeta novirzāmi darbībām, kas veicina klimata un vides ilgtspēju [46]. Šī pieeja nodrošina līdzsvarotu SEG emisiju pārvaldību ar citiem ilgtspējīgas lauksaimniecības aspektiem, piemēram, bioloģiskās daudzveidības saglabāšanu, ūdens kvalitāti un augsnes veselību.



Ekoshēmas un agrovīdēs pasākumi SEG emisiju mazināšanai

KLP ietvaros ieviestas vairākas mērķtiecīgas ekoshēmas, kuru mērķis ir atbalstīt lauksaimniekus SEG emisiju samazināšanā un oglekļa piesaistes veicināšanā.

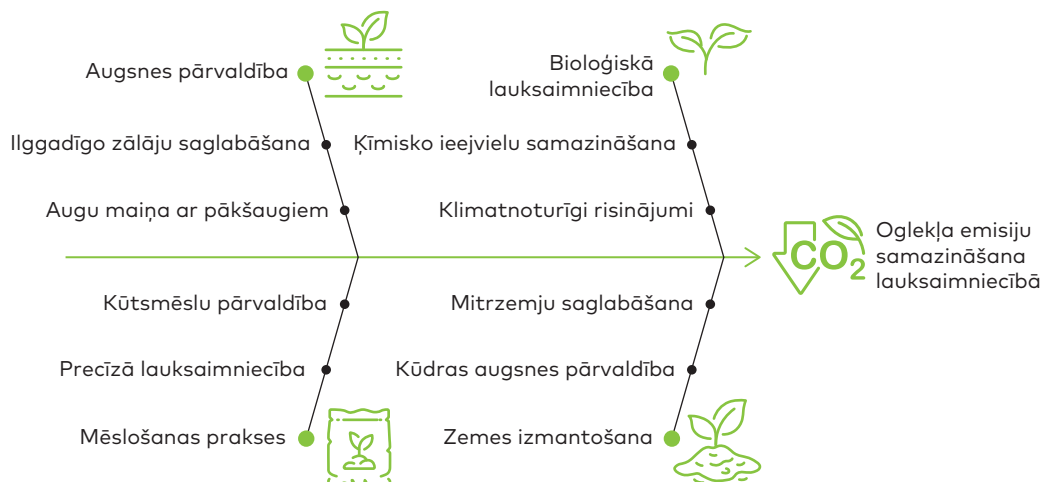
- Ilggadīgo zālāju saglabāšana un neuzaršana – būtiski veicina oglekļa akumulāciju augsnē, vienlaikus samazinot emisijas no augsnes traucējumiem.
- Augu maiņa ar pākšaugiem – samazina nepieciešamību pēc sintētiskiem slāpekļa mēslošanas līdzekļiem, tā mazinot N_2O emisijas.
- Ilgtspējīgas mēslošanas prakses – veicina precīzo lauksaimniecību un emisiju mērķtiecīgu samazināšanu, it īpaši no kūtsmēslu uzglabāšanas un lietošanas.
- Bioloģiskās lauksaimniecības paplašināšana – būtiski mazina ķīmisko izejvielu ietekmi un atbalsta klimatnoturīgus apsaimniekošanas risinājumus.
- Agrovīdēs pasākumi kūdras augsnēs un mitrzemēs – samazina emisijas no ūdens piesātinātām organiskajām augsnēm, veicinot zemes izmantošanas transformāciju oglekli piesaistošā režīmā.

Plānā izvirzīta arī nepieciešamība stiprināt lauksaimniecības sektora noturību pret pieaugošajiem klimatiskajiem riskiem. Klimata pārmaiņu ietekme Latvijā izpaužas kā ilgstoši sausuma periodi, pēkšņas nokrišņu epizodes un sezonāla mainība, kas būtiski ietekmē ražas kvalitāti un saimniecību ekonomisko stabilitāti. Atbalstāmo pasākumu klāstā ietilpst:

- ūdens resursu pārvaldības uzlabošana, tostarp drenāžas un mitrāju atjaunošana;

4.11. attēls.

Kopējās lauksaimniecības politikas mērķi [45].



4.12. attēls.

KLP pasākumi
SEG emisiju
samazināšanai.

- klimatnoturīgu kultūraugu ieviešana, pielāgojot lauksaimniecības praksi biotiskajiem un abiotiskajiem riskiem;
- zināšanu pārnese un riska vadība, ietverot pieeju agrometeoroloģiskajām prognozēm un lauksaimniecības apdrošināšanas shēmām.

SEG emisiju pārvaldības efektivitātei KLP stratēģiskajā plānā paredzēta progresīva uzskaites sistēmu attīstība. Plānots ieviest:

- emisiju kalkulatorus saimniecību līmenī, lai sniegtu precīzu emisiju novērtējumu pēc lauksaimnieciskās darbības veida;
- datu plūsmas digitalizāciju, uzlabojot informācijas apmaiņu starp lauksaimniekiem, uzraudzības institūcijām un pētniecības sektoru;
- vidusposma novērtējumu sistēmu, kas nodrošina iespēju pārskatīt pasākumu efektivitāti un pielāgot atbalsta instrumentus.

KLP stratēģiskais plāns kalpo kā būtisks politikas instruments Latvijas klimatneitralitātes mērķu īstenošanā. Tā ietvaros uzsvērtā gan SEG emisiju samazināšana, gan lauksaimniecības nozares spēju pielāgoties klimata pārmaiņām stiprināšana. Šo mērķu sasniegšanai nepieciešama kompleksa pieeja, kas ietver gan ekonomiskos stimulus, gan zināšanu pārnesi, gan uzskaites sistēmu pilnveidi, tādējādi nostiprinot ilgtspējīgas lauksaimniecības pozīcijas klimata politikas īstenošanā.

4.2.3. Eiropas Komisijas vīzija lauksaimniecības un pārtikas nākotnei

Lai stiprinātu pāreju uz ilgtspējīgu, noturīgu un konkurētspējīgu lauksaimniecības sektoru, Eiropas Komisija 2025. gadā publicējusi

Lauksaimniecības un pārtikas vīziju [47], kurā uzsvērtā stratēģiska un daudzdimensionāla pieeja nozares nākotnes veidošanā. Šī vīzija balstīta uz plašu ieinteresēto pušu dialogu un aicina uz kolektīvu rīcību, lai līdz 2040. gadam Eiropā izveidotu klimatneitrālu un ekonomiski dzīvotspējīgu pārtikas sistēmu.

Dokumentā noteiktas četras prioritārās jomas:

- pievilcība – veicināt lauksaimniecību kā perspektīvu un pievilcīgu profesiju nākamajām paaudzēm;
- konkurētspēja – stiprināt sektora pozīcijas globālajā tirgū un mazināt atkarības;
- gatavība nākotnei – integrēt inovācijas, digitalizāciju un klimata pielāgošanos;
- savienojums ar teritoriju – nodrošināt taisnīgus dzīves un darba apstākļus lauku reģionos, uzsverot pārtikas vērtību un saikni ar vietējo vidi.

Lai nodrošinātu ilgtspēju un ekonomisko dzīvotspēju, tiek piedāvāti konkrēti mehānismi, piemēram:

- vienkāršota un taisnīgāka KLP ieviešana,
- bioekonomikas stratēģijas izstrāde,
- oglekļa un dabas kredītu sistēmas ieviešana,
- ilgtspējas kompass saimniecību līmenī,
- paaudžu nomaiņas stratēģija,
- digitālā stratēģija lauksaimniecībā,
- ES pielāgošanās klimata pārmaiņām plāns.

Nozīmīga uzmanība veltīta arī lauku dzīvotspējas stiprināšanai – aktualizējot sieviešu lomu lauksaimniecībā, ģeogrāfisko izcelsmes norāžu popularizēšanu un publiskā iepirkuma pārskatīšanu, lai atbalstītu vietējos ražotājus.

Šī visaptverošā pieeja kalpo kā ceļvedis nākotnes lauksaimniecības politikai, kas apvieno SEG emisiju samazināšanu ar sociāli atbildīgu un ekonomiski dzīvotspējīgu zemes apsaimniekošanu.



Pievilcība

Veicināt lauksaimniecību kā pievilcīgu profesiju nākamajām paaudzēm.

Konkurētspēja

Stiprināt sektora pozīcijas globālajā tirgū un mazināt atkarības.

Gatavība nākotnei

Integrēt inovācijas, digitalizāciju un klimata pielāgošanos.

Savienojums ar teritoriju

Nodrošināt taisnīgus dzīves un darba apstākļus lauku reģionos.

4.13. attēls.

Eiropas lauksaimniecības vīzija.

4.2.4. Oglekļa saistīga lauksaimniecība

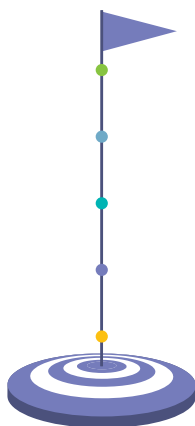
Klimata pārmaiņu ietekme kļūst arvien izteiktāka un visaptverošāka, tādēļ dažādu nozaru politikas veidotāji un ieinteresētās puses arvien biežāk uzsvēr nepieciešamību pēc sadarbības un inovatīviem risinājumiem, kas spētu mazināt šīs ietekmes sekas un veicināt ilgtspējīgu nākotni. Ņemot vērā, ka lauksaimniecības nozare ir viens no lielākajiem SEG emisiju avotiem, tai ir izšķiroša loma gan problēmas radīšanā, gan risināšanā. Kritiski svarīgi ir, lai nozare aktīvi iesaistītos emisiju samazināšanā, ieviešot videi draudzīgas un ilgtspējīgas apsaimniekošanas metodes [48], [49].

Tradicionālās lauksaimniecības prakses bieži veicinājušas augsnes organisko vielu zudumu, pasliktinot augsnes veselību un samazinot tās spēju sekvestrēt oglekli [50], [51]. Oglekļa saistīgā lauksaimniecība cenšas šo tendenci mainīt, izmantojot fotosintēzes spēju piesaistīt CO₂ un papildus lietojot oglekļa sekvestrācijas metodes. Šāda pieeja ne vien mazina emisijas, bet arī uzlabo pārtikas kvalitāti, ūdens resursu stāvokli, veicina bioloģisko daudzveidību un stiprina ekosistēmu noturību [52].

Ilgspējīgas lauksaimniecības īstenošanā būtiski ir ņemt vērā ne tikai vides aspektus, bet arī ekonomisko dzīvotspēju, sociālo atbildību un resursu efektīvu pārvaldību. Šie aspekti ir svarīgi gan politikas plānošanā, gan lauksaimniecības mehanizācijas attīstībā un tās iespējamās ietekmes novērtējumos [53].

KLP 2023.–2027. gadam kalpo kā galvenais regulējošais instruments, kas veicina oglekļa saistīgo lauksaimniecību, izmantojot ekoshēmas, agrovides pasākumus, klimata iniciatīvas un saimniecību līmeņa ieguldījumus [54]. Tomēr nereti tiek uzsvērts jautājums, vai šie mehānismi ir pietiekami efektīvi, lai stiprinātu sektora spēju reaģēt uz klimata pārmaiņām un īstenot ilgtermiņa ilgtspēju [55].

4.14. attēls.
Ilgspējīga
lauksaimniecība.



Ilgspējīga nākotne

Ilgspējīgas lauksaimniecības galvenais mērķis

Oglekļa saistīgā lauksaimniecība

Emisiju mazināšanas un augsnes uzlabošanas stratēģija

Politikas ietvari

Atbalsta politikas un regulējami

Ekonomiskā dzīvotspēja

Finansiālie stimuli un tirgus iespējas

Sociālekonomiskā ietekme

Sociālie un ekonomiskie apsvērumi

Oglekļa saistīgā lauksaimniecība ir kļuvusi par vienu no centrālajiem instrumentiem Eiropas klimatneitralitātes mērķu sasniegšanā. Tā balstīta praksēs, kas palielina oglekļa sekvestrāciju augsnē un veģetācijā, tā mazinot SEG emisijas [56]. Eiropas Komisija šo pieeju definē kā “zaļu uzņēmējdarbības modeli”, kas mudina zemes īpašniekus un apsaimniekotājus uzlabot zemes pārvaldību, lai sekmētu oglekļa uzkrāšanu biomasā un augsnē [57].

Pētījumi apstiprina šādas lauksaimniecības metodes potenciālu klimata pārmaiņu mazināšanā [12], [58], [59], kā arī norāda uz tās ekonomisko dzīvotspēju – lauksaimnieki var iegūt papildu ienākumus caur oglekļa kredītiem vai citiem finansiāliem stimuliem [60]. Lai šie risinājumi tiktu plašāk ieviesti, nepieciešami atbalstoši politiskie ietvari un mehānismi, kas veicina zināšanu apmaiņu un motivē saimniecības aktīvāk iesaistīties [61].

Oglekļa saistīgo pasākumu integrācija var ne tikai stiprināt noturību pret klimata pārmaiņām, bet arī uzlabot augsnes veselību un bioloģisko daudzveidību [62], [63]. Taču šādas prakses ieviešana nav vienmērīga – tā atšķiras gan starp reģioniem, gan saimniecību veidiem, kas uzsver nepieciešamību pēc visaptverošiem izvērtējumiem par efektivitāti un ieviešanas barjerām [64], [65]. Sistemātiski pārskati spēj sniegt detalizētu ieskatu iespējamajos ieguvumos, ierobežojumos un pielāgošanās mehānismos [66].

Vienlaikus svarīgi ir izprast šo pasākumu sociālekonomisko ietekmi, lai nodrošinātu līdzsvaru starp vides ilgtspēju un lauksaimnieku labklājību [67], [68]. Tikai šāda integrēta pieeja var nodrošināt efektīvu SEG emisiju mazināšanu, vienlaikus atbalstot ilgtspējīgas lauku kopienas un ekosistēmu saglabāšanu.

Oglekļa saistīgās lauksaimniecības prakses

Oglekļa saistīgā lauksaimniecība aptver daudzveidīgu saimniecokšanas paņēmieni klāstu, kura mērķis ir veicināt oglekļa uzkrāšanos augsnē, vienlaikus atbalstot klimata pārmaiņu mazināšanu. Šajās praksēs izmantotās metodes var būtiski ietekmēt augsnes veselību, barības vielu apriti un kopējo lauksaimniecības produktivitāti. Šajā apkopojumā sniegts pārskats par galvenajām oglekļa saistīgās lauksaimniecības metodēm, balstoties aktuālos zinātniskos avotos.

Augsnes apstrādes prakses

Tādas augsnes apstrādes metodes kā saglabājošā aršana un bezaršanas prakse arvien biežāk tiek minētas kā perspektīvi oglekļa saistīšanas paņēmieni. Šādas metodes samazina augsnes traucējumus un veicina augsnes organiskā oglekļa (AOO) uzkrāšanos [12], [69]. Pretstatā tam tradicionālā aršana bieži noved pie organiskās vielas zudumiem, erozijas un augsnes struktūras degradācijas [70].

Zinātniskie pētījumi rāda, ka samazināta augsnes apstrāde kopā ar intensīvāku augsekas plānošanu var samazināt CO₂ emisijas,



4.15. attēls.

Oglekļa saistīgas lauksaimniecības mērķi.

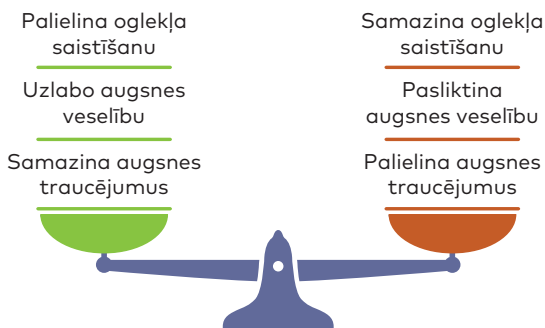
vienlaikus uzlabojot augsnes auglību [71]. Arī kultūraugu atliekas, atstātas uz lauka virsmas, ir nozīmīgs faktors AOO uzkrāšanai [72]. Saglabājošā aršana, īpaši kombinācijā ar segkultūrām, būtiski pastiprina lauksaimniecības zemju oglekļa sekvestrācijas potenciālu [73].

Tomēr šo pasākumu efektivitāte ir ļoti atkarīga no konkrētajiem augsnes tiem un klimata apstākļiem [74]. Piemērotība un rezultāti atšķiras arī atkarībā no izmantotajām metodēm un lauksaimniecības konteksta [75], [76]. Kopumā saglabājošās apstrādes prakses ne tikai uzlabo AOO, bet arī nostiprina augsnes veselību un ilgtspējību [77], [78], [79].

Segkultūras

Segkultūras kļūst par nozīmīgu oglekļa saistīgās lauksaimniecības sastāvdaļu, jo tās uzlabo augsnes struktūru, sekmē barības vielu apriti un palīdz uzkrāt organisko oglekli. Pētījumi liecina, ka šo kultūru integrācija dažādos Eiropas klimatiskajos reģionos uzlabo AOO uzkrāšanos [80].

Segkultūras ievērojami veicina slāpekļa cikla procesus augsnē, paaugstinot atbildīgo gēnu aktivitāti un daudzumu, tādējādi nostiprinot augsnes veselību [81]. Organiskās saimniekošanas sistēmās,



4.16. attēls.

Augsnes apstrādes praksi salīdzinājums.

kurās segkultūras ir būtisks elements, novērojams ievērojami zemāks oglekļa pēdas nospiedums [82], [83].

Turklāt segkultūras sniedz papildu labumu ekosistēmai, tostarp aizsargā augsni no erozijas, uzlabo mitruma saglabāšanu un palielina bioloģisko aktivitāti [84]. Segkultūras, apvienotas ar augseku, paaugstina ražību un AOO līmeni [85], īpaši pirmajos ieviešanas gados [86].

Starpkultūras

Starpkultūru audzēšana ir vēl viena ilgtspējīga metode, kas veicina AOO līmeņa paaugstināšanu, salīdzinot ar monokultūrām. Šāda pieeja uzlabo augsnes struktūru un stabilitāti [86], kā arī veicina barības vielu apriti un augsnes mikrobioloģisko daudzveidību [88], [89].

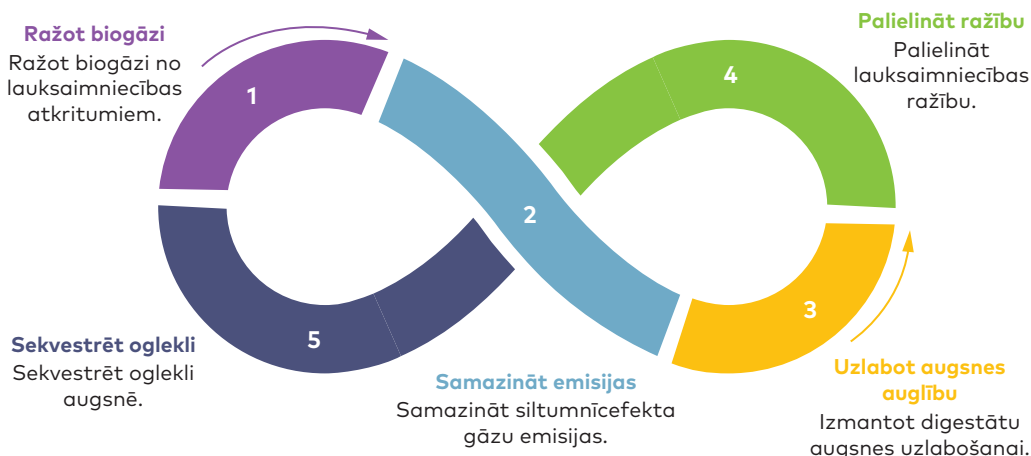
Papildus bioloģiskajiem ieguvumiem starpkultūru sistēmas var samazināt N_2O emisijas, tā sekmējot SEG samazinājumu [90]. Ilgtermiņā šādas prakses palīdz nostiprināt augsnes agregātstruktūru un palielina humusa saturu [91], [92].

Biogāzes un biometāna ražošana

Biogāzes un biometāna ražošana ieņem nozīmīgu vietu oglekļa saistīgās lauksaimniecības stratēģijās. Šīs tehnoloģijas ļauj ne vien samazināt lauksaimniecības emisijas, bet arī veicināt augsnes oglekļa uzkrāšanos. Piemēram, pētījumā [91] secināts, ka, integrējot biogāzes ražošanu lauksaimniecības ciklā, iespējams palielināt AOO līmeni.

Biogāzes ražošanā radītais digestāts (barības vielām bagātais atlikumprodukts) būtiski uzlabo augsnes auglību un veicina ražību [88]. Ir arī norādīts [93], ka daudzgadīgie kultūraugi, ko audzē

4.17. attēls. Biogāzes un biometāna cikls.



biogāzes ieguvei, spēj efektīvi veicināt oglekļa sekvestrāciju, pateicoties to augstajai biomasas produkcijai un barības vielu aprites spējai.

Pētījumā [94] apliecināts, ka biogāzes sistēmas kopumā var ievērojami samazināt SEG emisijas, savukārt citur [87] uzsvērts, ka pāreja uz biogāzes izmantošanu spēj mazināt lauksaimniecības oglekļa pēdas nospiedumu. Ar cita pētījuma secinājumiem [95] papildināts, ka bioenerģijas ražošana no lauksaimniecības atkritumiem, bez nepieciešamības izmantot papildu zemes platības, var sniegt divkārtšu labumu – SEG samazinājumu un barības vielu atgriešanu augsnē.

Oglekļa sekvestrācija augsnē

Augsnes oglekļa sekvestrācija ir viens no galvenajiem mehānismiem, ar kura palīdzību iespējams mazināt klimata pārmaiņu ietekmi un uzlabot augsnes veselību. Pētījumā [96] uzsvērts, ka oglekļa uzkrāšanās potenciāls lielākoties ir atkarīgs no konkrētās vietas īpašībām, nevis tikai pārvaldības metodēm. Arī citi pētnieki [97] izceļ zemes izmantošanas veida nozīmi AOO dinamikas kontekstā.

Pētījumā, kurā salīdzināti rīsa lauki ar sauszemes laukiem, konstatēts, ka rīsa lauki ir par 39–127 % efektīvāki organiskā oglekļa uzkrāšanā [98]. Tas nozīmē, ka klimata apstākļiem ir izšķirīga nozīme, izvēloties atbilstošu stratēģiju.

Augsnes struktūras uzlabošana, piemēram, izmantojot saglabājošo apstrādi un agregātu stabilizāciju, ir būtisks priekšnoteikums AOO saglabāšanai [99]. Arī citā pētījumā [78] norādīts, ka konservatīvā lauksaimniecība uzlabo augsnes funkcionalitāti un oglekļa uzkrāšanos. Pētījumi par kultūraugu dažādošanu dažādos Eiropas klimatiskajos reģionos papildina šo izpratni, uzsverot nepieciešamību pēc daudzveidīgām ilgtspējīgām praksēm [80].

4.18. attēls.

Daudzgadīgo kultūru ieguvumi.



Daudzgadīgie augi

Daudzgadīgie kultūraugi, pateicoties savām dziļajām sakņu sistēmām, piedāvā ievērojamu oglekļa sekvestrācijas potenciālu. Uzsvērts [100], ka šie augi efektīvi uzkrāj oglekli gan virszemes biomasā, gan augsnē. Tā kā tie uztur augsnes klājumu visu gadu, tiek samazināta erozija un uzlabota augsnes struktūra [12], [101].

Turklāt daudzgadīgās kultūras uzlabo slāpekļa apriti augsnē, īpaši, ja tās ir pākšaugi ar slāpekļa piesaistes spējām [102]. Šīs sistēmas uzlabo gan augsnes ražību, gan AOO uzkrāšanu [100], [103]. Ekonomiskā ziņā daudzgadīgie augi var nodrošināt stabilus ienākumus, taču to ieviešanai nepieciešami politiski stimuli un papildu atbalsts pētniecībai [104], [105].

Agromežsaimniecība

Agromežsaimniecības sistēmas ES teritorijā aptver vairāk nekā 15 miljonus hektāru [106]. Šīs sistēmas ne vien uzkrāj oglekli biomasā un augsnē, bet arī uzlabo augsnes kvalitāti un bioloģisko daudzveidību [107], [108]. Koku integrēšana lauksaimniecībā rada daudzslāņu vidi, kas spēj uzkrāt vairāk biomasas nekā tradicionālas kultūras [109].

Agromežsaimniecība sekmē arī slāpekļa ciklu, mitruma saglabāšanu un klimata noturību [110]. Tomēr tās ieviešanu Eiropā kavē ekonomiskie faktori, zemes izmantošanas ierobežojumi un nepietiekams politikas atbalsts [106], [111].

Organiskā mēslošana un bioogles

Gan bioogles, gan organiskā mēslošana aizvien biežāk tiek minētas kā efektīvas oglekļa saistīgās lauksaimniecības prakses Eiropā. Bioogles, kas rodas no biomasas kontrolētā degšanas procesā ar zemu skābekļa piekļuvi, spēj ilgi saglabāties augsnē un uzkrāt oglekli [112], [113]. Piemēram, pētījumā [114] parādīts, ka bioogļu pievienošana augsnei ievērojami paaugstina AOO līmeni.

Biooglēm piemīt arī spēja samazināt SEG emisijas, īpaši N_2O , kas ir spēcīga SEG [115]. Tās struktūra uzlabo augsnes agregāciju un stabilitāti, jo kalpo kā mikroorganismu dzīvesvide [116], [117]. Tas savukārt sekmē barības vielu apriti un augu produktivitāti.

Apvienojot bioogles ar organiskajiem mēslojumiem, piemēram, vistu mēsliem, iespējams panākt sinerģisku efektu – uzlabojot barības vielu pieejamību, samazinot izskalošanos un uzlabojot augsnes mitruma noturību [118], [119]. Neskatoties uz ieguvumiem, bioogļu plašāku ieviešanu kavē vairāki faktori: zemnieku informētības trūkums, bioogļu kvalitātes svārstības un ierobežots politiskais atbalsts [120]. Šo iemeslu dēļ nepieciešami turpmāki pētījumi par bioogļu ražošanas efektivitāti un to ilgtermiņa ietekmi uz augsni.

Kultūraugu dažādība un augseka

Kultūraugu dažādība un plānota augseka var būtiski uzlabot augsnes organiskā oglekļa krājumus. Zinātnieki savā pētījumā [121] uzsvēruši, ka augseka, kas aizstāj atmatās atstātos periodus ar segkultūrām, ļauj aktīvi absorbēt oglekli arī starp sezonām. Tas veicina AOO uzkrāšanos un uzlabo oglekļa bilanci lauksaimniecības zemēs.

Pētījumā par oglekļa saistīgu lauksaimniecību Latvijā secināts, ka nozīmīga loma SEG emisiju samazināšanā ir augsnes oglekļa uzkrāšanai un rezultātos balstītai subsīdiju piešķiršanai. Uzsvērtā arī nepieciešamība pēc vietēji pielāgotām metodoloģijām un ilgtermiņa monitoringa datiem [122]. Organiskās lauksaimniecības sistēmas uzrāda augstāku vides ilgtspēju, taču tām bieži nepieciešams finansiāls atbalsts. Salīdzinošā analīze ar konvencionālo lauksaimniecību atklāj katras pieejas priekšrocības un trūkumus emisiju kontekstā, īpaši graudkopībā un piena lopkopībā [123].

Dažādas kultūraugu sistēmas, īpaši tās, kurās integrētas daudzgadīgās vai pākšaugu sugas, uzrāda lielāku oglekļa uzkrāšanas spēju un augsnes auglību [124]. Pētījumā [125] modelēts Eiropas aramzemju potenciāls un secināts, ka optimizēta augseka un augu atliekas ievērojami palielina AOO līmeni.

Turklāt kultūraugu dažādība pozitīvi ietekmē bioloģisko daudzveidību un ekosistēmu pakalpojumus [126]. Pētījumā [127] pierādīts, ka dažādas augseku sistēmas labāk pielāgojas klimatiskajām svārstībām un uzlabo ražības stabilitāti. Arī ekonomiskā ilgtspēja tiek nostiprināta – dažādas kultūras samazina atkarību no viena tirgus segmenta [128].

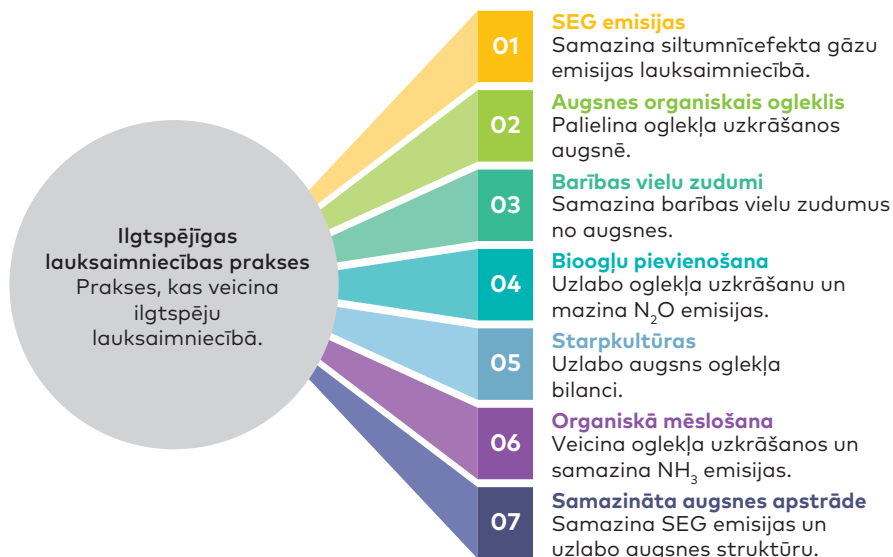
Tomēr ir pētījums [129], kurā atzīmēts, ka politikas un tirgus struktūras joprojām labvēlīgāk attiecas pret monokultūrām, kas ierobežo dažādības ieviešanu praksē. Nākotnes izpētei būtu jāapvert dažādošanas ilgtermiņa ietekme dažādos agroekosistēmu tipos Eiropā.

Ganību pārvaldība

Ganību pārvaldība būtiski ietekmē AOO līmeni zālājos. Pētījumā [130] secināts, ka, piemērojot uzlabotu ganišanas stratēģiju, iespējams ievērojami palielināt AOO krājumus. Līdzīgi arī citi zinātnieki [131] norāda, ka mērena ganišana mērenā klimata zālājos sekmē AOO, bet pārmērīga noslogošana rada augsnes degradāciju un oglekļa zudumus.

Ganību ilgstoša pārslodze izraisa strukturālus bojājumus, barības vielu izskalošanos un mikrobioloģisko aktivitāšu samazināšanos [132]. Pētnieki [133] uzsver, ka efektīva ganību pārvaldība prasa holistisku pieeju, kur ņemti vērā produkcijas, uzturvielu ciklu un oglekļa aprites aspekti.

Rotējošā ganišana, kurā ganības regulāri maina, paaugstina gan oglekļa uzkrāšanos, gan augu barības vērtību [63]. Pētījumā [134]



apliecināts, ka ilgtspējīga ganību pārvaldība uzlabo augsnes struktūru un mikroorganismu aktivitāti, tādējādi uzlabojot kopējo ekosistēmu noturību. Nākotnes pētījumos jāizstrādā reģionāli pielāgotas stratēģijas Eiropas apstākļiem.

Kopīgais pētniecības centrs 2024. gada 230 zinātnisko avotu metaanalīze apkopo kvantitatīvus rezultātus par dažādu ilgtspējīgu lauksaimniecības prakšu ietekmi uz SEG emisijām, augsnes organisko oglekli un barības vielu zudumiem [135], piemēram:

- bioogļu pievienošana uzlabo oglekļa uzkrāšanu un mazina N₂O emisijas līdz pat 40 %;
- starpkultūras uzlabo augsnes oglekļa bilanci par ~0,3–0,4 t C/ha/gadā;
- organiskā mēslošana veicina oglekļa uzkrāšanos augsnē un samazina NH₃ emisijas līdz 35 %;
- samazināta augsnes apstrāde nodrošina SEG emisiju samazinājumu un augsnes struktūras uzlabošanu.

Šie rezultāti kalpo par pamatu politikas veidotājiem praksēs balstītu lēmumu pieņemšanā un ietekmes novērtēšanā dažādos reģionos.

4.19. attēls.

Ilgtspējīgas lauksaimniecības prakšu ietekme.

4.2.5. Pasākumi klimata pārmaiņu mazināšanai – klimatsaprātīga lauksaimniecība

Latvijas lauksaimniecības sektoram ir būtiska loma gan valsts ekonomiskajā attīstībā, gan SEG emisiju kontekstā. Ņemot vērā ES zaļā kursa mērķus un NEKP uzdevumus, vairāki politikas instrumenti

Latvijā ir vērsti uz SEG emisiju samazināšanu, zemes ilgtspējīgu apsaimniekošanu un oglekļa piesaistes potenciāla palielināšanu.

Atbalsts mēslošanas plānošanā, īpaši organiskiem mēslošanas līdzekļiem

Mēslošanas plānošana, īpaši attiecībā uz organisko mēslojumu, ir viens no būtiskākajiem priekšnosacījumiem ilgtspējīgai un uz emisiju mazināšanu vērstai lauksaimniecībai. SEG emisiju kontekstā šis pasākums galvenokārt mērķēts uz slāpekļa oksīda (N_2O) emisiju samazināšanu, kas rodas nepietiekami pārvaldītas kūtsmēslu un viršanas izmantošanas rezultātā.

Klimata un enerģētikas ministrijas definētajā atbalsta pasākumā paredzēts, ka saimniecībām, kurās ir vismaz 30 dzīvnieku vienības, jāizstrādā mēslošanas plāns, īpašu uzmanību veltot organisko mēslošanas līdzekļu efektīvai izmantošanai. Saskaņā ar aprēķinu metodiku viena dzīvnieku vienība (govs) gada laikā rada vidēji 18,3 kg slāpekļa. Ja šis slāpekļis netiek pārvaldīts atbilstoši noteiktam mēslošanas plānam, tas pārtop par potenciāli emitējamu N_2O . Pieņemot, ka precīzas plānošanas rezultātā iespējams novērst 20 % no emisiju apjoma, emisiju samazinājums uz vienu dzīvnieku vienību var sasniegt 3,66 kg slāpekļa gadā. Pārrēķinot šo daudzumu CO_2 ekvivalentā, izmantojot IPCC 2006. gada emisijas koeficientus, iegūtais ietaupījums ir aptuveni 1,1 t CO_2 ekv. uz 30 dzīvnieku vienībām gadā. Ja pasākums tiek īstenots visās mērķsaimniecībās, kopējais emisiju samazinājums var sasniegt līdz 3,3 kt CO_2 ekv. gadā.

Pasākuma izmaksas ietilpst konsultatīvais atbalsts, mēslošanas plāna izstrāde un apmācību nodrošināšana, un tās tiek lēstas aptuveni 5 EUR/ha apmērā. Piemēram, saimniecībai ar 200 hektāriem šis izmaksas veido 1000 EUR gadā. Salīdzinājumā ar iespējamo emisiju ietaupījumu un ilgtermiņā saglabātu augsnes auglību šis ieguldījums uzskatāms par ekonomiski pamatotu. Turklāt mēslošanas plāna īstenošana pozitīvi ietekmē arī ūdens kvalitāti, samazinot slāpekļa izskalošanos virszemes un gruntsūdeņos, kas ir būtisks vides kvalitātes kritērijs.

SEG emisiju samazinājuma aspektā šis pasākums klasificējams kā augstas efektivitātes un zemu izmaksu rīcība. Tas nodrošina augstu pārraudzības un izmērāmības līmeni, jo plānošanas rezultātus iespējams verificēt, analizējot slāpekļa ieejas un izlaides datus saimniecībā.

Mēslošanas plānošanas uzlabošana ir būtisks instruments slāpekļa savienojumu emisiju samazināšanai un pārmērīga slāpekļa zuduma novēršanai. Atbalsta pasākumā norādītie nosacījumi uzsver nepieciešamību uzlabot saimniecību izpratni un praktiskās iemaņas organisko mēslojumu, īpaši kūtsmēslu, efektīvā lietošanā. Pielāgojot kūtsmēslu lietojumu atbilstoši augsnes un kultūraugu vajadzībām,

iespējams būtiski samazināt N_2O emisijas un vienlaikus uzlabot barības vielu izmantošanas efektivitāti.

Precīzās sējas tehnoloģiju ieviešana

Tiešās sējas jeb bezaršanas tehnoloģijas ieviešana ir viens no visefektīvākajiem agronomiskajiem paņēmieniem, kas vienlaikus palīdz samazināt SEG emisijas un uzlabot augsnes veselību. Šis pasākums nozīmē atteikšanos no tradicionālās augsnes apstrādes pirms sējas, tā vietā izmantojot tiešo sēšanu ar specializētu sējmašīnu. Šāda prakse ļauj ievērojami samazināt augsnes oglekļa mineralizāciju, tādējādi sekmējot oglekļa uzkrāšanos augsnē.

Aprēķinātais oglekļa piesaistes potenciāls norāda, ka, pārejot no tradicionālās sējas uz tiešo, iespējams panākt aptuveni 0,32 t CO_2 ekv. piesaisti uz vienu hektāru gadā. Ja šo metodi ieviestu vismaz 10 000 ha platībā, kopējais CO_2 piesaistes potenciāls sasniegtu 3,2 kt CO_2 ekv. gadā. Šie dati atbilst IPCC sniegtajām vadlīnijām par lauksaimniecības zemes pārvaldības uzlabojumu ietekmi uz SEG emisijām.

Papildus SEG ieguvumiem pasākums samazina arī degvielas patēriņu par aptuveni 20–30 %, jo nav nepieciešama vairākkārtēja lauku apstrāde ar traktortehniku. Tas savukārt nozīmē tiešo CO_2 emisiju samazināšanu no lauksaimniecības tehnikas, kā arī degvielas izmaksu samazinājumu. Degvielas ietaupījums tiek lēsts 30–40 litru uz hektāru sezonā, kas pie pašreizējām cenām (vidēji 1,5 EUR/L) dod aptuveni 45–60 EUR ietaupījumu uz hektāru.

Pasākuma izmaksas saistītas galvenokārt ar tiešās sējas sējmašīnu iegādi vai nomu, kā arī apmācību un tehnoloģiju ieviešanas atbalstu. Vienas specializētas sējmašīnas cena var sasniegt 50 000–80 000 EUR, taču saimniecības to bieži izmanto kolektīvi vai ar pakalpojumu sniedzēju starpniecību. Līdz ar to neto izmaksas var būt salīdzinoši zemas, ja ieviešanu finansiāli atbalsta valsts vai ES.

Ilgspējas aspektā tiešā sēja arī uzlabo augsnes ūdens noturību un mikrobioloģisko aktivitāti, kas ilgtermiņā stiprina lauksaimniecības pielāgošanās spēju klimata pārmaiņām. Šāds pasākums tiek klasificēts kā strukturāli noturīgs, ilgtspējīgs un ar ilgtermiņa pozitīvu efektu gan SEG emisiju, gan kopējās augsnes veselības kontekstā.

Kopproteīna satura samazināšana barībā

Lopbarības sastāva uzlabošana, īpaši attiecībā uz kopproteīna satura optimizēšanu, ir būtisks risinājums SEG emisiju samazināšanā no dzīvnieku izcelsmes lauksaimniecības. Galvenās emisijas rodas gan fermentācijas procesā dzīvnieku gremošanas traktā, gan no kūsmēsļu apsaimniekošana, īpaši saistībā ar amonjaka (NH_3) un slāpekļa oksīda (N_2O) emisijām.

Pasākuma ietvaros paredzēta barības proteīna līmeņa precizēta noteikšana atbilstoši dzīvnieku vajadzībām, izvairoties no pārmērīga proteīna daudzuma, kas noved pie slāpekļa pārpalikuma ekskrementos. Pēc aprēķiniem viena gov, saņemot barību ar 1 % pārsniegtu kopproteīna līmeni, var radīt papildus 0,5 kg slāpekļa emisiju mēnesī, kas, pārrēķinot ar IPCC koeficientiem, atbilst aptuveni 0,2 t CO₂ ekv. gadā uz vienu dzīvnieku.

Lai noteiktu emisiju samazinājuma potenciālu, izmantots scenārijs, kurā slaucamo govju barības proteīna saturs tiek samazināts no 17 % uz 15,5 %, saglabājot piena produktivitāti, bet ievērojami samazinot slāpekļa zudumus. Šāds samazinājums aptver aptuveni 30 000 govīs, nodrošinot potenciālu emisiju ietaupījumu līdz 6 kt CO₂ ekv. gadā.

Pasākuma efektivitāte cieši saistīta ar barības kvalitātes nodrošināšanu un līdzsvarotu proteīna avotu (piemēram, aminoskābju bagātinātāju) pieejamību. Izmaksas galvenokārt saistītas ar papildu analīzēm un barības pielāgošanu, kas veido aptuveni 15–20 EUR uz vienu dzīvnieku gadā. Tomēr šīs izmaksas daļēji kompensē uzlabota barības izmantošanas efektivitāte un potenciāla piena izslaukuma optimizācija.

SEG emisiju samazināšanas aspektā šis pasākums ir īpaši nozīmīgs intensīvajā lopkopībā, kur barības sastāvam ir tieša un mērāma ietekme uz emisiju apjomu. Papildus SEG samazinājumam tiek mazināts arī amonjaka emisiju ietekme uz vidi, tā samazinot skābo nokrišņu veidošanos un veicinot bioloģiskās daudzveidības saglabāšanu. Dzīvnieku barības sastāva pielāgošana, īpaši samazinot kopproteīna saturu, var veicināt slāpekļa emisiju samazinājumu, galvenokārt amonjaka un N₂O veidā.

Meliorācijas sistēmu atjaunošana

Lauksaimniecības emisiju samazināšanas kontekstā nozīmīgu vietu ieņem arī meliorācijas sistēmu atjaunošana. Ūdens režīma pārvaldība ir tieši saistīta ar SEG emisijām, jo pārmērīgs augsnes mitrums veicina anaerobos procesus un CH₄ un N₂O veidošanos, īpaši organiskajās augsnēs. Vienlaikus slikta drenāža rada problēmas arī kultūraugu augšanas apstākļiem un izraisa lielākus barības vielu zudumus, kas netieši veicina SEG emisiju pieaugumu.

Plānots atjaunot vai pilnveidot esošās meliorācijas sistēmas aptuveni 150 000 ha platībā, koncentrējoties uz efektīvas drenāžas atjaunošanu, grāvju tīrīšanu un caurteku pārbūvi. Pamatojoties uz datiem, uzlabota ūdens atvadišana samazina potenciālo slāpekļa zudumu par 10–20 %, kas atbilst samazinātam N₂O emisiju apjomam līdz pat 0,7 t CO₂ ekv./ha/gadā organiskajās augsnēs un 0,2 t CO₂ ekv./ha/gadā minerālaugsnēs. Līdz ar to emisiju ietaupījums kopumā var sasniegt vairāk nekā 20 kt CO₂ ekv. gadā.

Pasākuma ekonomiskā efektivitāte saistīta ar ilgtermiņa investīcijām infrastruktūrā. Vidējās izmaksas uz vienu hektāru svārstās 500–1000 EUR atkarībā no augsnes apstākļiem, sistēmas stāvokļa un nepieciešamajiem būvdarbiem. Tomēr šie ieguldījumi atmaksājas ilgtermiņā, jo uzlabota meliorācija paaugstina lauksaimniecības ražību par 10–15 % un samazina riskus, kas saistīti ar ilgstošu mitrumu vai sausumu.

SEG samazināšanas aspektā meliorācijas sistēmu atjaunošana sniedz arī netiešus ieguvumus – tā uzlabo arī augsnes struktūru, mazina barības vielu izskalošanos ūdenstilpnēs, samazina fosfora emisijas un atbalsta klimatnoturīgas lauksaimniecības attīstību. Tā ir sistēmiska investīcija ar potenciāli augstu klimata ieguvumu pie noteikuma, ka tiek ņemti vērā augsnes tips un ūdens bilances līdzsvars. Ūdens režīma uzlabošana caur meliorācijas sistēmu rekonstrukciju ir būtiska, lai samazinātu slāpekļa izskalošanos un SEG emisijas. Pastāv riski, kas saistīti ar augsnes pārmērīgu mitrumu, tādēļ īpaša nozīme ir precīzai ūdens apsaimniekošanai. Atjaunojot esošās drenāžas sistēmas un uzlabojot to darbību, iespējams paaugstināt lauksaimniecības produktivitāti un samazināt SEG emisiju riskus mitrās augsnēs.

Bioloģiskās piena lopkopības veicināšana

Bioloģiskās sistēmas pamats ir pamatīgs zāles lopbarības īpatsvars barībā, kas veicina ne tikai zemākas emisijas uz piena vienību, bet arī labāku barības vielu apriti un kūstmēslu pārvaldību. Aprēķini liecina, ka, pārejot uz bioloģisko piena ražošanu, emisijas no vienas govys var samazināties par 15–20 %, kas atbilst apmēram 0,6–0,8 t CO₂ ekv. uz dzīvnieku gadā. Pie nosacījuma, ka pasākums tiek īstenots vismaz 5000 govīm, emisiju ietaupījums kopumā var sasniegt līdz 4 kt CO₂ ekv. gadā.

Svarīgs aspekts ir kūstmēslu apsaimniekošana – bioloģiskās saimniecības biežāk izmanto uzlabotas kompostēšanas un vircas iekļaušanas metodes, kas samazina N₂O emisijas no mēslojuma lietojuma. Vienlaikus samazinās arī atkarība no minerālmēsliem, kas savukārt samazina emisijas, kuras saistītas ar to ražošanu un transportēšanu.

Pasākuma ieviešanas izmaksas ir mainīgas un ir atkarīgas no saimniecības sākotnējā stāvokļa un jau esošās infrastruktūras. Pāreja uz bioloģisko piena ražošanu var prasīt investīcijas gan barības ražošanas, gan sertifikācijas procesos, kuru kopējās izmaksas lēstas ap 300–500 EUR uz vienu dzīvnieku. Tomēr, pateicoties tirgus pieprasījumam pēc bioloģiskiem piena produktiem un pieejamajam valsts vai ES fondu atbalstam, šis ieguldījums uzskatāms par ekonomiski attaisnotu.

Papildus SEG emisiju mazināšanai bioloģiskā lopkopība veicina arī augsnes auglības uzlabošanu, bioloģiskās daudzveidības saglabāšanu un vietējo resursu izmantošanu, kas ilgtermiņā stiprina lauku teritoriju noturību pret klimata pārmaiņu riskiem. Bioloģiskās saimniecības pieeja piena lopkopībā veicina emisiju samazināšanu, samazinot barības vielu un pesticīdu ievadi, kā arī uzlabojot kūsmēsļu pārvaldību. Bioloģiskā piena lopkopība arī sekmē lauku ekonomisko dzīvotspēju, nodrošinot pievienotās vērtības produktiem zemu emisiju pēdu.

Ilgtspējīga lauksaimniecība un bioloģiskas izcelsmes materiālu izmantošana

Ilgtspējīgas lauksaimniecības attīstība ietver arī bioloģiskās izcelsmes materiālu izmantošanu, tostarp lauksaimniecības atkritumu pārstrādi biopolimēros. Šāda pieeja vienlaikus samazina plastmasas piesārņojumu un veicina aprites bioekonomiku. Kā norādīts pētījumā [136], agrobiopolimēri ir perspektīvs virziens, kas ļauj integrēt atkritumu samazināšanu, SEG emisiju mazināšanu un pievienotās vērtības produktu radīšanu no lauksaimniecības atlikumiem [136].

4.3. Klimata pārmaiņu mazināšanas ilgtspējas vērtējums

4.3.1. Saikne ar ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķiem

Lauksaimniecības SEG emisiju mazināšanas pasākumiem ir cieša saikne ar vairākiem Apvienoto Nāciju Organizācijas Ilgtspējīgas attīstības mērķiem (IAM), īpaši tiem, kas vērsti uz klimata rīcību, resursu ilgtspējīgu pārvaldību, pārtikas nodrošinājumu un vides aizsardzību.

IAM 2 – izskaust badu, panākt pārtikas nodrošinājumu un veicināt ilgtspējīgu lauksaimniecību.

Klimatsaprātīga un oglekli piesaistoša lauksaimniecība stiprina pārtikas ražošanas sistēmu noturību pret klimata pārmaiņām. Šāda pieeja veicina ilgtspējīgu ražošanu, uzlabo augsnes auglību un palīdz uzturēt pārtikas pieejamību ilgtermiņā, vienlaikus mazinot SEG emisijas.

IAM 12 – nodrošināt ilgtspējīgu patēriņa un ražošanas modeli.

Resursu efektīvas pārvaldības prakses, tostarp precīzās lauksaimniecības tehnoloģiju ieviešana, mēslojuma optimizācija un augsnes uzraudzība, palīdz samazināt pārtikas ražošanas vides nospiedumu, veicinot aprites ekonomikas principu ieviešanu lauksaimniecībā.

IAM 13 – veikt steidzamus pasākumus cīņai pret klimata pārmaiņām un to ietekmi.

Zemkopības un lopkopības SEG emisiju samazināšana, oglekļa piesaistes veicināšana augsnē un emisiju monitorings veicina gan Latvijas, gan ES kopējo mērķu sasniegšanu klimata jomā, tostarp klimatneitralitātes nodrošināšanu līdz 2050. gadam.

IAM 15 – aizsargāt, atjaunot un veicināt sauszemes ekosistēmu ilgtspējīgu izmantošanu.

Lauksaimniecības pasākumi, piemēram, ilggadīgo zālāju un mitrāju saglabāšana, kūdras augsnes saudzīga apsaimniekošana un bioloģiski daudzveidīgas ainavas uzturēšana, sniedz ieguldījumu bioloģiskās daudzveidības saglabāšanā un augsnes ekosistēmas funkciju nodrošināšanā.

Papildus tam emisiju pārvaldības pasākumiem ir netieša pozitīva ietekme uz šādiem IAM:

- IAM 6 – tīrs ūdens un sanitārija, jo uzlabota mēslojuma lietošana un zemes apsaimniekošana samazina izskalojuma un ūdens piesārņojuma riskus;
- IAM 8 – cieņpilns darbs un ekonomikas izaugsme, veicinot jaunas darbvietas “zaļajās” tehnoloģijās, datu pārvaldībā un oglekļa piesaistes sistēmās lauksaimniecībā.

4.3.2. Izturētspējas un ilgtspējas rādītāji

Lauksaimniecības sektors aizvien biežāk saskaras ar klimata pārmaiņu realitāti, kas rada nopietnus izaicinājumus, ietekmējot pārtikas nodrošinājumu un iztikas līdzekļus visā pasaulē. Mainoties klimatiskajiem apstākļiem un pieaugot to neparedzamībai, lauksaimniecības prakses izturētspēja un pielāgošanās spēja kļūst ne tikai vēlama, bet būtiska ilgtspējīgai attīstībai. Daudzi pētījumi liecina, ka klimata pārmaiņas negatīvi ietekmē ūdens resursus un lauksaimniecības produktivitāti, izraisot ražas samazināšanos un pieaugošu pārtikas trūkumu [137], [138]. Reģioni, kas ir ļoti atkarīgi no klimatsensitīvām kultūrām, nonāk īpaši neaizsargātā stāvoklī, jo pieaug temperatūra, kļūst biežāki ekstrēmi laikapstākļi, piemēram, sausuma periodi un plūdi [139], [140], [141].

SEG emisiju mazināšanas pasākumu izvērtēšanā būtiska ir indikatoru daudzveidība – kvantitatīvie un kvalitatīvie rādītāji nodrošina vispusīgu priekšstatu par emisiju ietekmi un politikas efektivitāti. Šāda pieeja ļauj identificēt vispiemērotākos pasākumus dažādos nozares segmentos [142].

Turklāt nelielo zemnieku saimniecību īpašnieki, kas veido būtisku daļu no pārtikas ražotājiem pasaulē, ir īpaši pakļauti klimata radītiem riskiem. Viņu unikālie sociāli ekonomiskie apstākļi un ierobežotie resursi būtiski ietekmē viņu spēju pielāgoties mainīgajiem klimatiskajiem apstākļiem [143]. Pētījumi liecina, ka efektīvas pielāgošanās stratēģijas var ievērojami paaugstināt izturētspēju

lauksaimniecības kopienās. Šādas stratēģijas ietver klimatsaprātīgu lauksaimniecības prakšu ieviešanu, atbilstošu kultūraugu izvēli, kultūru dažādošanu un uzlabotas ūdens apsaimniekošanas metodes, kas var palīdzēt mazināt klimata pārmaiņu nelabvēlīgo ietekmi uz lauksaimniecības ražošanu [144], [145].

Tāpat būtiska loma ir institucionālajiem ietvariem, kas veicina pielāgošanās stratēģiju īstenošanu. Politikas, kas sekmē koordinētu rīcību starp valsts iestādēm, bieži vien nodrošina efektīvākas klimata pārmaiņu pielāgošanās iniciatīvas [146], [139]. Tas var ietvert finansiālu atbalstu pētniecībai un izturētspējīgu lauksaimniecības prakšu attīstībai, vietējo kopienu aktīvāku iesaisti plānošanas procesos, kā arī ieguldījumus infrastruktūrā, lai uzlabotu resursu pieejamību. Efektīva pielāgošanās prasa ne tikai lokālu rīcību, bet arī spēcīgas pārvaldības struktūras, kas spēj integrēt klimata pārmaiņu apsvērumus nacionālajā lauksaimniecības politikā [146], [147].

Turklāt pielāgošanās jautājums sniedz tālāk par lokālām lauksaimniecības praksēm un ietver plašākas sabiedrības pārmaiņas. Klimata pielāgošanās stratēģiju un sociāli ekonomisko faktoru krustpunkts akcentē nepieciešamību pēc lielākas izpratnes par to, kā klimata mainīgums ietekmē lauku kopienas atšķirīgi, atkarībā no to specifiskās ievainojamības un pielāgošanās kapacitātes [148], [149]. Pētnieki uzsver, ka pielāgošanās stratēģijām jābūt kontekstuāli specifiskām, pielāgotām katras lauksaimniecības sistēmas un konkrētās vietas vajadzībām un izaicinājumiem [150], [151].

Politikas lēmumu pieņemšanā noderīgu rādītāju definēšanai nepieciešamas daudzlīmeņu modelēšanas pieejas, kas iekļauj gan ekonomiskos, gan ekoloģiskos kritērijus. Luksta u. c. [152] piedāvā bioresursu vērtības modeli, kas ļauj analizēt alternatīvus scenārijus kultūraugu ražošanas nozarē un novērtēt pievienotās vērtības radīšanas potenciālu Latvijas apstākļos [152].

Pētījumi Latvijā rāda, ka ilgtspējīgas augsnes apsaimniekošanas prakses, piemēram, tiešā sēja, starpkultūru audzēšana un bioloģisko mēslošanas līdzekļu izmantošana, būtiski sekmē SEG emisiju

4.20. attēls.

Ilgtspējīgas lauksaimniecības rādītāji.



mazināšanu un oglekļa uzkrāšanu. Šīs pieejas vienlaikus atbalsta arī pāreju uz klimatneitrālu lauksaimniecību [153].

Noslēgumā jāsecina, ka klimata pārmaiņu ietekmes risināšana lauksaimniecības sektorā, izmantojot efektīvas izturētspējas un pielāgošanās stratēģijas, ir daudzdimensionāls izaicinājums, kas prasa koordinētu sadarbību starp dažādiem pārvaldības līmeņiem, ieguldījumus inovatīvās lauksaimniecības praksēs un iekļaujošu pieeju, kas atzīst lauksaimnieku dažādās pieredzes. Šo nopietno izaicinājumu priekšā kļūst skaidrs, ka pielāgošanās kapacitātes stiprināšana lauksaimniecībā ir pamatnosacījums ne tikai pārtikas drošības uzturēšanai, bet arī lauksaimniecības prakses ilgtspējai nākotnes nenoteiktības apstākļos.

4.3.3. Aprites cikla analīze lauksaimniecības praksē

Pāreja uz zemas oglekļa emisijas ekonomiku prasa būtiskas pārmaiņas daudzos sektoros, un lauksaimniecība šajā procesā ieņem īpaši nozīmīgu lomu, ņemot vērā tās būtisko ieguldījumu SEG emisijās. Lauksaimniecības sektors ir atzīts par vienu no galvenajiem dalībniekiem globālajās klimata pārmaiņās, jo tas rada ievērojamu daļu no antropogēnajām SEG emisijām, īpaši CO₂, CH₄ un N₂O [154], [155]. Lai risinātu šos izaicinājumus, aprites cikla analīzes (*Life Cycle Assessment – LCA*) pieeja ir kļuvusi par būtisku instrumentu lauksaimniecības prakšu vides ietekmes novērtēšanā visā to dzīves ciklā – no ražošanas līdz patēriņam [156]. *LCA* ieviešana lauksaimniecības sistēmās ne tikai palīdz identificēt SEG emisiju samazināšanas iespējas, bet arī atbalsta ilgtspējīgas prakses, kas atbilst zemas oglekļa emisijas ekonomikas mērķiem [157], [158].

LCA ietvars ļauj visaptveroši analizēt enerģijas patēriņu, resursu izsīkumu un emisijas, kas saistītas ar lauksaimniecības ražošanu, tādējādi identificējot kritiskos punktus, kuros nepieciešama iejaukšanās un uzlabošana [159], [160]. Analizējot konkrētas lauksaimniecības prakses, piemēram, slāpekļa mēslojuma lietošanu un aršanas metodes, pētījumi parāda, ka atšķirīgas apsaimniekošanas pieejas var būtiski ietekmēt lauksaimniecības produktu oglekļa pēdas nospiedumu. Tāpēc šo prakšu optimizācija ir daudzsološs veids, kā samazināt SEG emisijas un virzīt sektoru uz zemas oglekļa emisijas attīstības ceļu [155], [158].

Zemas emisijas prakses ieviešana lauksaimniecībā nozīmē inovatīvu tehnoloģiju un apsaimniekošanas stratēģiju integrēšanu, kas pielāgotas konkrētiem vietējiem apstākļiem, kā arī plašāku reģionālu pielāgošanos klimata pārmaiņu ietekmei. Tam nepieciešama lauksaimnieku, politikas veidotāju un agronomu sadarbība, lai izstrādātu un ieviestu ilgtspējīgus risinājumus, kas vienlaikus uzlabo noturību un samazina vides ietekmi [161], [149]. Piemēram, klimatsaprātīga

lauksaimniecība ir atzīta par nozīmīgu pieeju, kas vienlaikus risina gan klimata pārmaiņu mazināšanu, gan nepieciešamību pēc pielāgošanās [162]. Tā uzsver prakses, kas ir ekonomiski izdevīgas, videi ilgtspējīgas un sociāli pieņemamas, padarot to par svarīgu instrumentu pārtikas drošības nodrošināšanā mainīgā klimatā [163].

Biogāzes ražošanas vides ietekmes novērtēšanai piemērota oglekļa bilances metode, kas iekļauj visas būtiskākos emisiju komponentus, tostarp digestāta izmantošanu. Latvijā veiktajā pētījumā [164] pierādīts, ka biogāzes ražošana no kukurūzas var novērst līdz 1,86 kg CO₂ ekv. emisiju uz katru saražoto kubikmetru biogāzes, ja lietoti efektīvi substrātu pārvaldības pasākumi [164].

Ilgtermiņa novērtējuma rīku pilnveidošanai Latvijā izstrādāts saliktais ilgtspējas indekss, kas apvieno vides, ekonomiskos un sociālos rādītājus un ļauj objektīvi salīdzināt organiskās konvencionālās saimniecības dažādos reģionos [165]. SEG kalkulatori un digitāli atbalsta rīki kļūst arvien nozīmīgāka daļa no klimatnoturīgas lauksaimniecības pārvaldības. To salīdzinošais izvērtējums rāda, ka dažādi rīki ievērojami atšķiras pēc lietojamības, precizitātes un ietekmes novērtēšanas metodes, tādēļ būtiska ir šo rīku pielāgošana konkrētiem reģioniem, kā arī to validācija praksē [166].

Vairāku modeļu salīdzinošā analīze lauksaimniecības biorafinērijas kontekstā liecina, ka *LCA* metodoloģija ir visaptverošākais rīks, lai vienlaikus analizētu gan vides, gan ekonomiskos un sociālos aspektus, kas saistīti ar bioresursu ilgtspējīgu izmantošanu [167]. *LCA* pieejā nedrīkst ignorēt arī sociālekonomisko dimensiju. Lauksaimnieku attieksme pret zemas emisijas tehnoloģijām, viņu finansiālās iespējas un gatavība ieviest jauninājumus būtiski ietekmē šo tehnoloģiju veiksmīgu ieviešanu [168], [169]. Piemēram, Dziansu provincē, Ķīnā, pētījumi rāda, ka sociālā integrācija ievērojami ietekmē lauksaimnieku uzvedību attiecībā uz zemas emisijas tehnoloģiju pieņemšanu, kas norāda uz nepieciešamību pēc politikām, kuras stiprina lauksaimnieku sociālos tīklus [168]. Kapacitātes stiprināšana un finansiālu stimulu vai subsīdiu piešķiršana var vēl vairāk veicināt šo tehnoloģiju ieviešanu un tādējādi sekmēt padziļinātas pārmaiņas lauksaimniecības sektorā [169], [170].

Lai izvērtētu iespējamās ceļus zemas oglekļa emisijas lauksaimniecības īstenošanai, nepieciešama sistēmiska pieeja, kas aptver dažādu lauksaimniecības praksi, tirgus dinamiku un vides politikas savstarpējo mijiedarbību. Pētījumi, kuros izmantota lauksaimniecības modeļu salīdzināšanas un pilnveidošanas pieeja, liecina, ka daudzveidīgas stratēģijas un nākotnes scenāriji ir būtiski, lai visaptveroši izvērtētu riskus, noturību un pielāgošanās spējas klimata pārmaiņu apstākļos [158], [171]. Turklāt pārrobežu piegādes ķēžu koordinācijas iespēju izpēte zemas emisijas lauksaimniecības produktiem uzsver nepieciešamību pēc integrētām pieejām, lai nodrošinātu ilgtspēju visā piegādes ķēdē [172].



Noslēgumā jāsecina, ka *LCA* pieejas ieviešana lauksaimniecības sektorā nodrošina stabilu pamatu ilgtspējīgu praksi novērtēšanai un veicināšanai, kas atbilst zemas oglekļa emisijas ekonomikas mērķiem. Izprotot pilnu lauksaimniecības ražošanas dzīves ciklu, iesaistītās puses var izstrādāt mērķētas stratēģijas, lai samazinātu emisijas, uzlabotu produktivitāti un stiprinātu noturību pret klimata pārmaiņām. Sektoram saskaroties ar klimata adaptācijas un mazināšanas izaicinājumiem, inovāciju ieviešana, sabiedrības iesaiste un integrēti politikas risinājumi būs būtiski veiksmīgai pārejai uz ilgtspējīgu un zemu emisiju nākotni.

4.21. attēls.

Dzīves cikla izvērtējuma pieeja lauksaimniecības praksē.

4.3.4. Iespējamā ietekme uz vidi un lauku attīstību

Jaunu lauksaimniecības praksi attīstība, jo īpaši klimatsaprātīgās lauksaimniecības un viedās lauksaimniecības jomā, piedāvā būtisku vides ilgtspējas nodrošināšanas un reģionālās attīstības veicināšanas pārmaiņu potenciālu. Pasaulei saskaroties ar klimata pārmaiņu negatīvo ietekmi, klimatsaprātīgās lauksaimniecības principu ieviešana var būtiski stiprināt lauksaimniecības sistēmu izturētspēju. Šī pielāgošanās ietver kultūraugu dažādošanu, ūdens un augsnes resursu saglabāšanu, kā arī agroekosistēmu noturības paaugstināšanu [173], [174]. Piemēram, klimatsaprātīgās lauksaimniecības prakses integrēšana demonstrē spēju vienlaikus palielināt ražas produktivitāti un risināt klimata mainīguma radītās sarežģītības [175], [176]. Tādējādi inovatīvas lauksaimniecības stratēģijas ne vien veicina pārtikas nodrošinājumu, bet arī veido pamatu ilgtspējīgai ekonomiskajai izaugsmei reģionālajā kontekstā.

Viens no būtiskākajiem klimatsaprātīgās lauksaimniecības aspektiem ir tā spēja mazināt tradicionālās lauksaimniecības radīto vides ietekmi. Pētījumi rāda, ka ilgtspējīgu lauksaimniecības prakšu ieviešana, piemēram, agromežsaimniecība, augu segu izmantošana un barības vielu apsaimniekošanas uzlabošana, efektīvi samazina SEG emisijas, vienlaikus uzlabojot augsnes veselību un bioloģisko daudzveidību [139], [177]. Šīs prakses veicina zemāku oglekļa pēdu reģionālās lauksaimniecības sistēmās un atbalsta virzību uz ilgtspēju, sevišķi pieaugot klimata pārmaiņu spiedienam. Turklāt jaunu tehnoloģiju un pārvaldības metožu ieviešana sekmē pāreju uz zemas emisijas lauksaimniecību, vienlaikus stiprinot reģionālo ekonomiku [156].

Viedā lauksaimniecība, kas balstīta tehnoloģijās, piemēram, izmantojot precīzo lauksaimniecību un datu analītiku, ievērojami ietekmē gan vides rezultātus, gan reģionālo attīstību. Ar modernajām tehnoloģijām uzraugot kultūraugu veselību, augsnes mitrumu un laikapstākļu modeļus, lauksaimnieki var optimizēt resursu izmantošanu, samazināt zudumus un būtiski palielināt ražošanas efektivitāti [178], [179]. Šī ar datiem pamatotā pieeja ne tikai maksimizē ražas apjomus, bet arī palīdz lauksaimniekiem pielāgoties mainīgajiem klimatiskajiem apstākļiem, uzlabojot viņu konkurētspēju lauksaimniecības tirgū. Tādējādi viedā lauksaimniecība aptver ne tikai vides aspektus, bet arī sociālekonomiskās dimensijas, kas ir būtiskas reģionālās attīstības veicināšanai [180], [181].

Vietējā līmenī lauksaimnieku un kopienu iesaiste ilgtspējīgās klimatsaprātīgās praksēs veicina to spēju pielāgoties pārmaiņām. Kopienas iniciatīvas, tostarp apmācību programmas un informatīvas kampaņas, veicina izpratni un pieņemšanu par ilgtspējīgām praksēm, kā rezultātā tās tiek plašāk izmantotas nelielo saimniecību līmenī [182]. Veidojot izturētspēju izglītojot, reģioni var vienlaikus uzlabot lauksaimniecības produktivitāti un risināt gan vides, gan sociālos izaicinājumus [183]. Šī kolektīvā pieeja uzsver vides ilgtspējas un reģionālās attīstības savstarpējo saistību, izceļot nepieciešamību pēc sadarbības, lai veicinātu resursu pārvaldības uzlabojumus un kopīgus ieguvumus [184], [156].

Apkopojot var secināt, ka jaunās lauksaimniecības pieejas, tostarp klimatsaprātīgā un viedā lauksaimniecība, piedāvā nozīmīgas iespējas vides ilgtspējas un reģionālās attīstības veicināšanai. Ieviešot inovatīvas prakses, izmantojot viedās tehnoloģijas un iesaistot kopienas, lauksaimniecības sektors var būtiski palielināt izturētspēju, nodrošinot nākotnes paaudzēm drošu pārtikas sistēmu un plaukstošas reģionālās ekonomikas. Pieejamie pierādījumi liecina par visaptverošu modeli, kas apvieno vides aizsardzību ar sociālekonomisko labklājību – būtisku pamatu klimata pārmaiņu radīto izaicinājumu pārvarēšanai [185], [186].

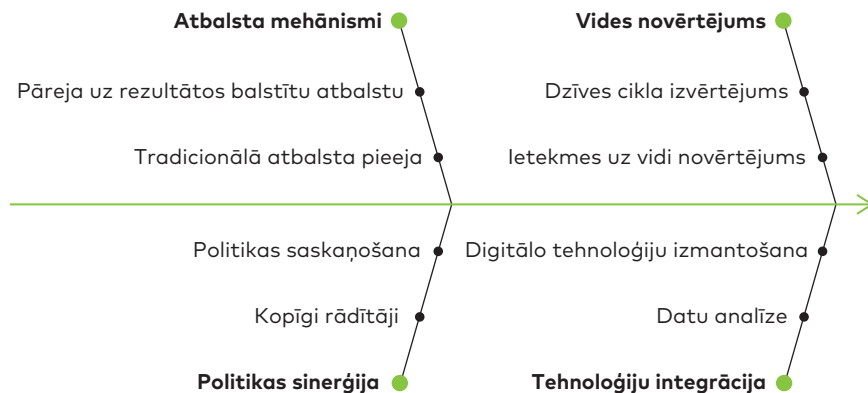
4.3.5. Pārvaldības un politikas sinerģijas – no darbības uz rezultātos balstītu atbalstu

Ilgtermiņīgas lauksaimniecības mērķu sasniegšana klimata pārmaiņu mazināšanas kontekstā prasa konceptuālu pārmaiņu pašos atbalsta mehānismos. Tradicionāli lauksaimniekiem piešķirtais atbalsts ir bijis balstīts noteiktu darbību veikšanā, piemēram, konkrētu agrovides pasākumu ieviešanā vai platību saglabāšanā. Tomēr pēdējos gados gan ES, gan nacionālā līmenī aizvien lielāka uzmanība tiek pievērsta rezultātos balstītai pieejai, kurā būtiska ir tieši faktiskā ietekme uz vidi. Šāda pieeja ne vien nodrošina lauksaimniekiem elastību un inovāciju iespējas, bet arī ļauj mērķtiecīgāk sasniegt ilgtspējas un klimata mērķus.

Rezultātos balstīta atbalsta sistēma sniedz iespēju labāk sinhronizēt dažādus politikas virzienus, piemēram, kopējo lauksaimniecības politiku (KLP), klimata politiku, vides stratēģijas un bioekonomikas attīstības plānus. Šī sinerģija balstīta kopīgi lietojamajos rādītājos, piemēram, augsnes organiskā oglekļa daudzumā, barības vielu cikliskuma rādītājos, SEG emisiju intensitātē vai ūdens noturības spējas pieaugumā. Tā vietā, lai katra politika darbotos izolēti ar saviem kritērijiem, rezultātos balstīta pieeja ļauj veidot pārvaldības sistēmas, kurās dati tiek koplietoti un atbalsts tiek piešķirts, ņemot vērā sasniegto pozitīvo ietekmi uz vidi. Aprites cikla analīze Latvijas lauksaimniecības sektorā ir uzsvērtā kā efektīvs rīks SEG emisiju izvērtēšanai, nodrošinot detalizētus un salīdzināmus rezultātus dažādu ražošanas sistēmu ietvaros [187].

Lai atbalsta mehānismi būtu efektīvi, svarīgi tos papildināt ar zinātniski pamatotu izvērtēšanu. Ietekmes uz vidi novērtējuma metode sniedz iespēju jau pirms atbalsta programmu īstenošanas izvērtēt iespējamo ietekmi uz dažādiem vides komponentiem. Tā ir īpaši nozīmīga, ja iecerēti jauni, neizmantoti risinājumi vai teritorijas izmantošanas maiņa. Savukārt dzīves cikla izvērtējums nodrošina

4.22. attēls. Pārvaldības un politikas sinerģija.



iespēju kvantitatīvi analizēt vides ietekmi visā ražošanas un apsaimniekošanas ciklā – no izejvielu ieguves līdz galaproduktam. Šīs pieejas ir savstarpēji papildinošas, jo ietekmes uz vidi novērtējums ir noderīgs stratēģiskā lēmumu pieņemšanas posmā, savukārt *LCA* ļauj vērtēt konkrētas darbības ietekmi praksē. Stratēģiskā vides novērtējuma izmantošana sniedz iespēju iekļaut vides apsvērumus jau attīstības plānošanas dokumentos, piemēram, valsts vai reģionālās lauku attīstības stratēģijās.

Rezultātos balstītie mehānismi lauksaimniecībā sniedz vairākas priekšrocības. Tie dod lauksaimniekiem lielāku izvēles brīvību, motivē inovatīvu praksi un vienlaikus nodrošina konkrētu, pārbaudāmu vides uzlabojumu sasniegšanu. Tā vietā, lai atbalsts tiktu piešķirts par noteiktas prakses ievērošanu, tas tiek balstīts konkrētos rezultātos, piemēram, noteikta mitruma režīma uzturēšana vai bioloģiskās daudzveidības pieaugums. Šāda pieeja gan prasa būtiskas izmaiņas pārvaldības struktūrās: ir jāiegulda precīzās monitoringa sistēmās, datu analizē, rezultātu pārbaudē un ilgtermiņa sekojumā. Daudzi no vides rādītājiem, piemēram, augsnes oglekļa uzkrājums vai SEG emisiju līmenis, nav tieši novērojami īsā termiņā vai prasa modelētu pieeju.

Latvijā līdz šim rezultātos balstītā pieeja ir bijusi ierobežoti ieviesta, tomēr pastāv ievērojams potenciāls tās attīstībai. Īpaši to varētu attiecināt uz augsnes oglekļa piesaistes veicināšanu ilggadīgajos zālajos un daudzgadīgajās kultūrās, barības vielu piesārņojuma samazināšanu ar precīzās lauksaimniecības palīdzību, kā arī mitrāju atjaunošanu oglekļa un bioloģiskās daudzveidības mērķiem. Lai šādas pieejas kļūtu praktiski īstenojamas, jāattīsta valsts līmeņa indikators sistēma, kas būtu saskaņota ar SEG inventarizāciju un LULUCF datu plūsmām. Tāpat svarīgi izmantot digitālās tehnoloģijas: satelītdatus, zemes izmantošanas datubāzes un reāllaika monitoringa rīkus.

Politikas dokumentu analīze liecina, ka Latvijas lauksaimniecības un mežsaimniecības jomā ieviestās stratēģijas bieži trūkst konkrētu, mērāmā rezultātā balstītu rādītāju un integrētas SEG emisiju pārvaldības. Vērtējot NEKP un citu dokumentu mērķu izpildi, atklājas, ka nozīmīga ir koordinācija starp vides, lauksaimniecības un klimata politikām [188].

Reģionālās attīstības stratēģijas, kas integrē CO₂ valorizācijas iespējas, var kalpot par instrumentu gan SEG emisiju samazināšanai, gan lauku ekonomiskās aktivitātes diversifikācijai. Pētījumā uzsvērts, ka CO₂ valorizācija lauku reģionos piedāvā iespējas ilgtspējīgai attīstībai, īpaši bioresursu izmantošanas un politikas sinerģijas ietvaros [189].

Izmantotā literatūra

- [1] Mohammed, S., Alsafadi, K., Takács, I., & Harsányi, E. (2019). Contemporary changes of greenhouse gases emission from the agricultural sector in the EU-27. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 4(4), 282–287. <https://doi.org/10.1080/24749508.2019.1694129>.
- [2] Mielcarek-Bocheńska, P., & Rzeźnik, W. (2021). Greenhouse Gas Emissions from Agriculture in EU Countries—State and Perspectives. *Atmosphere*, 12(11), 1396. <https://doi.org/10.3390/atmos12111396>.
- [3] Kabange, N. R., Lee, J.-H., Kwon, Y., Lee, S.-M., Oh, K.-W., Park, H., Cha, J.-K., Dzorkpe, G. D., Kang, J.-W., & Shin, D. (2023). Mitigating Greenhouse Gas Emissions from Crop Production and Management Practices, and Livestock: A Review. *Sustainability*, 15(22), 15889. <https://doi.org/10.3390/su152215889>.
- [4] Bocean, C. G. (2025). The Role of Organic Farming in Reducing Greenhouse Gas Emissions from Agriculture in the European Union. *Agronomy*, 15(1), 198. <https://doi.org/10.3390/agronomy15010198>.
- [5] Geibel, I., & Freund, F. (2023). The effects of dietary changes in Europe on greenhouse gas emissions and agricultural incomes in Ireland and Denmark. *Environmental Research Letters*, 18(12), 124026. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad0681>.
- [6] Jørgensen, S. L., & Termansen, M. (2016). Linking climate change perceptions to adaptation and mitigation action. *Climatic Change*, 138(1–2), 283–296. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1718-x>.
- [7] Kreft, C., Angst, M., Huber, R., & Finger, R. (2023). Farmers' social networks and regional spillover effects in agricultural climate change mitigation. *Climatic Change*, 176(2). <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03484-6>.
- [8] Van Hoof, S. (2023). Climate Change Mitigation in Agriculture: Barriers to the Adoption of Carbon Farming Policies in the EU. *Sustainability*, 15(13), 10452. <https://doi.org/10.3390/su151310452>.
- [9] Pande, C. B., & Moharir, K. N. (2023). *Application of Hyperspectral Remote Sensing Role in Precision Farming and Sustainable Agriculture Under Climate Change: A Review* (pp. 503–520). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19059-9_21.
- [10] Ejibe, I., Nwankwo, T., Okoye, C., Nwankwo, E., & Scholastica, U. (2024). Advancing environmental sustainability in the creative sectors: A strategic HR framework based on data analytics and eco-innovation. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(3), 050–060. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.3.0659>.
- [11] Popa, D. C., Bălănescu, M., Pasat, A., Marin, M. P., Vidu, L., Laurent, Y., Svrtoka, E., Popa, R. A., & Pogurschi, E. N. (2023). A Platform for GHG Emissions Management in Mixed Farms. *Agriculture*, 14(1), 78. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010078>.
- [12] Bumbiere, K., Pubule, J., Diaz Sanchez, F. A., & Blumberga, D. (2022). Development and Assessment of Carbon Farming Solutions. *Environmental and Climate Technologies*, 26(1), 898–916. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2022-0068>.
- [13] Luksta, I. (2025). Precīzās lauksaimniecības risinājumu pielietošana SEG emisiju mazināšanai [Promocijas darbs, Rīgas Tehniskā universitāte]. RTU Press.
- [14] Metta, M. (2023). Strengthening Multifunctional Agriculture through Digitalisation: Insights from Europe and Japan. *Journal of Rural Problems*, 59(1), 45–52. <https://doi.org/10.7310/arfe.59.45>.
- [15] Bumbiere, K., Diaz Sanchez, F. A., Pubule, J., & Blumberga, D. (2022). Development and assessment of carbon farming solutions. *Environmental and Climate Technologies*, 26(1), 898–916. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2022-0068>.
- [16] Gancone, A., Pubule, J., & Blumberga, D. (2021). Valorization Methodology for Agriculture Sector Climate Change Mitigation Measures. *Environmental and Climate Technologies*, 25(1), 944–954. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2021-0071>.

- [17] Makutėnienė, D., Perkumienė, D., & Makutėnas, V. (2022). Logarithmic mean division index decomposition based on Kaya identity of GHG emissions from agricultural sector in Baltic states. *Energies*, 15(3), 1195. <https://doi.org/10.3390/en15031195>
- [18] Şargu, L., Ignat, G., Timus, A., Prigoreanu, I., & Şargu, N. (2025). Economic and energy assessment of emissions from European agriculture: a comparative analysis of regional sustainability and resilience. *Sustainability*, 17(6), 2582. <https://doi.org/10.3390/su17062582>.
- [19] Gancone, A., Viznere, R., Kaleja, D., Pubule, J., & Blumberga, D. (2022). Towards Climate Neutrality via Sustainable Agriculture in Soil Management. *Environmental and Climate Technologies*, 26(1), 535–547. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2022-0041>.
- [20] Annual European Union greenhouse gas inventory 1990- 2022 and inventory document 2024. EEA/PUBL/2024/046.
- [21] Gancone, A., Viznere, R., Kaleja, D., Pubule, J., & Blumberga, D. (2022). Towards climate neutrality via sustainable agriculture in soil management. *Environmental and Climate Technologies*, 26(1), 535-547. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2022-0041>.
- [22] Mielcarek, P. and Rzeźnik, W. (2021). Greenhouse gas emissions from agriculture in EU countries—state and perspectives. *Atmosphere*, 12(11), 1396. <https://doi.org/10.3390/atmos12111396>
- [23] Englund, O., Mola-Yudego, B., Börjesson, P., Berndes, G., Cederberg, C., Dimitriou, I., ... & Scarlat, N. (2022). Large-scale deployment of grass in crop rotations as a multifunctional climate mitigation strategy.. <https://doi.org/10.31223/x5kw5j>
- [24] Agricultural emissions and projected emissions by EU Member State, European Environmental Agency. Available online: Agricultural emissions and projected emissions by EU Member State | European Environment Agency's home page.
- [25] Warner, D., Tzivilakis, J., Green, A., & Lewis, K. (2016). Rural development program measures on cultivated land in europe to mitigate greenhouse gas emissions – regional “hotspots” and priority measures. *Carbon Management*, 7(3-4), 205-219. <https://doi.org/10.1080/17583004.2016.1214516>.
- [26] Rodrigues, L., Hardy, B., Huyghebaert, B., & Leifeld, J. (2021). Potential agricultural soil carbon sequestration across Europe: a reality check. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-9512>.
- [27] Gancone, A., Pubule, J., & Blumberga, D. (2017). Evaluation of agriculture eco-efficiency in Latvia. *Energy Procedia*, 128, 309–315. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.056>.
- [28] Luksta, I., Pakere, I., Vamža, I., Liberova, V., & Blumberga, D. (2024). Comparative analysis of agricultural emissions across European countries. *Environmental and Climate Technologies*, 28(1), 738-748. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2024-0057>.
- [29] Latvia's National Inventory Document under the UNFCCC and Paris Agreement Greenhouse Gas Emissions in Latvia from 1990 to 2023.
- [30] Dace, E., Muižniece, I., Blumberga, A., & Kaczala, F. (2015). Searching for solutions to mitigate greenhouse gas emissions by agricultural policy decisions – Application of system dynamics modeling for the case of Latvia. *Science of the Total Environment*, 527–528, 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.088>.
- [31] Kopsavilkums par 2020. gada siltumnīcefekta gāzu inventarizāciju, 2020.
- [32] Kopsavilkums par 2022. gada siltumnīcefekta gāzu inventarizāciju, 2022.
- [33] Kopsavilkums par 2024. gada siltumnīcefekta gāzu inventarizāciju, 2024.
- [34] Fall, T., Heiden, K., Smyth, A., & Brym, Z. (2021). Greenhouse gas emissions from subtropical agriculture fields decrease over time. *Experimental Results*, 2. <https://doi.org/10.1017/exp.2020.48>.
- [35] Bumbiere, K., Meikulāne, E., Gravelins, A., Pubule, J., & Blumberga, D. (2023). Progress of the agricultural sector toward climate neutrality: Identification of essential stages. *Sustainability*, 15(14), 11136. <https://doi.org/10.3390/su15141136>.
- [36] Panchasara, H., Samrat, N., & Islam, N. (2021). Greenhouse gas emissions trends and mitigation measures in australian agriculture sector—a review. *Agriculture*, 11(2), 85. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020085>.

- [37] Grewer, U., Nash, J., Gurwick, N., Bockel, L., Galford, G., Richards, M., ... & Wollenberg, E. (2018). Analyzing the greenhouse gas impact potential of smallholder development actions across a global food security program. *Environmental Research Letters*, 13(4), 044003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab0b0>.
- [38] Han, J., Qu, J., Wang, D., & Maraseni, T. (2023). Accounting for and comparison of greenhouse gas (GHG) emissions between crop and livestock sectors in China. *Land*, 12(9), 1787. <https://doi.org/10.3390/land12091787>
- [39] Yue, W., Cai, Y., Xu, L., Tan, Q., & Yin, X. (2016). Adaptation strategies for mitigating agricultural ghg emissions under dual-level uncertainties with the consideration of global warming impacts. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31(4), 961-979. <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1244-4>.
- [40] Jantke, K., Hartmann, M., Rasche, L., Blanz, B., & Schneider, U. (2020). Agricultural greenhouse gas emissions: knowledge and positions of German farmers. *Land*, 9(5), 130. <https://doi.org/10.3390/land9050130>.
- [41] Dou, X. (2018). Low carbon agriculture and ghg emission reduction in China: an analysis of policy perspective. *Theoretical Economics Letters*, 08(03), 538-556. <https://doi.org/10.4236/tel.2018.83038>.
- [42] Ekonomikas ministrija (2020). *Latvijas Nacionālais enerģētikas un klimata plāns 2021.–2030. gadam*. Rīga: EM.
- [43] Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministrija (2020). *ZIZIMM un lauksaimniecības nozares SEG emisiju analīze*. Rīga: VARAM.
- [44] Klimata un enerģētikas ministrija (2023). *NEKP īstenošanas pārskats un emisiju novērtējums*. Rīga: KEM.
- [45] Kopējā lauksaimniecības politika (2023-2027). Eiropas Komisija. KLP (2023–2027) galvenie mērķi – Eiropas Komisija.
- [46] Latvijas KLP stratēģiskais plāns 2023.–2027. gadam. Rīga: Zemkopības ministrija. https://www.zm.gov.lv/lv/latvijas-kopejas-lauksaimniecibas-politikas-strategiskais-plans-2023-2027gadam?utm_source=https%3A%2F%2Fes.search.yahoo.com%2F.
- [47] Vīzija lauksaimniecībai un pārtikai. Eiropas Komisija. Overview Vision agriculture food – European Commission.
- [48] Bartzas G., Doula M., Hliaoutakis A., Papadopoulos N. S., and Tsotsolas N. Low carbon certification of agricultural production using field GHG measurements. Development of an integrated framework with emphasis on mediterranean products.
- [49] Kreft, C., Angst, M., Huber, R. et al. Farmers' social networks and regional spillover effects in agricultural climate change mitigation. *Climatic Change* 176, 8 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03484-6>.
- [50] Voltr, V., Menšík, L., Hlšínský, L., Hruška, M., Pokorný, E., & Pospíšilová, L. (2021). The soil organic matter in connection with soil properties and soil inputs. *Agronomy*, 11(4), 779. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040779>.
- [51] Abdeldaym, E. A., Traversa, A., Cocozza, C., & Brunetti, G. (2018). Effects of a 2-year application of different residual biomasses on soil properties and potato yield. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 46(12). <https://doi.org/10.1002/clen.201800261>.
- [52] Israel, M.A., Amikuzuno, J. & Danso-Abbeam, G. Assessing farmers' contribution to greenhouse gas emission and the impact of adopting climate-smart agriculture on mitigation. *Ecol Process* 9, 51 (2020). <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00249-2>.
- [53] Strapchuk S. I.; Mykolenko O. P. Factors of Sustainable Intensification in Agriculture of Ukraine: Evidence from the Enterprises of the Kharkivska Oblast. *Scientific Bulletin of Mukachevo State University Series Economics* 2021:8:3:9–17. doi: 10.52566/msu-econ.8(3).2021.9-17.
- [54] Armstrong J. H. and Kamieniecki S. Sustainability Policy Research: A Review and Synthesis. *Policy Studies Journal*. 2019:47:S1. doi: 10.1111/psj.12320.
- [55] Promoting carbon farming through the CAP. EEB - The European Environmental Bureau. [Online]. [Accessed 01.04.2024]. Available: <https://eeb.org/library/promoting-carbon-farming-through-the-cap/>.

- [56] Saikanth, D. R. K., Kishore, A. J., Sadineni, T., Singh, V., Upadhyay, L., Kumar, S., ... & Panigrahi, C. K. (2023). A review on exploring carbon farming as a strategy to mitigate greenhouse gas emissions. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(23), 380-388. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i234253>.
- [57] Doukas, Y. E., Salvati, L., & Vardopoulos, I. (2023). Unraveling the European agricultural policy sustainable development trajectory. *Land*, 12(9), 1749. <https://doi.org/10.3390/land12091749>.
- [58] Gadzhiev, N., Khasbulatova, Z. S., & Baysangurova, A. A. (2023). Study of carbon sequestration processes in forestry on carbon farms. *BIO Web of Conferences*, 63, 07006. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20236307006>.
- [59] Rijal, S. (2019). Agroforestry system: approaches for climate change mitigation and adaptation. *Big Data in Agriculture*, 1(2), 23-25. <https://doi.org/10.26480/bda.02.2019.23.25>.
- [60] Van Hoof, S. (2023). Climate change mitigation in agriculture: barriers to the adoption of carbon farming policies in the EU. *Sustainability*, 15(13), 10452. <https://doi.org/10.3390/su151310452>.
- [61] Dumbrell, N. P., Kragt, M., & Gibson, F. (2016). What carbon farming activities are farmers likely to adopt? a best-worst scaling survey. *Land Use Policy*, 54, 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.02.002>.
- [62] Reidsma, P., Wolf, J., Kanellopoulos, A., Schaap, B., Mandryk, M., Verhagen, A., ... & Ittersum, M. v. (2015). Climate change impact and adaptation research requires integrated assessment and farming systems analysis: a case study in the netherlands. *Environmental Research Letters*, 10(4), 045004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/4/045004>.
- [63] Machmuller, M. B., Kramer, M. G., Cyle, K. T., Hill, N., Hancock, D. W., & Thompson, A. (2015). Emerging land use practices rapidly increase soil organic matter. *Nature Communications*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms7995>.
- [64] Nevalainen, O., Niemitalo, O., Fer, I., Juntunen, A., Mattila, T., Koskela, O., ... & Liski, J. (2022). Towards agricultural soil carbon monitoring, reporting, and verification through the field observatory network (fion). *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 11(1), 93-109. <https://doi.org/10.5194/gi-11-93-2022>.
- [65] Avasilaoie, D. I., Calara, M., Brezeanu, P. M., Gruda, N. S., & Brezeanu, C. (2023). The evaluation of carbon farming strategies in organic vegetable cultivation. *Agronomy*, 13(9), 2406. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092406>.
- [66] Scotton, M. (2020). Seed production of semi-natural grasslands: amount and variability in an unfertilized upright brome and a fertilized tall oat-grass meadow. *Grass and Forage Science*, 75(4), 409-423. <https://doi.org/10.1111/gfs.12502>.
- [67] Kasirao, G., P. Himavarsha, Tomar, S., & Sharma, A. (2023). Carbon farming – the healing lungs of future agriculture: a review. *Pollution Research*, 42(03), 331-334. <https://doi.org/10.53550/pr.2023.v42i03.004>.
- [68] Evans, M. C., Carwardine, J., Fensham, R. J., Butler, D., Wilson, K. A., Possingham, H. P., ... & Martin, T. G. (2015). Carbon farming via assisted natural regeneration as a cost-effective mechanism for restoring biodiversity in agricultural landscapes. *Environmental Science & Policy*, 50, 114-129. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.02.003>.
- [69] Melero, S., López-Garrido, R., Murillo, J., & Moreno, F. (2009). Conservation tillage: short- and long-term effects on soil carbon fractions and enzymatic activities under Mediterranean conditions. *Soil and Tillage Research*, 104(2), 292-298. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.04.001>.
- [70] Cavalaris, C. (2023). Rotational tillage practices to deal with soil compaction in carbon farming. *Soil Systems*, 7(4), 90. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7040090>.
- [71] Álvaro-Fuentes, J., López, M., Arrúe, J., & Moret, D. (2009). Tillage and cropping effects on soil organic carbon in Mediterranean semiarid agroecosystems: testing the century model. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 134(3-4), 211-217. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.07.001>.

- [72] Li, Y., Zhou, L., Chang, S., Cui, S., Jagadamma, S., Ghiglieno, Q., ... & Cai, Y. (2020). Residue retention promotes soil carbon accumulation in minimum tillage systems: implications for conservation agriculture. *The Science of the Total Environment*, 740, 140147. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140147>.
- [73] Kyriakarakos, G. (2024). Carbon farming: bridging technology development with policy goals. *Sustainability*, 16(5), 1903. <https://doi.org/10.3390/su16051903>.
- [74] Block, J. (2024). Farmers' willingness to participate in a carbon sequestration program – a discrete choice experiment. *Environmental Management*, 74(2), 332-349. <https://doi.org/10.1007/s00267-024-01963-9>.
- [75] Rosinger, C., Keiblinger, K., Bieber, M., Bernardini, L., Huber, S., Mentler, A., ... & Bodner, G. (2023). On-farm soil organic carbon sequestration potentials are dominated by site effects, not by management practices. *Geoderma*, 433, 116466. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116466>.
- [76] Mihelič, R. (2024). Effects of transitioning from conventional to organic farming on soil organic carbon and microbial community: a comparison of long-term non-inversion minimum tillage and conventional tillage. *Biology and Fertility of Soils*, 60(3), 341-355. <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01796-y>.
- [77] Sae-Tun, O., Keiblinger, K., Rosinger, C., Mentler, A., & Bodner, G. (2022). Characterization of aggregate-stabilized dissolved organic matter release – a novel approach to determine soil health advances of conservation farming systems. *Plant and Soil*, 488(1-2), 101-119. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05713-w>.
- [78] Ghaley, B., Rusu, T., Sandén, T., Spiegel, H., Menta, C., Visioli, G., ... & Henriksen, C. (2018). Assessment of benefits of conservation agriculture on soil functions in arable production systems in Europe. *Sustainability*, 10(3), 794. <https://doi.org/10.3390/su10030794>.
- [79] Paul, C., Bartkowski, B., Dönmez, C., Don, A., Mayer, S., Steffens, M., ... & Helming, K. (2023). Carbon farming: are soil carbon certificates a suitable tool for climate change mitigation?. *Journal of Environmental Management*, 330, 117142. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117142>.
- [80] Begum, K., Zornoza, R., Farina, R., Lemola, R., Álvaro-Fuentes, J., & Cerasuolo, M. (2022). Modeling soil carbon under diverse cropping systems and farming management in contrasting climatic regions in Europe. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.819162>.
- [81] Alcalá-Herrera, R.; Moreno, B.; Aguirrebengoa, M.; Winter, S.; Robles-Cruz, A.B.; Ramos-Font, M.E.; Benítez, E. Role of Agricultural Management in the Provision of Ecosystem Services in Warm Climate Vineyards: Functional Prediction of Genes Involved in Nutrient Cycling and Carbon Sequestration. *Plants* 2023, 12, 527. <https://doi.org/10.3390/plants12030527>.
- [82] Aguilera, E., Guzmán, G. I., & Alonso, A. M. (2014). Greenhouse gas emissions from conventional and organic cropping systems in Spain. i. herbaceous crops. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 713-724. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0267-9>.
- [83] Ghiglieno, I., Simonetto, A., Facciano, L., Tonni, M., Donna, P., Valenti, L., ... & Gilioli, G. (2023). Comparing the carbon footprint of conventional and organic vineyards in northern Italy. *Sustainability*, 15(6), 5252. <https://doi.org/10.3390/su15065252>.
- [84] Drexler, S. and Don, A. (2024). Carbon sequestration potential in hedgerow soils: results from 23 sites in Germany. *Geoderma*, 445, 116878. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116878>.
- [85] Attia, A., Marohn, C., Shawon, A. R., de Kock, A., Strassemer, J., & Feike, T. (2024). Do rotations with cover crops increase yield and soil organic carbon?—a modeling study in southwest Germany. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 375, 109167. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109167>.

- [86] Vicente-Vicente, J. L., García-Ruiz, R., Francaviglia, R., Aguilera, E., & Smith, P. (2016). Soil carbon sequestration rates under Mediterranean woody crops using recommended management practices: a meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 235, 204-214. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.10.024>.
- [87] Kim, J. H., Jobbágy, E. G., Richter, D., Trumbore, S. E., & Jackson, R. B. (2020). Agricultural acceleration of soil carbonate weathering. *Global Change Biology*, 26(10), 5988-6002. <https://doi.org/10.1111/gcb.15207>.
- [88] Doyeni, M. O., Barčauskaitė, K., Buneviciene, K., Venslauskas, K., Navickas, K., Rubežius, M., ... & Tilvikienė, V. (2022). Nitrogen flow in livestock waste system towards an efficient circular economy in agriculture. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 41(3), 701-712. <https://doi.org/10.1177/0734242x221123484>.
- [89] Herrera, R., Moreno, B. G., Aguirrebengoa, M., Winter, S., Robles-Cruz, A. B., Ramos-Font, M. E., ... & Benítez, E. (2023). Role of agricultural management in the provision of ecosystem services in warm climate vineyards: functional prediction of genes involved in nutrient cycling and carbon sequestration. *Plants*, 12(3), 527. <https://doi.org/10.3390/plants12030527>.
- [90] Paul, C., Bartkowski, B., Dönmez, C., Don, A., Mayer, S., Steffens, M., ... & Helming, K. (2023). Carbon farming: are soil carbon certificates a suitable tool for climate change mitigation?. *Journal of Environmental Management*, 330, 117142. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117142>.
- [91] Koppelmäki, K., Lamminen, M., Helenius, J., & Schulte, R. P. (2021). Smart integration of food and bioenergy production delivers on multiple ecosystem services. *Food and Energy Security*, 10(2), 351-367. <https://doi.org/10.1002/fes3.279>.
- [92] Block, J. B., Danne, M., & Mußhoff, O. (2024). Farmers' willingness to participate in a carbon sequestration program – a discrete choice experiment. *Environmental Management*, 74(2), 332-349. <https://doi.org/10.1007/s00267-024-01963-9>.
- [93] Ruf, T. and Emmerling, C. (2022). Biomass partitioning and nutrient fluxes in silphium perfoliatum and silage maize cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 124(3), 389-405. <https://doi.org/10.1007/s10705-022-10242-0>.
- [94] Carter, M. S., Hauggaard-Nielsen, H., Heiske, S., Jensen, M. B., Thomsen, S. T., Schmidt, J. E., ... & Ambus, P. (2011). Consequences of field n₂o emissions for the environmental sustainability of plant-based biofuels produced within an organic farming system. *GCB Bioenergy*, 4(4), 435-452. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01132.x>.
- [95] Wu, F., Pfenninger, S., & Muller, A. (2024). Land-free bioenergy from circular agroecology—a diverse option space and trade-offs. *Environmental Research Letters*, 19(4), 044044. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad33d5>.
- [96] Rosinger, C., Bodner, G., Bernardini, L. G., Huber, S., Mentler, A., Sae-Tun, O., ... & Keiblinger, K. M. (2022). Benchmarking carbon sequestration potentials in arable soils by on-farm research on innovative pioneer farms. *Plant and Soil*, 488(1-2), 137-156. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05626-8>.
- [97] Volungevičius, J., Feiza, V., Amalevičiūtė-Volungė, K., Liaudanskienė, I., Šlepetienė, A., Kuncevičius, A., ... & Poškienė, J. (2019). Transformations of different soils under natural and anthropogenized land management. *Zemdirbyste-Agriculture*, 106(1), 3-14. <https://doi.org/10.13080/z-a.2019.106.001>.
- [98] Chen, X., Hu, Y., Xia, Y., Zheng, S., Ma, C., Rui, Y., ... & Su, Y. (2021). Contrasting pathways of carbon sequestration in paddy and upland soils. *Global Change Biology*, 27(11), 2478-2490. <https://doi.org/10.1111/gcb.15595>.
- [99] Sae-Tun, O., Keiblinger, K. M., Rosinger, C., Mentler, A., Mayer, H., & Bodner, G. (2022). Characterization of aggregate-stabilized dissolved organic matter release – a novel approach to determine soil health advances of conservation farming systems. *Plant and Soil*, 488(1-2), 101-119. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05713-w>.

- [100] Ledo, A., Smith, P., Zerihun, A., Whitaker, J., Vicente-Vicente, J. L., Qin, Z., ... & Hillier, J. (2020). Changes in soil organic carbon under perennial crops. *Global Change Biology*, 26(7), 4158-4168. <https://doi.org/10.1111/gcb.15120>.
- [101] Zucaro, A., Forte, A., Fagnano, M., Bastianoni, S., Basosi, R., & Fierro, A. (2015). Comparative attributional life cycle assessment of annual and perennial lignocellulosic feedstocks production under mediterranean climate for biorefinery framework. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 11(3), 397-403. <https://doi.org/10.1002/ieam.1604>.
- [102] Means, M., Crews, T. E., & Souza, L. (2022). Annual and perennial crop composition impacts on soil carbon and nitrogen dynamics at two different depths. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 37(5), 437-444. <https://doi.org/10.1017/s1742170522000084>.
- [103] Adebisi, J. A., Olabisi, L. S., & Snapp, S. S. (2015). Understanding perennial wheat adoption as a transformative technology: evidence from the literature and farmers. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 31(2), 101-110. <https://doi.org/10.1017/s1742170515000150>.
- [104] Scott, E. I., Toensmeier, E., Iutzi, F., Rosenberg, N., Lovell, S. T., Jordan, N. R., ... & Leib, E. B. (2022). Policy pathways for perennial agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.983398>.
- [105] Danso-Abbeam, G., Amin, K. M., & Ogundeji, A. A. (2022). Enhancing household welfare through perennial crop production in northern Ghana. *Sustainability*, 15(1), 451. <https://doi.org/10.3390/su15010451>.
- [106] Herder, M. d., Moreno, G., Mosquera-Losada, M. R., Palma, J., Sidiropoulou, A., Santiago-Freijanes, J. J., ... & Burgess, P. J. (2017). Current extent and stratification of agroforestry in the European Union. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 241, 121-132. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.005>.
- [107] Tefera, Y. (2019). Potential of agroforestry for climate change mitigation through carbon sequestration: review paper. *Agricultural Research & Technology: Open Access Journal*, 22(3). <https://doi.org/10.19080/artoaj.2019.22.556196>.
- [108] Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P. J., Moreno, G., & Plieninger, T. (2016). Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 230, 150-161. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002>.
- [109] Ahmad, F., Talukdar, N. R., Biradar, C., Dhyani, S. K., & Rizvi, J. (2022). Harnessing the potentiality of farm landscape for trees based on satellite evaluation: a GIS modeling perspective. *Anthropocene Science*, 1(2), 278-294. <https://doi.org/10.1007/s44177-022-00025-1>.
- [110] Visscher, A. M., Meli, P., Fonte, S. J., Bonari, G., Zerbe, S., & Wellstein, C. (2023). Agroforestry enhances biological activity, diversity and soil-based ecosystem functions in mountain agroecosystems of Latin America: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 30(1). <https://doi.org/10.1111/gcb.17036>.
- [111] Jalón, S. G. d., Burgess, P. J., Graves, A., Moreno, G., McAdam, J., Pottier, É., ... & Vityi, A. (2017). How is agroforestry perceived in Europe? An assessment of positive and negative aspects by stakeholders. *Agroforestry Systems*, 92(4), 829-848. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0116-3>.
- [112] Sarkhot, D. V., Berhe, A. A., & Ghezzehei, T. A. (2012). Impact of biochar enriched with dairy manure effluent on carbon and nitrogen dynamics. *Journal of Environmental Quality*, 41(4), 1107-1114. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0123>.
- [113] Wang, J., Xiong, Z., & Kuzyakov, Y. (2015). Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. *GCB Bioenergy*, 8(3), 512-523. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12266>.

- [114] Li, H., Lu, Z., Ma, H., & Jin, S. (2013). Effect of biochar on carbon dioxide release, organic carbon accumulation, and aggregation of soil. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(3), 941-946. <https://doi.org/10.1002/ep.11867>.
- [115] Wang, L., Deng, J., Yang, X., & Hou, D. (2023). Role of biochar toward carbon neutrality. *Carbon Research*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44246-023-00035-7>.
- [116] Biederman, L. A. and Harpole, W. S. (2012). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 5(2), 202-214. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12037>.
- [117] Liu, Q., Liu, B., Zhang, Y., Hu, T., Lin, Z., Liu, G., ... & Xie, Z. (2019). Biochar application as a tool to decrease soil nitrogen losses (nh3 volatilization, n2o emissions, and n leaching) from croplands: options and mitigation strength in a global perspective. *Global Change Biology*, 25(6), 2077-2093. <https://doi.org/10.1111/gcb.14613>.
- [118] Keskinen, R., Hyvälouma, J., Sohlo, L., Help, H., & Rasa, K. (2019). Fertilizer and soil conditioner value of broiler manure biochars. *Biochar*, 1(3), 259-270. <https://doi.org/10.1007/s42773-019-00020-7>.
- [119] Keskinen, R., Hyvälouma, J., Sohlo, L., Help, H., & Rasa, K. (2019). Fertilizer and soil conditioner value of broiler manure biochars. *Biochar*, 1(3), 259-270. <https://doi.org/10.1007/s42773-019-00020-7>.
- [120] Tisserant, A. and Cherubini, F. (2019). Potentials, limitations, co-benefits, and trade-offs of biochar applications to soils for climate change mitigation. *Land*, 8(12), 179. <https://doi.org/10.3390/land8120179>.
- [121] Poeplau, C. and Don, A. (2015). Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – a meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200, 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024>.
- [122] Bumbiere, K. (2024). Carbon Farming Towards Climate Neutrality [Doctoral dissertation, Riga Technical University]. RTU Press.
- [123] Balode, L., Pakere, I., Luksta, I., & Blumberga, D. (2025). Organic versus conventional agriculture: Comparison of economic and environmental sustainability. *Environmental and Climate Technologies*, 29(1), 1-20. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2025-0001>.
- [124] McCauley, K. and Barlow, K. (2023). Regenerative agriculture: increasing plant diversity and soil carbon sequestration on agricultural landscapes. *SURJ Journal*, 15(1). <https://doi.org/10.21083/surg.v15i1.7196>.
- [125] Lugato, E., Bampa, F., Panagos, P., Montanarella, L., & Jones, A. (2014). Potential carbon sequestration of European arable soils estimated by modelling a comprehensive set of management practices. *Global Change Biology*, 20(11), 3557-3567. <https://doi.org/10.1111/gcb.12551>.
- [126] Beillouin, D., Ben-Ari, T., Malézieux, É., Seufert, V., & Makowski, D. (2021). Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services. *Global Change Biology*, 27(19), 4697-4710. <https://doi.org/10.1111/gcb.15747>.
- [127] Gaudin, A. C. M., Tolhurst, T. N., Ker, A. P., Janovicek, K., Tortora, C., Martin, R. C., ... & Deen, W. M. (2015). Increasing crop diversity mitigates weather variations and improves yield stability. *Plos One*, 10(2), e0113261. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113261>.
- [128] Weigel, R., Koellner, T., Poppenborg, P., & Bogner, C. (2018). Crop diversity and stability of revenue on farms in central Europe: an analysis of big data from a comprehensive agricultural census in Bavaria. *Plos One*, 13(11), e0207454. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207454>.
- [129] Ryschawy, J., Choisis, N., Choisis, J., & Gibon, A. (2013). Paths to last in mixed crop-livestock farming: lessons from an assessment of farm trajectories of change. *Animal*, 7(4), 673-681. <https://doi.org/10.1017/s1751731112002091>.
- [130] Conant, R. T., Cerri, C. E. P., Osborne, B. B., & Paustian, K. (2017). Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis. *Ecological Applications*, 27(2), 662-668. <https://doi.org/10.1002/eap.1473>.

- [131] McSherry, M. E. and Ritchie, M. E. (2013). Effects of grazing on grassland soil carbon: a global review. *Global Change Biology*, 19(5), 1347-1357. <https://doi.org/10.1111/gcb.12144>.
- [132] Tessema, B., Sommer, R., Piikki, K., Namirembe, S., Notenbaert, A. M. O., Tamene, L., ... & Paul, B. K. (2020). Potential for soil organic carbon sequestration in grasslands in East African countries: a review. *Grassland Science*, 66(3), 135-144. <https://doi.org/10.1111/grs.12267>.
- [133] Kleppel, G. S. and Frank, D. A. (2022). Structure and functioning of wild and agricultural grazing ecosystems: a comparative review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.945514>.
- [134] Liebig, M. A., Gross, J., Kronberg, S. L., & Phillips, R. (2010). Grazing management contributions to net global warming potential: a long-term evaluation in the northern great plains. *Journal of Environmental Quality*, 39(3), 799-809. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0272>.
- [135] European Commission, Joint Research Centre, Guerrero, I., Bielza Diaz-Caneja, M., Angileri, V., Assouline, M., Bosco, S., Catarino, R., Chen, M., Koeble, R., Lindner, S., Makowski, D., Montero Castaño, A., Perez-Soba Aguilar, M., Schievano, A., Tamburini, G., Terres, J. and Rega, C., Quantifying the Impact of Sustainable Farming Practices on Environment and Climate, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2024, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/20814,JRC137826>.
- [136] Patel, N., Feofilovs, M., & Blumberga, D. (2022). *Agro Biopolymer: A Sustainable Future of Agriculture – State of Art Review*. *Environmental and Climate Technologies*, 26(1), 499–511. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2022-0038>.
- [137] Piao, S., Ciais, P., Huang, Y., Shen, Z., Peng, S., Li, J., ... & Fang, J. (2010). The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 467(7311), 43-51. <https://doi.org/10.1038/nature09364>.
- [138] Vermeulen, S., Campbell, B., & Ingram, J. (2012). Climate change and food systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 37(1), 195-222. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-020411-130608>.
- [139] Singh, A., Pandey, A., Santhosh, D., Ganavi, N., Sarma, A., Deori, C., ... & D, S. (2024). A comprehensive review on greenhouse gas emissions in agriculture and evolving agricultural practices for climate resilience. *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(5), 455-464. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i54206>.
- [140] Nurjati, E. and Adityawati, S. (2024). Climate change adaptation strategy of the agricultural sector in Southeast Asia. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 1414(1), 012066. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1414/1/012066>.
- [141] Harvey, C., Saborío-Rodríguez, M., Martínez-Rodríguez, M., Viguera, B., Chain-Guadarrama, A., Vignola, R., ... & Alpizar, F. (2018). Climate change impacts and adaptation among smallholder farmers in Central America. *Agriculture & Food Security*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s40066-018-0209-x>.
- [142] Pubule, J., Gancone, A., Rosa, M., & Blumberga, D. (2017). Sectoral Greenhouse Gas Emission Mitigation Possibilities: Why Broad Spectrum of Indicators is Applied. *Energy Procedia*, 113, 377–381. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.04.015>.
- [143] Cohn, A., Newton, P., Gil, J., Kuhl, L., Samberg, L., Ricciardi, V., ... & Northrop, S. (2017). Smallholder agriculture and climate change. *Annual Review of Environment and Resources*, 42(1), 347-375. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102016-060946>.
- [144] Karbo, R. and Crentsil, A. (2021). Climate-smart agriculture (CSA) adaptation strategies of farmers against climate change in Lawra municipality, upper west region, Ghana. *Journal of Scientific Research and Reports*, 10-19. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2021/v27i230355>.

- [145] Dirani, A., Abebe, G., Bahn, R., Martiniello, G., & Bashour, I. (2021). Exploring climate change adaptation practices and household food security in the Middle Eastern context: a case of small family farms in central Beka, Lebanon. *Food Security*, 13(4), 1029-1047. <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01188-2>.
- [146] KazákovaMateva, Y. (2023). *Institutions and mandates for climate change adaptation in Bulgarian rural areas*. In *Innovative development of agricultural business and rural areas: Conference proceedings (28–29 September 2023, Sofia)* (pp. 146–155). University of National and World Economy. <https://doi.org/10.37075/idara.2023.14>.
- [147] Esham, M. and Garforth, C. (2013). Climate change and agricultural adaptation in Sri Lanka: a review. *Climate and Development*, 5(1), 66-76. <https://doi.org/10.1080/17565529.2012.762333>.
- [148] Sultana, S., Das, P., Saikia, D., & Barman, I. (2020). Farmers extent of adoption of climate resilient agro-technologies. *International Journal of Environment and Climate Change*, 53-56. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2020/v10i530200>.
- [149] Aryal, J., Sapkota, T., Khurana, R., Khatri-Chhetri, A., Rahut, D., & Jat, M. (2019). Climate change and agriculture in South Asia: adaptation options in smallholder production systems. *Environment Development and Sustainability*, 22(6), 5045-5075. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00414-4>.
- [150] Pathak, T., Maskey, M., Dahlberg, J., Kearns, F., Bali, K., & Zaccaria, D. (2018). Climate change trends and impacts on California agriculture: A detailed review. *Agronomy*, 8(3), 25. <https://doi.org/10.3390/agronomy8030025>.
- [151] Bíró, K. and Kovács, E. (2023). Agro-climatic analysis for agricultural adaptation in Hungary. *Periodica Polytechnica Social and Management Sciences*, 32(2), 141-147. <https://doi.org/10.3311/ppso.22482>.
- [152] Luksta, I., Asaris, P., Feofilovs, M., & Blumberga, D. (2022). Bioresource Value Model: Case of Crop Production. *Environmental and Climate Technologies*, 26(1), 1128–1144. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2022-0085>.
- [153] Gancone, A. (2022). Greenhouse gas assessment tools and life cycle modelling in the context of Latvian agriculture [Doctoral dissertation, Riga Technical University]. RTU Press.
- [154] Rötter, R., Höhn, J., & Fronzek, S. (2012). Projections of climate change impacts on crop production: a global and a Nordic perspective. *Acta Agriculturae Scandinavica Section a – Animal Science*, 62(4), 166-180. <https://doi.org/10.1080/09064702.2013.793735>.
- [155] Hou, J. and Hou, B. (2019). Farmers' adoption of low-carbon agriculture in China: an extended theory of the planned behaviour model. *Sustainability*, 11(5), 1399. <https://doi.org/10.3390/su11051399>.
- [156] Chami, D., Daccache, A., & Moujabber, M. (2020). How can sustainable agriculture increase climate resilience? a systematic review. *Sustainability*, 12(8), 3119. <https://doi.org/10.3390/su12083119>.
- [157] Jin, W., Wu, S., Zhang, Y., Zhou, G., Xu, L., & Xu, Y. (2023). Review on Chinese agricultural science and technology research from a low-carbon economy perspective: hotspots, evolution, and frontiers. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1268432>.
- [158] Mu, J., Antle, J., & Abatzoglou, J. (2019). Representative agricultural pathways, climate change, and agricultural land uses: an application to the Pacific Northwest of the USA. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24(5), 819-837. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9834-8>.
- [159] Wang, Z., Wen, X., Zhang, H., Lu, X., & Chen, F. (2015). Net energy yield and carbon footprint of summer corn under different n fertilizer rates in the North China plain. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(8), 1534-1541. [https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(15\)61042-5](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(15)61042-5).

- [160] Wang, Z., Zhang, H., Lu, X., Wang, M., Chu, Q., Wen, X., ... & Chen, F. (2016). Lowering carbon footprint of winter wheat by improving management practices in north China plain. *Journal of Cleaner Production*, 112, 149-157. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.084>
- [161] Gerasimova, M., Pismenskaya, Y., & Modina, M. (2024). Effect of climate change trends on viticulture in the region. *Bio Web of Conferences*, 103, 00007. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410300007>
- [162] Antle, J., Homann-KeeTui, S., Descheemaeker, K., Masikati, P., & Valdivia, R. (2017). Using agmip regional integrated assessment methods to evaluate vulnerability, resilience and adaptive capacity for climate smart agricultural systems., 307-333. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61194-5_14
- [163] Arslan, A., McCarthy, N., Lipper, L., Asfaw, S., Cattaneo, A., & Kokwe, M. (2015). Climate smart agriculture? Assessing the adaptation implications in Zambia. *Journal of Agricultural Economics*, 66(3), 753-780. <https://doi.org/10.1111/1477-9552.12107>
- [164] Bumiere, K., Gancone, A., Pubule, J., & Blumberga, D. (2021). Carbon Balance of Biogas Production from Maize in Latvian Conditions. *Agronomy Research*, 19(S1), 687-697. <https://doi.org/10.15159/AR.21.085>
- [165] Balode, L. (2025). Climate and energy measures evaluation with composite sustainability index [Doctoral dissertation, Riga Technical University]. RTU Press.
- [166] Dzalbs, A., Bimbere, M., Pubule, J., & Blumberga, D. (2023). Environmental impact decision support tools for horticulture farming: Evaluation of GHG calculators. *Agriculture*, 13(12), 2213. <https://doi.org/10.3390/agriculture13122213>
- [167] Patel, N., Feofilovs, M., & Blumberga, D. (2022). Evaluation of bioresource value models: Sustainable development in the agriculture biorefinery sector. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, 100367. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100367>
- [168] Hua-wei, Z., Ma, J., Zhao-yu, Y., & Hu, F. (2022). How does social embeddedness affect farmers' adoption behavior of low-carbon agricultural technology? evidence from Jiangsu province, China. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.909803>
- [169] Zhao, D. and Hong, Z. (2021). Livelihoods, technological constraints, and low-carbon agricultural technology preferences of farmers: analytical frameworks of technology adoption and farmer livelihoods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(24), 13364. <https://doi.org/10.3390/ijerph182413364>
- [170] Liu, L., Zhu, Y., & Guo, S. (2020). The evolutionary game analysis of multiple stakeholders in the low-carbon agricultural innovation diffusion. *Complexity*, 2020, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2020/6309545>
- [171] Rosenzweig, C., Jones, J., Hatfield, J., Ruane, A., Boote, K., Thorburn, P., ... & Winter, J. (2013). The agricultural model intercomparison and improvement project (agmip): protocols and pilot studies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 166-182. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.011>
- [172] Liu, Z., Huang, N., Hu, B., Sun, W., Shi, L., Zhao, Y., ... & Han, C. (2024). Cross-border supply chain coordination of low-carbon agricultural products under the risk of supply uncertainty. *Plos One*, 19(10), e0309763. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0309763>
- [173] Naik, A., Jogi, M., & Shreenivas, B. (2024). Assessing the impact of climate change on global crop yields and farming practices. *Archives of Current Research International*, 24(5), 696-712. <https://doi.org/10.9734/acri/2024/v24i5743>
- [174] Dev, P., Khandelwal, S., Yadav, S., Arya, V., & Mali, H. (2023). Climate based smart agriculture: need for food security and sustainability. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(3), 224-231. <https://doi.org/10.9734/ijec/2023/v13i31702>

- [175] Wang, Y., Morkūnas, M., & Wei, J. (2024). Mapping the landscape of climate-smart agriculture and food loss: a bibliometric and bibliographic analysis. <https://doi.org/10.20944/preprints202404.0983.v1>.
- [176] Halder, N. and A. R. (2023). Sustainable and climate smart agriculture for food security: a review. *Journal of Experimental Agriculture International*, 45(11), 229-239. <https://doi.org/10.9734/jeai/2023/v45i112253>.
- [177] Akanmu, A., Akol, A., Ndolo, D., Kutu, F., & Babalola, O. (2023). Agroecological techniques: adoption of safe and sustainable agricultural practices among the smallholder farmers in Africa. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1143061>.
- [178] Agnese, F. and Othman, Z. (2019). Response to climate change impact on paddy farming: the system of rice intensification (sri). *Journal of Technology and Operations Management*, 14(Number 1), 43-53. <https://doi.org/10.32890/jtom2019.14.1.5>.
- [179] Loboguerrero, A., Campbell, B., Cooper, P., Hansen, J., Rosenstock, T., & Wollenberg, E. (2019). Food and earth systems: priorities for climate change adaptation and mitigation for agriculture and food systems. *Sustainability*, 11(5), 1372. <https://doi.org/10.3390/su11051372>.
- [180] Verma, S., Singh, A., Pradhan, S., & Kushwaha, M. (2024). Impact of climate change on agriculture: a review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(3), 615-620. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i34069>.
- [181] Kundu, B. and Kumar, R. (2024). Enhancing crop resilience to climate change through biochar: a review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(6), 170-184. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i64219>.
- [182] Sarie, F., Mohammad, W., Suparwata, D., & Jamin, F. (2023). Evaluation of the effect of climate change factors, sustainable agricultural practices, and community involvement on sustainable agricultural productivity: a case study on rice farmers in Cianjur area. *WSA*, 1(01), 15-20. <https://doi.org/10.58812/wsa.v1i01.376>.
- [183] Li, W., Chang, Y., & Zhang, Y. (2024). Analysis on the impact of agricultural modernization development on environmental pollution in Xinjiang., 113. <https://doi.org/10.1117/12.3044583>.
- [184] Mohod, N., Ashoka, P., Borah, A., Goswami, P., Koshariya, A., Sahoo, S., ... & Prabhavathi, N. (2023). The international year of millet 2023: a global initiative for sustainable food security and nutrition. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(19), 1204-1211. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i193659>.
- [185] Mathews, J., Kruger, L., & Wentink, G. (2018). Climate-smart agriculture for sustainable agricultural sectors: the case of Mooifontein. *Jambá Journal of Disaster Risk Studies*, 10(1). <https://doi.org/10.4102/jamba.v10i1.492>.
- [186] Morkūnas, M. and Baležentis, T. (2021). Is agricultural revitalization possible through the climate-smart agriculture: a systematic review and citation-based analysis. *Management of Environmental Quality an International Journal*, 33(2), 257-280. <https://doi.org/10.1108/meq-06-2021-0149>.
- [187] Dace, E., & Blumberga, D. (2016). How do 28 European Union Member States perform in agricultural greenhouse gas emissions? It depends on what we look at: Application of the multi-criteria analysis. *Ecological Indicators*, 71, 352-358. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.016>.
- [188] Balode, L., & Blumberga, D. (2023). Evaluating the effectiveness of agricultural and forestry policies in achieving environmental goals through policy documents. *Environmental and Climate Technologies*, 27(1), 195-211. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2023-0015>.
- [189] Terjanika, V., Gusca, J., Pubule, J., & Blumberga, D. (2021). Analysis of CO2 Valorisation Options for Regional Development. *Environmental and Climate Technologies*, 25(1), 243-253. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2021-0017>.

Ievads

- 01** Enerģētikas sektors
- 02** Transporta sektors
- 03** Rūpniecības sektors
- 04** Lauksaimniecības sektors

05	ZIZIMM	214
5.1.	Globālais oglekļa cikls un <i>AFOLU</i> sektors	215
5.1.1.	ZIZIMM sektors un oglekļa cikls ZIZIMM sektorā	217
5.1.2.	ZIZIMM sektora SEG emisijas ES un Latvijā	221
5.2.	ZIZIMM sektora SEG emisiju audits Latvijā	228
5.2.1.	Emisiju un piesaistes aprēķina metodoloģijas ZIZIMM sektorā	228
5.2.2.	Oglekļa krājas izmaiņas (CRF – 4A, 4B, 4C, 4D, 4E)	232
5.2.3.	Nocirstie koksnes produkti (NKP) (CRF 4Gs)	241
5.2.4.	Augsnes nosusināšana, mitrināšana vai cita apsaimniekošana (CRF 4II)	243
5.2.5.	Tiešās un netiešās N ₂ O emisijas no slāpekļa mineralizācijas/imobilizācijas (CRF 4III)	247
5.2.6.	Emisijas no biomasas dedzināšana (CRF 4IV)	247
5.3.	Klimata pārmaiņu mazināšanas tehnoloģiskie risinājumi	249
5.3.1.	Apmežošanas pasākumi	250
5.3.2.	Meža apsaimniekošanas uzlabošanas pasākumi	251
5.3.3.	Agromežsaimniecības pasākumi	254
5.3.4.	Bioogles izmantošana aramzemē	257
5.3.5.	Ilgspējīgas koksnes produktu ražošana un izmantošanas pasākumi	258
5.4.	Klimata pārmaiņu mazināšanas ilgtspējas vērtējums ZIZIMM	260
5.4.1.	Saikne ar ANO ilgtspējīgas attīstības mērķiem	260
5.4.2.	Dzīves cikla analīze kā instruments ilgtspējas novērtēšanai	267

- 06** Atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektors

Izmantotā literatūra
Summary

Pirms ZIZIMM sektora SEG emisiju un oglekļa piesaistes bilances analīzes ir jāizprot globālais oglekļa cikls. Tas ļauj aptvert, kā tiek pārvaldītas oglekļa plūsmas un kā cilvēka darbība ietekmē emisijas un oglekļa piesaisti [1]. Oglekļa cikls ir sarežģīta sistēma, kas iekļauj dažādu krātuvju mijiedarbību, un jebkuras izmaiņas šajos procesos var ievērojami ietekmēt oglekļa plūsmas un globālo klimatu [2], [3].

5.1. Globālais oglekļa cikls un AFOLU sektors

Ogleklis ir dzīvības pamats uz Zemes. Mēs esam veidoti no oglekļa, mēs ēdam oglekli, mūsu civilizācija – ekonomika, transportlīdzekļi – ir balstīti ogleklī.

Oglekļa plūsma raksturo oglekļa daudzumu, kas tiek pārvietots starp dažādām krātuvēm, veidojot oglekļa cirkulāciju starp sauszemes virsmu, dzīvajiem organismiem, okeānu un atmosfēru. Šīs plūsmas raksturo globālo oglekļa aprites ciklu. Pastāv piecas galvenās oglekļa krātuves: atmosfēra, okeāni, biosfēra, augsne, kas atrodas virs zemes pamatieža, un fosilie resursi [4]. Lielākā no šīm krātuvēm ir okeāni, kas uzkrāj aptuveni 37 000 Gt oglekļa (aptuveni 80 % no Zemes oglekļa krājas), un šis apjoms katru gadu palielinās. Otra lielākā krātuve ir fosilie resursi jeb ģeoloģiskās krātuves, kur ogleklis tiek noglabāts naftas, akmeņogļu un dabasgāzes veidā. Jāapzinās, ka šī krātuve veido aptuveni 40 % no globālajām CO₂ emisijām fosilo resursu dedzināšanas un apstrādes dēļ. Lieluma ziņā trešā ir augšnes (līdz 1 m dziļumam (pedosfēra)) oglekļa krātuve, kas uzkrāj gan organisko, gan neorganisko oglekli. Savukārt atmosfēra un biosfēra ir salīdzinoši mazākas krātuves [5], [6].

Nošķir ātro un lēno globālo oglekļa aprites ciklu. Ātrā oglekļa aprīte iekļauj ātru apmaiņu starp atmosfēru, okeānu, sauszemes biosfēru, savukārt lēnais cikls ietver apmaiņu starp ģeoloģiskajām krātuvēm.

Oglekļa apmaiņa starp dažādām ekosistēmām ir būtiska klimata stabilitātes saglabāšanai. Oglekļa plūsma notiek ne tikai dabisku procesu ietekmē, bet arī antropogēnās ietekmes rezultātā. Ogleklis tiek nepārtraukti pārvietots starp dažādām krātuvēm un tiek atbrīvots vai uzkrāts dažādos ekosistēmu procesos. Šie procesi var būt gan mehāniski, gan ķīmiski, gan bioloģiski [5]. Tie ir galvenie mehānismi, kas nosaka oglekļa cirkulāciju atmosfērā, biosfērā un okeānos. Pastāv vairāki oglekļa apmaiņas mehānismi:

- fotosintēze un elpošana (heterotrofa vai autotrofa) – veicina oglekļa apmaiņu starp atmosfēru un sauszemes biosfēru;
- meža ugunsgrēki un citas ietekmes (meža izciršana, kukaiņu savairošanās, vētras) – veicina oglekļa nokļūšanu atmosfērā;

- oglekļa plūsma starp atmosfēru un okeāniem – šī apmaiņa notiek difūzijas ceļā, kad CO_2 izšķīst okeānu virsmas ūdeņos un tiek pārvietots uz dziļajiem ūdeņiem.

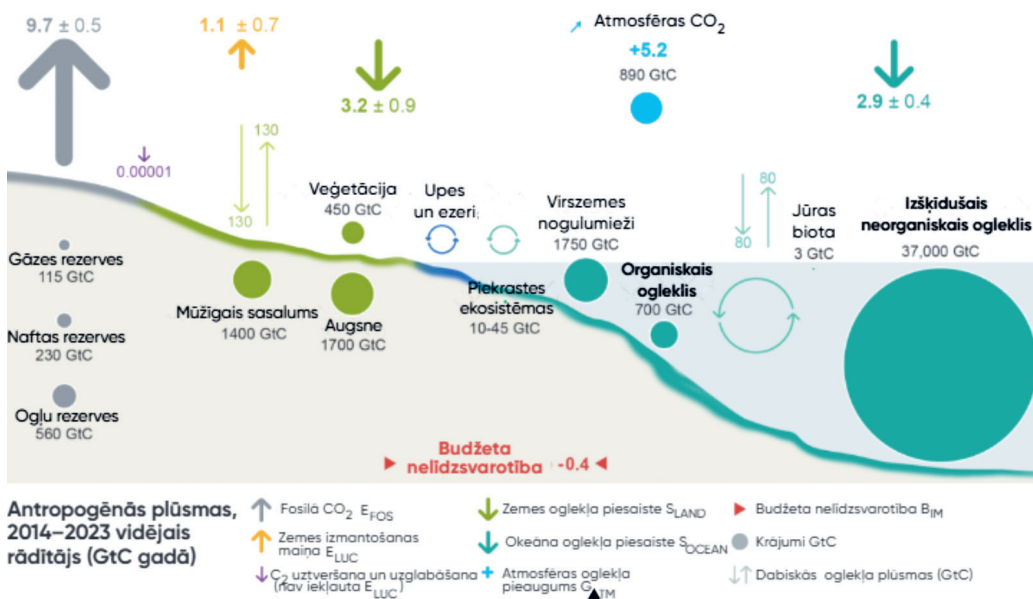
5.1. attēlā ir redzams globālais oglekļa cikls, ņemot vērā antropogēno ietekmi [6], [7].

Cilvēku darbība būtiski ietekmē oglekļa apmaiņu [8]. Tādas darbības kā mežu izciršana, urbanizācija vai lauksaimniecība ietekmē SEG emisiju plūsmas [9], [10]. Pēc Klimata pārmaiņu starpvaldības padomes (KPSP) vadlīnijām emisijas un oglekļa piesaisti, kas radušās no apsaimniekotām ekosistēmām, apskata **lauksaimniecības, mežsaimniecības un citāda zemes izmantojuma sektorā (AFOLU)**, kas ir sadalīts divos apakšsektoros: lauksaimniecības un **zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības (ZIZIMM) sektorā**. 5.2. attēlā ir parādīti galvenie SEG emisiju un piesaistes avoti, kā arī galvenie apsaimniekoto ekosistēmu procesi [11].

AFOLU sektoru var iedalīt šādos komponentos: dzīvā biomasā, mirušās organiskās vielas, augsnes, nocirstie koksnes produkti un dzīvnieki. Galvenās ar AFOLU sektoru saistītās SEG emisijas ir CO_2 , CH_4 un N_2O . CO_2 plūsmu galvenokārt nosaka fotosintēzes, elpošanas un biomasas sadalīšanās un degšanas procesi. Dabiskos apstākļos veģetācija un augsne darbojas kā oglekļa piesaistītāji (angļu val. *carbon sink*), fotosintēzē piesaistot CO_2 no atmosfēras un uzkrājot to biomasā un augsnes organiskajās vielās [12], [13]. Tajā pašā laikā elpošanas, biomasas sadalīšanās procesu vai dabisko traucējumu ietekmē (piemēram, meža ugunsgrēki) ogleklis daļēji atgriežas atmosfērā.

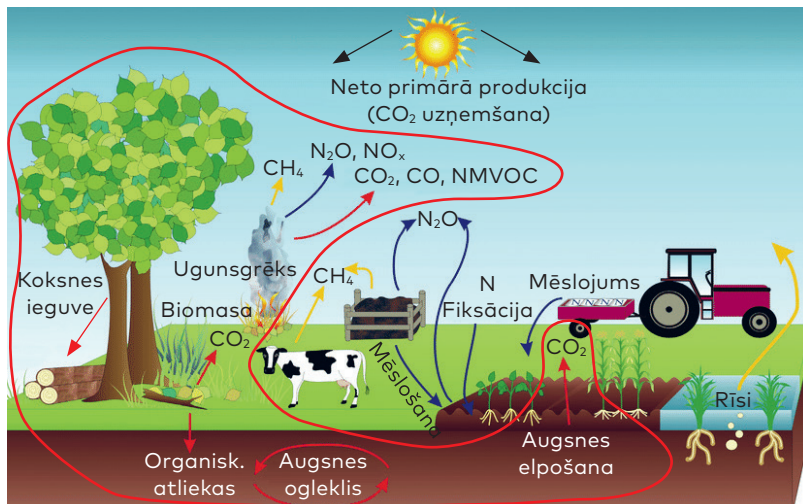
5.1. attēls.

Globālais oglekļa cikls, ņemot vērā antropogēno ietekmi (2014.–2023. gada vidējais rādītājs) [6].



5.2. attēls.

Galvenie SEG emisiju avoti/ piesaistes avoti un procesi apsaimniekotajās ekosistēmās (ar sarkano ir apvilkti ZIZIMM) [11].

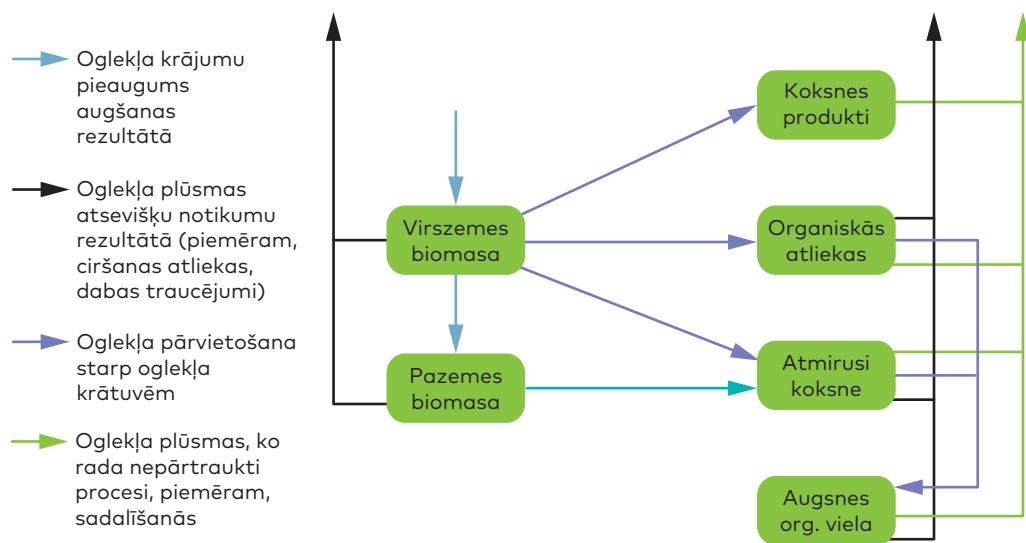


Cilvēku darbība var šos procesus gan sekmēt, gan kavēt. Mežu izcirstšana samazina oglekļa piesaisti dzīvajā biomasā, mitrāju nosusināšana rada ievērojamas CO₂ emisijas. Vienlaikus no izcirstās koksnes saražotie koksnes produkti, piemēram, finiera saplākšņi vai mēbeles, piesaista papildu oglekli [14], [15]. CH₄ izdalās atmosfērā galvenokārt anaerobos apstākļos augsnē notiekošajā metanoģenēzes procesā (mikrobioloģisks process – mikrobiem sadalot organiskās vielas, rodas metāns). CH₄ papildus izdalās no dzīvnieku kūstmēsliem, dabīgi un antropogēni ietekmētiem mitrājiem vai dedzinot biomasu. N₂O tiek emitēts ekosistēmās galvenokārt kā nitrifikācijas un denitrifikācijas blakusprodukts [11].

5.1.1. ZIZIMM sektors un oglekļa cikls ZIZIMM sektorā

ZIZIMM sektors ietver tās emisijas/piesaisti, kas rodas zemes izmantošanas, tās izmaiņu un mežu apsaimniekošanas rezultātā. Saskaņā ar KPSP vadlīnijām ZIZIMM sektorā uzskaita emisijas un piesaiste no šādiem AFOLU komponentiem: dzīvā biomasa, mirušās organiskās vielas, augsnēs, nocirstie koksnes produkti. Emisijas, kas rodas dzīvnieku un kūstmēslu apsaimniekošanas rezultātā, aplūko AFOLU apakšsektorā – lauksaimniecībā.

ZIZIMM sektors ir viens no svarīgākajiem sektoriem Latvijas SEG emisiju bilancē, jo tas spēj absorbēt CO₂. Vairāk nekā pusi no Latvijas teritorijas klāj meži. 2022. gadā meži veidoja 51 % no valsts teritorijas [16], [17]. Tas ir ievērojami vairāk nekā ES vidējais rādītājs, kas ir tikai 33 %. Šis lielais mežu apjoms nodrošina Latvijai salīdzinoši lielu oglekļa piesaistes mehānismu [18]. Ilgtspējīga mežsaimniecība var būtiski palielināt oglekļa sekvestrāciju. Šādas prakses balstītas mežu



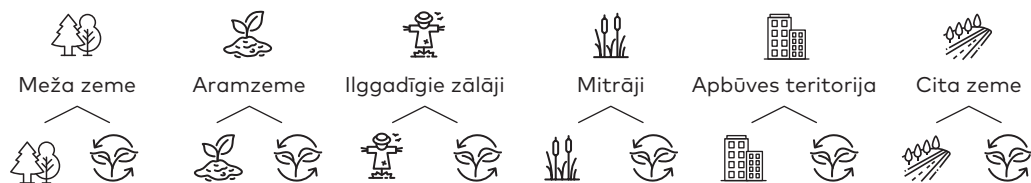
ekosistēmu veselības saglabāšanā, vienlaikus nodrošinot ilgtermiņa oglekļa uzkrāšanu.

Oglekļa krājas uzskaites pamatā ir oglekļa krājas izmaiņas dažādās krātuvēs jeb “baseinos” (*pools*). Oglekļa cikls ZIZIMM sektorā ir dinamiskas plūsmas process starp dažādām vidē esošajām oglekļa krātuvēm. Ogleklis nepārtraukti pārvietojas sistēmā un no tās, mijiedarbojas ar oglekļa krātuvēm (virszemes biomasa, pazemes biomasa, atmirusī koksne, nobiras, augsnes organiskās vielas un nocirstie koksnes produkti (sk. 5.3. att.) [11].

Oglekļa plūsma sistēmā sākas ar fotosintēzi, kur augi absorbē CO₂ no atmosfēras, galvenokārt **virszemes biomasā** (viss dzīvais augu materiāls virs augsnes). Ogleklis virszemes biomasā nepaliek bezgalīgi. Tas izdalās augiem elpojot vai koku izciršanas/augu novākšanas rezultātā, tādējādi ogleklis tiek izvadīts no sistēmas. Augiem atmirstot, ogleklis tiek pārnests uz citām krātuvēm: atmiruso koksni, nobirām, saražotajiem koksnes produktiem. **Pazemes biomasa** sastāv no augu saknēm, kurās ogleklis nonāk no virszemes biomasas fotosintēzes produktiem. Kokam augot, saknes izplešas, piesaistot augsnei vairāk oglekļa. Tāpat kā virszemes biomasa, pazemes biomasa pakāpeniski izdala oglekli elpošanas procesā. Sakņu sistēmai atmirstot vai trūdot, ogleklis tiek pārnests augsnē. **Atmirusās koksnes krātuve** atspoguļo oglekli, kas kādreiz bija dzīvā biomasa (koks, augs), bet tagad atrodas dažādās sabrukšanas stadijās. Lai kam ejot, atmirusī koksne trūdēšanas vai degšanas rezultātā atmosfērā pakāpeniski izdala oglekli. **Nobiru krātuve** iekļauj zarus, koku lapas u. c. augu atliekas, kas nonāk uz zemes. Kad augi nomet lapas, tie noglabā oglekli nobirās, kur lapas pakāpeniski sadalās un izdala oglekli atpakaļ sistēmā. Augsnes organiskās vielas notur

5.3. attēls.

Vienkāršots oglekļa cikls AFOLU ekosistēmās (oglekļa plūsmas sistēmā un no tās) [11].



5.4. attēls.

Zemes izmantošanas un apsaimniekošanas kategorijas.

oglekli ilgtermiņā, ogleklis nonāk šajā krātuvē, sadaloties organismiskajiem materiāliem, tostarp atmirušajiem dzīvniekiem un augiem. Laika gaitā mikroorganismi sadala šos organismiskos materiālus un daļa no oglekļa tiek uzkrāta kā augsnes organiskā viela. Ogleklis var atbrīvoties sistēmā augsnes elpošanas procesā kā CO_2 , savukārt ūdens spēj izvadīt no augsnes izšķīdušo organisko oglekli izskalošanās rezultātā. Mijiedarbība starp šīm oglekļa krātuvēm rada ciklu, kur ogleklis pastāvīgi pārvietojas. Kad ogleklis tiek absorbēts veģetācijā un tiek uzglabāts augsnē, sistēma darbojas kā oglekļa piesaistītājs (*sink*) – ogleklis tiek absorbēts vairāk, nekā izdalīts. Tomēr, ja notiek mežu izciršana, ugunsgrēki vai augsnes degradācija, sistēma kļūst par emisiju avotu (*source*), tā veicinot atmosfēras CO_2 līmeņa paaugstināšanos.

Zemes izmantošanas kategorijas

ZIZIMM sektorā nošķir sešas zemes izmantošanas un apsaimniekošanas kategorijas (sk. 5.4. att.): meža zeme, aramzeme, zālāji, mitrāji, apbūves teritorija (infrastruktūras zeme), cita zeme. SEG emisijas un piesaisti analizē gan tad, kad zemei netiek mainīts izmantošanas veids (piemēram, meža zeme paliek meža zeme), gan tad, kad zeme tiek transformēta no vienas zemes kategorijas citā (piemēram, meža zeme tiek transformēta par aramzemi). Katru zemes kategoriju pēc nepieciešamības var sadalīt apakškategorijās atbilstoši klimatiskajiem apstākļiem, augsnes tipam vai apsaimniekošanas režīmam. Nocirstie koksnes produktu (*HWP – harvested wood products*) kategorija uzskaita oglekļa krāju no koksnes produktiem, ko izmanto cilvēku vajadzībām (izņemot malku). Izdala trīs lielas apakšgrupas: zāģmateriāli, saplāksnis un kokskaidu plātnes, papīrmalkas produkti.

Lai novērtētu oglekļa krāju un tās izmaiņas, zeme ir jāklasificē, jānosaka konkrētas zemes kategorijas platība un tās izmaiņas. KPSP rekomendē valsts ZIZIMM sektorā izmantot 3. līmeņa pieeju (*Tier 3*), kas ietver zemes gabalu un to pāreju kartēšanu laika gaitā [11]. Tas nozīmē, ka ir jāintegrē ģeogrāfiskās informācijas sistēmas (ĢIS) un ģeotelpiskie dati, lai ar augstāku precizitāti noteiktu un izsekotu zemes izmantošanas maiņu, nevis tikai apkopot informāciju no “lauka darbiem” [19], [20].

Saskaņā ar KPSP vadlīnijām [11], [16] Latvijā ZIZIMM sektorā zemes izmantošanas klasifikācija ir šāda:

- meža zeme definēta kā teritorija vismaz 0,1 ha lielā platībā, kur kokiem ir potenciāls sasniegt vainaga segumu virs 20 % un koku augstums brieduma vecumā ir līdz 5 m. Šeit iekļauj arī jaunus dabiskos mežus un stādījumus, kas izveidoti mežsaimniecības nolūkos, kā arī teritorijas, kuras dabiski vai cilvēku darbības rezultātā pagaidām ir neapmežotas un kuras plānots apmežot;
- aramzeme ir zeme, ko izmanto kultūraugu audzēšanai un ko uzar vismaz reizi 20 gados, dzīvnieku barošanas pļavas (periodiski artas platības meža teritorijā);
- ilggadīgie zālāji ir teritorijas, ko izmanto ganībām vai pļavām (ganības, kļajumi un krūmāji). Šīm teritorijām viegli var atgriezt zālāja statusu, pļaujot vai izcērtot mazos kokus. Šajā kategorijā iekļauj arī nemeža zemes, kur koku vidējais diametrs krūšu augstumā ir mazāks par 2 cm;
- mitrāju kategorija iekļauj ūdens tilpnes (ezerus, upes, dīķus), purvus (pastāvīgi mitras teritorijas, kur koki nespēj sasniegt 5 m augstumu), palienes (teritorijas, kas periodiski applūst, piemēram, pavasara palu laikā), izcirtumi vai krūmāji lielā platībā ar pārmērīgu mitruma līmeni;
- apbūves teritorija (infrastruktūras zeme) ietver zemi, uz kuras atrodas ēkas, pagalmi, ceļi u. c. infrastruktūra. Šajā kategorijā ietver arī meža infrastruktūru (grāvjus, pretuguns joslas), zālāju un aramzemju meliorācijas sistēmas, mazdārziņus u. c.;
- kategorijā cita zeme Latvija pieskaita kāpu zonas, kas nav apmežotas.

Zemes lietojuma veidu un tā maiņu var noteikt, izmantojot dažādas metodes: attālinātas izpētes sistēmas, ģeogrāfiskās informācijas sistēmas, lauka darbus (inventarizācija un monitorings), modeļi/simulācijas.

Latvijā tiek veikts Meža resursu monitorings (MRM), kur Latvija ir sadalīta parauglaukumos (kopā 16 157 parauglaukumi). MRM uzdevums ir iegūt informāciju par meža/nemeža zemes platībām, mežaudžu platību un krāju, pieaugumu, nedzīvo koksni, bojājumiem, sadalījumu pa meža tipiem, koku sugām un vecuma grupām u. c. informāciju [21], [22].

Līdz 2019. gadam zemes izmaiņas tika noteiktas ar attālinātas izpētes datiem no *LANDSAT*. Aprēķinot veģetācijas indeksu, tika noteiktas tās teritorijas, kur meža zeme transformēta par aramzemi, apbūves teritoriju vai mitrāju. No 2020. gada monitoringa dati tiek integrēti *LPIS* (*land parcel identification system*), tā veidojot zemes izmantošanas matricu. Saskaņā ar šo matricu zemes izmaiņas tiek noteiktas piecu gadu ciklā, salīdzinot trīs secīgus MRM apsekojumu datus. Praksē MRM dati sniedz parauglaukuma zemes izmantošanas novērojumus – atkārtoti apmeklējot to pašu parauglaukumu

nākamajos ciklos, identificējot izmaiņas (piemēram, pāreju no zālāja uz mežu). Metodoloģijas nosaka zemes konversiju starp kategorijām ik piecus gadus un pēc tam interpolē ikgadējās pārejas, lai iegūtu izmaiņu aplēses pa gadiem [23]. Šāda metode samazina kļūdas, kas var rasties manuālā darba dēļ un mazina neesošas zemes lietošanas izmaiņas.

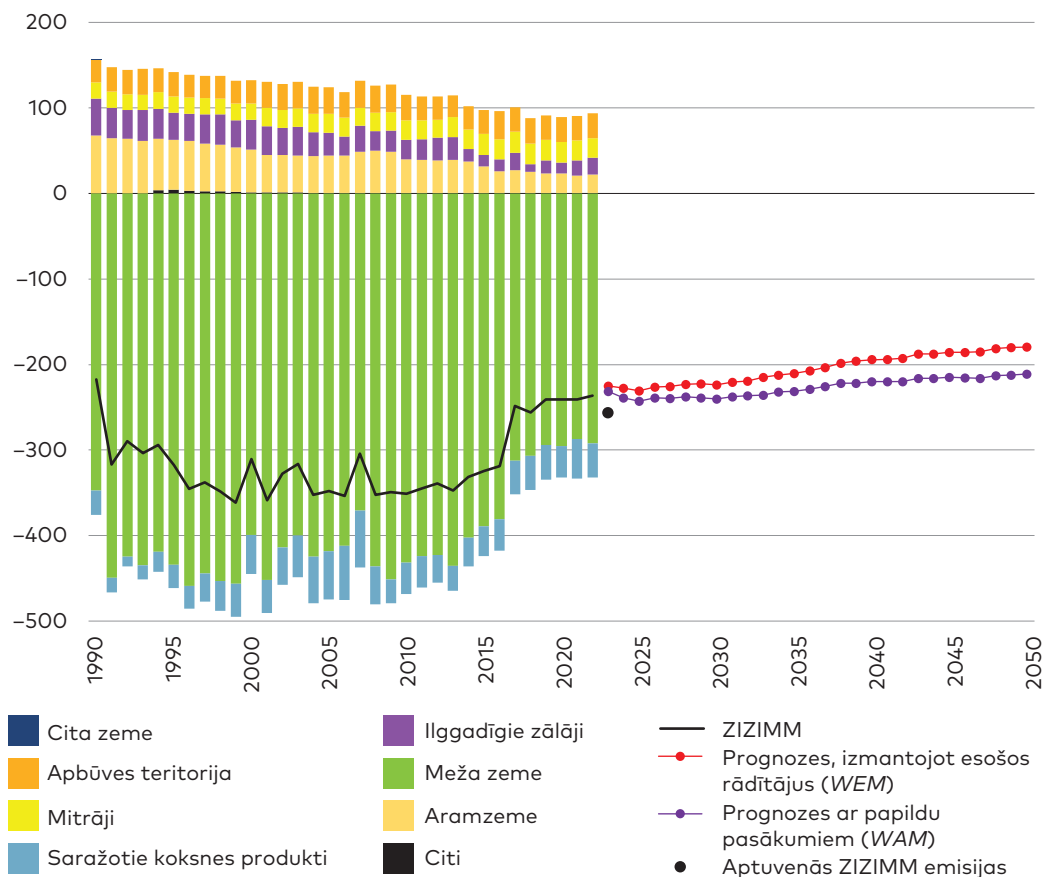
5.1.2. ZIZIMM sektora SEG emisijas ES un Latvijā

Jāuzsver, ka ZIZIMM tiek iekļauti tikai tie SEG emisiju avoti un piesaistes mehānismi, kas tieši saistīti ar zemes izmantošanu un tās pārmaiņām. Emisijas, kas rodas, piemēram, izmantojot degvielu mežsaimniecības darbos vai ražojot enerģiju no biomasas, tiek uzskaitītas citos sektoros, galvenokārt enerģētikas sektorā.

Dzīvā biomasā no meža zemes ir viens no lielākajiem oglekļa piesaistītājiem ZIZIMM sektorā ES. Tā spēj uzņemt vairāk oglekļa, nekā izdala, tā “amortizējot” citu zemes izmantošanas kategoriju vai citu sektoru radītās emisijas (sk. 5.5. att.). Nocirstie koksnes produkti ES ir otrs lielākais oglekļa piesaistītājs. Intensīvas augsnes apstrādes, nosusināšanas un zemes transformācijas dēļ aramzemes, zālāji, apbūves teritorija un mitrāji emitē vairāk emisijas, nekā spēj piesaistīt [24].

Katru gadu ZIZIMM sektors vidēji veido aptuveni 13–21 % no kopējām pasaules antropogēnajām SEG emisijām [6]. Neskatoties uz to, ZIZIMM ir svarīgs oglekļa piesaistīšanas avots. 2022. gadā vien ZIZIMM nodrošināja CO₂ piesaisti 7 % no kopējām gada SEG emisijām [7]. Austrumeiropas valstis, tostarp Baltijas valstis, nodrošina lielāko daļu no oglekļa piesaistes dzīvajā biomasā Eiropā. Šajā reģionā meža platība ir lielāka nekā daudzās Rietumeiropas valstīs [26]. Neskatoties uz to, Austrumeiropa ir piedzīvojusi lielas izmaiņas zemes izmantošanas un apsaimniekošanas nozarē, kas saistītas ar vēsturiskiem un politiskiem notikumiem [26]. Pēc PSRS sabrukuma 20. gs. beigās Austrumeiropā mežizstrāde samazinājās, un daudzas valstis piedzīvoja meža platības pieaugumu, tomēr dažās valstīs (Latvijā, Igaunijā) meža teritorijas saruka, kas skaidrojams ar ātrāku pāreju uz tirgus ekonomiku, nesamazinot mežizstrādes apjomu [27]. Tika atvērta ES tirgus, atcelti PSRS mežizstrādes ierobežojumi, kā arī priežu audzes, kas pēc Otrā Pasaules kara tika stādītas degradētās zemēs, sasniedza brieduma vecumu [28].

Pēdējās desmitgadēs emisijas no nemeža zemēm ir samazinājušās. Šī tendence galvenokārt ir saistīta ar emisiju samazināšanos no aramzemes (no 43,6 Mt CO₂ līdz 21,7 Mt CO₂ laikā no 2005. līdz 2022. gadam). Neskatoties uz to, pēdējā desmitgadē ir novērojama arī negatīva tendence – ir samazinājies oglekļa piesaistes apjoms



dzīvajā biomasā no meža zemes, kā rezultātā ES kopējā piesaiste ZIZIMM sektorā laikā no 2012. līdz 2022. gadam ir samazinājusies par aptuveni 30 % [24].

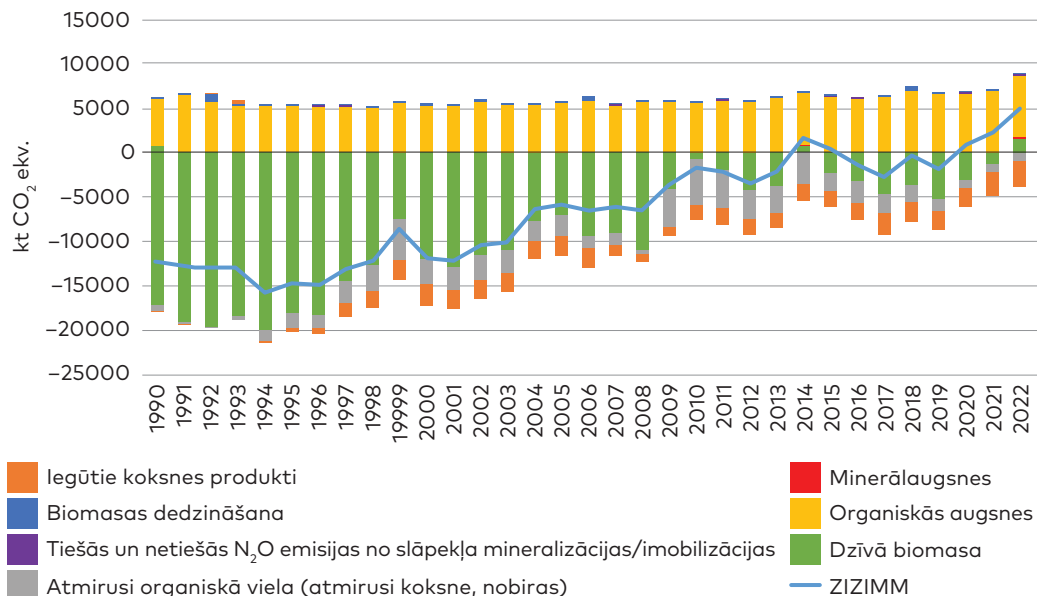
Šī tendence ir skaidrojama ar vairākiem faktoriem:

- 1) kā viens galvenajiem iemesliem minams **meža vecuma pieaugums**, kas nozīmē, ka meži nespēj uzņemt tik daudz oglekļa no atmosfēras kā iepriekš (veci meži aug lēnāk nekā jauni meži, līdz ar to nāk klāt mazāk biomasas un oglekļa uzkrāšana palēninās);
- 2) **meža mirstību** palielina dabas katastrofas un klimata pārmaiņas (piemēram, vētras, meža ugunsgrēki, kaitēkļu invāzijas), un, mežam atmiršot, samazinās tā spēja piesaistīt oglekli dzīvajā biomasā, savukārt atmirusī koksne atbrīvo oglekli atmosfērā;
- 3) ir palielinājies **mežu izciršanas apjoms** – 2022. gadā izcirsti aptuveni 66 % no ES mežu neto gada koksnes pieauguma [29].

Arī Latvijā ZIZIMM sektors kopš 1990. gada ir piedzīvojis ievērojamas pārmaiņas SEG emisiju un oglekļa piesaistes bilanci.

5.5. attēls.

ES ZIZIMM sektora emisijas un piesaiste pēc zemes izmantošanas kategorijām [25].

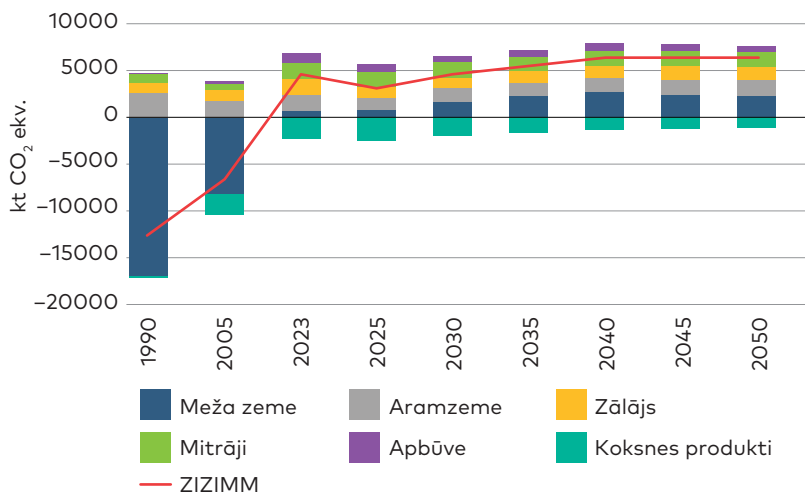


5.6. attēls.

Neto emisijas un piesaiste Latvijas ZIZIMM sektorā pēc emisiju un piesaistes avota [16].

Pagājušā gadsimta deviņdesmitajos gados un divtūkstošo gadu sākumā ZIZIMM sektors darbojās kā ļoti liels oglekļa piesaistītājs (*sink*). To sekmēja vairāki apstākļi – pēc padomju perioda plašas lauksaimniecības zemes tika atstātas dabiskai aizaugšanai (apmežošanai), kā rezultātā samazinājās lauksaimnieciskā darbība (augšnes apstrāde, zemes transformācija par aramzemi) un pieauga koksnes biomasas krājums. Pēdējās divās desmitgadēs šajā sektorā ir iezīmējusies lejupslīdes tendence (sk. 5.6. att.). Kopš 1990. gada kopējā oglekļa piesaiste ir samazinājusies par 140 %. Salīdzinot ar 1990. gadu, emisiju/piesaistes tendence ir būtiski mainījusies arī citās zemes kategorijās, piemēram, zālājos emisijas ir pieaugušas par 47 %, mitrājos – par 75 % un apbūves teritorijā – par 4296 %, savukārt aramzemēs samazinājušās par 24 % [16]. Ļoti ievērojamas pārmaiņas ir notikušas pēc 2008. gada, kad būtiski izmainījās oglekļa piesaistes proporcija starp dzīvo un atmirušo biomasu. To var skaidrot ar vēlgāzēm, kas reģistrētas iepriekšējos gados. 2014. gadā un kopš 2020. gada Latvijā ir novērojama tendence, ka ZIZIMM sektors ir kļuvis par neto emisiju avotu, nevis neto oglekļa piesaistes avotu. Tas nozīmē, ka šajā sektorā tiek radīts vairāk emisiju, nekā tas spēj noglabāt (sk. 5.6. att.) [16].

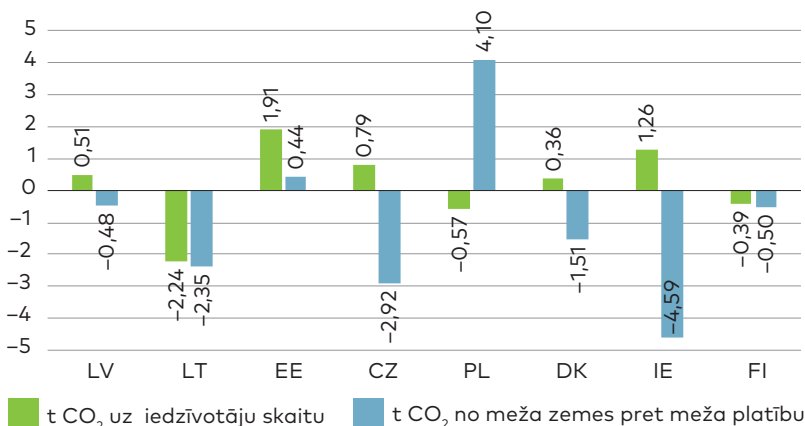
WEM (prognozes izmantojot esošos scenārijus) un *WAM* (prognozes ar papildus scenārijiem) prognozes liecina, ka SEG emisijas ZIZIMM sektorā, salīdzinot ar 1990. gadu, pieaugs par 137 % 2030. gadā un par 151 % 2050. gadā (sk. 5.7. att.). Pēc šiem scenārijiem tiek prognozēts, ka mežu novecošanas, dabiskās mirstības un



intensīvas mežizstrādes dēļ oglekļa krāja ZIZIMM līdz 2050. gadam samazināsies par 535 milj. tonnu. Vecie meži vairs nespēs kompensēt emisijas no organiskajām augsnēm [30].

Liela daļa emisiju rada atmežošana infrastruktūras būvniecības dēļ, īpaši "Rail Baltic" projekta kontekstā, kas viens pats būs atbildīgs par 1–1,5 milj. t CO₂ ekv. emisiju. Pēc pašreizējām prognozēm Latvija nespēs izpildīt ZIZIMM klimata mērķi līdz 2030. gadam, jo struktūrālā līdzsvara trūkums starp emisiju avotiem un piesaistes potenciālu turpinās palielināt piesaistes deficītu [30].

Lai gan meži klāj vairāk nekā 50 % Latvijas teritorijas, meža zemes CO₂ piesaiste 2021. gadā nespēja nosegt ZIZIMM sektora emisijas. Turpretī Lietuva, kurā mežu platība ir mazāka (35 % no kopējās valsts platības), ziņo par četras reizes lielāku CO₂ piesaisti ZIZIMM sektorā. Arī Polija un Somija uzrāda lielāku piesaisti šajā sektorā, savukārt Igaunija ziņo daudz lielāku emisiju īpatsvaru



attiecībā pret valsts iedzīvotāju skaitu un pret meža platību (sk. 5.8. att.) [31].

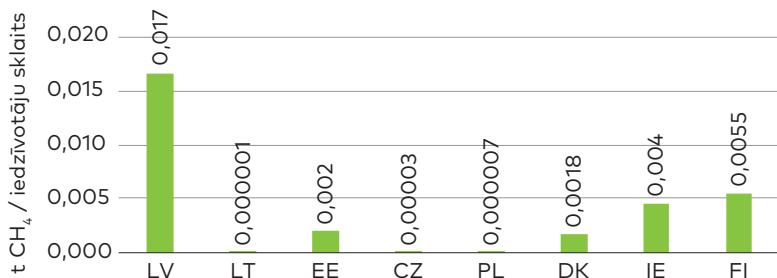
Papildus Latvija 2021. gadā ziņoja visaugstākās CH₄ emisijas attiecībā uz vienu iedzīvotāju skaitu starp Baltijas un atsevišķām ES valstīm (sk. 5.9. att.). Salīdzinājumam Lietuvas CH₄ emisijas ir aptuveni 1000 reižu mazākas [31]. Tas galvenokārt ir saistīts ar emisijām no nosusinātām un atjaunotām organiskajām augsnēm. Saskaņā ar Latvijas Nacionālo inventarizācijas ziņojumu 2022. gadā ZIZIMM sektora emisijas bija 4944,16 kt CO₂. Vislielākais emisiju avots bija organiskās augsnes [16].

Turpmāk minēti galvenie faktori, kas ietekmējuši ZIZIMM emisiju/piesaistes dinamiku kopš 1990. gada.

- **Mežaudžu vecumstruktūras izmaiņas.** Latvijas meži noveco, ir pieaudzis to mežaudžu īpatsvars, kas sasniedzis vai pārsniegušas ciršanas vecumu. Vienlaikus klimata pārmaiņas ir sekmējušas mežaudžu bojājumus, piemēram, vētras postījumi 2005. gadā, ilgstošas sausuma epizodes 2018.–2022. gadā, kaitēkļu savairošanās, ugunsgrēki. Jāatzīmē, ka dabiskie traucējumi veicina oglekļa zudumus gan tieši (degšana, biomasas noārdīšanās), gan netieši (bojāgājušo koku izvākšana).
- **Palielināts mežizstrādes apjoms.** Pēdējās desmitgadēs būtiski ir audzis mežizstrādes apjoms. Pēc ekonomiskās krīzes 2008. gadā ekonomiskās atkopšanās un koksnes pieprasījuma pieauguma rezultātā 2009. un 2010. gadā pieauga mežizstrādes apjoms, rezultātā mazinot mežu piesaistes kapacitāti.
- **Zemes izmantošanas maiņa.** Lai arī kopējā mežu platība Latvijā pēdējos gados bijusi relatīvi stabila, meža zeme tiek atmežota, īstenojot infrastruktūras un apbūves projektus. Mežu zemes pārveide par ceļiem, apdzīvotām vietām un citu infrastruktūru rada tiešas emisijas (nocirsti koki, augsnes ogleklis) un ilgtermiņā oglekļa piesaistes zudumu.
- **Dabiskā apmežošanās un zemes atgriešana lauksaimniecībā.** Pēc 1990. gada daudzas lauksaimniecības zemes tika pamestas, kā rezultātā tās apauga ar krūmiem un kokiem, palielinot oglekļa piesaisti. Tomēr pēdējā laikā daļa no šīm

5.9. attēls.

CH₄ emisijas un piesaiste ZIZIMM sektorā 2021. gadā uz iedzīvotāju skaitu [31].



5.10. attēls. ZIZIMM sektora iedalījums (veidots no [16]).

4. ZIZIMM			
4A Oglekļa krājas izmaiņas meža zemē	4B Oglekļa krājas izmaiņas aramzemē	4C Oglekļa krājas izmaiņas zālājos	4D Oglekļa krājas izmaiņas mitrājos
4.A.1. meža zeme paliek par meža zemi	4.B.1. aramzeme paliek par aramzemi	4.C.1. zālājs paliek par zālāju	4.D.1. mitrājs paliek par mitrāju
4.A.2. zeme, kas tiek transformēta par meža zemi	4.B.2. zeme, kas tiek transformēta par aramzemi	4.C.2. zeme, kas tiek transformēta par zālāju	4.D.1.a. kūdras ieguve paliek par kūdras ieguvi
4.A.2.a. aramzeme, kas tiek transformēta par meža zemi	4.B.2.a. meža zeme, kas tiek transformēta par aramzemi	4.C.2.a. meža zeme, kas tiek transformēta par zālāju	4.D.1.b. applūdušas teritorijas paliek par applūdušām teritorijām
4.A.2.b. zālājs, kas tiek transformēta par meža zemi	4.B.2.b. zālājs, kas tiek transformēta par aramzemi	4.C.2.b. zālājs, kas tiek transformēta par zālāju	4.D.2.b. citas mitrās zemes paliek par citām mitrām zemēm
4.A.2.c. mitrājs, kas tiek transformēta par meža zemi	4.B.2.c. mitrājs, kas tiek transformēta par aramzemi	4.C.2.c. mitrājs, kas tiek transformēta par zālāju	4.D.2. zeme, kas tiek transformēta par mitrāju
4.A.2.d. apbūves teritorija, kas tiek transformēta par meža zemi	4.B.2.d. apbūves teritorija, kas tiek transformēta par aramzemi	4.C.2.d. apbūves teritorija, kas tiek transformēta par zālāju	4.D.2.a. zeme, kas tiek transformēta par kūdras ieguvi
4.A.2.e. cita zeme, kas tiek transformēta par meža zemi	4.B.2.e. cita zeme, kas tiek transformēta par aramzemi	4.C.2.e. cita zeme, kas tiek transformēta par zālāju	4.D.2.b. zeme, kas tiek transformēta par applūdušām teritorijām
			4.D.2.c. zeme, kas tiek transformēta par citām mitrām zemēm

5.10. attēla turpinājums. ZIZIMM sektora iedalījums (veidots no [16]).

4. ZIZIMM				
4E Oglekļa krājas izmaiņas apbūves ter.	4(II) Susināšana mitrināšana/citi augsnes apsaimniekošanas pasākumi	4(III)Tiešās/netiešās N ₂ O emisijas no N mineralizācijas	4(IV) Biomasas dedzināšana	4G Oglekļa krājas izmaiņas - Saražotie koksnes produkti
4.E.1. apbūves teritorija paliek par apbūves teritoriju	4(II).A.1 meža zeme paliek par meža zemi	4(III).B.2. zeme, kas tiek transformēta par aramzemi	4(IV).A.1. meža zeme paliek par meža zemi	4.G.1. masīvkoks
4.E.2. zeme, kas tiek transformēta par apbūves teritoriju	4(II).A.2 zeme, kas tiek transformēta par meža zemi	4(III).E.2. zeme, kas tiek transformēta par apbūves teritoriju	4(IV).A.1.a. kontrolētā degšana	4.G.1. papīrs un kartons
4.E.2.a. meža zeme, kas tiek transformēta par apbūves teritoriju	4(II).B.1. aramzeme paliek par aramzemi		4(IV).A.1.b. savvaļas ugunsgrēki	
4.E.2.b. zālājs, kas tiek transformēta par apbūves teritoriju	4(II).B.2. zeme, kas tiek transformēta par aramzem		4(IV).C.1. zālājs paliek par zālāju	
4.E.2.c. mitrājs, kas tiek transformēta par apbūves teritoriju	4(II).C.1. zālājs paliek par zālāju		4(IV).C.1.b. savvaļas ugunsgrēki	
4.E.2.d. apbūves teritorija, kas tiek transformēta par apbūves teritoriju	4(II).C.2. zeme, kas tiek transformēta par zālāju			
4.E.2.e. cita zeme, kas tiek transformēta apbūves teritoriju	4(II).D.1. mitrājs paliek par mitrāju			
	4(II).D.1.a. kūdras ieguve paliek par kūdras ieguvi			
	4(II).D.2. zeme, kas tiek transformēta par mitrāju			
	4(II).D.2.b. zeme, kas tiek transformēta par applūdušām teritorijām			
	4(II).E.1. apbūves teritorija paliek par apbūves teritoriju			
	4(II).E.2. zeme, kas tiek transformēta par apbūves teritoriju			

zemēm tiek atgriezta lauksaimniecības apritē, proti, nocērtot jaunizaugušos kokus un uzarot augsni, tiek atbrīvots ogleklis, rezultātā samazinot piesaisti no šīs zemes.

- **Organisko augšņu nosusināšana un izmantošana.** Latvijā ir augsts organisko augšņu īpatsvars. Plašas kūdrāju teritorijas ilgstoši tikušas nosusinātas lauksaimniecībai, mežsaimniecībai vai kūdras ieguvei. Saskaņā ar *NIR* organiskās augsnes ir lielākais emisiju avots ZIZIMM sektorā.

5.2. ZIZIMM sektora SEG emisiju audits Latvijā

Šajā apakšnodaļā aplūkots ZIZIMM sektora emisiju audits. Līdzīgi kā citos sektoros, arī ZIZIMM var iedalīt vairākos apakšsektoros, kas ietver gan emisiju avotus, gan oglekļa piesaistes procesus (sk. 5.10. att.). ZIZIMM sektorā emisiju apjomi, kas lielā mērā ir atkarīgi no cilvēku darbības, ir iedalāmi šādās kategorijās: atmežošana, zemes izmantošanas maiņa, augsnes apsaimniekošana, biomasas dedzināšana. Savukārt oglekļa piesaiste iedalāma šādās grupās: oglekļa krājas izmaiņas (ietver arī oglekļa emisijas no augsnes un atmirušās biomasas), nocirstie koksnes produkti.

Aprēķinu pamatā ir princips, ka jāuzskaita emisijas no sešiem zemes lietojuma veidiem (meža zeme, aramzeme, zālājs, mitrājs, apbūves teritorija, cita zeme). Katru zemes lietojuma veidu iedala apakškategorijās atkarībā no tā, vai zeme paliek tajā pašā lietojumā vai lietojums ir mainīts.

5.2.1. Emisiju un piesaistes aprēķina metodoloģijas ZIZIMM sektorā

Emisiju un piesaistes aprēķins ZIZIMM sektorā Latvijā balstīts KPSP izstrādātajās vadlīnijās:

- 2006. gada KPSP vadlīnijas nacionālo SEG inventarizāciju sagatavošanai [11];
- 2013. gada papildinājums 2006. gada KPSP vadlīnijām: Mitrzemes [32].

Informācija par aprēķinos izmantotajiem līmeņiem un emisijas faktoriem iegūta no Latvijas Nacionālā inventarizācijas ziņojuma (*NIR*). Lai nodrošinātu emisiju un piesaistes aprēķinu, izmantota arī valstij raksturīgā informācija no šādām institūcijām [16], [33]:

- Latvijas Valsts mežzinātnes institūta “Silava” (Meža resursu monitoringa dati (MRM));
- Valsts meža dienesta;
- Lauku atbalsta dienesta;

- Latvijas Kokrūpniecības federācijas;
- ANO Pārtikas un lauksaimniecības organizācijas (FAO);
- Valsts ugunsdzēsības un glābšanas dienesta;
- u. c.

Pēc KPSP vadlīnijām emisijas var aprēķināt trīs līmeņos. Šie līmeņi nosaka SEG emisiju precizitāti un datu kvalitāti. Katrs līmenis balstīts atšķirīgā datu vākšanas un apstrādes pieejā. Pirmo līmeni izmanto tad, kad nav pieejami detalizēti dati par kādu procesu, līdz ar to izmanto vispārējas metodes un noklusējuma emisijas faktorus, kas ir atrodami KPSP vadlīnijās. Otrajā līmenī izmanto valsts specifiskos datus un ietver detalizētākus aprēķinus, izmantojot valsts līmeņa emisijas faktorus. Trešo līmeni izmanto tad, kad ir pieejami augstas izšķirtspējas un detalizācijas dati, bieži ietverot aprēķinu reģionāla skatījumā un aprēķinu modeļu pieejamību. Latvija SEG emisiju un oglekļa piesaistes aprēķinu ZIZIMM sektorā balsta galvenokārt 1. un 2. līmeņa aprēķinu metodēm. 5.1. tabulā ir redzams emisiju un piesaistes avotu detalizēts sadalījums pa kategorijām un SEG emisijām. Emisiju un oglekļa piesaistes aprēķinā izmantoti emisiju faktori atbilstoši NIR [16].

5.11. attēlā parādīta vienkāršota SEG emisiju un oglekļa piesaistes shēma pēc aktivitātes uz zemes izmantošanas veida Latvijā. Pēc NIR Latvijā ar zemes izmantošanas veidu "Cita zeme" saprot neapsaimniekotu zemi, kas nenodrošina būtisku oglekļa piesaisti nevienā no krātuvēm un nerada būtiskas emisijas.

Mitrāju kategorijā Latvija ziņo gan par *off-site* emisijām, gan *on-site* emisijām. *On-site* emisijas ir attiecināmas uz tām emisijām, kas rodas no organiskās augsnes (tostarp oglekļa krājas izmaiņas organiskajā augsnē), *off-site* emisijas ir saistītas ar kūdras izmantošanu dārzkopībā (emisijas no kūdras, kas tiek izmantota enerģijas iegūšanā, aplūko enerģētikas sektorā). Pārējās mitrāju teritorijas tiek uzskatītas par neapsaimniekotām, līdz ar to CO₂ emisijas netiek apskatītas (neskaitot tās teritorijas, kas ir apmežotas, bet nav iekļautas mežu zemes kategorijā, piemēram, šauras koka joslas ūdenstilpju tuvumā).

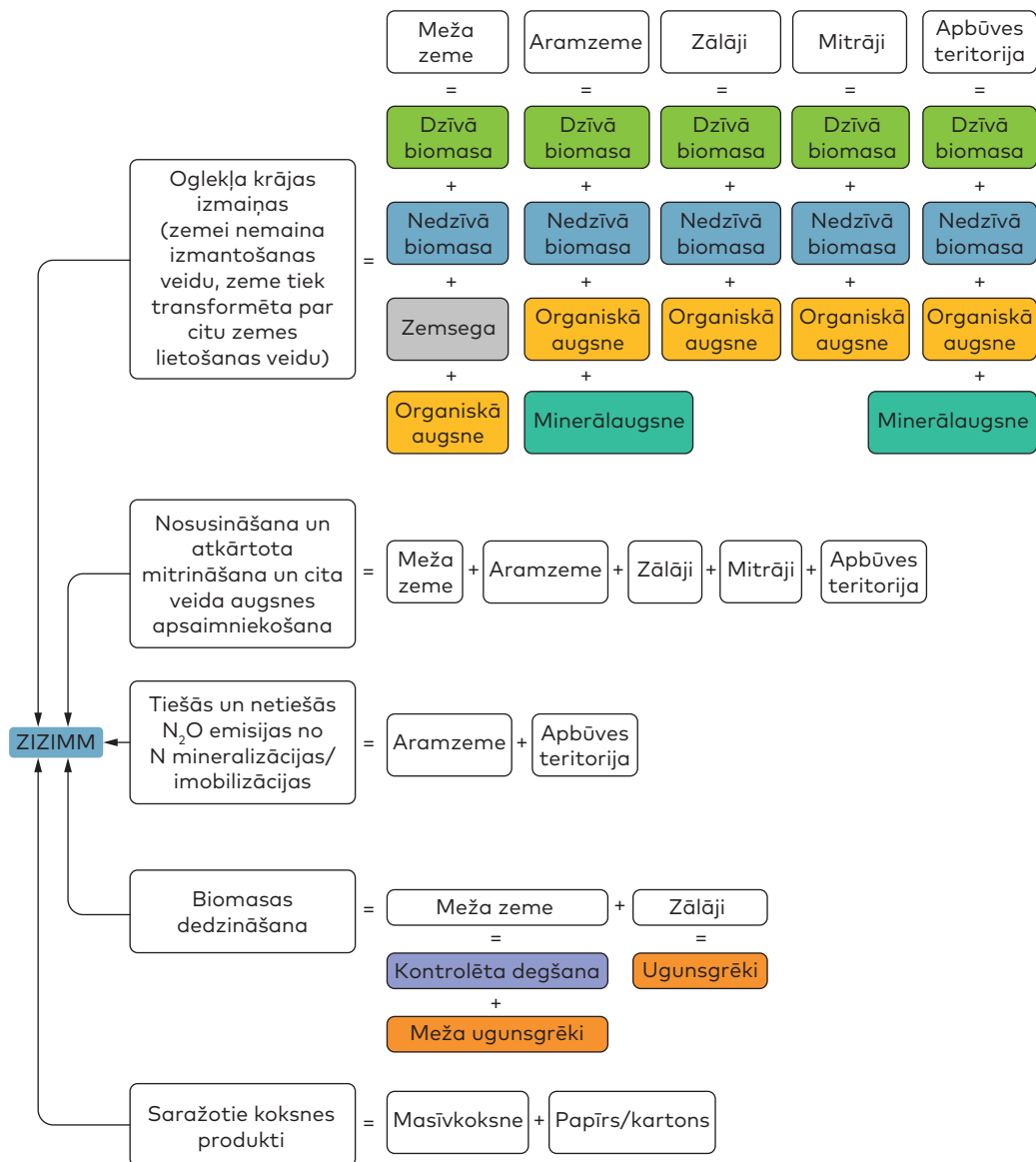
Kā ne-CO₂ emisijas ZIZIMM sektorā tiek aprēķinātas CH₄ un N₂O emisijas. ZIZIMM sektorā ne-CO₂ emisijas var rasties no dažādiem procesiem, piemēram, biomasas sadegšanas vai organisko augšņu nosusināšanas vai mitrināšanas. Šādas emisijas ZIZIMM sektorā nav atkarīgas no biomasas krājas izmaiņām, bet gan cieši saistītas ar veikto darbību. Bieži vien emisiju apjomu nosaka ar vispārinātu formulu, kur emisiju faktoru reizina ar aktivitātes datiem, piemēram, nosusināto organiskās augsnes platību.

Kopš 2010. gada, lai aprēķinātu emisijas un oglekļa piesaisti, kā pamatu Latvijā izmanto modeli "EPIM" (*emission projection and inventory model*). Tas iekļauj KPSP metodoloģiju un valsts īpatnējos

5.1. tabula

Aprēķinam izmantotās metodes emisiju un piesaistes [16]

Emisiju/piesaistes avots	Lietotā metode		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Meža zeme			
Oglekļa krājas izmaiņas, meža zeme, kas paliek meža zeme	L2	-	-
Oglekļa krājas izmaiņas, zeme, kas tiek transformēta par meža zemi	L2	-	-
Susināšana, mitrināšana un citi augsnes apsaimniekošanas pasākumi	L1	L1, L2	L1
Biomases dedzināšana	L1	L1, L2	L1, L2
Aramzeme			
Oglekļa krājas izmaiņas, aramzeme, kas paliek aramzeme	L2	-	-
Oglekļa krājas izmaiņas, zeme, kas tiek transformēta par aramzemi	L2, L3	-	-
Susināšana, mitrināšana un citi augsnes apsaimniekošanas pasākumi	-	L1	-
Tiešās un netiešās N ₂ O emisijas no slāpekļa mineralizācijas/imobilizācijas	-	-	L1
Zālāji			
Oglekļa krājas izmaiņas, zālāji, kas paliek zālāji	L2	-	-
Oglekļa krājas izmaiņas, zeme, kas tiek transformēta par zālāju	L1, L2, L3	-	-
Susināšana, mitrināšana un citi augsnes apsaimniekošanas pasākumi	-	L2	-
Biomases dedzināšana	-	L1	L1
Mitrāji			
Oglekļa krājas izmaiņas, mitrāji, kas paliek mitrāji	L2	-	-
Oglekļa krājas izmaiņas, zeme, kas tiek transformēta par mitrāju	L1	-	-
Susināšana, mitrināšana un citi augsnes apsaimniekošanas pasākumi	L1, L2	L1, L2	L2
Apbūves teritorija			
Oglekļa krājas izmaiņas, apbūves teritorija, kas paliek apbūves teritorija	L2	-	-
Oglekļa krājas izmaiņas, zeme, kas tiek transformēta par apbūves teritoriju	L1, L2	-	-
Susināšana, mitrināšana un citi augsnes apsaimniekošanas pasākumi	-	-	L1
Tiešās un netiešās N ₂ O emisijas no slāpekļa mineralizācijas/imobilizācijas	-	-	L1
Nocirstie koksnes produkti	L2	-	-
Saīsinājums: 1. līmenis – L1; 2. līmenis – L2; 3. līmenis – L3			



5.11. attēls.

Vienkāršota SEG emisiju un piesaistes plūsmas ZIZIMM sektorā Latvijā shēma.

pieņēmumus. Papildus tiek izmantots AGM (augšanas gaitas modelis) un *Yasso07* modelis (oglekļa krājas izmaiņas minerālaugsnēs). Ņemot vērā, ka emisiju un oglekļa piesaistes aprēķinu metodes atšķiras pēc emisiju/piesaistes avota, turpmāk apakšnodaļās izskatīta emisiju un piesaistes pamata aprēķina metodoloģija, kas ir kopīga visiem zemes izmantošanas veidiem. Atsevišķās apakšnodaļās izskatīti pieņēmumi un specifiski aprēķini, kas raksturīgi katram zemes izmantošanas veidam.

5.2.2. Oglekļa krājas izmaiņas (CRF – 4A, 4B, 4C, 4D, 4E)

Atbilstoši KPSP vadlīnijām [11] katrā zemes izmantošanas kategorijā tiek analizēts, kā laika gaitā mainās oglekļa daudzums šajās krātuvēs. Kopējo ZIZIMM oglekļa krājas izmaiņu rēķina kā visu zemju izmantošanas kategoriju summu.

$$\Delta C_{ZIZIMM} = \Delta C_{ME} + \Delta C_{AR} + \Delta C_Z + \Delta C_{MI} + \Delta C_{AP} + \Delta C_C, \quad (5.1.)$$

kur

ΔC_{ZIZIMM} – oglekļa krājas izmaiņas, t C/gadā;

ME – meža zeme; AR – aramzeme; Z – zālājs; MI – mitrāji; AP – apbūves teritorija; C – cita zeme.

Oglekļa krājas izmaiņas nosaka, summējot visas krātuves, kas tiek novērotas apskatāmajā zemes izmantošanas veidā.

$$\Delta C_{ZV} = \Delta C_{VB} + \Delta C_{PB} + \Delta C_{AK} + \Delta C_{NB} + \Delta C_{AO} + \Delta C_{NKP}, \quad (5.2.)$$

kur

ΔC_{ZV} – oglekļa krājas izmaiņas konkrētajā zemes izmantošanas veidā, t C/gadā;

VB – virszemes biomasa, PB – pazemes biomasa, AK – atmiruši koksne, NB – nobiras, AO – augsnes organiskā viela, NKP – nocirstie koksnes produkti.

Oglekļa krājas izmaiņa dzīvajā biomasā

Pastāv divas metodes, lai noteiktu oglekļa krājas izmaiņas biomasā: ieguvumu un zudumu metode (*gain – loss method*) un krājumu starpības metode (*stock difference method*). Abās metodēs aktivitātes datus (zemes platību) nosaka inventarizācijas gada beigās, jebkuru pāreju no viena zemes lietošanas veida uz citu uzskaita atsevišķi. Mainot zemes lietojumu uz citu, piemēro pārejas periodu – 20 gadus. Tādējādi, piemēram, meža zeme, kas 2010. gadā tika pārveidota par aramzemi, tiks iekļauta kategorijā “zemes, kas mainījušas lietojumu pēdējo 20 gadu laikā” līdz 2030. gadam. Šāds pārejas periods nozīmē, ka pēc zemes izmantošanas izmaiņām oglekļa krājumi uzkrājas līdz līdzsvara stāvoklim, piemēram, ja zemes lietojuma maiņas rezultātā notiek oglekļa zudums no augsnes, šis zudums netiek pieskaitīts vienā gadā, bet tiek sadalīts vienmērīgi 20 gadu periodā, atspoguļojot pakāpenisko oglekļa samazināšanos. Ir daži izņēmumi, kad visas oglekļa krājas izmaiņas notiek pārejas gadā (t. i., pārejas periods ir viens gads). Turpmāk sekos emisiju un piesaistes aprēķina paraugs zemei, nemainot zemes lietojumu [34].

Ar ieguvumu un zudumu metodi aprēķina oglekļa plūsmu, balstoties uz oglekļa ieguvumiem no dzīvās biomasas pieauguma

un oglekļa pārejā no dzīvās biomasas uz citām krātuvēm (piemēram, dabīgās mirstības vai mežizstrādes rezultātā ogleklis tiek novirzīts uz atmirušās koksnes vai saražoto koksnes produktu krājām) [11].

$$\Delta C = \Delta C_I + \Delta C_Z, \quad (5.3.)$$

kur

ΔC – oglekļa krājas izmaiņas krātuvē gadā, t C/gadā;

ΔC_I – oglekļa ieguvums gadā, t C/gadā;

ΔC_Z – oglekļa zudums gadā, t C/gadā.

Ieguvumu un zudumu metode ir situācijas vienkāršots ataiņojums. Aprēķinot ņem vērā konkrētā zemes izmantošanas veida zemes platību gada beigās. Šī metode der visiem trīs aprēķinu līmeņiem, jo vadlīnijās ir pieejamas vispārinātas vērtības oglekļa krājas izmaiņu aprēķinam gadījumā, ja valstij nav pieejami īpatnējie dati. Neskatoties uz to, visiem līmeņiem ir jāizmanto valsts īpatnējie aktivitātes dati (piemēram, meža platība). 1. līmenī ir vēlams izmantot FAO statistikas portāla datus [35].

$$\Delta C_I = \sum(A \times G_{total} \times CF), \quad (5.4.)$$

kur

ΔC_I – oglekļa ieguvums gadā, t C/gadā;

A – zeme, kas paliek tajā pašā zemes lietojuma kategorijā, ha;

G_{total} – vidējais biomasas pieaugums gadā, t sausas/ha/gadā;

CF – oglekļa frakcija sausnā, t C/(t sausa).

Vidējais biomasas pieaugums gadā ietver gan virszemes, gan pazemes biomasu. Atkarībā no izmantotā aprēķina līmeņa to aprēķina ar 5.5. un 5.6. izteiksmi.

$$1. \text{ līmenis} \quad G_{total} = \sum(G_W \times (1 + R)) \quad (5.5.)$$

$$2 \text{ un } 3. \text{ līmenis} \quad G_{total} = \sum(I_V \times BCEF_I \times (1 + R)), \quad (5.6.)$$

kur

G_W – vidējais virszemes biomasas pieaugums gadā, t sausas/ha/gadā;

R – attiecība starp pazemes un virszemes biomasu, ja uzskata, ka izmaiņu nav, jāpieņem kā 0, t sausas pazemes biomasas / t sausas virszemes biomasas;

I_V – vidējais neto biomasas pieaugums gadā, m³/ha/gadā;

$BCEF_I$ – biomasas konversijas un izplešanās koeficients neto gada pieauguma apjoma konversijai virszemes biomasas pieaugumā (ieskaitot mizu), t virszemes biomasas pieaugums / m³ neto gada pieaugums.

Oglekļa zudumus no biomasas rēķina no mežizstrādes, malkas koksnes izciršanas un traucējumiem (vētras, ugunsgrēki, kaitēkļi).

$$\Delta C_Z = L_M + L_{MK} + L_T, \quad (5.7.)$$

kur

L_M – ikgadējie oglekļa zudumi mežizstrādes rezultātā, t C/gadā;

L_{MK} – ikgadējie oglekļa zudumi malkas koksnes izciršanas rezultātā, t C/gadā;

L_T – ikgadējie oglekļa zudumi traucējumu rezultātā, t C/gadā.

$$L_M = (H \times BCEF_R \times (1 + R) \times CF), \quad (5.8.)$$

kur

H – ikgadējais mežizstrādes apjoms (apaļkoks), m³/gadā;

$BCEF_R$ – biomasas konversijas un izplešanās koeficients piesaistes konvertēšanai no tirgojamā apjoma uz kopējo biomasas piesaisti (ieskaitot mizu), t biomasas piesaistes / m³ piesaistes.

$$L_{MK} = ((FG_k \times BCEF_R \times (1 + R) \times CF) + FG_d \times D \times CF), \quad (5.9.)$$

kur

FG_k – ikgadējais malkas koksnes (veselo koku) izvešanas apjoms, m³/gadā;

FG_d – ikgadējais malkas koksnes (koku daļu) izvešanas apjoms, m³/gadā;

D – koksnes blīvums, t sausnas / m³.

$$L_T = (A_T \times B_T \times (1 + R) \times CF \times Fd), \quad (5.10.)$$

kur

A_T – skartā teritorija, ha/gadā;

B_T – skartās teritorijas vidējā virszemes biomasa, t sausnas / ha;

Fd – biomasas frakcija, kas zaudēta traucējumu laikā (vērtība ir no 0 līdz 1, kur 0 nozīmē, ka traucējumi nav ietekmējuši biomasas apjomus, 1 – visa biomasa ir gājusi bojā).

Ar krājuma starpības metodi aprēķina oglekļa krājuma izmaiņas, salīdzinot oglekļa krājumus sākuma un beigu laika periodā ar nosacījumu, ka platība ir nemainīga. Šo metodi iesaka izmantot, ja valstī tiek veikta mežu un citu zemju inventarizācija, kas ļauj periodiski noteikt krājumu apjomus. Ņemot vērā prasīto datu detalizāciju, šī metode der tām valstīm, kas izmanto 3. līmeņa aprēķina metodi (izņēmumu gadījumā arī 2. līmeņa metodi).

$$\Delta C = \frac{(C_{T2} + \Delta C_{T1})}{(t_2 - t_1)}, \quad (5.11.)$$

kur

C_{T1} – oglekļa krāja laika periodā t_1 , t C / gadā;

C_{T2} – oglekļa krāja laika periodā t_2 , t C / gadā.

Lai aprēķinātu Latvijas oglekļa krājas izmaiņas dzīvajā biomasā visās pamata zemes kategorijās, lietota 2. līmeņa ieguvumu un

zudumu aprēķinu metode. Tas nozīmē, ka tiek izmantoti valsts specifiskie biomasas koeficienti un meža augšanas dati. Aprēķinam nepieciešamie dati iegūti galvenokārt no MRM un LPIS.

Meža zeme – oglekļa krājas izmaiņas dzīvajā biomasā ir galvenais piesaistes avots ZIZIMM sektorā. Šajā zemes lietojumā oglekļa krāja dzīvajā biomasā ir ļoti atkarīga no mežizstrādes. Lai noteiktu biomasas apjomu, biomasas krāju un oglekļa krāju Latvijas teritorijai, katram kokam, kas tiek mērīts MRM, lieto biomasas vienādojumus un oglekļa frakcijas vērtības. Iegūtos datus tālāk ekstrapolē uz Latvijas platību [16].

MRM ir šādas dominējošās koku sugas: apse, baltalksnis, bērzs, egle, melnalksnis, ozols, osis, priede, citas sugas (galvenokārt vītols). Attiecīgi šīm koku sugām ir noteiktas valsts specifiskās vērtības: koksnes blīvums, biomasas pārejas koeficienti, vidējā oglekļa krāja dzīvajā biomasā u. c. (sk. 5.2. tabulu). Kā iepriekš aprakstīts, nedzīvās koksnes sadalīšanās periods ir 20 gadi. Koka sugai raksturīgais mirstības koeficients ir atkarīgs no mežaudzes vecuma un vidējā koka izmēra. Oglekļa krājas izmaiņu aprēķins veikts par pieciem secīgiem atpakaļejošiem gadiem. Tas nozīmē, ka mirstība un sadalīšanās ir ietekmējusi meža krājumu pēdējos piecos gados, pieņemot vienādus meža apsaimniekošanas apstākļus pagātnē.

Aramzeme/zālājs/mitrājs – oglekļa krājas izmaiņas rēķina, pamatojoties uz MRM datiem. Salīdzinātas biomasas krājas izmaiņas un koku atmiruma dati par pēdējiem pieciem gadiem apmežotās teritorijās. Izmantoti tādi paši koeficienti kā meža zemes aprēķinā. Atmirušās koksnes sadalīšanās periods ir 20 gadi (sk. 5.3. tabulu).

Apbūves teritorija – oglekļa krājas izmaiņas dzīvajā biomasā rēķina, izmantojot tos pašus datu parametrus kā tad, kad meža zeme paliek meža zeme: svērtais bruto krājas pieaugums (pēc platības), biomasas ekspansijas faktori, vidējais oglekļa saturs biomasā.

5.2. tabula

Pieņēmumi, kas izmantoti piesaistes/emisiju aprēķinā meža zemē [16]

Suga	Oglekļa saturs koksne, kg tonnā sausas	Nosacītais stumbra koksnes blīvums, t m ⁻³ svaigas koksne	Attiecība starp stumbra un vainaga biomasu	Attiecība starp stumbra un pazemes biomasu
Apse	507,57	0,40	1,20	0,27
Baltalksnis	522,12	0,39	1,22	0,28
Bērzs	521,09	0,49	1,19	0,31
Egle	528,02	0,39	1,41	0,39
Melnalksnis	522,12	0,49	1,19	0,30
Ozols, osis	522,12	0,49	1,19	0,30
Pārējās sugas	522,12	0,46	1,21	0,30
Priede	530,91	0,44	1,22	0,29

5.3. tabula

Pieņēmumi, kas izmantoti piesaistes/emisiju aprēķinā aramzemēs, zālājos, mitrājos, apbūves teritorijā [16]

Gads	Oglekļa saturs koksnē, kg tonnā sausnas	Nosacītais stumbra koksnes blīvums, t m ⁻³ svaigas koksnes	Attiecība starp stumbra un vainaga biomasu	Attiecība starp stumbra un pazemes biomasu
2022	523,99	0,42	0,25	0,31

Visām zemes lietojumu maiņām pārejas periods ir 20 gadi. Apmežojot zemi, oglekļa krāju nosaka ar 2. līmeņa krājas starpības metodi, līdz ar to nav iespējams atsevišķi izteiktu oglekļa krājas zudumus un ieguvumus. Zudumus dzīvās biomasas oglekļa krājā iekļauj ieguvumus kā dabīgo mirstību, un CRF ziņojumā atzīmē kā *“Included Elsewhere” (IE)*. Pieņemts, ka, ja kādu iemeslu dēļ apmežotā teritorijā notikusi mežizstrāde, šie oglekļa krājas zudumi tiek ziņoti pie sadaļas “meža zeme paliek meža zeme”, tā iekļaujot visus no mežizstrādes radušos zudumus. Aprēķinam nepieciešami vidējais blīvums, oglekļa saturs koksnē un konversijas faktori konkrētā gada noteiktās vērtības (sk. 5.3. tabulu) [16].

Meža zemi pārveidojot par aramzemi, oglekļa krāju ziņo kā zudumus, kas ir zemes apmežošanai, jo, transformējot mežu uz kādu citu zemes lietojuma veidu, tiek izcirsti koki, kā rezultātā rodas zudumi oglekļa krājā. Piemēro tūlītējās oksidācijas metodi. Transformējot zālāju par aramzemi, pieņem, ka vidējā oglekļa krāja biomasā zālajos ir 3,36 t C/ha (uzskaita kā zudumus) un vidējā oglekļa krāja biomasā aramzemē ir 4,94 t C/ha (uzskaita kā ieguvumus) [36], [37]. Zemi pārveidojot par zālāju, oglekļa krājas ieguvumus aprēķina, ņemot vērā vidējo oglekļa krāju biomasā zālajos 3,36 t C/ha. Tas nozīmē, ka aktivitātes dati (transformētā platība) ir jāreizina ar šo vērtību. Zemi transformējot par mitrājiem, oglekļa krājas izmaiņas dzīvajā biomasā netiek ziņotas. Zemi transformējot par apbūves teritoriju, pieņem, ka oglekļa krājā rodas tikai zudumi. Pārveidojot meža zemi par apbūves zemi, pieņem, ka zudumi dzīvajā biomasā ir vienādi ar vidējo krājas pieaugumu (aprēķinam nepieciešamā informācija atrodama 5.3. tabulā). Ja zālājs vai aramzeme tiek pārveidoti par apbūves teritoriju, piemēro vidējās oglekļa krājas vērtības biomasā. Oglekļa krājas izmaiņas dzīvajā biomasā no mitrāju pārveidošanas par apbūves teritoriju netiek apskatītas, jo KPSP vadlīnijās nav pietiekamas metodoloģijas [11], [16].

Oglekļa krājas izmaiņas atmirušās organiskās vielās (dead organic matter (DOM))

Šajā krājā ietilpst atmirusī koksne un nobiras, kas sadalās laika gaitā, izdalot oglekli atpakaļ atmosfērā. Šī krāja pieaug pēc traucējumiem, piemēram, meža izciršana izraisa lielu atmirušās biomasas

krājas pieaugumu, kas laika gaitā samazinās, ogleklīm izdaloties atpakaļ atmosfērā biomasas sadalīšanās procesā [38]. Sadalīšanās ātrums (sabrukšanas periods) ir atkarīgs no vides apstākļiem. Tas var būt straujāks mitrākā un siltākā klimatā nekā sausākā un vēsākā klimatā [39]. Jāzina, ka, sadegot biomasai (meža ugunsgrēki), tikai daļa oglekļa tiek izvadīta atmosfērā notikuma gadā. Liela daļa biomasas tiek novadīta uz citām krātuvēm (atmirusī koksne, nobiras, augsne), kur tālāk gadu gaitā pakāpeniski sadalās un atbrīvo oglekli [38].

Ja zemei nemaina lietojuma veidu, 1. līmeņa aprēķinā pieņem, ka atmirušās koksnes un nobiru krājas nemainās laika gaitā un oglekļa zudumi no traucējumiem vai mežizstrādes nonāk atmosfērā notikuma gadā. Tādējādi oglekļa krājas izmaiņas atmirušo organisko vielu krājā nosaka ar nulles vērtību. Neskatoties uz to, ka oglekļa krājas šajā gadījumā nerēķina, ir jāaprēķina ne-CO₂ SEG emisijas, kas rodas biomasas sadegšanas laikā [11].

$$\Delta C_{DOM} = \Delta C_{AK} + \Delta C_{ZE}, \quad (5.12.)$$

kur

ΔC_{DOM} – ikgadējās oglekļa krājas izmaiņas atmirušās organiskās vielā, t C/gadā;

ΔC_{AK} – oglekļa ieguvums gadā, t C/gadā;

ΔC_{ZE} – oglekļa zudums gadā, t C/gadā.

KPSP mudina valstis izmantot 2. un 3. līmeņa metodes, kur, līdzīgi kā dzīvās biomasas oglekļa krājas izmaiņu aprēķinam, var izmantot divas metodes: ieguvumu un zudumu metodi un krājumu starpības metodi.

Ieguvumu un zudumu metodes aprēķins

$$\Delta C_{DOM} = A \times ((DOM_{iejoša} + DOM_{izejoša}) \times CF), \quad (5.13.)$$

kur

$DOM_{iejoša}$ – ikgadējā vidējā biomasas pārvešana atmirušās koksnes / nobiru krātuvē no mežizstrādes un traucējumiem, t saunas / ha / gadā

$DOM_{izejoša}$ – ikgadējais oglekļa zudums no biomasas sadalīšanās un traucējumiem no atmirušās koksnes / nobiru krātuvēm, t saunas / ha / gadā.

$$DOM_{iejoša} = (L_{atmirums} + L_{atliekas} + (L_{traucējumi} \times f_{BIO})), \quad (5.14.)$$

kur

$L_{atmirums}$ – ikgadējā biomasas pārvešana DOM krātuvē no atmiruma, t C / gadā;

$L_{atliekas}$ – ikgadējā biomasas pārvešana DOM krātuvē mežizstrādes atliekas, t C / gadā;

f_{Biol} – biomasas daļa, kas ir atstāta sadalīšanās procesam uz zemes traucējumu izraisītu zudumu dēļ.

$$L_{atmirums} = (A \times G_W \times CF \times m), \quad (5.15.)$$

kur

m – mirstības līmenis, izteikts kā virszemes biomasas pieauguma daļa.

$$L_{atliekas} = ((H \times BCEF_R \times (1 + R))(H - D)) \times CF, \quad (5.16.)$$

kur

H – ikgadējais mežizstrādes apjoms (koksne vai malkas koksne), m^3 /gadā.

Krājumu starpības metodes aprēķins

$$\Delta C_{DOM} = \left(A \times \frac{(DOM_{t_2} + DOM_{t_1})}{T} \right) \times CF, \quad (5.17.)$$

kur

DOM_{t_1} – atmirušās koksnes / nobiru krāja laika periodā t_1 , t sausnas / ha;

DOM_{t_2} – atmirušās koksnes / nobiru krāja laika periodā t_2 , t sausnas / ha;

T – laika periods starp pirmo un otro krājas novērtējumu, gadā.

Meža zemei nemainot lietojuma veidu, oglekļa krājas izmaiņas rēķina ar 2. līmeņa metodi, kur izmanto datus no MRM par dažādu koka sugu dabisko atmirumu, mežizstrādes apjomu un mežizstrādes atliekām. Aprēķinam izmanto tādus pašus koeficientus kā dzīvās biomasas oglekļa krājas aprēķinam (5.2. tabula). Sākotnējo oglekļa krāju, kas ienāk atmirušās koksnes krājā, rēķina līdzīgi dzīvajai biomasai, pievienojot 20 gadu sadalīšanās periodu. Tas nozīmē, ka tiek aprēķināta piesaiste nedzīvajā koksne 20 gadu periodā – kopīgais dabīgais atmirums t/ha/gadā tiek izdalīts ar dabiskā atmiruma mineralizācijas laiku – 20 gadiem. Zemi transformējot par meža zemi, pieņem, ka atmirušās koksnes krāja un nobiru krāja apmežotajā zemē noteiktā audzes vecumā kļūst vienāda ar atmirušās koksnes un nobiru krāju meža zemē, kas paliek kā meža zeme. No MRM datiem pieņem, ka šī krāja seko lineārai regresijai un pēc 150 gadiem sasniegs meža zemei raksturīgās vērtības

Citām zemēm nemainot lietojuma veidu, lai noteiktu oglekļa krājas izmaiņas no atmirušās koksnes, salīdzina dzīvās biomasas krājumu izmaiņas ar koku mirstību pēdējo piecu gadu laikā. Izmanto tādus pašus koeficientus kā dzīvas biomasas oglekļa krājas

aprēķinam (5.3. tabula). Atmirušās organiskās biomasas krāja aramzemē un zālajos bieži vien ir maza, jo apsaimniekotajos laukos un ganību zemēs uzkrājas maz koku atlieku. Savukārt, mainoties zemes izmantošanas veidam (atmežošana), var notikt oglekļa pārnese no dzīvās biomasas uz atmirušo. No pētījumiem tiek pieņemts, ka oglekļa krāja nobirās ir 12,14 t C / ha [40]. Mitrāju gadījumā izmaiņas atmirušās biomasas krājā tiek ziņotas tikai "Citi mitrāji paliek kā citi mitrāji" apakš kategorijā (CRF 4.D.1.c.).

Oglekļa krājas izmaiņa augsnē

Augsnes oglekļa krājas izmaiņas tiek izdalītas divās apakšgrupās: oglekļa krājas izmaiņas minerālaugsnēs un oglekļa krājas izmaiņas organiskās augsnēs.

$$\Delta C_{\text{augzne}} = \Delta C_{\text{minerāla}} - L_{\text{organiska}} + \Delta C_{\text{neorganiska}}, \quad (5.18.)$$

kur

ΔC_{augzne} – ikgadējās oglekļa krājas izmaiņas augsnē, t C / gadā;

$\Delta C_{\text{minerāla}}$ – ikgadējās izmaiņas oglekļa krājā minerālaugsnē, t C / gadā;

$L_{\text{organiska}}$ – ikgadējie oglekļa zudumi no nosusinātām organiskajām augsnēm, t C / gadā;

$\Delta C_{\text{neorganiska}}$ – ikgadējās izmaiņas neorganiskā oglekļa krāja augsnē, t C / gadā (ja izmanto 1. un 2. līmeni, vērtība ir 0).

Latvija izmanto 1. un 2. līmeņa aprēķinu, kā rezultātā neorganiskā krājuma izmaiņas netiek vērtētas. Savukārt oglekļa zudumus no organiskās augsnes rēķina, reizinot organiskās augsnes platības datus ar emisiju faktoru. Latvijā par organisku augsni uzskata augsni, kur organiskais slānis ir vismaz 20 cm dziļš. Organiskais slānis ir augsne, kas ir bagāta ar augu un dzīvnieku atliekām dažādās sadalīšanās stadijās [32], [41].

Emisiju faktori, ko izmanto, lai aprēķinātu oglekļa krājas izmaiņas no organiskās augsnes meža zemē / aramzemēs / zālajos / mitrājos, tika izstrādāti "LIFE REtore" projektā un ir zemāks nekā KPSP vadlīnijās noteiktais emisiju faktors [42]. Apbūves teritorijām izmanto 1. līmeņa aprēķina metodi, līdz ar to tiek lietots noklusējuma emisiju faktors kultivētām organiskām augsnēm (ja augsne ir nosusināta, bet kūdra nav izstrādāta) [32]. "LIFE OrgBalt" projekta ietvarā turpinās oglekļa krājas izpēti organiskās augsnēs, lai nākotnē ieviestu Latvijā 3. līmeņa metodi (modelēšana) [43]. Oglekļa krājas izmaiņas organiskā augsnē, mainot zemes lietojumu, rēķina pēc tāda paša principa kā zemei, nemainot lietojumu.

Latvija izmanto krāju starpības metodi, ja zemei nemaina lietojumu un apsaimniekošana ir stabila. 1. līmeņa metodē pieņem, ka organiskā materiāla daudzums ir līdzsvarā (nav neto gada izmaiņu).

5.4. tabula

Emisiju faktori, ko izmanto, lai aprēķinātu oglekļa krājas izmaiņas organiskajās augsnēs

Zemes kategorija	Emisiju faktors	Valsts īpatnējais/noklusējuma EF
Meža zeme	0,52 t CO ₂ – C ha ⁻¹ gadā ⁻¹	Valsts īpatnējais
Aramzeme	4,8 t CO ₂ – C ha ⁻¹ gadā ⁻¹	Valsts īpatnējais
Zālājs	4,4 t CO ₂ – C ha ⁻¹ gadā ⁻¹	Valsts īpatnējais
Mitrājs	1,21 t CO ₂ – C ha ⁻¹ gadā ⁻¹	Valsts īpatnējais
Apbūves teritorija	7,9 t CO ₂ – C ha ⁻¹ gadā ⁻¹	Noklusējumā

$$\Delta C_{\text{minerāla}} = \frac{(SOC_0 - SOC_{(0-T)})}{D}, \tag{5.19.}$$

kur
 SOC_0 – organiskā oglekļa krāja augsnē inventarizācijas gada beigu periodā, t C;
 $SOC_{(0-T)}$ – organiskā oglekļa krāja augsnē inventarizācijas sākuma periodā, t C;
 D – krājumu izmaiņu faktoru laika atkarība, līdzsvara periods starp SOC vērtībām (20 gadi).

$$SOC = (SOC_{REF} \times F_{LU} \times F_{MG} \times F_I \times A), \tag{5.20.}$$

kur
 SOC_{REF} – oglekļa krājas reference vērtība, t C / ha;
 F_{LU} – krājas izmaiņu faktors zemes izmantošanas veidam;
 F_{MG} – krājas izmaiņu faktors zemes apsaimniekošanas režīmam;
 F_I – krājas izmaiņu faktors organisko vielu ievadei.

Oglekļa krājas izmaiņas minerālaugsnē nosaka, tikai mainot zemes lietošanas veidu. Ņemot vērā pētījumu rezultātus [44], Latvija pieņem, ka nav jāziņo oglekļa krājas izmaiņas, ja tās notikušas, aramzemi pārvēidojot par zālāju (vai pretēji). Arī aramzemei un zālājam nemainot lietojumu, zudumus no minerālaugsnes neuzskata kā emisiju avotu. Tāpat pieņemts, ka meža zeme, kas paliek kā meža zeme ar dabīgi slapju vai mitru minerālaugsni, oglekļa krājas izmaiņas ir 0, jo to uzskata par nebūtisku emisiju avotu [45]. Pētījumā norādīts [46], ka nav arī izteiktu izmaiņu oglekļa krājā minerālaugsnē, ja aramzeme, zālājs vai apbūves teritorija tiek apmežoti. Mitrājus transformējot par meža zemi, pieņem, ka oglekļa krāja pirms transformācijas bija 87 t C / ha, bet pēc konvertācijas – 82,6 t C / ha [16].

Konvertējot meža zemi par aramzemi, oglekļa krāja minerālaugsnē pirms pārejas ir 82,6 t C / ha, bet pēc pārejas perioda (20 gadi) – 79,4 t C / ha. Apbūves teritoriju pārvēršot par zālāju, pieņem, ka oglekļa krāja pirms konvertācijas ir 66,1 t C / ha, bet pēc pārejas perioda – 85,6 t C / ha. Savukārt zemei, kas tiek transformēta par mitrāju, oglekļa krājas izmaiņas minerālaugsnē ziņojumā

5.5. tabula

Oglekļa krāja minerālaugsnē uz vienu hektāru
pēc zemes lietojuma veida [16]

Zemes lietojums	Oglekļa krāja minerālaugsnē, t/ha
Meža zeme	82,6
Aramzeme	79,4
Zālājs	85,6
Mitrājs	85,0
Apbūves teritorija	66,1

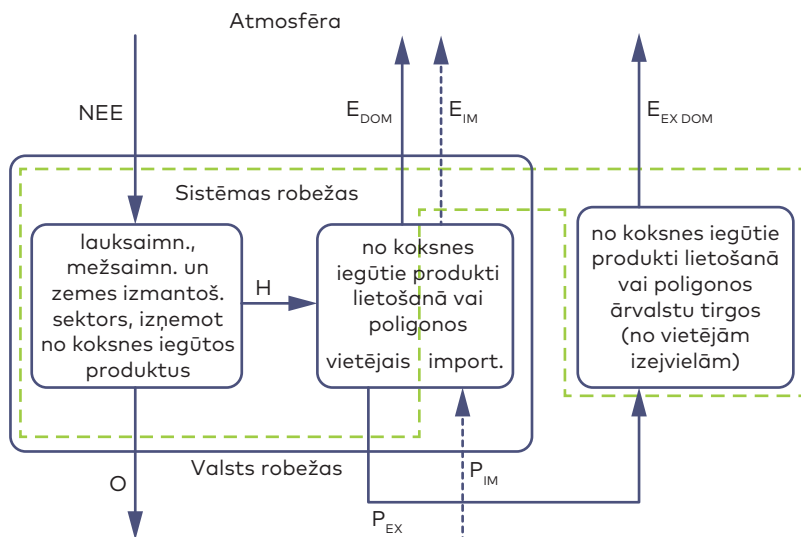
tiek summētas un netiek izdalītas pēc zemes lietojuma veida. Tomēr aprēķins ir jāveic individuāli katrai transformācijai, tikai rezultātā iegūtās vērtības ir jāsummē [16].

Latvijā joprojām notiek *Yasso07* modeļa kvantitatīvo rezultātu pilnveidošana, lai novērtētu oglekļa krājas izmaiņas minerālaugsnē [16]. Plānots, ka rezultāti tiks iekļauti nākamajās emisiju inventarizācijās, uzlabojot ziņoto emisiju/piesaistes bilanci.

5.2.3. Nocirstie koksnes produkti (NKP) (CRF 4Gs)

Šī oglekļa krāja atspoguļo oglekli, kas pēc nociršanas tiek uzkrāts koksnes materiālos (zāgmateriālos, koka paneļos, papīrā). Oglekļa krājas izmaiņas NKP tiek ziņota 4.G. kategorijā. Latvija oglekļa krājas izmaiņu aprēķinā NKP ievēro 2013. gada KPSP KP papildināto metodoloģiju [47]. Aprēķinam lietota ražošanas pieeja un 2. līmeņa metode. Šī pieeja ļauj novērtēt izmaiņas oglekļa krājā valsts meža “baseinā” (*pool*) un saražoto koksnes produktu “baseinā” (*pool*). SARAŽOTO koksnes produktu “baseins” sastāv no koksnes produktiem, kas saražoti no Latvijas koksnes (tostarp eksportam plānotie materiāli). Šāda pieeja nosaka, KAD ir notikušas izmaiņas, nevis KUR [11]. Citiem vārdiem sakot, ražotājvalsts ziņo par CO₂ emisijām, kas uzkrātas vai atbrīvotas no NKP krātuves, kuras izcelsme ir valsts meži, neskatoties uz to, kur produkti rezultātā tiks lietoti. Ražošanas pieejas sistēmas robežas ir redzamas 5.12. attēlā. Robežas ir paplašinātas, lai izsekotu eksportētos koksnes materiālus, neņemot vērā valstī importētos materiālus. Kā iepriekš minēts, mežizstrādes rezultātā ogleklis pāriet no dzīvās biomasas krājas NKP krājā, tādā veidā aizkavējot CO₂ nonākšanu atmosfērā sabrukšanas vai degšanas rezultātā. Latvijā pieņem, ka katru gadu saražotās koksnes oglekļa saturs turpmākajos gados eksponenciāli samazināsies.

NKP iedala kategorijās un apakškategorijās ar īpatnējām vērtībām, piemēram, pusmūža periods, blīvums, oglekļa konvertācijas koeficients u. c. (sk. 5.6. tabulu).



5.12. attēls.

Ražošanas pieejas sistēmas robežas [11].

Aktivitātes datus iegūst no:

- statistikas par saražotajiem produktiem – *FAO, EUROSTAT*;
- mežizstrādes datiem – *MRM* (kopš 2012);
- vēsturiskajiem mežizstrādes datiem – *VMD* (1990–2011).

Kad zeme tiek atmežota (zemes transformācijas gadījumā), saskaņā ar KPSP jebkuri šajā notikumā saražotie kokmateriāli tiek pakļauti tūlītējai oksidācijai. Kad Latvija pirmo reizi uzsāka ziņot piesaisti/emisijas no NKP, tika noteikts sākotnējais oglekļa krājums. Tas veikts, lai ņemtu vērā tos produktus, kas saražoti pirms inventarizācijas laikrindas. Tika pieņemts, ka NKP bija stabilā stāvoklī – ieplūde bija vienāda ar izplūdi, neto izmaiņas vienādas ar nulli. Tas nozīmē, ka bāzes gadā nav notikušas izmaiņas, bet nākamajos gados tās seko. Šāda pieeja ļauj izvairīties no mākslīga emisiju/piesaistes lēciena laikrindas sākumā [11], [16].

$$C(i+1) = e^{-k} \times C(i) + \left(\frac{1 - e^{-k}}{k} \right) inflow(i), \quad (5.21.)$$

kur

$C(i+1)$ – ikgadējās oglekļa krājas izmaiņas, kt C / gadā;

e – eksponenciāla konstante;

k – sabrukšanas konstante, vienības/gadā;

$C(i)$ – oglekļa krāja konkrētā kategorijā i -tā gada sākumā, kt C;

$inflow(i)$ – ieplūstoša plūsma konkrētā NKP kategorijā gada griezumā, kt C / gadā.

$$\Delta C(i) = C(i+1) - C(i), \quad (5.22.)$$

kur

$\Delta C(i)$ – oglekļa krājas izmaiņas konkrētā NKP kategorijā i -tajā gadā, kt C / gadā.

5.6. tabula

NKP iedalījums un īpatnējie koeficienti pēc kategorijām un apakškategorijām [47]

NKP kategorija	NKP apakš-kategorija	Blīvums, g/cm ³	Oglekļa konvertācijas koeficients, C/m ³	Pusmūža periods (half life) HL	K	Eksponenciālā konstante e ^{-k}	Sabrukšanas konstante k
Zāģmateriāli	Skujkoku zāģmateriāli	0,456	0,225	35	0,02	0,98	0,99
	Neskujkoku zāģmateriāli	0,560	0,280				
Koka paneli/plātnes	Kokšķiedru plātne (HDF)	0,788	0,335	25	0,03	0,97	0,99
	Sapresēta kokšķiedru plātne	0,739	0,315				
	Vidējā blīvuma kokšķiedru plātne (MDF)	0,691	0,295				
	Siltum-izolācijas plāksne (LDF/ citas plātnes)	0,159	0,075				
	Skaidu plātne	0,596	0,269				
	Saplāksnis	0,542	0,267				
	Finiera plātnes	0,505	0,253				
NKP kategorija	NKP apakš-kategorija	Blīvums, g/cm ³	Oglekļa konversijas koeficients, Mg C/Mg	HL	K	e ^k	k
Papīrs un kartons	Papīrs un kartons	0,900	0,386	2	0,35	0,71	0,85

5.2.4. Augsnes nosusināšana, mitrināšana vai cita apsaimniekošana (CRF 4II)

Atbilstoši labajai praksei pieņemts, ka augsni iedala šādās kategorijās: nosusināta minerālaugsne, mitra minerālaugsne, nosusināta organiska augsne, mitra organiska augsne. Procesī, kuru rezultātā organiskā augsne tiek nosusināta, ir kūdras izstrāde, mežu apsaimniekošana, aramzemju un zālāju apsaimniekošana.

Nosusinātas organiskas augsnes

CRF 4(II) sadaļā atspoguļotas CH₄ un N₂O emisijas no organiskās augsnes susināšanas un netiek atspoguļotas CO₂ emisijas no tās.

Šīs emisijas attiecinā pie oglekļa krājas izmaiņām augsnē atbilstoši zemes izmantošanas veidam (4A,4B, 4C, 4E), atskaitot mitrājus. Organiskās augsnes nosusināšana ir process, kad mitrā augsnē (piemēram, purvos) tiek pazemināts ūdens līmenis. Tas tiek darīts galvenokārt, lai iegūtu kūdru vai padarītu zemi izmantojamu mežsaimniecībā vai lauksaimniecībā. Susinot tiek veicināta organisko vielu oksidēšanās un sadalīšanās ātrums, kā rezultātā atmosfērā nonāk liels daudzums SEG emisiju [48].

CH₄ emisijas no organiskas augsnes susināšanas aprēķina pēc 1. un 2. līmeņa metodes 2013. gada KPSP vadlīnijām: Mitrzemes.

$$CH_4 = A \times ((1 - Frac_{cg}) \times EF_{zeme} + Frac_g \times EF_{zeme}), \tag{5.23.}$$

- kur
- A – nosusinātās organiskās augsnes platība, ha;
 - EF_{zeme} – nosusinātas organiskas augsnes emisiju faktors, kg CH₄ / ha / gadā;
 - EF_{grāvis} – nosusinātu grāvju emisiju faktors, kg CH₄ / ha / gadā;
 - Frac_g – grāvju īpatsvars no kopējās nosusinātās platības.

Meža zemēm Latvija izmanto noklusējuma emisiju faktoru nosusinātām organiskām zemēm, savukārt grāvjiem ir izstrādāts valsts īpatnējais emisiju faktors, kā rezultātā tas ir vairākas reizes mazāks nekā KPSP vadlīnijās (217 kg CH₄ / ha) [49]. Papildus ir izstrādāti valsts īpatnējie emisiju faktori mitrājiem un zālājiem (tikai organiskai augsnei, ne grāvjiem) [42], [50]. Aramzemju gadījumā rēķina CH₄ emisijas tikai no susinātiem grāvjiem, līdz ar to EF ir 0.

N₂O emisijas no organiskas augsnes susināšanas aprēķina pēc 1. un 2. līmeņa metodes 2013. gada KPSP vadlīnijām: Mitrzemes. N₂O

5.7. tabula

Emisiju faktori CH₄ emisiju no susinātām organiskām augsnēm aprēķinam

Zemes kategorija	Emisiju faktors nosusinātai organiskai augsnei, kg CH ₄ / ha / gadā	Valsts īpatnējais/ noklusējuma EF	Nosusināto grāvju emisiju faktors, kg CH ₄ / ha / gadā	Valsts īpatnējais/ noklusējuma EF	Grāvju īpatsvars no kopējās nosusinātās platības	Valsts īpatnējā/ noklusējuma vērtība
Meža zeme	2,5	Noklusējuma	10,3	Valsts īpatnējais	0,025	Noklusējuma
Aramzeme	0	Noklusējuma	1165	Valsts īpatnējais	0,05	Noklusējuma
Zālājs	77,07	Valsts īpatnējais	1165	Noklusējuma	0,05	Noklusējuma
Mitrājs	10,83	Valsts īpatnējais	122,5	Valsts īpatnējais	0,05	Noklusējuma

5.8. tabula

Emisiju faktori N₂O emisiju no susinātām
organiskām augsnēm aprēķinam

Zemes kategorija	Nosusinātas organiskas augšnes emisiju faktors, kg N ₂ O-N / ha	Valsts īpatnējais/ noklusējuma EF
Meža zeme	2,8	Noklusējuma
Mitrājs	0,44	Valsts īpatnējais
Apbūves teritorija	13	Noklusējuma (aramzeme)

emisijas no augsnes apsaimniekošanas zālajos un aramzemē tiek ziņotas lauksaimniecības sektorā.

$$N_2O = \frac{(A \times EF_{N_2O})}{1000}, \quad (5.24.)$$

kur

N_2O – emisijas no organiskās augsnes susināšanas, t N₂O / gadā;

EF_{N_2O} – konkrētas gāzes un avota emisiju faktors, kg N₂O-N / ha / gadā.

Apbūves teritorijai nav izstrādāti noklusējuma emisiju faktori, tāpēc pieņemts līdzīgas zemes emisiju faktors. Latvija šajā gadījumā piemēro aramzemes emisiju faktoru, jo šīm zemēm ir līdzīga dziļā drenāžas sistēma [16].

Mitrinātas organiskas augsnes

Organisko augšņu mitrināšana (applūdināšana) raksturo procesu, kad iepriekš nosusināta organiska augsne tiek atkārtoti applūdināta vai mitrināta (piemēram, atjaunojot purvus vai mežu mitruma režīmu). Šāda prakse samazina CO₂ emisijas, jo applūdināšana palēnina aerobo sadalīšanos, bet var palielināt CH₄ emisijas, radot mikroorganismiem anaerobus apstākļus [51], [52].

Latvija emisiju aprēķinus veic ar 1. līmeņa metodi, kur izmanto noklusējuma vērtības.

CH₄ emisijas no augsnes mitrināšanas rēķina pēc tādas pašas formulas kā N₂O emisijas no augsnes nosusināšanas. Aktivitātes datus reizina ar emisijas faktoru. CO₂ emisiju aprēķins ņem vērā ne tikai vietējās emisijas, bet arī ārējās emisijas. Pirmajā gadījumā CO₂ rodas no organiskās augsnes sadalīšanās heterotrofu mikroorganismu darbības rezultātā, otrais gadījums raksturo to oglekļa daļu, kas tiek izskalota ūdenī un pēc tam sadaloties atgriežas atmosfērā. Izmantojot augstāku aprēķinu līmeni (2. vai 3.), ir jāiekļauj arī emisijas no degšanas procesa, kas ir norisinājies uz mitrinātas organiskās augsnes [32].

5.9. tabula

Emisiju faktori CO₂ un CH₄ emisiju no mitrinātām organiskām augsnēm aprēķinam

Zemes kategorija	Mitrinātas organiskas augsnes emisiju faktors, kg CO ₂ – C / ha	Valsts īpatnējais/ noklusējuma EF	Emisiju faktors no izšķīdušā organiskā oglekļa, kas izskalots no atkārtoti mitrinātas organiskās augsnes, kg CO ₂ – C / ha	Valsts īpatnējais/ noklusējuma EF	Mitrinātas organiskas augsnes emisiju faktors, kg CH ₄ – C/ ha	Valsts īpatnējais/ noklusējuma EF
Meža zeme/ mitrājs	0,5	Noklusējuma	0,24	Noklusējuma	216	Noklusējuma

$$CO_2 - C_{mitrinātas\ org.\ augsnes} = CO_2 - C_{composite} + CO_2 - C_{DOC}, \tag{5.25.}$$

kur
CO₂ – C – emisijas no organiskās augsnes mitrināšanas, t C / gadā;
CO₂ – C_{composite} – emisijas no organiskās augsnes mitrināšanas, t C / gadā;
CO₂ – C_{DOC} – emisijas no izšķīdušā organiskā oglekļa, kas izskalots no atkārtoti mitrinātas organiskās augsnes, t C / gadā.

CO₂ no augsnes mitrināšanas un CO₂ emisijas no izšķīdušā organiskā oglekļa, kas izskalots no atkārtoti mitrinātas organiskās augsnes, rēķina pēc tādas pašas formulas kā N₂O emisijas no augsnes nosusināšanas. Aktivitātes datus reizina ar emisijas faktoru.

CO₂ emisijas no kūdras izstrādes (4(II).D.1.a.) (organiskas augsnes nosusināšana), kas tiek izmantota dārzniecībā, aprēķina ar 2. līmeņa metodi, piemērojot tūlītējās oksidācijas metodi. Aktivitātes datus (izstrādātās kūdras apjomu tonnās) iegūst no Centrālās statistikas pārvaldes (CSP) datubāzes. Tiek pieņemts, ka oglekļa frakcija kūdrā ir 45 % (no KPSP 2006. gada vadlīnijām [11]) un relatīvais mitrums 40 % (no CSP).

$$CO_2 - C_{kūdra} = \frac{W_{sausā\ kūdra} \times C_{frakcija\ kūdra}}{100}, \tag{5.26.}$$

kur
CO₂ – C_{kūdra} – vietējās emisijas no kūdras izstrādes, Gg C / gadā;
W_{sausā kūdra} – iegūtās kūdras sausais apjoms, t/gadā;
C_{frakcija kūdra} – sausās kūdras oglekļa frakcija pēc svara, t C / t sausas kūdras.

Lai iegūtu sausās kūdras apjomu, izstrādātās kūdras apjoms jāreizina ar relatīvo mitrumu un rezultāts ir jāatņem no sākotnējā izstrādātā kūdras apjoma.

5.2.5. Tiešās un netiešās N₂O emisijas no slāpekļa mineralizācijas/imobilizācijas (CRF 4III)

Tiešās un netiešās N₂O emisijas no slāpekļa mineralizācijas ir saistītas ar augsnes organisko vielu zudumu zemes izmantošanas vai apsaimniekošanas prakses maiņas dēļ. Latvija šīs emisijas nosaka tikai zemes maiņai uz aramzemi vai apbūves teritoriju. Tiešo emisiju aprēķinam izmanto 1. līmeņa metodi, kur N₂O rēķina pēc 5.27. formulas.

$$N_2O - N_N = F_{som} \times EF_N, \quad (5.27.)$$

kur

F_{som} – minerālaugsnē mineralizēta slāpekļa neto daudzums gadā, kas rodas augsnes oglekļa zudumu rezultātā, kg N;

EF_N – emisiju faktors slāpeklim, kas mineralizēts no minerālaugsnes augsnes oglekļa zudumu rezultātā, kg N₂O – N / kg N.

$$F_{som} = (\Delta C_{mineral} \times \frac{1}{R}) \times 100 \quad (5.28.)$$

kur

R – C:N attiecība (15).

Emisiju faktors abos aprēķinu gadījumos ir 0,01 kg N₂O – N / kg N, jo KPSP nepiedāvā vispārinātu emisiju faktoru apbūves teritorijai. Lai aprēķinātu netiešās emisijas, kas rodas izskalošanas vai noplūdes rezultātā, Latvija izmanto 1. līmeņa metodi.

$$N_2O - N_N = F_{som} \times EF_L \times Frakc_L, \quad (5.29.)$$

kur

EF_L – emisiju faktors no noplūdes un izskalošanās, kg N₂O – N / kg N;

$Frakc_L$ – visa slāpekļa frakcija, kas ir zudusi izskalošanās/noplūdes dēļ un tiek pievienota vai mineralizēta apsaimniekotās augsnēs, kur notiek izskalošanās/noplūde, kg N/ kg pievienotā N.

Emisiju faktors ir 0,0075 kg N₂O – N / kg N, un frakcija ir 0,3 kg N / kg pievienotā N (abas vērtības ir no KPSP vadlīnijām). Apbūves teritorijas gadījumā oglekļa zudumus minerālaugsnē nosaka kā 20 % no zudumiem augsnes oglekļa krājā, zemi transformējot par apbūves teritoriju, savukārt emisiju faktori/frakcija ir tādi paši kā aramzemei.

5.2.6. Emisijas no biomasas dedzināšana (CRF 4IV)

Šajā kategorijā rēķina CO₂, CH₄, N₂O emisijas, kas rodas savvaļas ugunsgrēku (meža vai zālāju zemēs) un kontrolētas biomasas dedzināšanas dēļ (mežizstrādes atlieku dedzināšana). Ugunsgrēkus mitrājos attiecina uz meža zemi, jo pēc Latvijas zemes izmantošanas

definīcijas tos nenošķir. Latvijā pieņemts, ka zemē, kura tiek apmežota, nenotiek ugunsgrēki. Dati par ugunsgrēku platībām zālajos tiek saņemti no VUGD un par meža ugunsgrēkiem – no VMD.

Latvija izmanto KPSP 2006. gada metodoloģiju, kur emisijas no savvaļas ugunsgrēkiem rēķina pēc 5.30. formulas. Pieņemts, ka meža ugunsgrēku laikā tiek sadedzināta tikai daļa oglekļa, kas uzkrāts dzīvajā biomasā (tikai virszemes biomasā) [53].

$$L_{uguns} = A \times M_b \times C_f \times G_{ef} \times 10^{-3},$$

(5.30.)

kur

L_{uguns} – SEG emisiju apjoms no ugunsgrēka, t SEG ($\text{CH}_4, \text{N}_2\text{O}$ u. c.);

A – deguma platība, ha;

M_b – sadedzināšanai pieejamā kurināma masa, t sausnas / ha;

C_f – degšanas koeficients;

G_{ef} – emisiju koeficients, g / kg sausnas.

Sadegšanas koeficients parāda proporciju starp pieejamo kurināmo un faktiski sadedzināto biomasu. Šī vērtība ir atkarīga no kurināmā slodzes lieluma (piemēram, tiks sadedzināts koka stumbrs, nevis zāle vai nokritušās koku lapas), kurināmā mitruma un notikuma intensitātes (ko ietekmē klimats un reģionalitāte). Savukārt emisijas faktors šajā gadījumā izsaka to SEG emisiju apjomu, kas izdalās, sadedzinot vienu sausnas vienību. Meža un zālāju ugunsgrēku gadījumā izmanto 1. līmeņa metodi ar noklusējuma emisijas faktoriem [11]. Meža ugunsgrēku gadījumā sadegušās biomasas apjomu pieņem kā vidējo vērtību no pieauguma dzīvajā biomasā, nobirās un atmirušajā koksņē. Tā ir Latvijas īpatnējā vērtība. Savukārt zālāju ugunsgrēku gadījumā pieņem noklusējuma vērtību no vadlīnijām [16]. CO_2 emisijas no savvaļas ugunsgrēkiem zālajos nerēķina, jo pēc vadlīnijām CO_2 , kas nonāks atmosfērā ugunsgrēka laikā, tiks līdzsvarots tuvāko nedēļu/gadu laikā pēc degšanas notikuma, fotosintēzē piesaistot CO_2 atpakaļ biomasā.

Lai aprēķinātu emisijas no kontrolētas biomasas dedzināšanas, Latvija izmanto 2. līmeņa aprēķina metodi. Pieņemts, ka jebkura kontrolēta dedzināšana galvenokārt attiecas uz ražas mežizstrādes atlikumiem (cirtes atliekas). To dara, lai novērstu kaitēkļus. 4V

5.10. tabula

Savvaļas ugunsgrēku emisijas faktori

Biomasas sadedzšanas notikuma kategorija	Emisiju faktori, g / kg sausnas			Degšanas koeficients	Sadedzināšanai pieejamā kurināma masa, t sausnas / ha
	CO_2	CH_4	N_2O		
Meža ugunsgrēks	1550 (±95)	6,1 (±2,2)	0,06	0,45	-
Zālāju ugunsgrēks	-	2,3 (±0,9)	0,21 (±0,1)	0,74	2,1

sadaļā attiecinā CH₄ un N₂O emisijas. Sadedzinot atlikumus, šo daudzumu atņem no atmirušās koksnes krājas pieauguma (nenoglabājot to šajā krājā) un ziņo kā tūlītējas CH₄ un N₂O emisijas (tūlītēja oksidācija). CO₂ emisijas no kontrolētas biomasas dedzināšanas uzskaita kā zudumus dzīvajā biomasā (4A sadaļa), līdz ar to 4V sadaļā CRF atzīmē kā *IE (Included Elsewhere)*, lai izvairītos no dubultas uzskaites. Aprēķinam izmanto meža ugunsgrēku emisijas faktorus (sk. 5.11. tabulu), un degšanas koeficients ir 0,62. Neskatoties uz to, ka emisiju faktors un sadegšanas koeficients ir 1. līmeņa, aktivitātes dati ir precīzāki. Biomasu, kas atstāta mežā un ir pieejama sadedzināšanai, rēķina, balstoties pētījumā, kur, sākot no 2010. gada, sadedzināšanai atstātu mežizstrādes atlieku īpatsvars ir 7 %. Salīdzinot ar vērtību pirms 2000. gada 50 %, īpatsvars ir būtiski samazinājies, jo šāda cirtes kopšana nav ilgtspējīga vai finansiāli izdevīga, tāpēc to piemēro salīdzinoši reti. Arī mežizstrādes atlieku dedzināšanā pieņem, ka sadeg tikai virszemes biomasa (stumbra fragmenti un zari) [53].

5.3. Klimata pārmaiņu mazināšanas tehnoloģiskie risinājumi

ZIZIMM sektors ir viens no būtiskākajiem oglekļa piesaistes avotiem Latvijā, kas atkarībā no zemes apsaimniekošanas prakses vienlaikus var būt gan emisiju avots, gan piesaistes mehānisms [54], [55]. Eiropas un Latvijas klimata mērķu sasniegšanā šī sektora loma ir īpaši nozīmīga, jo dzīvā biomasa un augsne spēj uzkrāt ievērojamu oglekļa daudzumu, bet neatbilstoša apsaimniekošana, piemēram, augsnes nosusināšana, neefektīva mežizstrāde vai purvu degradācija, rada lielas SEG emisijas [31].

Latvijā ZIZIMM sektorā dekarbonizācijas mērķis ir panākt, ka sektora piesaistītā oglekļa daudzums pārsniedz vai vismaz līdzsvaro radītās emisijas [56]. No Latvijas Nacionālais enerģētikas un klimata plāna 2021.–2030. gadam (NEKP) bāzes scenārija izriet, ka Latvija nerasniegs mērķrādītāju līdz 2030. gadam (- 644 kt CO₂ ekv.). Tomēr NEKP paredz vairākus tehnoloģiskos risinājumus un apsaimniekošanas prakses uzlabojumus ZIZIMM sektorā, lai sasniegtu mērķi [57].

Šajā apakšnodaļā aplūkoti NEKP minētie galvenie tehnoloģiskie virzieni ZIZIMM sektora dekarbonizācijā. Pasākumi ir sagrupēti tematiskās nodaļās, ietverot apmežošanu un meža apsaimniekošanas uzlabošanu, organisko augšņu emisiju samazināšanu un mitrāju atjaunošanu, kā arī ilgtspējīgu koksnes produktu izmantošanu. Katrs no šiem risinājumiem izvērtēts, ņemot vērā zinātniskos pētījumus, politikas dokumentus un citu valstu pieredzi.

5.3.1. Apmežošanas pasākumi

Apmežošana nozīmē jaunu mežaudžu ierīkošanu zemēs, kur iepriekš ilgstoši nav auguši koki. Šī prakse atšķiras no dabiskās mežu atjaunošanās, jo tā paredz mērķtiecīgu koku stādīšanu lauksaimniecībā neizmantotajās zemēs, degradētās zemēs vai citās teritorijās, kas neatbilst meža definīcijai. Šis ir viens no nozīmīgākajiem klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumiem ZIZIMM sektorā, jo tas veido oglekļa krājas pieaugumu dzīvajā biomasā un augsnē, vienlaikus uzlabojot bioloģisko daudzveidību un augsnes struktūru.

Mērķtiecīga organisko augšņu apmežošana lauksaimniecībā izmantojamās zemēs

Šis pasākums paredz apmežot nosusinātas organiskās augsnes lauksaimniecības zemēs, saglabājot tās kā mežus ar meliorācijas sistēmu. Apmežošana samazina emisijas, kas rodas no organisko vielu oksidācijas, un nodrošina piesaisti jaunās koku audzēs. Tomēr apmežošanas ietekme uz augsnes īpašībām ir atkarīga no konkrētās situācijas. Dažos gadījumos apmežošana var samazināt augsnes organiskā oglekļa daudzumu vai mainīt barības vielu apriti [58], piemēram, samazinot kopējo fosfora daudzumu vai ietekmējot slāpekļa pieejamību atkarībā no iepriekšējās zemes apsaimniekošanas un vietējiem apstākļiem [59], [60].

Tāpat kā citi apmežošanas pasākumi, organisko augšņu apmežošana lauksaimniecības zemēs veicina ilgtspējīgas biomasas izmantošanu enerģijas ražošanā, kas savukārt atbilst ES atjaunojamo energoresursu direktīvas (RED III) kritērijiem [61].

Mazāk vērtīgo lauksaimniecības zemju mērķtiecīga apmežošana

Šis pasākums skar zemes lietojuma maiņu, kur tiek apmežotas mazvērtīgas lauksaimniecības zemes ar minerālaugsnēm. Par mazvērtīgu lauksaimniecības zemi var uzskatīt zemi ar zemas auglības augsni (mazauglīga – zemes vērtība ir 25–35 balles (maksimālā vērtība 100)), kā arī attālas, grūti apstrādājamās zemes platības.

Zemes balles ir skaitlisks rādītājs, kas raksturo konkrētas zemes ražīgumu un lietošanas piemērotību, ņemot vērā augsnes meliorācijas sistēmu stāvokli, akmeņainību un reljefu. Jo augstāks ir vērtējums ballēs, jo auglīgāka un produktīvāka ir zeme [62].

Šo zemju apmežošana veicina oglekļa piesaisti dzīvajā biomasā, laika gaitā – arī augsnē, papildus šāda prakse samazina emisijas, kas varētu rasties no lauksaimniecības zemes apstrādes (minerālmēsli, aršana u. c.) [63]. Ekonomiski šādas zemes sniedz iespēju nākotnē

iegūt koksni un citus meža resursus, tā dažādojot ienākumus, kurus var gūt lauksaimnieki [64], [65]. Tomēr sākotnējā periodā oglekļa piesaiste un ekonomiskā atdeve ir zema, tāpēc nepieciešams valsts atbalsts, lai kompensētu zemes īpašnieku īstermiņa zaudējumus un veicinātu šādas prakses īstenošanu [66].

Mērķtiecīga mežu ieaudzēšana izstrādātos kūdras laukos

Mērķtiecīga mežu ieaudzēšana izstrādātajos kūdras laukos ir rekultivācijas pasākums, kas piemērojams degradētām zemes platībām, kur kūdras izstrāde ir noslēgusies un teritorija ir palikusi ar vāji attīstītu veģetāciju. Tomēr, ja netiek atjaunots kūdrāju hidroloģiskais režīms, šāda apmežošanas pilnvērtīgi neatjauno ekosistēmas funkcijas un oglekļa piesaistes potenciālu, jo netiek apturēts kūdras oksidācijas process [67], [68].

Latvijā ir viens no lielākajiem kūdrāju īpatsvaram ES [69], kur aptuveni 36 % (50 179 ha) no kūdrājiem uzskatāmi par degradētiem. Degradētus kūdrājus izmanto gan lauksaimniecībā, gan ganībās, gan mežsaimniecībās vai arī atstāj, lai tie dabiski atjaunojas. Latvijā mērķtiecīgi apmežoti vai aizauguši kūdrāji aizņem vien 14 % no kopējās platības, bet pašatjaunošanās notikusi tikai 5 % kūdrāju [70]. Papildu pētījumi norāda, ka kūdrāju izmantošana mežsaimniecībā vai lauksaimniecībā būtiski paātrina kūdras noārdīšanos, salīdzinot ar dabiskiem apstākļiem [71].

Joprojām trūkst pārliecinošu pierādījumu tam, ka apmežotie kūdras lauki ilgtermiņā spēj kompensēt oglekļa zudumus no kūdras izstrādes. Daudzos gadījumos emisijas no organiskās augsnes pārsniedz oglekļa piesaistes apjomus koksnē, kā rezultātā šāds zemes lietojuma veids ir SEG emisiju avots [67]. Papildus šāds pasākums var konfliktēt ar mitrāju atjaunošanas mērķiem, jo, balstoties ES regulā par dabas atjaunošanu (2024/1991), prioritāte ir dabisko purvu atjaunošana, nevis apmežošana [72], [73].

5.3.2. Meža apsaimniekošanas uzlabošanas pasākumi

Šajā apakšnodaļā apkopoti pasākumi, kas spēj uzlabot esošo mežu augšanu un oglekļa piesaisti. Tādi pasākumi kā meža augsnes mēslošanas un ielabošana, ūdens režīma regulēšana, mežaudžu kvalitātvai atjaunošana un kopšana palielina koksnes pieaugumu, veicinot oglekļa piesaisti dzīvajā biomasā, augsnē un koksnes produktos. NEKP aprēķini liecina, ka meža apsaimniekošanas uzlabojumi var dot būtisku ieguldījumu SEG emisiju samazināšanā. Piemēram, hidroloģiskā režīma uzlabošana slapjajņos var samazināt CO₂ emisijas par aptuveni 875 tūkst. t CO₂ ekv. Turpmāk aplūkoti galvenie šīs jomas pasākumi.

Meža mēslošana

Augsnes ielabošana kūdreņos, izmantojot koksnes pelnus

Kūdreņos un nabadzīgās augsnēs augošu mežu mēslošana (piemēram, ar koksnes pelniem) var būt viens no efektīvākajiem veidiem, kā palielināt mežaudžu pieaugumu un oglekļa piesaisti. **Pelnu mēslojumu** izklieš uz kūdrāju augsnes. Koksnes pelni satur svarīgus makroelementus (K, P, Ca, Mg), kas bieži ir deficīts kūdreņu augsnēs. Papildus koksnes pelni veicina pH līmeņa paaugstināšanos, mazinot augsnes skābumu, uzlabojot barības vielu uzņemšanu un dzīvās biomasas augšanu kopumā. Šādu mēslošanu var atkārtot ar regularitāti reizi 7–10 gados vai pēc katras kopšanas cirtes [74].

Ir jāņem vērā riski, ka pārmērīga pelnu lietošana var stimulēt smago metālu uzkrāšanos (pelnu kvalitāte ir jāuzrauga) un barības vielu nelīdzsvarotību [75]. Nav ieteikts koksnes pelnu mēslojumu izmantot lieguma teritorijās, jo tas var radīt izmaiņas augu biotā [76]. NEKP paredzēts, ka līdz 2030. gadam plānots lietot šo praksi 21,8 tūkst. ha kūdreņu, un kā viens no izmantošanas ierobežojumiem tiek minēts Latvijā pieejamais koksnes pelnu apjoms [57]. Latvijā saražoto koksnes pelnu apjoma precīza uzskaite ir apgrūtināta, jo daļa pelnu tiek nodota lauksaimniecības un mežsaimniecības vajadzībām bez apjoma uzskaites un daļa tiek noglabāta poligonā [77].

Minerālmēslu izmantošana sausieņos un āreņos ir process, kad mežos ar sausu un barības vielām nabadzīgu augsni (minerālaugsni) izklieš slāpekli un fosforu saturošus minerālmēslus.

Sausieņu meži – meži ar sausām minerālaugsnēm, bez kūdras slāņa, raksturīga liela koksnes krāja. Gruntsūdeņi tiešā veidā neietekmē sausieņu mežu koku sakņu sistēmu. **Āreņi** – meži nosusinātās minerālaugsnēs, kur cilvēku darbība ietekmējusi augšanas apstākļus [78].

Šāda prakse spēj veicināt koku augšanas tempus un produktivitāti, nodrošinot papildu koksnes pieaugumu, tādējādi palielinot CO₂ piesaisti oglekļa krātuves (dzīvā biomasā, nedzīvā biomasā, augsnē) [79], [80]. Latvijas NEKP aprēķini paredz, ka, apmēslojot 21 tūkst. ha platību, var panākt papildu piesaisti 185 tūkst. t CO₂ ekv. [57], [81].

Pētījumi Somijas, Zviedrijas un citos mērenā klimata mežos [82], [83] norāda, ka slāpekļa un fosfora mēslojuma izmantošana noteiktos apstākļos (piemēram, slāpekļa deficīts augsnē) var palielināt koksnes pieaugumu, dažos gadījumos līdz pat 50 %. Neskatoties uz to, ka šāda prakse var uzlabot oglekļa piesaisti dzīvajā biomasā, piesaistes apjoms ir atkarīgs no augsnes auglības un meža stāvokļa. Vidēji boreālajos un mērenās joslas mežos uz katru pievienoto slāpekļa kilogramu piesaistās 11 kg līdz 14 kg oglekļa [84], [85] (apjoms var atšķirties no mēslojuma devas, augsnes stāvokļa un meža lokācijas). Pētījums [86] norāda, ka N₂O emisijas no slāpekļa mēslojuma

ir mazākas nekā oglekļa piesaiste dzīvajā biomasā no radītā pieauguma, radot pozitīvu neto efektu. Fosfors ir svarīga barības viela meža produktivitātei. Tas spēj veicināt sakņu sistēmu attīstību un ilgtermiņā var nodrošināt lielāku oglekļa piesaisti. Atšķirībā no slāpekļa mēslojuma fosfora mēslojums reti izraisa SEG emisiju pieaugumu, tomēr ietekme uz dzīvās biomasas pieaugumu ir zemākā nekā slāpekļa mēslojumam [82]. Bieži vien slāpekļa mēslojumu kombinē ar citām barības vielām, piemēram, fosforu, radot sinerģisku efektu, palielinoties dzīvās biomasas apjomam un oglekļa piesaistei, novēršot barības vielu deficītu, kas var rasties, lietojot tikai vienas barības vielas minerālmēslojumu [87].

Neproduktīvu audžu nomaiņa

Neproduktīvas audzes Latvijā raksturo zems koksnes pieaugums, kas ierobežo oglekļa piesaisti. Šādas audzes visbiežāk ir sastopamas mazvērtīgās, barības vielām nabadzīgās augsnēs vai teritorijās, kur vēsturiski apsaimniekošanas rezultātā iestādītas neatbilstošas koka sugas. Latvijā neproduktīvās mežaudzes nosaka pēc MK noteikumiem Nr. 935 "Noteikumi par koka ciršanu mežā" [88] kritērijiem. Par neproduktīvu audzi, balstoties šajos kritērijos, var uzskatīt, piemēram, priežu, egļu vai bērza audzes ar pārmērīgu mazvērtīgu koku piemistrojumu, audzes ar ilgstoši zemu pieauguma tempu (zema bonitāte) vai būtiski bojātas audzes. Neproduktīvas audzes var nocirst un aizstāt ar augstvērtīgām sugām (parasti stāda piemērotas koka sugas, piemēram, priedi uz sausām smilšainām augsnēm, bet melnalksni vai bērzu auglīgākās augsnēs), tomēr šī kārtība neattiecas uz aizsargājamām teritorijām, ES nozīmes biotopiem vai citām teritorijām ar īpašu statusu. Šāda atruna nodrošina to, ka audžu nomaiņa notiek mērķtiecīgi un tikai tur, kur tā ir pamatota gan no mežsaimnieciskā, gan klimata politikas viedokļa. NEKP līdz 2030. gadam kā mērķa rādītāju nosaka 10 tūkst. ha neproduktīvu audžu nomaiņu [57].

Hidroloģiskā režīma uzlabošana slapjajos

Šis pasākums ir vērsts uz ūdens režīma optimizēšanu meža zemēs ar pārmērīgu mitrumu, novēršot pārlietu augstu gruntsūdeņu līmeni, veicinot augsnes aerāciju, uzlabojot koku augšanas apstākļus. Šajā procesā ir jābūt piesardzīgiem, jo pārlietu intensīva nosusināšana var veicināt CO₂ emisijas, jo organiskās augsnēs notiek oksidēšanās procesi [89]. Pasākuma tehniskais risinājums ietver selektīvu grāvju tīkla ierīkošanu vai uzlabošanu un vietējos paņēmienus liekā ūdens novadīšanai, piemēram, dziļvagu un ievalku izrakšana lokālās ieplakās. Papildus ir jāveic meliorācijas sistēmu uzturēšana pēc galvenās cirtes. Līdzīgi kā citās uz dzīvās biomasas pieaugumu orientētās praksēs, arī šīs prakses efektivitāte ir atkarīga no koku sugas, augsnes tipa un klimatiskajiem apstākļiem. Uzlabojot hidroloģisko

režīmu, tiek veicināta koku augšana, rezultātā palielinot biomasas krāju, kas savukārt sekmē oglekļa piesaistes pieaugumu. Papildus šāds pasākums mazina anaerobos apstākļus augsnē, tā mazinot CH₄ emisijas. Veicot šo praksi, ir jāņem vērā, ka tā nav paredzēta dabiskajiem purviem vai ES nozīmes biotopiem [90].

5.3.3. Agromežsaimniecības pasākumi

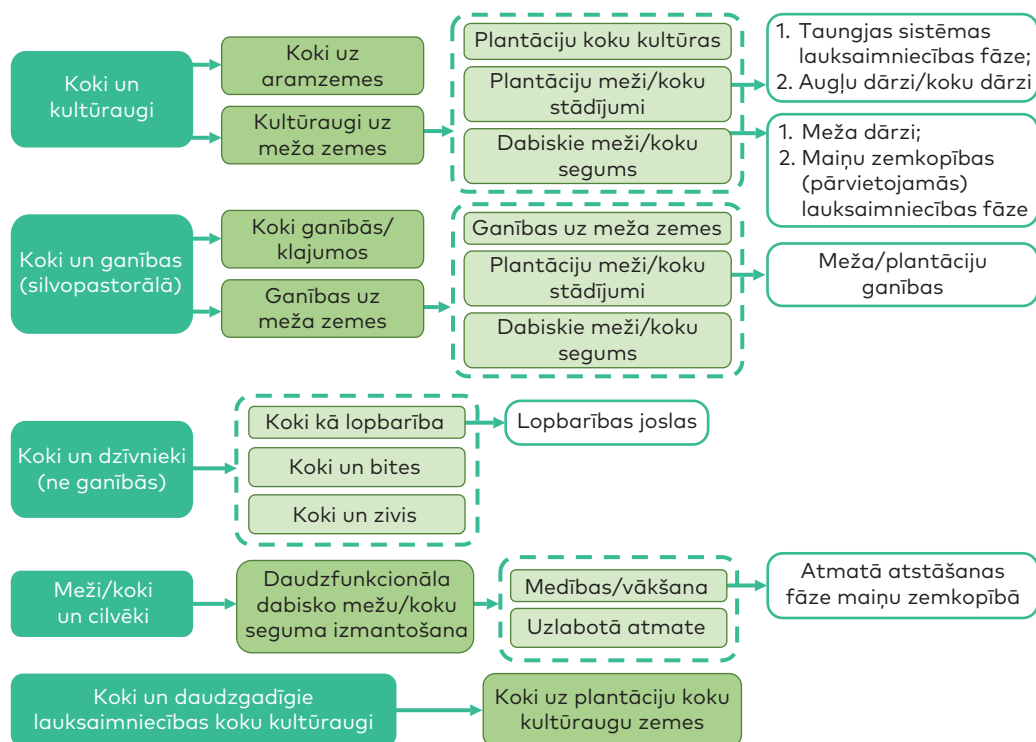
Agromežsaimniecības pasākumi paredz mērķtiecīgu koku un krūmu integrāciju lauksaimniecības ainavās, veidojot sistēmas, kurās koku vai krūmu audzes, kultūraugi un/vai ganāmpulki pastāv vienlaikus un papildina viena otru. Šādas prakses ne tikai veicina oglekļa piesaisti, bet arī nodrošina koksnes resursus, mazina augsnes eroziju, uzlabo bioloģisko daudzveidību un ganību kvalitāti. 5.13. attēlā ir shematiski parādīts agromežsaimniecības strukturālais sistēmu iedalījums.

Kokaugu joslu stādījumi

Kokaugu un krūmu joslu stādīšana lauksaimniecības zemēs ir efektīva oglekļa piesaistes prakse. Šādas joslas tiek mērķtiecīgi integrētas gar lauku robežām, starp kultūraugu joslām vai kā

5.13. attēls.

Agromežsaimniecības praksi primārā klasifikācija [91].



ūdenstilpnes buferjosla. Tās vienlaikus veic vairākas funkcijas: uzkrāj oglekli biomasā un augsnē, pasargā augsni no vēja erozijas un palielina ainavas ekoloģisko vērtību, nodrošinot biotopus daudzām sugām. Koku apstādījumi laukos būtiski palielina dzīvās biomasas apjomus un augsnes organisko oglekli, uzlabojot augsnes struktūru un auglību. Turklāt aizvēja efekts, ko rada kokaugu joslas, pozitīvi ietekmē kultūraugu produktivitāti. Piemēram, pētījumi liecina, ka kviešu raža aizsargjoslu ietekmes zonā var pieaugt vidēji par 23 %, īpaši teritorijās, kas pakļautas lielākam vēja radītam stresam [92].

Svarīgi ņemt vērā, ka dažādiem kokaugu stādījumu tipiem ir atšķirīgs oglekļa piesaistes potenciāls. Krūmu joslām (*hedgerows*) raksturīgs augstāks augsnes organiskā oglekļa uzkrājums nekā koku joslām/alejkultūrām (*alley cropping*), kur kokus stāda rindās starp lauksaimniecības kultūrām. Tāpat zinātniskie pētījumi rāda, ka platlapju koku sugas nodrošina augstāku oglekļa uzkrāšanos augsnē, salīdzinot ar skujukokiem, kas bieži dod mazāku, bet ilgtermiņā stabilāku pieaugumu. Oglekļa piesaistes apjoms ir atkarīgs no kokaugu sugas. Vidēji koku joslu sistēma vidēji gadā nodrošina 1,15 t C / ha oglekļa piesaisti augšējā augsnes slānī (0–20 cm), un 0,25 t C / ha slānī 20–40 cm [93], [94].

Jāņem vērā, ka šāda prakse aizņem lauksaimniecības zemi, var radīt ēnojumu vai konkurenci ar kultūraugiem, radot samazinātas ražas risku [95]. Koku un krūmu joslas ir regulāri jāuztur (jāapgriež vai jāatjauno), jo novārtā atstātās joslas var kļūt par oglekļa emisiju avotu [96], [97].

Īscirtmeta atvasāji

Īscirtmeta atvasāji (*short rotation coppice (SRC)*) ir ātraudzīgo koku (kārkli, papeles, apšu hibrīd sugas) plantācijas, ko audzē īsā rotācijas ciklā (3–8 gadi) atkarībā no sugas un augšanas apstākļiem. Bieži vien šādu audzi ievieš lauksaimniecības zemēs vai mazvērtīgās mežaudzēs. Jāatceras, ka šāda prakse nemaina zemes lietojuma veidu, lauksaimniecības zeme netiek transformēta par meža zemi. SRC plantācijas var uzkrāt ievērojamus oglekļa apjomus gan virszemes, gan pazemes biomasā. Piemēram, baltās robīnijas atvasāji uz nekultivētām raktuvju augsnēm Vācijā 36 gadu periodā virszemes un pazemes biomasā uzkrāja aptuveni 65 Mg C / ha, bet papeļu atvasāji – 9 Mg C / ha [98], savukārt vītoli atvasāji Polijā sasniedza 13,5 Mg C / ha [99]. Pētījumi rāda, ka pāreja no lauksaimniecības zemes uz SRC plantācijām ne vienmēr sekmē augsnes organiskā oglekļa pieaugumu. Šīs izmaiņas ir atkarīgas no teritorijas, kur tiek veikta šāda prakse [100]. Īscirtmeta atvasāju plantācijas uzlabo augsnes struktūru, bioloģisko daudzveidību un ūdens cirkulāciju [101], [102]. Papildus pēc katra rotācijas cikla no plantācijas pieejamo biomasu var izmantot enerģijas ražošanai, aizstājot fosilo kurināmo, tā netieši samazinot enerģētikas sektora emisijas [103].

Koku grupas ganībās

Ieaudzējot kokus vai koku grupas ganību laukos (silvopastorāla sistēma) var veicināt papildu oglekļa piesaisti gan biomasā, gan augsnē, papildināt augsni ar organiskajām vielām no koku lapām vai saknēm. Papildus šāda prakse uzlabo augsnes struktūru un mitruma režīmu, mazinot nepieciešamību pēc papildu mēslojuma izmantošanas, rezultātā mazinot N_2O emisijas, kas rodas no sintētiskā minerāl-mēslojuma izmantošanas [104].

Silvopastorālas sistēmas uzkrāj būtisku oglekļa daudzumu virszemes biomasā. Pēc KPSP 2019. gada vadlīnijām pieņemts, ka mērenā klimata reģionos oglekļa akumulācija virszemes biomasā uz vienu hektāru ganību zemēs ir aptuveni 2,33 t C gadā, ja koku blīvums ir 854 stumbri uz vienu hektāru un rotācijas cikls ir 30 gadu [105]. Augsnes organiskā oglekļa piesaistes apjoms šādā agromežsaimniecības praksē bieži vien ir neliels vai dažos gadījumos rodas nelieli zaudējumi [93]. Tomēr, ja neapsaimniekotu vai degradētu zemi pārvērst par zālāju ar silvopastorālu sistēmu, ir iespējams palielināt augsnes organiskā oglekļa krāju par 25 % 0–30 cm augsnes dziļumā [106]. Oglekļa piesaistes apjoms ir atkarīgs no ieaudzēto koku sugas, apstādījumu blīvuma, klimatiskajiem apstākļiem un zemes apsaimniekošanas. Pētījumi liecina, ka ir pozitīva saikne starp koku daudzveidību un oglekļa uzkrāšanu silvopastorālās sistēmās [107]. Reģionālais klimats ietekmē koku augšanas ātrumu un augsnes oglekļa dinamiku. Piemēram, mērenajā zonā augšanas ātrums un augsnes organiskā oglekļa uzkrāšanas ātrums var būt lēnāks, salīdzinot ar tropisko klimata zonu, tomēr mērenajā klimata zona kopējais uzkrātais oglekļa daudzums gala rezultātā ir lielāks [108]. Apsaimniekošanas prakse – koku sugu izvēle, ganību intensitāte, mēslošana – var būtiski ietekmēt oglekļa piesaisti, piemēram, slāpekļa nogulsnešanās var veicināt koku augšanu, tomēr pārmērīgs slāpekļa daudzums augsnē var radīt negatīvu ietekmi [109].

Dažādas koku sugas atšķirīgi veicina oglekļa piesaisti dažāda augšanas ātruma, vainaga struktūras, nobiru kvalitātes un barības vielu aprites dēļ. Piemēram, pētījumā Čehijā [110] norādīts, ka vislielākais piesaistītais oglekļa apjoms biomasā ir kļavai (*sycamore maple*) un liepai (*lime*) (104,3 t/ha un 91,7 t/ha), savukārt dižskābardis (*beech*) uzrādīja viszemāko vērtību –14,8 t/ha. Visaugstākās augsnes oglekļa vērtības bija mežaudzēs ar liepu apstādījumu (2,6 t/ha), un vissliktākās vērtības – ar kļavām (1,3 t/ha) [110]. Augsnes organiskā oglekļa uzkrāšana, it īpaši augsnes virsējā slānī un humusā, ir atkarīga no koku vecuma. Audzei novecojot, palielinās gan piesaistītais oglekļa daudzums, gan piesaistes dziļums augsnē [60]. Pētījumos [111] ir noteikts, ka platlapju koki kopumā spēj nodrošināt lielāku oglekļa piesaisti augsnē, jo bieži vien šādiem kokiem ir dziļākas sakņu sistēmas nekā skujkokiem, kā arī platlapju koki nodrošina lielāku nobiru daudzumu, kas sadalās ātrāk nekā nobiras no skujkokiem.

5.3.4. Bioogles izmantošana aramzemē

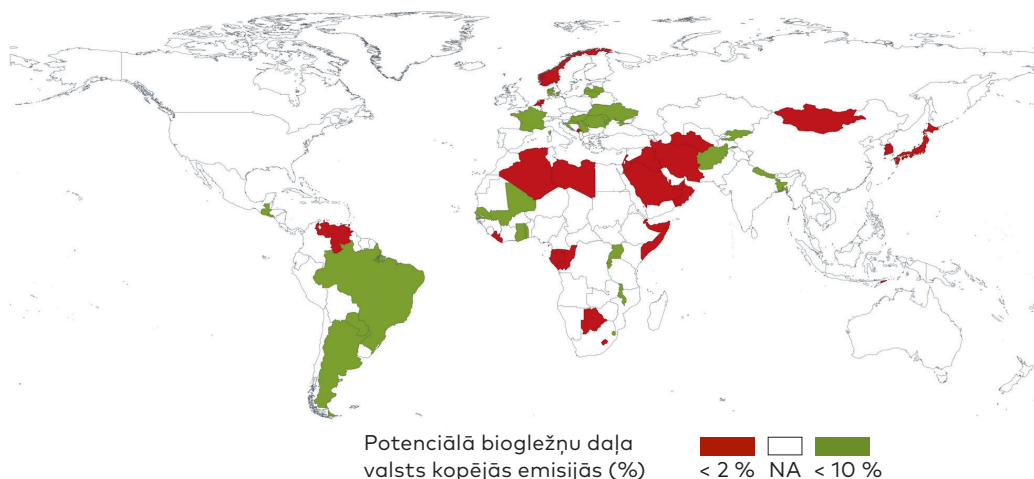
Bioogle ir viena no *CDR* (*carbon dioxide removal*) tehnoloģijām. Tā ir stabila oglekļa forma, kas augsnē spēj saglabāties no 100 līdz 1000 gadiem ar nelieliem CO₂ zudumiem atmosfērā. Bioogle iegūst biomasas termoķīmiskās konversijas (pirolīzes, gazifikācijas, torefikācijas) ceļā. Bieži vien to iegūst kā blakusproduktu singāzes vai bioeļļas ražošanā [112], [113]. Pateicoties lielajai virsmas platībai un augstajai porainībai, bioogle spēj ne tikai piesaistīt oglekli ilgtermiņā, bet arī uzlabot augsnes kvalitāti, attīrot to no piesārņojuma un veicinot augsnes auglīgumu [114]. Bioogle arī mazina emisijas no minerālmēslu izmantošanas, jo savu fizikālo īpašību dēļ var samazināt mēslojuma izmantošanu apjomus par 10 % [115], slāpekļa mēslojuma gadījumā – pat līdz pat 30 % [116]. Bioogles fizikāli ķīmiskās īpašības galvenokārt ir atkarīgas no izmantotās ražošanas tehnoloģijas un izejvielām (lauksaimniecības vai koksnes atlikumi, kūtsmēsli, dūņas). Saskaņā ar 2023. gada pētījumu [117] Latvijai ir viens no augstākajiem bioogles CO₂ piesaistes potenciāla rādītājiem Eiropā, kas izteikts procentos no kopējām SEG emisijām valstī (15–20 %) (sk. 5.14. att.).

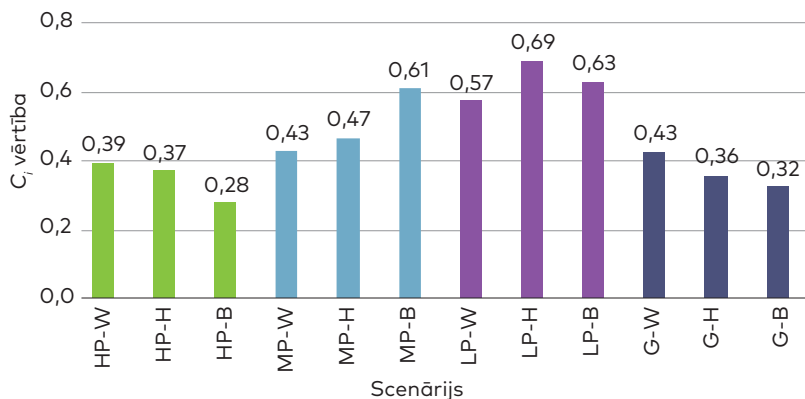
5.14. attēls.

Globālā karte ar valstīm, kurām ir visaugstākais bioogles potenciālais ietekmes līmenis (> 10 % no valsts emisijām – zaļā krāsā) un viszemākais potenciālais ietekmes līmenis (< 2 % no valsts emisijām – sarkanā krāsā) [117].

Pētījumā [118] veikta 12 bioogles ražošanas scenāriju salīdzinošā analīze, izmantojot *TOPSIS* analīzi. Secināts, ka bāzes scenārijā (visas indikatoru grupas ir vienlīdzīgas pēc svarīguma) vislabākos rezultātus uzrāda scenārijs ar pirolīzi zemā un vidējā temperatūrā, un no izejvielām vislabākos rezultātus ieguva biocietvielas (dūņas) [118].

Neskatoties uz to, ka visaugstākais oglekļa saturs ir biooglē, kas ražota no koksnes, šis ražošanas scenārijs nav efektīvs izmaksu un zemākas augsnes uzlabošanas spējas dēļ (koksne satur celulozi un lignīnu, un mazāk barības vielu, salīdzinot ar biocietvielām). Savukārt dūņas ir bagātas ar barības vielām, tomēr ir jāņem vērā smago





5.15. attēls.

Scenāriju TOPSIS tuvuma koeficients (*closeness coefficient* C_i) [119] [118].

metālu piesārņojuma risks, tāpēc ir svarīgi kontrolēt izejvielu kvalitāti. Pie vidējas vai zemas temperatūras pirolīzes arī lauksaimniecības atlieku scenāriji parāda labu potenciālu, jo šāda biomasas ir brīvi pieejama, un satur vairāk barības vielu nekā koksne [118].

Ja Latvija spēs attīstīt rūpnieciska mēroga bioogles ražošanu un integrēšanu lauksaimniecības zemēs, šis pasākums var kļūt par stratēģisku elementu valsts klimata mērķu sasniegšanā. Papildus ņemot vērā to, ka Latvijā ir pietiekams daudzums zemas pievienotās vērtības biomasas no mežsaimniecības un lauksaimniecības, šis pasākums nekonkurētu ar produktu ražošanu, kuriem nepieciešama biomasas ar lielāku pievienoto vērtību [120]. NEKP paredz bioogles iestrādi aramzemē, sākot ar 2029. gadu, papildus plānojot izbūvēt bioogles ražošanas rūpnīcu [57]. Jāņem vērā, ka bioogles oglekļa piesaistes un augsnes uzlabošanas īpašības ir atkarīgas no daudziem mainīgiem faktoriem: iestrādes apjoma, bioogles reaplikācijas biežuma, bioogles oglekļa satura u. c. Pastāv vairākas bioogles aplikācijas devas, bieži vien augsnē tiek iestrādāts no 5 t līdz 20 t bioogles uz vienu hektāru, raugoties, lai nerastos pārsātinājums [121], [122]. Deva un reaplikācijas laiks ir atkarīgi no kultūrauga un augsnes stāvokļa. Pašu bioogles iestrādes procesu var integrēt ikgadējās mēslošanas procesā, tā mazinot papildu izmaksu nepieciešamību. Nākotnē var integrēt arī oglekļa kredītu sistēmu “*carbon credit*”, kas sniegtu papildu ienākumus lauksaimniekiem, kuri piemēro šādu praksi (piemēram, cena par vienu piesaistīto oglekļa tonnu, izmantojot bioogli, 2025. gada pirmajā pusē bija aptuveni 130 EUR [123]).

5.3.5. Ilgtspējīgas koksnes produktu ražošana un izmantošanas pasākumi

Latvijā meža nozare ir viens no valsts ekonomiskajiem stūrakmeņiem, kur mežsaimniecības, kokapstrāde un mēbeļu ražošana veido aptuveni 6 % no Latvijas iekšzemes kopprodukta. Tradicionāli

liela daļa no koksnes produktiem (piemēram, apaļkoksne) tiek eksportēta. 2023. gadā vien tie bija 17 % no kopējā valsts eksporta, kur tālāk, citās valstīs, tiek saražoti produkti ar lielāku pievienoto vērtību vai arī koksne tiek novirzīta enerģijas ražošanai [124], [125]. Piemēram, 2023. gadā tika saražoti 3056 tūkst. m³ garumā zāģētu vai sašķeldotu kokmateriālu (biezums virs 6 mm), no tiem 2808 tūkst. m³ tika eksportēti (91 %) [126]. No vienas puses, intensīva mežizstrāde un eksports potenciāli ierobežo oglekļa piesaisti Latvijā un “atdod” klimata iegumu citām valstīs (piemēram, no koksnes produktiem tiek būvētas mājas, kas aizstāj emisiju intensīvus produktus, piemēram, betonu). No otras puses, pētījumos Latvijā [127], [128] ir secināts, ka, samazinot izciršanas apjomu par 20 %, tiks ievērojami samazinātas SEG emisijas, tomēr radīsies negatīvs sociālais un ekonomiskais efekts. Tas nozīmē, ka nav vēlams būtiski samazināt vai paaugstināt izciršanas apjomus, jo tad cietīs vai nu valsts ekonomiskie, vai klimata rādītāji. Kā risinājums varētu būt ilgtspējīgu koksnes produktu attīstība, kas ļautu no esošā ciršanas apjoma iegūt maksimālu pievienoto vērtību un oglekļa piesaisti, tādā veidā sabalansējot ekonomisko izaugsmi un klimata mērķu sasniegšanu.

Ilgtspējīgai koksnes izmantošanai ir būtisks kaskādes princips, kur koksnes materiāli tiek izmantoti secīgi vairākos ciklos, prioritizējot ilgtspējīgāko lietojumu. NEKP uzsver aprītes ekonomikas pieeju, nosakot, ka koksne ir jāizmanto šādā prioritārā secībā: vispirms koksnes izstrādājumi (mēbeles, saplāksnis u. c.), maksimāli ilgi paildzinot kalpošanas laiku, pēc tam koksnes izstrādājums ir jānovirza atkārtotai izmantošanai vai pārstrādei, un tikai pašās beigās tas tiek novirzīts uz enerģijas iegūšanai un atlikumu apglabāšanai [57]. Kaskādes metode veicina atlikumu materiālu izmantošanu, piemēram, zāģskaidas var izmantot skaidu plātņu vai granulu ražošanā. Pētījumā [129] secināts, ka līdz pat 70 % no *CLT* (*cross laminated timber*) ražošanas un izmantošanas procesu atgriezumiem, piemēram, logu vai durvju aiļu izgriezumai, var pārstrādāt jaunus *CLT* paneļus. Tas uzlabo ražošanas efektivitāti, samazinot atlikumus un vienlaikus mazinot nepieciešamību pēc papildu kokmateriālu iegādes/ieguves. Saražoto koksnes produktu izmantošana būvniecībā ļauj aizstāt tādus emisiju intensīvus būvmateriālus kā betons vai tērauds. Tā, piemēram, neatkarīgi no apstākļiem *CLT* emitē par 70 % mazāk CO₂ [130].

Ņemot iepriekš minēto, ir vairāki pasākumi, kas Latvijai būtu jāīsteno, lai palielinātu vietējās koksnes pārstrādi un produktu ilgtspējīgu izmantošanu, tā veicinot klimata mērķa sasniegšanu.

- **Jaunas koksnes pārstrādes rūpnīcas izveide.** NEKP 2021.–2030. gadam paredz pasākumu, kas varētu veicināt oglekļa piesaisti koksnes produktos, – skaidu plātņu rūpnīcas izveidi [57].
- **Koksnes plātņu un citu augstvērtīgu materiālu ražošanas paplašināšana.** Latvijā jāstimulē koka būvju celtniecība,

piemēram, rādot pozitīvu piemēru, būvējot bērnudārzus, skolas vai administratīvās ēkas, kā arī rīkojot informācijas kampaņas. Šādi pasākumi vairotu pieprasījumu pēc koka būvmateriāliem, veicinot valsts iekšējo tirgu un nodrošinot oglekļa piesaisti.

- **Koksnes izmantošanas veicināšana būvniecībā** [131].
- **Koksnes atlikumu un blakusproduktu otrreizējā izmantošana.** Jāveicina infrastruktūras uzlabojumi, ļaujot efektīvi savākt koksnes atlikumus pārstrādei. Tāpat jāveicina efektīvāki ražošanas procesi esošajās koksnes produktu ražotnēs. Jāveicina noslēgts aprites ekonomikas cikls, tā paildzinot koksnes cirkulāciju ekonomikā [132], [133].
- **Inovācijas un pētniecības veicināšana koksnes ķīmiskajā izmantošanā (lignīns, ķīmiskā šķiedra).** Latvija eksportē lielāko daļu no lapu koku papīrmalkas. Tā vietā no šīs koksnes varētu ražot celulozes šķiedras audumu, bioplasmasu, lignīna bāzes līmes un sveķus, aizstājot sintētiskos analogus [134], [135]. Šāda prakse ļautu diversificēt Latvijas kokrūpniecības piedāvājumu ar augstas pievienotas vērtības produktiem. Šādi produkti ne tikai uzkrāj oglekli, bet arī samazina citu nozaru emisijas (*avoided emissions*). NEKP 2021.–2030. gadam paredz koksnes ķīmiskās pārstrādes / koksnes šķiedras rūpnīcas būvniecību ar potenciālu samazināt SEG emisijas par 314 kt CO₂ [57], [81].

5.4. Klimata pārmaiņu mazināšanas ilgtspējas vērtējums

ZIZIMM regula (ES 2018/841) nav izolēts politikas instruments. Tas ir cieši integrēts ES zaļā kursa un “Fit for 55” pakotnes ietvarā [136]. Regulas mērķis ir nodrošināt, ka ZIZIMM sektors līdz 2030. gadam ir oglekļa piesaistes, nevis emisiju avots, tādā veidā sekmējot klimatneitralitātes sasniegšanu līdz 2050. gadam. Šī regula aptver vairākas dimensijas: mežsaimniecību, lauksaimniecību, ogļsaistīgo saimniekošanu, enerģētiku un vidi. Katrā dimensijā ir savi regulējošie dokumenti, kas nodrošina detalizētu mērķu un instrumentu sistēmu (sk. 5.16. att.).

5.4.1. Saiknē ar ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķiem

ZIZIMM sektors ir ļoti svarīgs ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķu (IAM) sasniegšanā, jo īpaši to mērķu, kas ir saistīti ar klimata politiku, dzīvību uz sauszemes un ilgtspējīgu resursu pārvaldību.

5.16. attēls.

ZIZIMM regulas sasaiste ar citām ES zaļā kursa iniciatīvām [137].

ENERĢIJA

- Nacionālā enerģētikas un klimata plāna regulējums
- Emisijas kvotu tirdzniecības sistēma
- Atjaunojamās enerģijas direktīva (II un III)



LAUKSAIMNIECĪBA

- Augsnes stratēģija
- Augsnes monitoringa likums
- Kopīgu centienu regula



MEŽSAIMNIECĪBA

- Meža monitoringa regula
- Meža stratēģija
- Atmežošanas regula



OGLEKĻSAISTĪGĀ SAIMNIEKOŠANA

- Oglekļa sertifikācijas regula



VIDE

- Bioloģiskās daudzveidības stratēģija
- Dabas atjaunošanas regula



ZIZIMM aktivitātes nosaka būtisku oglekļa piesaisti, bioloģisko daudzveidību un lauku dzīves atbalstu. Tiešā veidā ZIZIMM atbalsta šādus mērķus: “rīcībā klimata jomā” (IAM 13), “dzīvība uz zemes” (IAM 15), “nodrošināt ūdens un sanitārijas pieejamību visiem un ilgtspējīgu pārvaldību” (IAM 6), “nodrošināt ilgtspējīgus patēriņa paradumus un ražošanas modeļus” (IAM 12), “nodrošināt visiem piekļuvi uzticamai, ilgtspējīgai un mūsdienīgai enerģijai par pieejamu cenu” (IAM 7). ZIZIMM sektors arī netieši atbalsta mērķus, kas ir saistīti ar pārtikas nodrošinājumu, ekonomisko izaugsmi: “izskaust badu, panākt pārtikas nodrošinājumu un uzlabotu uzturu, veicināt ilgtspējīgu lauksaimniecību” (IAM 2), “veicināt noturīgu, iekļaujošu un ilgtspējīgu ekonomikas izaugsmi, pilnīgu un produktīvu nodarbinātību, kā arī cilvēka cienīgu darbu visiem” (IAM 8), “padarīt pilsētas un apdzīvotas vietas iekļaujošas, drošas, pielāgoties spējīgas un ilgtspējīgas” (IAM 11), “nodrošināt veselīgu dzīvi un sekmēt labklājību jebkura vecuma cilvēkiem” (IAM 3) [138].

ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķi. Rīcībā klimata jomā (IAM 13)

Klimata pārmaiņas izraisījušas būtisku ekstremālo meteoroloģisko parādību (plūdu, vētru, sausuma, karstuma viļņu u. c.) biežuma un intensitātes pieaugumu, kas savukārt tieši apdraud cilvēku dzīvi, labklājību un ekonomisko drošību [139]. Ir nepieciešams kompleks pasākumu kopums visā pasaulē, lai apkarotu klimata krīzi. ES un citas valstis arvien vairāk integrē ZIZIMM sektoru savās klimata



stratēģijās, nosakot konkrētus emisiju samazināšanas un oglekļa piesaistes mērķus, kas ir būtiski IAM 13 sasniegšanai [140], [141]. Uz ZIZIMM tieši attiecināmi šādi IAM 13 apakšmērķi:

- **noturība un pielāgošanās (13.1).** Ilgtspējīga zemes apsaimniekošana, mežu atjaunošana un degradēto teritoriju rekultivācija stiprina noturību pret klimata apdraudējumiem un uzlabo pielāgošanās spējas mežsaimniecībā, lauksaimniecībā un citās tautsaimniecības nozarēs. Šāda pieeja stabilizē ūdens apriti, samazina plūdu un vēja erozijas riskus, amortizē sausuma ietekmi, uzlabo bioloģisko daudzveidību un veicina oglekļa piesaisti [142], [143];
- **klimata pārmaiņu pasākumu integrēšana politikās, stratēģijās un plānos (13.2).** Pasaules meteoroloģijas organizācija (PMO) ir atzinusi 2023. gadu par viskarstāko novērojumu vēsturē, jo globālā temperatūra gandrīz sasniedza Parīzes nolīgumā noteikto sasilšanas ierobežošanas mērķi (1,5 °C). Šis rādītājs nozīmē, ka ir vēl striktāk un pārdomātāk jāintegrē klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumi [144]. Latvijā ZIZIMM sektora loma klimata pārmaiņu mazināšanā un pielāgošanās ir nostiprināta vairākos nacionālos politikas dokumentos: Latvijas pielāgošanās klimata pārmaiņām plānā laika posmam līdz 2030. gadam, Latvijas stratēģijā klimatneitralitātes sasniegšanai līdz 2050. gadam, Nacionālajā enerģētikas un klimata plānā 2021.–2030. gadam, Vides politikas pamatnostādnēs 2021.–2027. gadam. Klimata pārmaiņu mazināšanās un pielāgošanās pasākumi ir integrēti NEKP 2021.–2030. gadam, kur ir izcelti pasākumi, kas saistīti ar organisko augšņu emisiju samazināšanu, mērķtiecīgu apmežošanu un ilgtspējīgu mežsaimniecību. Šie pasākumi

5.17. attēls.

ANO 17 Ilgtspējīgas attīstības mērķi [138].

ietver ZIZIMM regulas prasības (ES 2018/841), kas nosaka emisiju un oglekļa piesaistes ziņošanas kārtību. Kopā šie dokumenti veicina ES ZIZIMM sektora kopējo mērķa sasniegšanu līdz 2030. gadam (Latvijas mērķis ir -0,644 Mt CO₂ ekv. piesaiste) [57];

- **izglītība un institucionāla kapacitāte (13.3).** Sabiedrības, pašvaldību un komersantu zināšanu paplašināšana par ZIZIMM nozīmi klimata pārmaiņu mazināšanā ir svarīgs priekšnoteikums ilgtspējīgas rīcības nodrošināšanai. Latvijā ir izveidots klimata pārmaiņu portāls (*klimatam.lv*), kur ir iespējams iegūt informāciju par klimata politikas jautājumiem, kā arī ir iespējams apskatīt dažādus klimata attīstības scenārijus Latvijā ar klimata pārmaiņu analīzes rīka palīdzību [145], [146];
- **starptautiskā finansējuma mobilizēšana un pārredzama pasākumu īstenošana, integrējot inovatīvus risinājumus, stiprinot klimata pārvaldību (13.a).** Latvija kā ES dalībvalsts piedalās starptautisko klimata finansējuma mehānismu īstenošanā, piemēram, klimata pārmaiņu finanšu instrumenti (KPFI) un ES Kohēzijas fonda projekti, kas atbalsta zemes apsaimniekošanas uzlabojumus un oglekļa piesaistes pasākumus [147], [148]. Starptautisks finansējums ļauj īstenot inovatīvus risinājumus, piemēram, bioogles ražotnes izbūvi un integrēšanu aramzemē, kas pretējā gadījumā varētu būt apgrūtināti īstenot tikai paļaujoties uz nacionālajiem resursiem [149].

ANO ilgtspējīgas attīstības mērķiem. Dzīvība uz zemes (IAM 15)

Pētījumi rāda, ka neilgtspējīgas mežu un zemes apsaimniekošana noved pie mežu noplicināšanas, augsnes degradācijas un sugu izmiršanas, tādējādi apdraudot ekosistēmas līdzsvaru [150]. Lai risinātu šo problēmu, ir jāveicina ilgtspējīgas prakses ZIZIMM sektorā, jo šis sektors ir ļoti svarīgs instruments, lai tiešā veidā atbalstītu ANO IAM 15 mērķa sasniegšanu. Uz ZIZIMM tieši attiecas šādi IAM 15 apakšmērķi:

- **sauszemes ekosistēmu saglabāšana un atjaunošana (15.1).** Tādas ZIZIMM sektora prakses kā pārmērīga augsnes apstrāde un mājlopu ganīšana, mežu izciršana lauksaimniecības vai apbūves nolūkiem, kūdras izstrāde ir veicinājušas zemes degradāciju, kas savukārt ir samazinājusi ekosistēmu spēju sniegt tādus pakalpojumus kā pārtikas ražošana, ūdens pieejamība, oglekļa piesaiste, augsnes auglība [151]. Globālie ekosistēmu pakalpojumu vērtības zaudējumi traucējumu dēļ ir aptuveni 6,3 triljonu ASV dolāru gadā, kas ir ievērojama daļa no pasaules IKP [152]. Rekultivējot degradētās zemes, atjaunojot mežus un ieviešot aizsardzības pasākumus, ir iespējams veicināt ekosistēmu un bioloģiskās daudzveidības atjaunošanu un saglabāšanos. Latvijā īpaši aizsargājamas teritorijas

aizņem 13 % no kopplatības (nacionālie parki, biosfēras rezervāti, dabas liegumi, dabas parki u. c.) [145];

- **ilgtspējīga mežu apsaimniekošana (15.2).** Pasaulē turpinās samazināties mežu platība (no 2001. līdz 2024. gadam kopējā mežu platība pasaulē samazinājās par 13 %, salīdzinot ar 2000. gadu [153]). Galvenais iemesls ir meža zemju pārveidošana par lauksaimniecības zemēm, tomēr ir vērojami arī uzlabojumi meža krājas pieaugumā aizsargājamās teritorijās [144]. Ilgtspējīgas mežsaimniecības prakses, tostarp mežu izciršanas samazināšana, jaunaudžu kopšana, neproduktīvo audžu nomaiņa, palielina meža noturību pret klimata pārmaiņām un ilgtermiņā nodrošina lielāku oglekļa piesaisti. Latvijā vairāk nekā puse mežu ir sertificēti pēc *FSC* un *PEFC* standartiem, kas apliecina atbilstību ilgtspējības kritērijiem [154];
- **cīņa ar zemes degradāciju un tuksnešošanos (15.3).** Globālā līmenī zemes degradācija tieši ietekmē 3,2 miljardus cilvēku [155]. Latvijā šī problēma izpaužas nedaudz citādāk nekā klimatiski sausos reģionos. Latvijā viens no lielākajiem emisiju avotiem ZIZIMM ir organiskās augsnes, īpaši nosusinātie kūdrāji un emisijas no kūdras ieguves [16]. Lai risinātu šo problēmu, Latvijā ir izstrādāti degradēto augšņu un teritoriju kritēriji, kas ļauj noteikt apdraudētās teritorijas un izmantot vispiemērotākos rekultivācijas pasākumus (piemēram, mitruma režīma atjaunošanu). Līdz 2025. gadam Latvija jau ir atjaunoti 2200 ha degradētu ekosistēmu [145];
- **bioloģiskās daudzveidības zuduma novēršana (15.5).** Bioloģiskās daudzveidības saglabāšana ir viens no galvenajiem priekšnosacījumiem, lai saglabātu ekosistēmu stabilitāti un veidotu noturību pret klimata pārmaiņām. Pasaulē pēdējās desmitgadēs bioloģiskā daudzveidība ir strauji samazinājusies. Pēc Pasaules Dabas fonda informācijas savvaļas sugu populāciju skaits kopš 1970. gada ir sarucis par 73 % (Eiropā un Centrālāzijā – 35 %) [156]. ES sliktā vai nepietiekamā stāvoklī ir aptuveni 81 % dzīvotņu un 63 % sugu [157]. Latvijā labā stāvoklī ir vien 10 % ES aizsargājamo biotopu un 43 % sugu. Plānots aizsargājamo ES biotopu labā stāvoklī pieaugums līdz 25 % [145]. Latvijā liela daļa bioloģiskās daudzveidības atrodas privātos mežos, kur attieksmi pret aizsardzības pasākumiem bieži ietekmē īpašnieku finansiālā atkarība no mežizstrādes ienākumiem un informācijas trūkums. Bieži vien, lai veicinātu bioloģiskās daudzveidības saglabāšanu, zemes īpašnieki ir spiesti ierobežot savas darbības [158]. Latvijā 8 % no meža zemes platībās ir noteikti strikti meža aizsardzības noteikumi, kur 2 % ir privātais sektors. Papildus ir ierobežojumi mežsaimniecībā aizsargājamās teritorijās

putnu ligzdošanas periodā. Lai risinātu šo problēmu, Latvijai jāmeklē brīvprātīgi un motivējoši mehānismi, lai mazinātu konfliktus ar mežu īpašniekiem. Šādi pasākumi var ietvert izglītošanu, godīgus kompensāciju mehānismus, kopienu līdzdalību u. c. [159];

- **ekosistēmu un bioloģiskās daudzveidības vērtību integrācija plānošanā (15.9).** Daudzi lēmumu pieņēmēji un plānotāji nepietiekami apzinās ekosistēmu un bioloģiskās daudzveidību nozīmi cilvēku labklājībai, kas savukārt kavē šo vērtību iekļaušanu plānošanā [160]. Papildus pastāv konflikts starp attīstību un aizsardzību, jo bieži dominē ekonomiskas intereses, kas var nonākt pretrunā ar dabas aizsardzības mērķiem [161]. Latvijā ekosistēmu un bioloģiskās daudzveidības vērtības integrācijas politikā un teritoriālajā plānošanā notiek pakāpeniski. Ir izstrādāti un apstiprināti dabas aizsardzības plāni lielai daļai aizsargājamo teritoriju, tomēr tiek turpināta dabas aizsardzības plānu izstrāde vairākām teritorijām. Šis process ir laikietilpīgs, un plāns tiek sagatavots tikai noteiktam laika posma (parasti 7–15 gadiem) [162].

ANO ilgtspējīgas attīstības mērķi. Tīrs ūdens un sanitārija (IAM 6)

Daudzviet pasaulē cilvēkiem nav pieejams drošs dzeramais ūdens, kas savukārt apdraud veselību. Neilgtspējīga zemes izmantošana, mežu izciršana un augsnes degradācija ierobežo ūdens pieejamību un pasliktina kvalitāti. Atjaunojot mežus un mitrājus, ir iespējams uzlabot ūdens apriti. Šī brīža situācijā tiek uzskatīts, ka neviens no IAM apakšmērķiem nevirzās izpildes virzienā [144]. Uz ZIZIMM tieši attiecas šāds IAM 6 apakšmērķis:

- **ūdens ekosistēmu aizsardzība (6.6).** Pasaulē no 2005. gada ir novērojama pastāvīgs virszemes ūdeņu pieaugums klimata pārmaiņu un jaunu ūdenskrātuvju izveides dēļ. Neskatoties uz to, vairākos pasaules reģionos ir novērojami zudumi, kas saistīti ar intensīvu lauksaimniecību un rūpniecību [144]. Šis mērķis uzsver nepieciešamību aizsargāt un atjaunot ar ūdeni saistītās ekosistēmas [163]. Latvijā mežu, mitrāju un purvu ekosistēmas ir būtiskas, lai nodrošinātu ūdens kvalitāti un apriti. Lai saglabātu un uzlabotu ūdens apriti un kvalitāti, ir jāpielāgo zemes apsaimniekošana, jāuztur ūdenstilpņu buferzonas un jārekultivē mitrāji [163], [164].

ANO ilgtspējīgas attīstības mērķi. Atbildīgs patēriņš un ražošana (IAM 12)

Pašreizējie patēriņa un ražošanas modeļi izraisa pārmērīgu dabas resursu izmantošanu, atkritumu uzkrāšanos un vides

degradāciju, kas savukārt apdraud ekosistēmas un cilvēku labklājību. Tradicionālā “ņem – izlieto – izmet” pieeja arī ZIZIMM sektorā rada lielu spiedienu, jo pieaug dabas resursu izmantošana, veicinot bioloģiskās daudzveidības zudumu mežsaimniecības vai lauksaimniecības darbības rezultātā [165]. Uz ZIZIMM tieši attiecas šādi IAM 12 apakšmērķi:

- **ilgtspējīgā dabas resursu pārvaldība (12.2).** Ilgtspējīga zemju apsaimniekošana nodrošina, ka koksnes resursi tiek iegūti tā, lai saglabātu ekosistēmu spēju atjaunoties. Atbildīga koksnes un biomasas resursu izmantošana samazina nepieciešamību pēc nepamatota mežizstrādes apjoma [17], [166]. ZIZIMM sektorā tiek īpaši uzsvērtā koksnes kaskādes principa izmantošana: vispirms būvmateriāli (ilgtermiņa oglekļa noglabāšana), pēc tam koksne kā pārstrādes izejviela un tikai pašās beigās kā kurināmais enerģētikas sektorā. Šāda pieeja ļauj aizstāt emisiju intensīvus materiālus, piemēram, betonu [167];
- **atkritumu samazināšana (12.5).** ZIZIMM sektora klimatneitralitātes sasniegšanas pasākumi ietver arī bioloģisko atlikumu pārstrādi. Piemēram, lauksaimniecības un mežizstrādes blakusproduktus var izmantot bioogles ražošanai, kas ne tikai samazina atkritumu daudzumu poligonos, bet arī ilgtermiņā nodrošina oglekļa piesaisti augsnē. Latvijā arī attīstās zemas kvalitātes un atkritumu koksnes izmantošana koksnes produktu vai bioenerģijas ražošanā [15], [129], [168];
- **ilgtspējīgas prakses uzņēmumos (12.6).** Latvijas koksnes pārstrādes un papīra rūpnīcas arvien biežāk ievieš ilgtspējības principus, piemēram, izmanto vietējo FSC sertificēto koksni, attīsta biomateriālus (finieri, plātnes), kā arī uzlabo ražošanas tehnoloģijas. Tomēr pētījumā [169] secināts, ka Latvijā koksnes ražošanā joprojām ir viens no zemākajiem ilgtspējības rādītājiem. Līdz ar to ir jāievieš striktāki pasākumi, piemēram, jāveicina aprites ekonomika, jāievieš atbalsta pasākumi (finansiāli un politiski), jāveicina energoefektivitātes pasākumi [170]. NEKP paredz atbalstīt jaunas koksnes pārstrādes rūpnīcas izveidi, kas ļaus ražot produktus ar augstu pievienoto vērtību [57];
- **izglītība un sabiedrības informēšana (12.8).** Ir svarīgi izglītēt sabiedrību par ilgtspējīgu koksnes produktu izmantošanu, jo koksnes produktu un mēbeļu izvēle tiešā veidā ietekmē Latvijas ZIZIMM emisiju/piesaistes bilanci [171]. Arvien vairāk tiek popularizēti ekoloģiskas celtniecības risinājumi (piemēram, koka moduļu mājas), veicinot oglekļa piesaisti un valsts bioekonomiku [172] [173].

ANO ilgtspējīgas attīstības mērķi. Nodrošināt visiem piekļuvi uzticamai, ilgtspējīgai un mūsdienīgai enerģijai par pieejamu cenu (IAM 7)

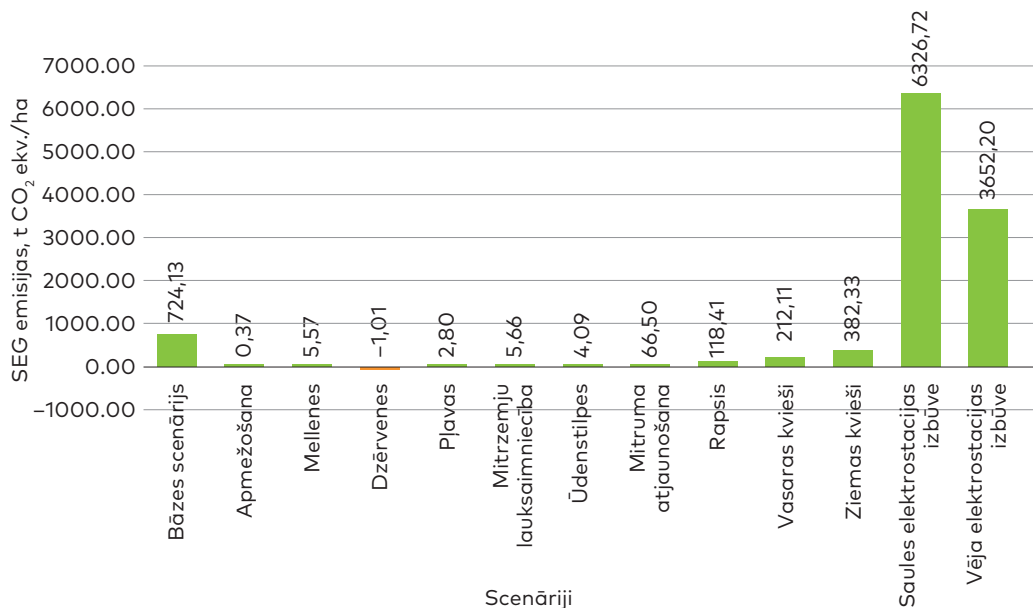
Tradicionālie enerģijas ražošanas veidi rada lielu SEG emisiju īpatsvaru. Vietējās biomasas izmantošana samazina atkarību no fosilajiem resursiem un uzlabo enerģijas drošību. Kurināmā koksne (briketes, granulas, malka, šķelda u. c.) ir visizplatītākais AER Latvijā (2022. gadā – 80,2 % [174]), tomēr rodas jautājums, cik liela daļa šīs koksnes tiek izmantota ilgtspējīgi. Uz ZIZIMM tieši attiecas šāds IAM 7 apakšmērķis:

- **atjaunojamās enerģijas īpatsvars (7.2).** Koksnes un citas izplatītas biomasas izmantošana enerģētikā ir viens no būtiskākajiem ZIZIMM ieguldījumiem IAM 7 sasniegšanai. Pētījumi [168], [175], [176], [177], [178] liecina, ka Latvijā mežizstrādes un lauksaimniecības biomasas atlikumiem ir augsts potenciāls, lai no tiem varētu ražot granulas, biogāzi vai citus resursus. Jāņem vērā, ka biomasas izmantošanai jābūt balstītai ilgtspējīgas mežsaimniecības principos, lai oglekļa piesaistes bilance ilgtermiņā saglabātos pozitīva.

5.4.2. Dzīves cikla analīze kā instruments ilgtspējas novērtēšanai

Ilgtspējīgas zemes izmantošanas un mežsaimniecības prakses izvērtēšana ir būtisks izaicinājums klimata politikas īstenošanā savu īpašību un metodoloģiskās sarežģītības dēļ [179]. Ņemot vērā, ka ZIZIMM sektorā notiekošie procesi ir dinamiski (ietver oglekļa piesaisti fotosintēzes ceļā, dzīvās biomasas pieaugumu un atmirumu), tradicionālā jeb statiskā *LCA* pieeja ne vienmēr spēj atspoguļot šo procesu ilgtermiņa ietekmi. Šāda pieeja balstās pieņēmumā, ka šodienas situācijā būs identiska nākotnes scenārijam (piemēram, saražotais koksnes produktu apjoms) [180]. Lai novērtētu izmaiņas laikā, ir ieteicams izmantot dinamisko *LCA* pieeju, iegūstot precīzākus rezultātus. Dinamisko *LCA* pieeju ZIZIMM sektorā var izmantot gan mežu un to biomasas plūsmu novērtēšanā, gan arī koksnes produktu dzīves cikla analīzei. Meža zemē šāda pieeja modelē biomasas pieaugumu, dabisko mirstību un traucējumu (vētra, kaitēkļi vai ugunsgrēks) ietekmi uz oglekļa krāju laika gaitā. Šāda metode ļauj noteikt, kā mainās oglekļa bilance, īstenojot dažādas meža apsaimniekošanas stratēģijas, piemēram, intensīvas mežizstrādes vai purvu rekultivācijas gadījumā [181], [182].

Saskaņā ar ES Dabas atjaunošanas regulu (2024/1991) dalībvalstīm ir noteikts atjaunot un rekultivēt degradētas ekosistēmas, īpašu uzmanību pievēršot mitrājiem, ņemot vērā to ietekmi uz SEG emisiju

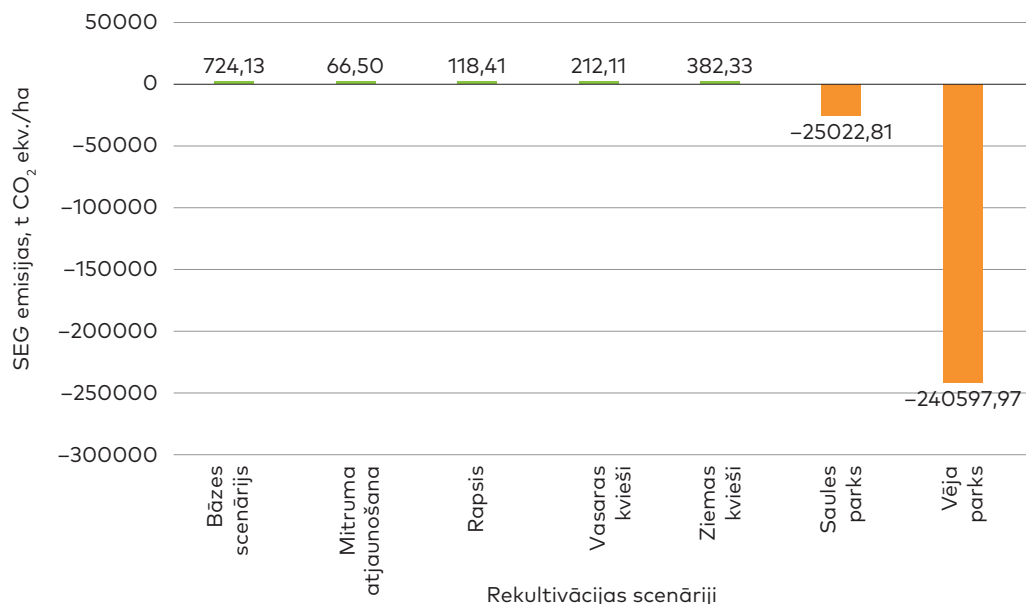


bilanci. Sadarbībā ar Latvijas kūdras izstrādes uzņēmumu projektā (*Peat4Res* [183]) noteikti šādi purva rekultivācijas scenāriji: apmežošana, ogu audzēšana (mellenes, dzērvenes), ūdenstilpes ierīkošana, transformācija par aramzemi, paludikultūru audzēšana, transformācija par zālāju, mitruma režīma atjaunošana, saules vai vēja parku ierīkošana. Šajā pētījumā alternatīvie apsaimniekošanas scenāriji salīdzināti ar bāzes scenāriju, kad tiktu turpināta kūdras izstrāde [184].

Lai novērtētu, kurš no šiem scenārijiem ir ilgtspējīgāks, izmantota *E-LCA* metode, kas balstīta ISO 14044:2006 standartā. Pētījumā ņemtas vērā gan tiešās, gan netiešās emisijas, nosakot sistēmas robežas “no šūpuļa līdz kapam”, lai novērtētu emisijas, kas rodas scenārija ieviešanas un uzturēšanas laikā. Kā funkcionālā vienība tika pieņemtas 1 ha emisijas gada laikā no kūdrāja, ko izmanto kūdras ieguvei un rekultivācijai. Papildus ņemta vērā novērstā elektroenerģijas ražošanas ietekme, resp., cik lielā mērā emisijas tiek samazinātas, ja tīklā tiek integrēta zaļā enerģija no saules vai vēja. SEG emisiju noteikšanai izmantota *KPSP2021 GWP100* metode. Tā ļauj atainot emisiju ietekmi uz globālo sasilšanu 100 gadu periodam. Visi scenāriji attiecināti uz zemes izmantošanu 50 gadu periodā (sākuma gads ir 2025. gads), un noteikti trīs emisiju references punkti: īstermiņa (2030), vidēja termiņa (2050), ilgtermiņa emisijas (2075). Šādi references punkti izvēlēti, jo Latvija ir apņēmusies līdz 2030. gadam izbeigt kūdras izstrādi enerģijas ražošanai, 2050. gadā ir jāsasniedz klimatneitralitāte, savukārt 50 gadu cikls pieņemts, jo tad beidzas augu veģetatīvais cikls. Pēc nepieciešamajiem

5.18. attēls.

Kopējās SEG emisijas 50 gadu laikā uz 1 hektāru [184].



5.19. attēls.

Scenāriju SEG emisiju kopējās ietekmes salīdzinājums [184].

aprēķiniem bija iespējams noteikt kopējās stratēģijas ietekmi uz vidi un tās ietekmi, salīdzinot ar bāzes scenāriju. 5.18. attēls parāda salīdzinājumu starp bāzes scenāriju (sarkans) un rekultivācijas scenārijiem [184].

Vislielākās emisijas ir novērojamas saules un vēja parku uzstādīšanas scenārijos. Tas skaidrojams ar emisijām, kas saistītas ar šo tehnoloģiju ieviešanu un uzturēšanu, kā arī emisiju intensīvu materiālu izmantošanu. No zemes apsaimniekošanas praksēm vislielākais emisiju apjoms ir no lauksaimniecības prakšu scenārijiem, savukārt vismazākā ietekme ir apmežošanas un dzērveņu audzēšanas scenārijiem (dzērveņu rekultivācijas scenārijā ir novērojama potenciāla oglekļa piesaiste). Apmežošana un hidroloģiskā režīma uzlabošana veicina oglekļa piesaisti biomasā un augsnē. Noteikts, ka, purvam sasniedzot savu dabīgo stāvokli, gada laikā uz vienu hektāru tiek piesaistīts 5,06 t CO₂ ekv. Savukārt uz 1,5 hektāru apmežotās platības ir iespējams piesaistīt 1 t CO₂ ekv. Neskatoties uz to, ka, ieviešot saules un vēja parkus, rodas liels emisiju apjoms, tas tiek kompensēts ar zaļās enerģijas integrēšanu tīklā. Ņemot vērā novērstās emisijas, kas rastos fosilo resursu izmantošanas rezultātā, vēja un saules scenāriji uzrāda vislabākos rādītājus, nodrošinot iespaidīgu SEG emisiju piesaistes apjomu 50 gadu periodā (sk. 5.19. att.) [184].

Tomēr jāņem vērā, ka šādi scenāriji nav vēlami tādos mitrājos, kur pastāv iespēja atjaunot mitrāju dabīgo stāvokli. Pētījums apliecina, ka ir jāveic emisiju monitorings. LCA metode nodrošina daudzpusīgu skatījumu, izvērtējot ne tikai tiešās SEG emisijas, bet

arī novērtē, kā atšķiras oglekļa piesaiste un ekosistēmas pakalpojumi ilgtermiņā dažādos rekultivācijas scenārijos. Šāda pieeja var kalpot kā atbalsts lēmumu pieņemējiem, nosakot ilgtspējīgāko risinājumu [184].

Izmantotā literatūra

- [1] J. Wu, K. S. Larsen, L. Van Der Linden, C. Beier, K. Pilegaard, and A. Ibrom, 'Synthesis on the carbon budget and cycling in a Danish, temperate deciduous forest', *Agric. For. Meteorol.*, vol. 181, pp. 94–107, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.agrformet.2013.07.012.
- [2] R. A. Houghton and A. Castanho, 'Annual emissions of carbon from land use, land-use change, and forestry from 1850 to 2020', *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 15, no. 5, pp. 2025–2054, May 2023, doi: 10.5194/essd-15-2025-2023.
- [3] G. Grassi *et al.*, 'Harmonising the land-use flux estimates of global models and national inventories for 2000–2020', *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 15, no. 3, pp. 1093–1114, Mar. 2023, doi: 10.5194/essd-15-1093-2023.
- [4] D. Archer, *The Global Carbon Cycle*. in Princeton Primers in Climate. Princeton University Press, 2010. [Online]. Available: <https://books.google.lv/books?id=2OUFwR3NrpkC>
- [5] L. Bruhwiler *et al.*, 'Chapter 1: Overview of the Global Carbon Cycle. Second State of the Carbon Cycle Report', U.S. Global Change Research Program, 2018. doi: 10.7930/SOCCR2.2018.Ch1.
- [6] P. Friedlingstein *et al.*, 'Global Carbon Budget 2024', *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 17, no. 3, pp. 965–1039, Mar. 2025, doi: 10.5194/essd-17-965-2025.
- [7] Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc), *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1st ed. Cambridge University Press, 2023. doi: 10.1017/9781009157896.
- [8] P. Ke *et al.*, 'Low latency carbon budget analysis reveals a large decline of the land carbon sink in 2023', *Natl. Sci. Rev.*, vol. 11, no. 12, p. nwae367, Nov. 2024, doi: 10.1093/nsr/nwae367.
- [9] I. P. Obani, Z. I. Obani, F. C. Anaeto, T. O. Akroh, and C. S. Nwachukwu, 'Impact of Deforestation on Carbon Emissions: A Data-Driven Study of the Amazon and Southeast Asia'.
- [10] G. Churkina, 'The Role of Urbanization in the Global Carbon Cycle', *Front. Ecol. Evol.*, vol. 3, Jan. 2016, doi: 10.3389/fevo.2015.00144.
- [11] Eggleston H.S, Buendia L, Miwa K, Ngara T, and Tanabe K, *IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories VOLUME 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use*. JAPAN: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [12] H. Wu *et al.*, 'Unveiling the crucial role of soil microorganisms in carbon cycling: A review', *Sci. Total Environ.*, vol. 909, p. 168627, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.168627.
- [13] R. Mäkipää *et al.*, 'How does management affect soil C sequestration and greenhouse gas fluxes in boreal and temperate forests? – A review', *For. Ecol. Manag.*, vol. 529, p. 120637, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.foreco.2022.120637.
- [14] I. Profft, M. Mund, G.-E. Weber, E. Weller, and E.-D. Schulze, 'Forest management and carbon sequestration in wood products', *Eur. J. For. Res.*, vol. 128, no. 4, pp. 399–413, Jul. 2009, doi: 10.1007/s10342-009-0283-5.
- [15] P. Vasuks, I. Vamza, M. Valtere, T. Bezrucko, and D. Blumberga, 'Recycled cross-laminated timber as a low environmental impact alternative to virgin material: Latvia case study', *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 22, p. e04094, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e04094.
- [16] Ministry of Climate and Energy of the Republic of Latvia, 'Latvia's National Inventory Report', 2024. [Online]. Available: https://cdr.eionet.europa.eu/lv/eu/mmr/art07_inventory/ghg_inventory/envzfkvaa/index_html?&page=1
- [17] I. Muizniece, E. Dace, and D. Blumberga, 'Assessing the potential of coniferous greenery from logging residues in Latvia using a system dynamics model', *Environ. Technol. Resour. Proc. Int. Sci. Pract. Conf.*, vol. 2, p. 219, Jun. 2015, doi: 10.17770/etr2015vol2.240.

- [18] V. Tetere, J. Peerlings, and L. Dries, 'The forest-based bioeconomy in Latvia: economic and environmental importance', *Bio-Based Appl. Econ.*, vol. 12, no. 4, pp. 323–331, Dec. 2023, doi: 10.36253/bae-13868.
- [19] M. De Rosa, M. Vestergaard Odgaard, J. K. Staunstrup, M. Trydeman Knudsen, and J. E. Hermansen, 'Identifying Land Use and Land-Use Changes (LULUC): A Global LULUC Matrix', *Environ. Sci. Technol.*, vol. 51, no. 14, pp. 7954–7962, Jul. 2017, doi: 10.1021/acs.est.6b04684.
- [20] Z. Tahir *et al.*, 'Predicting land use and land cover changes for sustainable land management using CA-Markov modelling and GIS techniques', *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 3271, Jan. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-87796-w.
- [21] Latvijas Valsts mežzinātnes institūts 'Silava', 'Meža resursu monitoringa metodika Izstrādāta saskaņā ar Ministru kabineta noteikumu Nr. 51 "Nacionālā meža monitoringa noteikumi" 10. punktu', Latvijas Valsts mežzinātnes institūts "Silava", 2022. [Online]. Available: <https://www.silava.lv/images/Petijumi/Nacionalais-meza-monitorings/2022-04-28-MRM-metodika.pdf>
- [22] Ministru kabinets, 'Nacionālā meža monitoringa noteikumi, Ministru kabineta noteikumi Nr. 51'. Jan. 18, 2022. [Online]. Available: <https://likumi.lv/ta/id/329305-nacionala-meza-monitoringa-noteikumi>
- [23] L. L. Krumsteds, J. Ivanovs, J. Jansons, and A. Lazdins, 'Development of Latvian land use and land use change matrix using geospatial data of national forest inventory', *Agron. Res.*, vol. 17, no. 6, pp. 2295–2305, 2019, doi: 10.1515/AR.19.195.
- [24] Krystyna Springer and Julia Bognar, 'EU LULUCF sink development until 2040: Trends, projections and uncertainties', Mar. 2025. [Online]. Available: <https://ieep.eu/wp-content/uploads/2025/03/EU-LULUCF-sink-development-until-2040-Trends-projections-and-uncertainties-IEEP-2025.pdf>
- [25] EEA, 'Greenhouse gas emissions from land use, land use change and forestry in Europe'. Oct. 31, 2024. Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-land>
- [26] K. Winkler *et al.*, 'Changes in land use and management led to a decline in Eastern Europe's terrestrial carbon sink', *Commun. Earth Environ.*, vol. 4, no. 1, p. 237, Jul. 2023, doi: 10.1038/s43247-023-00893-4.
- [27] P. V. Potapov *et al.*, 'Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive', *Remote Sens. Environ.*, vol. 159, pp. 28–43, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.rse.2014.11.027.
- [28] M. Lazdinis, A. Carver, L. Carlsson, K. Tönisson, and L. Vilkriste, 'Forest policy networks in changing political systems: Case study of the Baltic states', *J. Balt. Stud.*, vol. 35, no. 4, pp. 402–419, Dec. 2004, doi: 10.1080/01629770400000181.
- [29] Eurostat, 'Forests, forestry and logging Statistics Explained', Dec. 2024. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/52476.pdf>
- [30] LVĢMC, '2025. gada integrētais ziņojums par rīcībpolitikām, pasākumiem un SEG prognozēm kopsavilkums (iesniegts Eiropas Komisijai 31.03.2025.)', 2025.
- [31] V. Kostevica and D. Blumberga, 'Which EU Country Contributes Most to GHG Emissions in the LULUCF Sector Relative to Population and GDP?', *Environ. Clim. Technol.*, vol. 28, no. 1, pp. 527–539, Jan. 2024, doi: 10.2478/rtuect-2024-0041.
- [32] Hiraishi, T *et al.*, 2013 *Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*. Switzerland: IPCC.
- [33] A. Lazdins, 'Aramzemes un ilggadīgo zālāju apsaimniekošanas radīto siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju un oglekļa dioksīda (CO₂) piesaistes uzskaites sistēmas pilnveidošana un atbilstošu metodisko risinājumu izstrādāšana', 2016.
- [34] IPCC, 'Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual CHAPTER 5 LAND - USE CHANGE & FORESTRY'. [Online]. Available: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6d.html>

- [35] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 'Forestry Production and Trade'. [Online]. Available: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>
- [36] A. Bārdule *et al.*, 'Annual net CO₂ fluxes from drained organic soils used for agriculture in the hemiboreal region of Europe', Sep. 05, 2024, *Biogeochemistry: Land*. doi: 10.5194/egusphere-2024-2523.
- [37] D. Purviņa *et al.*, 'Impact of Soil Organic Layer Thickness on Soil-to-Atmosphere GHG Fluxes in Grassland in Latvia', *Agriculture*, vol. 14, no. 3, p. 387, Feb. 2024, doi: 10.3390/agriculture14030387.
- [38] C. Ribeiro-Kumara, E. Köster, H. Aaltonen, and K. Köster, 'How do forest fires affect soil greenhouse gas emissions in upland boreal forests? A review', *Environ. Res.*, vol. 184, p. 109328, May 2020, doi: 10.1016/j.envres.2020.109328.
- [39] J. Zhu *et al.*, 'Carbon stocks and changes of dead organic matter in China's forests', *Nat. Commun.*, vol. 8, no. 1, p. 151, Jul. 2017, doi: 10.1038/s41467-017-00207-1.
- [40] Latvia State Forest Research Institute 'Silava', A. Butlers, A. Lazdins, and Latvia State Forest Research Institute 'Silava', 'Carbon stock in litter and organic soil in drained and naturally wet forest lands in Latvia', presented at the Research for Rural Development 2020, Oct. 2020, pp. 47–54. doi: 10.22616/rrd.26.2020.007.
- [41] Irina Pilvere, 'Pētījums "Organisko augšņu devuma novērtējums Latvijas lauksaimniecībā – daudzfaktoru ietekmes izvērtējums efektīvas zemes izmantošanas risinājumu piedāvājumā"', Sep. 2017. [Online]. Available: https://www.lbtu.lv/sites/default/files/files/projects/_ORG_AUGSNES_6_0.pdf
- [42] A. Priede and A. Gancone, 'KŪDRAS IEGUVES IETEKMĒTU TERITORIJU ATBILDĪGA APSAIMNIEKOŠANA UN ILGTSPĒJĪGA IZMANTOŠANA'.
- [43] J. Ivanovs *et al.*, 'Activity data for accounting and projections of GHG emissions from organic soils 2020-C2/1', 2020. [Online]. Available: https://www.orgbalt.eu/wp-content/uploads/2024/11/2020_C2_1-Activity-data-for-reporting-and-projections-of-GHG-emissions-from-organic-soils_.pdf
- [44] A. Lazdins, 'ARAMZEMES UN ILGGADĪGO ZĀLĀJU APSAIMNIEKOŠANAS RADĪTO SILTUMNĪFEKTA GĀZU (SEG) EMISIJU UN OGLEKĻA DIOKSĪDA (CO₂) PIESAISTES UZSKAITES SISTĒMAS PILNVEIDOŠANA UN ATBILSTOŠU METODISKO RISINĀJUMU IZSTRĀDĀŠANA', 2017. [Online]. Available: <https://www.lbtu.lv/sites/default/files/files/projects/Nosleguma%20atskaite%20V01%20AL.pdf>
- [45] Latvian State Forest Research Institute 'Silava', A. Bārdulis, A. Lupiķis, Latvian State Forest Research Institute 'Silava', J. Stola, and Latvian State Forest Research Institute 'Silava', 'Carbon balance in forest mineral soils in Latvia modelled with Yasso07 soil carbon model', presented at the Research for Rural Development, 2017, Dec. 2017, pp. 28–34. doi: 10.22616/rrd.23.2017.004.
- [46] Aris Jansons, Zane Libiete, Mats Berlin, and Guntis Brumelis, 'Conference ADAPTATION AND MITIGATION: STRATEGIES FOR MANAGEMENT OF FOREST ECOSYSTEMS & ENERWOODS SEMINAR Book of Abstracts', 2015.
- [47] Hiraishi, T *et al.*, 2013 *Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol*. Switzerland: IPCC, 2013. [Online]. Available: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/pdf/KP_Supplement_Entire_Report.pdf
- [48] G. Conchedda and F. N. Tubiello, 'Drainage of organic soils and GHG emissions: validation with country data', *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 12, no. 4, pp. 3113–3137, Dec. 2020, doi: 10.5194/essd-12-3113-2020.
- [49] M. Vanags-Duka *et al.*, 'GHG Emissions from Drainage Ditches in Peat Extraction Sites and Peatland Forests in Hemiboreal Latvia', *Land*, vol. 11, no. 12, p. 2233, Dec. 2022, doi: 10.3390/land11122233.
- [50] I. Licite and A. Lupiķis, 'Impact of land use practices on greenhouse gas emissions from agriculture land on organic soils', presented at the 19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, May 2020. doi: 10.22616/ERDev.2020.19.TF492.

- [51] M. Abdalla, A. Hastings, J. Truu, M. Espenberg, Ü. Mander, and P. Smith, 'Emissions of methane from northern peatlands: a review of management impacts and implications for future management options', *Ecol. Evol.*, vol. 6, no. 19, pp. 7080–7102, Oct. 2016, doi: 10.1002/ece3.2469.
- [52] D. Wilson, D. Blain, and J. Couwenberg, 'Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils', *Mires Peat*, no. 17, pp. 1–28, Apr. 2016, doi: 10.19189/MaP.2016.OMB.222.
- [53] A. Lazdins, 'PĀRSKATS PAR PĒTĪJUMU: MEŽSAIMNIECISKO DARBĪBU IETEKME UZ SILTUMNĪCEFEKTA GĀZU EMISIJĀM UN CO₂ PIESAISTI', 2015. [Online]. Available: <https://www.silava.lv/images/Petijumi/2011-LVM-SEG-CO2/2015-LVM-SEG-CO2-Parskats.pdf>
- [54] I. Luksta, I. Pakere, I. Vamža, V. Liberova, and D. Blumberga, 'Comparative Analysis of Agricultural Emissions Across European Countries', *Environ. Clim. Technol.*, vol. 28, no. 1, pp. 738–748, Jan. 2024, doi: 10.2478/rtuect-2024-0057.
- [55] L. Vistarte, A. Kubule, L. Rozentale, and J. Pubule, 'Carbon Farming: A Systematic Literature Review on Sustainable Practices', *Environ. Clim. Technol.*, vol. 28, no. 1, p. 20240068, Jan. 2024, doi: 10.2478/rtuect-2024-0068.
- [56] 'REGULATION (EU) 2018/841 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 30 May 2018 on the inclusion of greenhouse gas emissions and removals from land use, land use change and forestry in the 2030 climate and energy framework, and amending Regulation (EU) No 525/2013 and Decision No 529/2013/EU', 2018.
- [57] 'NATIONAL ENERGY AND CLIMATE PLAN OF LATVIA 2021–2030'.
- [58] S. Hong *et al.*, 'Divergent responses of soil organic carbon to afforestation', *Nat. Sustain.*, vol. 3, Sep. 2020, doi: 10.1038/s41893-020-0557-y.
- [59] Q. Deng, D. McMahon, X. Yangzhou, C. Yu, R. Jackson, and D. Hui, 'A global meta-analysis of soil phosphorus dynamics after afforestation', *New Phytol.*, vol. 213, Aug. 2016, doi: 10.1111/nph.14119.
- [60] Y. Guo, M. Abdalla, M. Espenberg, A. Hastings, P. Hallett, and P. Smith, 'A systematic analysis and review of the impacts of afforestation on soil quality indicators as modified by climate zone, forest type and age', *Sci. Total Environ.*, vol. 757, p. 143824, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143824.
- [61] 'Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva (ES) 2023/2413 (2023. gada 18. oktobris), ar ko attiecībā uz atjaunīgo energoresursu enerģijas izmantošanas veicināšanu groza Direktīvu (ES) 2018/2001, Regulu (ES) 2018/1999 un Direktīvu 98/70/EK un atceļ Padomes Direktīvu (ES) 2015/652'.
- [62] 'Kadastrālās vērtēšanas noteikumi'. Accessed: Aug. 26, 2025. [Online]. Available: <https://m.likumi.lv/ta/en/en/id/312662>
- [63] J. Cukor, Z. Vacek, R. Linda, and L. Bílek, 'Carbon sequestration in soil following afforestation of former agricultural land in the Czech Republic', *Cent. Eur. For. J.*, vol. 63, Jan. 2017, doi: 10.1515/forj-2017-0011.
- [64] K.-I. Kumm and A. Hessle, 'Economic Comparison between Pasture-Based Beef Production and Afforestation of Abandoned Land in Swedish Forest Districts', *Land*, vol. 9, no. 2, p. 42, Feb. 2020, doi: 10.3390/land9020042.
- [65] U. Djanibekov and A. Khamzina, 'Stochastic Economic Assessment of Afforestation on Marginal Land in Irrigated Farming System', *Environ. Resour. Econ.*, vol. 63, pp. 95–117, Jan. 2016, doi: 10.1007/s10640-014-9843-3.
- [66] N. Lienhoop and R. Brouwer, 'Agri-environmental policy valuation: Farmers' contract design preferences for afforestation schemes', *Land Use Policy*, vol. 42, pp. 568–577, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.landusepol.2014.09.017.
- [67] G. Jurasinski *et al.*, 'Active afforestation of drained peatlands is not a viable option under the EU Nature Restoration Law', *Ambio*, vol. 53, no. 7, pp. 970–983, Jul. 2024, doi: 10.1007/s13280-024-02016-5.
- [68] J. Leifeld and L. Menichetti, 'The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies', *Nat. Commun.*, vol. 9, no. 1, p. 1071, Mar. 2018, doi: 10.1038/s41467-018-03406-6.

- [69] R. Paoli, M. Feofilovs, A. Kamenders, and F. Romagnoli, 'Peat production for horticultural use in the Latvian context: sustainability assessment through LCA modeling', *J. Clean. Prod.*, vol. 378, p. 134559, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134559.
- [70] 'PROJEKTS "DEGRADĒTO PURVU ATBILDĪGA APSAIMNIEKOŠANA UN ILGTSPĒJĪGA IZMANTOŠANA LATVIJĀ" LIFE RESTORE, LIFE14 CCM/LV/001103 LATVIJAS DEGRADĒTO KŪDRĀJU INVENTARIZĀCIJA UN DATU BĀZES IZVEIDE'. Accessed: Aug. 26, 2025. [Online]. Available: <https://restore.daba.gov.lv/public/lat/jaunumi/73/>
- [71] F. Humpenöder *et al.*, 'Peatland protection and restoration are key for climate change mitigation', *Environ. Res. Lett.*, vol. 15, no. 10, p. 104093, Oct. 2020, doi: 10.1088/1748-9326/abae2a.
- [72] 'Eiropas Parlamenta un Padomes Regula (ES) 2024/1991 (2024. gada 24. jūnijs) par dabas atjaunošanu un ar ko groza Regulu (ES) 2022/869 (Dokuments attiecas uz EEZ)'. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1991>
- [73] L. Balode, K. Bumbiere, V. Sosars, K. Valters, and D. Blumberga, 'Pros and Cons of Strategies to Reduce Greenhouse Gas Emissions from Peatlands: Review of Possibilities', *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 6, p. 2260, Mar. 2024, doi: 10.3390/app14062260.
- [74] B. Jansone, V. Samariks, M. Okmanis, D. Kļaviņa, and D. Lazdiņa, 'Effect of High Concentrations of Wood Ash on Soil Properties and Development of Young Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst) and Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.)', *Sustainability*, vol. 12, no. 22, p. 9479, Jan. 2020, doi: 10.3390/su12229479.
- [75] H. Bachmaier, D. Kuptz, and H. Hartmann, 'Wood Ashes from Grate-Fired Heat and Power Plants: Evaluation of Nutrient and Heavy Metal Contents', *Sustainability*, vol. 13, no. 10, p. 5482, May 2021, doi: 10.3390/su13105482.
- [76] N. Huotari, E. Tillman-Sutela, M. Moilanen, and R. Laiho, 'Recycling of ash – For the good of the environment?', *For. Ecol. Manag.*, vol. 348, pp. 226–240, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.foreco.2015.03.008.
- [77] Latvijas Atkritumu saimniecības asociācija, 'Koksnes sadedzināšanas pelnu kā otrreizēji izmantojamu materiālu gala statusa noteikšana (Nr.1-08/81/2019.) Ekspertu novērtējums', 2019. [Online]. Available: <https://www.varam.gov.lv/lv/media/6019/download>
- [78] I. Liepa *et al.*, *LATVIJAS MEŽA TIPOLOGIJA*. Jelgava: Studentu biedrība «Šalkone», 2014.
- [79] T. Pukkala, 'Optimal nitrogen fertilization of boreal conifer forest', *For. Ecosyst.*, vol. 4, no. 1, p. 3, Dec. 2017, doi: 10.1186/s40663-017-0090-2.
- [80] Department of Forest Sciences, University of Helsinki, P.O. Box 27, 00014 University of Helsinki, Finland *et al.*, 'Volume growth responses of Scots pine and Norway spruce to nitrogen fertilization: quantitative synthesis of fertilization experiments in Finland', *Silva Fenn.*, vol. 59, no. 1, 2025, doi: 10.14214/sf.24041.
- [81] Zemkopības Ministrija, 'Nacionālais enerģētikas un klimata plāns – ZIZMM un lauksaimniecības pasākumu izpildes gaita', Apr. 2025. [Online]. Available: <https://www.zm.gov.lv/lv/media/16766/download?attachment>
- [82] E. Richy *et al.*, 'Phosphorus limitation promotes soil carbon storage in a boreal forest exposed to long-term nitrogen fertilization', *Glob. Change Biol.*, vol. 30, no. 9, p. e17516, Sep. 2024, doi: 10.1111/gcb.17516.
- [83] A. Palvi *et al.*, 'Repeated nitrogen fertilization enhances Scots pine growth and carbon uptake without persistent long-term effects in boreal forests', *Tree Physiol.*, vol. 45, no. 6, p. tpaf053, Jun. 2025, doi: 10.1093/treephys/tpaf053.
- [84] L. Schulte-Uebbing and W. de Vries, 'Global-scale impacts of nitrogen deposition on tree carbon sequestration in tropical, temperate, and boreal forests: A meta-analysis', *Glob. Change Biol.*, vol. 24, no. 2, pp. e416–e431, 2018, doi: 10.1111/gcb.13862.
- [85] L. F. Schulte-Uebbing, G. H. Ros, and W. de Vries, 'Experimental evidence shows minor contribution of nitrogen deposition to global forest carbon sequestration', *Glob. Change Biol.*, vol. 28, no. 3, pp. 899–917, 2022, doi: 10.1111/gcb.15960.

- [86] I. Janssens *et al.*, 'Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition', *Nat. Geosci.*, vol. 3, pp. 315–322, Apr. 2010, doi: 10.1038/ngeo844.
- [87] W. Zeng and W. Wang, 'Combination of nitrogen and phosphorus fertilization enhance ecosystem carbon sequestration in a nitrogen-limited temperate plantation of Northern China', *For. Ecol. Manag.*, vol. 341, pp. 59–66, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.foreco.2015.01.004.
- [88] 'Noteikumi par koku ciršanu mežā', LIKUMI.LV. Accessed: Aug. 20, 2025. [Online]. Available: <https://likumi.lv/doc.php?id=253760>
- [89] A. Laurén *et al.*, 'Drainage and Stand Growth Response in Peatland Forests—Description, Testing, and Application of Mechanistic Peatland Simulator SUSI', *Forests*, vol. 12, no. 3, p. 293, Mar. 2021, doi: 10.3390/f12030293.
- [90] A. H. Eckes-Shephard, E. Tiavlovsky, Y. Chen, P. Fonti, and A. D. Friend, 'Direct response of tree growth to soil water and its implications for terrestrial carbon cycle modelling', *Glob. Change Biol.*, vol. 27, no. 1, pp. 121–135, 2021, doi: 10.1111/gcb.15397.
- [91] F. Sinclair, 'A general classification of agroforestry practice', *Agrofor Syst.*, vol. 46, pp. 161–180, Sep. 1999, doi: 10.1023/A:1006278928088.
- [92] R. J. Osorio, C. J. Barden, and I. A. Ciampitti, 'GIS approach to estimate windbreak crop yield effects in Kansas–Nebraska', *Agrofor. Syst.*, vol. 93, no. 4, pp. 1567–1576, Aug. 2019, doi: 10.1007/s10457-018-0270-2.
- [93] S. Mayer *et al.*, 'Soil organic carbon sequestration in temperate agroforestry systems – A meta-analysis', *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 323, p. 107689, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.agee.2021.107689.
- [94] Y. Peng *et al.*, 'Tree species effects on topsoil carbon stock and concentration are mediated by tree species type, mycorrhizal association, and N-fixing ability at the global scale', *For. Ecol. Manag.*, vol. 478, p. 118510, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.foreco.2020.118510.
- [95] A. Mantino *et al.*, 'Effect of Tree Presence and Soil Characteristics on Soybean Yield and Quality in an Innovative Alley-Cropping System', *Agronomy*, vol. 10, no. 1, p. 52, Dec. 2019, doi: 10.3390/agronomy10010052.
- [96] M. Suhag, T. Ahamed, A. K. Das, M. A. Rahman, M. M. Rahman, and M. G. Miah, 'Leucaena-Based Alley Cropping System: An Approach for Reclaiming Degraded Land, Reducing the Use of Inorganic Nitrogen Fertilizer, and Improving Crop Productivity', *Nitrogen*, vol. 6, no. 2, p. 25, Jun. 2025, doi: 10.3390/nitrogen6020025.
- [97] H. H. C. P. P. Adhikary, P. Jakhar, and M. MADEGOWDA, 'Alley Cropping Agroforestry System for Improvement of Soil Health', 2022, pp. 529–549. doi: 10.1007/978-3-031-09270-1_23.
- [98] A. Quinkenstein and H. Jochheim, 'Assessing the carbon sequestration potential of poplar and black locust short rotation coppices on mine reclamation sites in Eastern Germany – Model development and application', *J. Environ. Manage.*, vol. 168, pp. 53–66, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.jenvman.2015.11.044.
- [99] M. Pietrzykowski *et al.*, 'Carbon sink potential and allocation in above- and below-ground biomass in willow coppice', *J. For. Res.*, vol. 32, no. 1, pp. 349–354, Feb. 2021, doi: 10.1007/s11676-019-01089-3.
- [100] K. Walter, A. Don, and H. Flessa, 'No general soil carbon sequestration under Central European short rotation coppices', *GCB Bioenergy*, vol. 7, no. 4, pp. 727–740, 2015, doi: 10.1111/gcbb.12177.
- [101] R. S. Zalesny *et al.*, 'Ecosystem Services of Woody Crop Production Systems', *BioEnergy Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 465–491, Jun. 2016, doi: 10.1007/s12155-016-9737-z.
- [102] M. Schrama, B. Vandecasteele, S. Carvalho, H. Muylle, and W. H. van der Putten, 'Effects of first- and second-generation bioenergy crops on soil processes and legacy effects on a subsequent crop', *GCB Bioenergy*, vol. 8, no. 1, pp. 136–147, 2016, doi: 10.1111/gcbb.12236.
- [103] J. Schweiher *et al.*, 'Environmental impacts of bioenergy wood production from poplar short-rotation coppice grown at a marginal agricultural site in Germany', *GCB Bioenergy*, vol. 9, no. 7, pp. 1207–1221, 2017, doi: 10.1111/gcbb.12423.

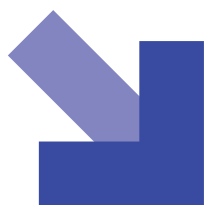
- [104] D. Feliciano, A. Ledo, J. Hillier, and D. R. Nayak, 'Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions?', *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 254, pp. 117–129, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.agee.2017.11.032.
- [105] C. B. E *et al.*, *IPCC 2019, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, vol. 4. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019. [Online]. Available: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch02_Generic%20Methods.pdf
- [106] A. De Stefano and M. G. Jacobson, 'Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis', *Agrofor. Syst.*, vol. 92, no. 2, pp. 285–299, Apr. 2018, doi: 10.1007/s10457-017-0147-9.
- [107] M. R. Hoosbeek, R. P. Remme, and G. M. Rusch, 'Trees enhance soil carbon sequestration and nutrient cycling in a silvopastoral system in south-western Nicaragua', *Agrofor. Syst.*, vol. 92, no. 2, pp. 263–273, Apr. 2018, doi: 10.1007/s10457-016-0049-2.
- [108] Z. Ma, H. Y. H. Chen, E. W. Bork, C. N. Carlyle, and S. X. Chang, 'Carbon accumulation in agroforestry systems is affected by tree species diversity, age and regional climate: A global meta-analysis', *Glob. Ecol. Biogeogr.*, vol. 29, no. 10, pp. 1817–1828, 2020, doi: 10.1111/geb.13145.
- [109] S. Etzold *et al.*, 'Nitrogen deposition is the most important environmental driver of growth of pure, even-aged and managed European forests', *For. Ecol. Manag.*, vol. 458, p. 117762, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.foreco.2019.117762.
- [110] J. Cukor, Z. Vacek, S. Vacek, R. Linda, and V. Podrázský, 'Biomass productivity, forest stability, carbon balance, and soil transformation of agricultural land afforestation: A case study of suitability of native tree species in the submontane zone in Czechia', *CATENA*, vol. 210, p. 105893, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.catena.2021.105893.
- [111] S. Mayer *et al.*, 'Soil organic carbon sequestration in temperate agroforestry systems – A meta-analysis', *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 323, p. 107689, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.agee.2021.107689.
- [112] V. Kirsanovs *et al.*, 'Biomass Gasification for District Heating', *Energy Procedia*, vol. 113, pp. 217–223, May 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.04.057.
- [113] V. Kirsanovs, A. Žandeckis, and C. Rochas, 'Biomass gasification thermodynamic model including tar and char', *Agronomy Research*, vol. 13, no. 2, pp. 500–510, 2015.
- [114] Y. Gao *et al.*, 'Influences of soil and biochar properties and amount of biochar and fertilizer on the performance of biochar in improving plant photosynthetic rate: A meta-analysis', *Eur. J. Agron.*, 2021, doi: 10.1016/j.eja.2021.126345.
- [115] A. Tisserant and F. Cherubini, 'Potentials, Limitations, Co-Benefits, and Trade-Offs of Biochar Applications to Soils for Climate Change Mitigation', *Land*, vol. 8, no. 12, p. 179, Nov. 2019, doi: 10.3390/land8120179.
- [116] R. Ibarrola, S. Shackley, and J. Hammond, 'Pyrolysis biochar systems for recovering biodegradable materials: A life cycle carbon assessment', *Waste Manag.*, vol. 32, no. 5, pp. 859–868, May 2012, doi: 10.1016/j.wasman.2011.10.005.
- [117] D. Lefebvre, S. Fawzy, C. Aquije, A. I. Osman, K. Draper, and T. A. Trabold, 'Biomass residue to carbon dioxide removal: quantifying the global impact of biochar', *Biochar*, 2023, doi: 10.1007/s42773-023-00258-2.
- [118] V. Kostevica, A. Kubule, I. Vamza, T. Irbe, M. Rosa, and D. Blumberga, 'Sustainability Trade-offs in Biochar Production', *Environ. Clim. Technol.*, vol. 29, pp. 851–864, Nov. 2025, doi: 10.2478/rtuct-2025-0057.
- [119] V. Kostevica, A. Kubule, I. Vamza, and D. Blumberga, 'Latvia's Biochar Potential: Tech, Feedstock & Climate Synergy', *Environmental and Climate Technologies*, vol. 1, no. 29, 2025.
- [120] D. Lauka, A. Barisa, and D. Blumberga, 'Assessment of the availability and utilization potential of low-quality biomass in Latvia', *Energy Procedia*, vol. 147, pp. 518–524, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.065.

- [121] J. Liang *et al.*, 'Optimizing biochar application to improve soil physical and hydraulic properties in saline-alkali soils', *Sci. Total Environ.*, vol. 771, p. 144802, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144802.
- [122] X. Wang *et al.*, 'Targeted biochar application alters physical, chemical, hydrological and thermal properties of salt-affected soils under cotton-sugarbeet intercropping', *CATENA*, vol. 216, p. 106414, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.catena.2022.106414.
- [123] 'CORC Biochar Price Index CORCCHAR'. Accessed: May 02, 2025. [Online]. Available: <https://puro.earth/corc-carbon-removal-indexes>
- [124] MEŽA NOZARE SKAITĻOS UN FAKTOS 2024. Biedrība 'Zaļās mājas'. [Online]. Available: <https://www.zm.gov.lv/lv/media/16911/download?attachment>
- [125] CSP, 'Eksports sadalījumā pa preču veidiem no 2005. gada janvāra līdz 2025. gada septembrim'. [Online]. Available: <https://eksports.csb.gov.lv/lv/months/products/export/2025M09>
- [126] 'Koksnes produktu ražošanas, eksporta un importa apjomi – Koksnes produkti, Laika periods un Rādītāji. PxWeb'. Accessed: Aug. 25, 2025. [Online]. Available: https://data.stat.gov.lv/pxweb/lv/OSP_PUB/START__NOZ__ME__MEK/MEK010/table/tableViewLayout1/
- [127] I. Muizniecea, E. Dace, and D. Blumberga, 'Dynamic Modeling of the Environmental and Economic Aspects of Bio-Resources from Agricultural and Forestry Wastes', *Procedia Earth Planet. Sci.*, vol. 15, pp. 806–812, 2015, doi: 10.1016/j.proeps.2015.08.129.
- [128] E. Dace and I. Muizniece, 'Modeling greenhouse gas emissions from the forestry sector – the case of Latvia', *Agron. Res.*, vol. 13, pp. 464–476, Jul. 2015.
- [129] I. Vamza, F. Diaz, P. Resnais, A. Radziņa, and D. Blumberga, 'Life Cycle Assessment of Reprocessed Cross Laminated Timber in Latvia', *Environ. Clim. Technol.*, vol. 25, no. 1, pp. 58–70, Jan. 2021, doi: 10.2478/rtuect-2021-0005.
- [130] J.-W. Oh *et al.*, 'Comparative CO2 emissions of concrete and timber slabs with equivalent structural performance', *Energy Build.*, vol. 281, p. 112768, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112768.
- [131] D. Lazarevic, P. Kautto, and R. Antikainen, 'Finland's wood-frame multi-storey construction innovation system: Analysing motors of creative destruction', *For. Policy Econ.*, vol. 110, p. 101861, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.forpol.2019.01.006.
- [132] I. Vamza, K. Valters, I. Luksta, P. Resnais, and D. Blumberga, 'Complete Circularity in Cross-Laminated Timber Production', *Environ. Clim. Technol.*, vol. 25, no. 1, pp. 1101–1113, Jan. 2021, doi: 10.2478/rtuect-2021-0083.
- [133] 'The Potential of Wood Construction Waste Circularity'. Accessed: Sep. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3298/11/11/231>
- [134] G. Yang, Z. Gong, X. Luo, L. Chen, and L. Shuai, 'Bonding wood with uncondensed lignins as adhesives', *Nature*, vol. 621, no. 7979, pp. 511–515, Sep. 2023, doi: 10.1038/s41586-023-06507-5.
- [135] Z. Zhou *et al.*, 'A strong and biodegradable wood particles-based bioplastic modified by synergistically dynamic cross-linking with tannic acid and Fe3+', *Compos. Part B Eng.*, vol. 247, p. 110349, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.compositesb.2022.110349.
- [136] L. H. Gulbrandsen, 'Implementing the EU LULUCF regulation in Norway: Short-term and long-term policy coherence challenges', *For. Policy Econ.*, vol. 166, p. 103270, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.forpol.2024.103270.
- [137] ZM, 'ZIZIMM un lauksaimniecības sektors. Pasākumi un turpmāk nepieciešamās stratēģiskās darbības. Zemes sektora (t.sk. mežsaimniecība) un lauksaimniecības darba grupas sanāksme', Jan. 2024. [Online]. Available: <https://www.lmsp.lv/documents/view-ext/60519c3dd22587d6de04d5f1e28bd41d/Prezent%C4%81cija%20LR%20ZM%20ZIZIMM%20un%20lauksaimniec%C4%ABbas%20sektors%2024.janv%C4%81ris%202024.pdf>

- [138] '17 ilgtspējīgas attīstības mērķi | Ministru kabinets'. Accessed: Aug. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.mk.gov.lv/lv/17-ilgtspējīgas-attīstības-merki>
- [139] K. L. Ebi *et al.*, 'Extreme Weather and Climate Change: Population Health and Health System Implications', *Annu. Rev. Public Health*, vol. 42, no. 1, pp. 293–315, Apr. 2021, doi: 10.1146/annurev-publhealth-012420-105026.
- [140] G. Di Lallo, M. Chiriaco, E. Tarasova, M. Köhl, and L. Perugini, 'The land sector in the low carbon emission strategies in the European Union: role and future expectations', *Clim. Policy*, vol. 24, pp. 1–15, Nov. 2023, doi: 10.1080/14693062.2023.2273948.
- [141] G.-J. Nabuurs, P. Delacote, D. Ellison, M. Hanewinkel, L. Hetemäki, and M. Lindner, 'By 2050 the Mitigation Effects of EU Forests Could Nearly Double through Climate Smart Forestry', *Forests*, vol. 8, p. 484, Dec. 2017, doi: 10.3390/f8120484.
- [142] A. Arneth *et al.*, 'Restoring Degraded Lands', *Annu. Rev. Environ. Resour.*, vol. 46, no. Volume 46, 2021, pp. 569–599, Oct. 2021, doi: 10.1146/annurev-environ-012320-054809.
- [143] M. Löf, P. Madsen, M. Metslaid, J. Witzell, and D. Jacobs, 'Restoring forests: regeneration and ecosystem function for the future', *New For.*, vol. 50, pp. 139–151, Mar. 2019, doi: 10.1007/s11056-019-09713-0.
- [144] United Nations, 'Progress towards the Sustainable Development Goals Report of the Secretary-General A/79/79-E/2024/54', Feb. 2024. [Online]. Available: <https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2024/SG-SDG-Progress-Report-2024-advanced-unedited-version.pdf>
- [145] 'ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķu īstenošana Latvijā | Ministru kabinets'. Accessed: Aug. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.mk.gov.lv/lv/iam-istenosana-latvija>
- [146] 'Klimats | Klimata pārmaiņas Latvijā | Pielāgošanās klimata pārmaiņām'. Accessed: Aug. 27, 2025. [Online]. Available: <https://klimatam.lv/>
- [147] 'Inforegio - EU Cohesion Policy: €4.6 billion for Latvia to support a green and fair economy and society in 2021-2027'. Accessed: Aug. 27, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/regional_policy/whats-new/newsroom/21-10-2022-eu-cohesion-policy-eur4-6-billion-for-latvia-to-support-a-green-and-fair-economy-and-society-in-2021-2027_en?utm
- [148] 'Par Latvijas Republikas dalību Kioto protokola elastīgajos mehānismos', LIKUMI.LV. Accessed: Aug. 27, 2025. [Online]. Available: <https://likumi.lv/doc.php?id=167091>
- [149] COWI, IEPP, and Ecologic Institute, *Annexes to Technical Guidance Handbook - setting up and implementing result-based carbon farming mechanisms in the EU. Report to the European Commission, DG Climate Action on Contract No. CLIMA/C.3/ETU/2018/007*. 2021.
- [150] D. M. Lapola *et al.*, 'The drivers and impacts of Amazon forest degradation', *Science*, vol. 379, no. 6630, p. eabp8622, Jan. 2023, doi: 10.1126/science.abp8622.
- [151] M. AbdelRahman, 'An overview of land degradation, desertification and sustainable land management using GIS and remote sensing applications', *Rendiconti Lincei Sci. Fis. E Nat.*, Apr. 2023, doi: 10.1007/s12210-023-01155-3.
- [152] P. C. Sutton, S. J. Anderson, R. Costanza, and I. Kubiszewski, 'The ecological economics of land degradation: Impacts on ecosystem service values', *Ecol. Econ.*, vol. 129, pp. 182–192, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.ecolecon.2016.06.016.
- [153] Vizzuality, 'Global Deforestation Rates & Statistics by Country | GFW'. Accessed: Aug. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/global?category=undefined>
- [154] Jānis Švirksts, 'Meža sertifikācija un tās dinamika Latvijā'. [Online]. Available: <https://www.lmsp.lv/informativie-materiali>
- [155] 'Land Degradation | UNDRR'. Accessed: Aug. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.undrr.org/understanding-disaster-risk/terminology/hips/en0301>

- [156] WWF, *Living Planet Report 2024 – A System in Peril*. Switzerland, 2024. [Online]. Available: <https://wwflpr.awsassets.panda.org/downloads/2024-living-planet-report-a-system-in-peril.pdf>
- [157] *State of nature in the EU Results from reporting under the nature directives 2013–2018 EEA Report No 10/2020*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020.
- [158] Ģ. Baranovskis, O. Nikodemus, G. Brūmelis, and D. Elferts, 'Biodiversity conservation in private forests: Factors driving landowner's attitude', *Biol. Conserv.*, vol. 266, p. 109441, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.biocon.2021.109441.
- [159] Ģ. Baranovskis, O. Nikodemus, D. Elferts, G. Brūmelis, A. Līviņa, and A. Mežgaile, 'Biodiversity conservation in private forests: Preferences of Latvian forest owners in the context of involuntary conservation', *For. Policy Econ.*, vol. 170, p. 103369, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.forpol.2024.103369.
- [160] E. Z. Baskent, 'A Framework for Characterizing and Regulating Ecosystem Services in a Management Planning Context', *Forests*, vol. 11, no. 1, p. 102, Jan. 2020, doi: 10.3390/f11010102.
- [161] B. Czech, 'Prospects for Reconciling the Conflict between Economic Growth and Biodiversity Conservation with Technological Progress', *Conserv. Biol.*, vol. 22, no. 6, pp. 1389–1398, 2008, doi: 10.1111/j.1523-1739.2008.01089.x.
- [162] 'Dabas aizsardzības plāni | Dabas aizsardzības pārvalde'. Accessed: Aug. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.daba.gov.lv/lv/dabas-aizsardzibas-plani>
- [163] S. Seifollahi-Aghmiuni, M. Nockrach, and Z. Kalantari, 'The Potential of Wetlands in Achieving the Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda', *Water*, vol. 11, no. 3, p. 609, Mar. 2019, doi: 10.3390/w11030609.
- [164] M. Saklaurs, S. Dubra, L. Liepa, D. Jansone, and Ā. Jansons, 'Vegetation Affecting Water Quality in Small Streams: Case Study in Hemiboreal Forests, Latvia', *Plants*, vol. 11, no. 10, p. 1316, Jan. 2022, doi: 10.3390/plants11101316.
- [165] V. Patyal, P. Sarma, S. Modgil, T. Nag, and D. Dennehy, 'Mapping the links between Industry 4.0, Circular Economy and Sustainability: A Systematic Literature Review', *J. Enterp. Inf. Manag.*, vol. ahead-of-print, Feb. 2022, doi: 10.1108/JEIM-05-2021-0197.
- [166] I. Laganovska, M. Feofilovs, and D. Blumberga, 'Forestry Sector Resource Optimization with TIMES', *Environ. Clim. Technol.*, vol. 26, no. 1, pp. 1279–1298, Jan. 2022, doi: 10.2478/rtuct-2022-0097.
- [167] M. Jarre, A. Petit-Boix, C. Priefer, R. Meyer, and S. Leipold, 'Transforming the bio-based sector towards a circular economy - What can we learn from wood cascading?', *For. Policy Econ.*, vol. 110, p. 101872, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.forpol.2019.01.017.
- [168] V. Friedniece, A. Sturmane, R. Eglitis, I. Juhnevicā, G. Krigers, and V. Kirsanovs, 'Search for Alternative Raw Materials for Pellet Production – a Preliminary Study', *Environ. Clim. Technol.*, vol. 28, pp. 652–669, Nov. 2024, doi: 10.2478/rtuct-2024-0051.
- [169] A. Kubule and D. Blumberga, 'Sustainability Analysis of Manufacturing Industry', *Environ. Clim. Technol.*, vol. 23, no. 3, pp. 159–169, Dec. 2019, doi: 10.2478/rtuct-2019-0086.
- [170] K. Dolge, R. Āzis, P. D. Lund, and D. Blumberga, 'Importance of Energy Efficiency in Manufacturing Industries for Climate and Competitiveness', *Environ. Clim. Technol.*, vol. 25, no. 1, pp. 306–317, Jan. 2021, doi: 10.2478/rtuct-2021-0022.
- [171] L. Balode and D. Blumberga, 'Evaluating the Effectiveness of Agricultural and Forestry Policies in Achieving Environmental Goals Through Policy Documents', *Environ. Clim. Technol.*, vol. 27, no. 1, pp. 195–211, Jan. 2023, doi: 10.2478/rtuct-2023-0015.
- [172] K. Laktuka, A. Kubule, I. Vamza, S. Rozakis, and D. Blumberga, 'Strategic pathways for a bioeconomy with high value-added products: Lessons learnt from the Latvian forest sector', *Biomass Bioenergy*, vol. 190, p. 107400, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.biombioe.2024.107400.

- [173] I. Muizniece, L. Vilcane, and D. Blumberga, 'Laboratory research of granulated heat insulation material from coniferous forestry residue', *Agron. Res.*, vol. 13, pp. 690–699, Jul. 2015.
- [174] 'Energobalance, TJ, tūkst.toe (NACE 2. red.) 2008 - 2023', Oficiālās statistikas portāls. Accessed: Aug. 28, 2025. [Online]. Available: https://data.stat.gov.lv/443/pxweb/lv/OSP_PUB/START_NOZ__EN__ENB/ENB060/
- [175] D. Lauka, A. Barisa, and D. Blumberga, 'Assessment of the availability and utilization potential of low-quality biomass in Latvia', *Energy Procedia*, vol. 147, pp. 518–524, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.065.
- [176] K. Bumbiere, A. Gancone, J. Pubule, and D. Blumberga, 'Carbon balance of biogas production from maize in Latvian conditions', p. 483.2Kb, 2021, doi: 10.15159/AR.21.085.
- [177] T. Prodanuks, G. Cimdirina, I. Veidenbergs, and D. Blumberga, 'Sustainable Development of Biomass CHP in Latvia', *Energy Procedia*, vol. 95, pp. 372–376, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.026.
- [178] L. Zihare, R. Soloha, and D. Blumberga, 'The potential use of invasive plant species as solid biofuel by using binders', p. 614.5Kb, 2018, doi: 10.15159/AR.18.102.
- [179] A. Lehtilä, H. U. Ghani, X. Liu, T. Palosuo, H. L. Tuomisto, and I. Leinonen, 'Framework for including national-level LULUC emissions and removals in the GWP of agricultural and forestry products in LCA', *J. Clean. Prod.*, vol. 494, p. 144999, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.jclepro.2025.144999.
- [180] E. Van de moortel, K. Allacker, F. Troyer, E. Schoofs, and L. Stijnen, 'Dynamic Versus Static Life Cycle Assessment of Energy Renovation for Residential Buildings', *Sustainability*, vol. 14, p. 6838, Jun. 2022, doi: 10.3390/su14116838.
- [181] A. Levasseur, P. Lesage, M. Margni, M. Brandão, and R. Samson, 'Assessing temporary carbon sequestration and storage projects through land use, land-use change and forestry: Comparison of dynamic life cycle assessment with ton-year approaches', *Clim. Change*, vol. 115, Dec. 2012, doi: 10.1007/s10584-012-0473-x.
- [182] S. Lueddeckens, P. Saling, and E. Guenther, 'Temporal issues in life cycle assessment—a systematic review', *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 25, no. 8, pp. 1385–1401, Aug. 2020, doi: 10.1007/s11367-020-01757-1.
- [183] "'Sustainable peatlands strategies for restoration of peat extraction sites (Peat4Res)", project No. lzp-2022/1-0405.' [Online]. Available: <https://videszinatne.rtu.lv/zinatne/projekti-un-petijumi/peat4res/>
- [184] D. Kazmere, M. Feofilovs, and F. Romagnoli, 'Climate Neutrality Strategies for Peatland Management: Case Study about Peat Extraction Field Repurposing Scenarios in Latvia', *Environ. Clim. Technol.*, vol. 29, no. 1, pp. 623–640, Oct. 2025, doi: 10.2478/rtuct-2025-0043.



06

ATKRITUMU UN NOTEKŪDEŅU APSAIMNIEKOŠANAS SEKTORS

Ievads

01 Enerģētikas sektors

02 Transporta sektors

03 Rūpniecības sektors

04 Lauksaimniecības sektors

05 ZIZIMM

06 ATKRITUMU UN NOTEKŪDEŅU APSAIMNIEKOŠANAS SEKTORS 282

6.1.	Atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektora SEG emisiju audits	285
6.1.1.	Atkritumu apglabāšanas sektora SEG emisiju audits	286
6.1.2.	Atkritumu bioloģiskā pārstrāde	293
6.1.3.	Atkritumu sadedzināšana	297
6.1.4.	Notekūdeņu attīrīšana un novadīšana	298
6.2.	Tehnoloģiskie paņēmieni atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektora dekarbonizācijai	299
6.2.1.	Atkritumu neradīšana, veicinot inovatīvu bioproduktu ražošanu	300
6.2.2.	Notekūdeņu dūņu izmantošanas veidi	301
6.2.3.	Noārdāmā oglekļa daļas samazināšana apglabāto atkritumu plūsmā	303
6.2.4.	Tekstila atkritumu apjoma samazināšana un tekstila izmantošana	306
6.2.5.	Biogāzes uzlabošana biometāna ieguvei	307
6.2.6.	Patērētāju paradumu ietekme uz atkritumu apsaimniekošanu	309
6.3.	Klimata pārmaiņu mazināšanas ilgtspējas vērtējums atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektorā	310
6.3.1.	ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķu sasaiste ar atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektoru	310
6.3.2.	Vides, sociālais un ekonomiskais novērtējums	312

Izmantotā literatūra

Summary

Radīto atkritumu un notekūdeņu apjomi ir saistīti ar sabiedrības pamatvajadzību nodrošināšanu, iedzīvotāju ekonomisko aktivitāti, rūpniecības sektora resursu patēriņu un ir atkarīgi no materiālu aprites, respektīvi, apritīguma trūkuma sabiedrībā (sk. 6.1. att.). Pētījums par resursu apriti liecina, ka 2024. gadā pasaulē atbilstoši ilgtspējīgas aprites principiem tika izmantoti mazāk nekā 7 % resursu [1]. Resursu patēriņš radīto emisiju apjomu ietekmē divējādi. No vienas puses, emisijas rodas, ražojot produktus, un dažkārt arī lietojot. No otras puses, SEG emisijas var rasties aprites cikla noslēgumā, kad produkti kļūst par atkritumiem, taču emisiju daudzums būs atkarīgs no izmantotās atkritumu apsaimniekošanas pieejas.

SEG emisijas rada dažādas atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas aktivitātes:

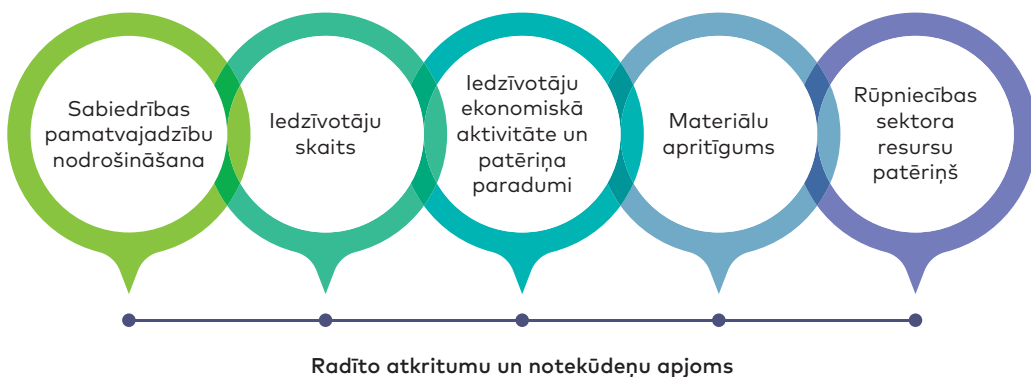
- atkritumu apglabāšana apsaimniekotās un neapsaimniekotās apglabāšanas vietās,
- atkritumu bioloģiskā pārstrāde,
- atkritumu sadedzināšana,
- notekūdeņu apsaimniekošana.

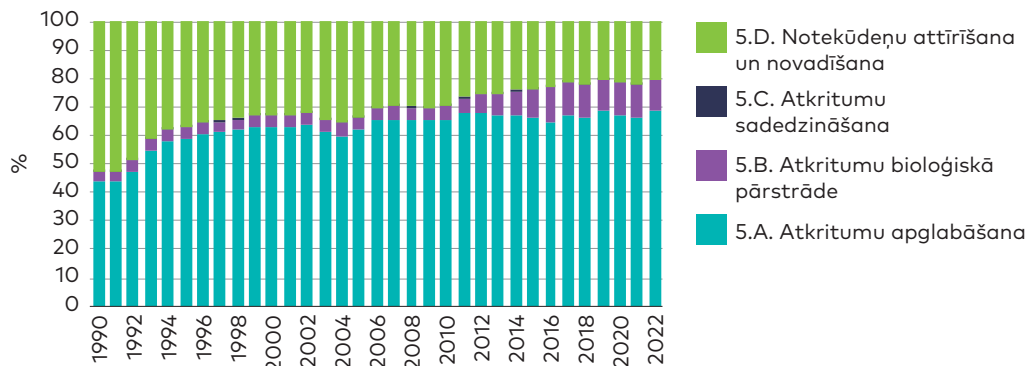
Latvijā atkritumu apsaimniekošanas sektorā ietvertās aktivitātes rada salīdzinoši mazu daļu no kopējām valsts SEG emisijām (2023. gadā – 5,8 %, neskaitot ZIZIMM, ieskaitot netiešās CO₂ emisijas). Cieto atkritumu apglabāšanas darbības rada 3,97 % no Latvijas kopējām emisijām, notekūdeņu attīrīšana un novadīšana – 1,22 % un atkritumu bioloģiskā pārstrāde – 0,62 % [2]. Būtiski, ka atklāta atkritumu sadedzināšana Latvijā nav atļauta un netiek īstenota atkritumu sadedzināšana bez enerģijas atgūšanas, tāpēc šajā apakšsektorā Apvienoto Nāciju Organizācijas Klimata pārmaiņu starpvaldību padomes (KPSP) metodoloģijas kontekstā tiek ziņots tikai par emisijām no kremēšanas, kā arī par kontrolētu klīnisko un bīstamo atkritumu apsaimniekošanu.

6.2. attēlā apkopotas sadzīves atkritumu apsaimniekošanas sektorā ietilpstošās aktivitātes un galvenie emisiju avoti. Kopš 2023. gada Latvijā noteikti pieci atkritumu apsaimniekošanas reģioni [3]. Nešķirotu

6.1. attēls.

Radīto atkritumu un notekūdeņu apjomus ietekmējošie faktori.





6.3. attēls.

Atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektora radīto SEG emisiju dinamika [izmantoti [7] dati].

SEG emisijas kopš 1990. gada gandrīz visu laiku konsekventi samazinājušās. Valstī radīto atkritumu un notekūdeņu apjoms ir atkarīgs no iedzīvotāju skaita, kā arī iedzīvotāju preču un resursu patēriņa. Līdz ar to šī sektora radīto SEG emisiju virzītājspēks ir iedzīvotāju skaits un viņu paradumi. Samazinoties valsts iedzīvotāju skaitam, mazinās ūdens patēriņš un līdz ar to arī pieprasījums pēc kanalizācijas pakalpojumiem, taču arī tehnoloģiju attīstība veicinājusi ūdens resursu efektivitāti, piemēram, rūpniecībā [7]. Izmaiņas atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektora emisiju struktūrā ir arī saistītas ar atkritumu bioloģiskās pārstrādes daļas pieaugumu (sk. 6.3. att.).

Būtiski, ka atkritumu apglabāšana ir laikā dinamisks emisiju avots – apglabātie atkritumi emisijas rada ilgstošā laika periodā, kamēr sadalās organiskās vielas.

Turpmākajās nodaļās vispirms raksturotas atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektora galvenās aktivitātes un SEG emisiju avoti, tad raksturotas tehnoloģijas un risinājumi emisiju samazināšanai, kā arī ņemtas vērā to vides, sociālās un ekonomiskās ietekmes.

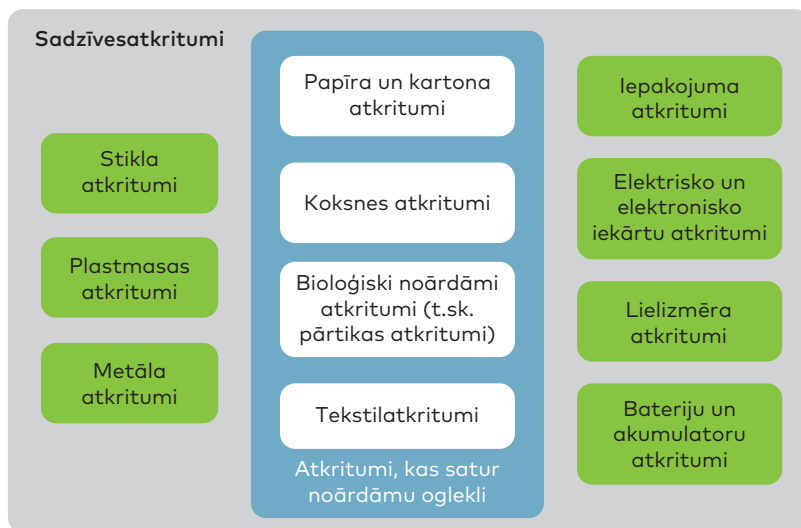
6.1. Atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektora SEG emisiju audits

Emisiju rašanās mehānismi katrā no atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas apakšsektoriem ir atšķirīgi, tādēļ šo emisiju aprēķina principi turpmākajās nodaļās skatīti atsevišķi. Jāņem vērā, ka enerģijas atgūšana no atkritumiem (piemēram, no atkritumiem iegūts kurināmais vai poligonu gāzes sadedzināšana) tiek attiecināta kā emisiju avots enerģētikas nevis atkritumu sektorā, kā arī atkritumu savākšanas transporta radītās emisijas tiek ziņotas enerģētikas sektora transporta apakšsektorā.

6.1.1. Atkritumu apglabāšanas sektora SEG emisiju audits

Cietie sadzīves atkritumi ir tādi atkritumi, kas rodas mājsaimniecību ikdienas darbībās vai tām pielīdzināmās darbībās (kā tirdzniecības iestāžu un rūpniecības nebīstami atkritumi). Parasti tos organizētā veidā savāc pašvaldības izraudzīts atkritumu apsaimniekošanas uzņēmums. Latvijā sadzīves atkritumu kategorijā tiek ieskaitīti šķiroti vai nešķiroti savākti papīra, kartona, stikla, metāla, plastmasas, bioloģiski noārdāmi, koksnes, tekstila, iepakojuma, elektrisko un elektronisko iekārtu, bateriju un akumulatoru, liela izmēra atkritumi [8]. Daļa no sadzīves atkritumu sastāvā esošajām atkritumu frakcijām satur organiski noārdāmu oglekli (sk. 6.4. att.). Nešķirotu sadzīves atkritumu apsaimniekošanas iespējas ir ierobežotas to savstarpējās sajaukšanās dēļ.

Lai veiktu SEG emisiju auditu šim sektoram, ņem vērā emisijas, ko rada atkritumu apsaimniekošana, tos noglabājot gan apsaimniekotās, gan neapsaimniekotās atkritumu apglabāšanas vietās. KPSP metodika kā trešo iespējamo kategoriju paredz nekategorizētas atkritumu apglabāšanas vietas. Šī kategorija izmantojama, ja nekādi nav iespējams atkritumu poligona darbību attiecināt uz apsaimniekoto vai neapsaimniekoto pieeju. Latvijā nekategorizētas atkritumu apglabāšanas vietas netiek ziņotas. Savukārt, piemēram, Beļģijā [9] vēsturiskās situācijas aprēķinam par 1950.–1960. gadu nav pieejama informācija, kas ļautu ticami klasificēt apglabāšanas vietas kā apsaimniekotas vai neapsaimniekotas, tādēļ izvēlēts visiem apglabātajiem atkritumiem izmantot nekategorizētām atkritumu apglabāšanas vietām atbilstošos koeficientus.



6.4. attēls.
Sadzīves atkritumu iespējamās frakcijas.

Nešķirotu sadzīves vai tiem pielīdzināmu atkritumu apglabāšana atkritumu poligonos rada metāna (CH_4) emisijas, jo daļa nešķirotajos atkritumos esošā organiski noārdāmā oglekļa sadalās bezskābekļa vidē. Noārdīšanas procesos izdalās arī CO_2 , NMGOs, N_2O [10]. Šo gāzu maisījumu sauc par poligonu gāzi. Ņemot vērā, ka CO_2 emisijas šajos procesos rodas no bioatkritumu noārdīšanās, tās pieņem par daļu no oglekļa dabiskās aprites un par tām neziņo kā par antropogēnām SEG emisijām. Arī N_2O emisijas no atkritumu apglabāšanas uzskata par nebūtiskām [11]. Tādēļ CH_4 , kura siltumnīcas efekta potenciāls ir 27 reizes lielāks nekā CO_2 [12], uzskatāms par būtiskāko atkritumu apglabāšanas SEG emisiju veidu. Par laimi, mūsdienās CH_4 novadīšana atmosfērā vairs netiek uzskatīta par pašsaprotamu. Turpretī kā atkritumu poligonos, tā arī zemnieku saimniecībās tiek uzstādītas poligonu gāzes un biogāzes sadedzināšanas tehnoloģijas, lai mērķtiecīgi izmantotu šī resursa potenciālu.

Metāna ražošana atkritumu krātuvē notiek laikā mainīgi, jo ar katru gadu iepriekš noglabātajos atkritumos paliek arvien mazāk bioloģiski degradējamā materiāla. Savukārt atkritumu apglabāšanas radīto emisiju apjoms atkarīgs gan no radītās poligonu gāzes kopējā apjoma, gan arī no tās apsaimniekošanas veida (piemēram, sadedzinot lāpā, sadedzinot enerģijas atguvei vai attīrot metānu līdz degvielas kvalitātei) un pat klimatiskajiem apstākļiem [13]. Atkritumu sektorā radītās emisijas iespējams aprēķināt, izmantojot atšķirīgus datu detalizācijas līmeņus. Dažādi aprēķinu detalizācijas līmeņi nepieciešami, jo atšķiras emisiju apjoms un nozīmīgums katras valsts emisiju kopējā budžetā, kā arī atšķiras datu pieejamības līmeņi. Visu trīs KPSP metodoloģijā iekļauto detalizācijas līmeņu pamatā ir pirmās pakāpes sabrukšanas metode (angļu val. *first order decay*) [11], kas ņem vērā to, ka metāna ražošana ar laiku samazinās. Radīto metāna emisiju apjomu var noteikt, pamatojoties uz informāciju par kārtējā gadā noglabāto atkritumu apjomu un atkritumu īpašībām, kā arī jāņem vērā vēsturiski noglabātais atkritumu daudzums un sastāvs.

Lai atkritumu apglabāšanas darbību emisiju aprēķiniem izmantotu pirmās pakāpes sabrukšanas metodi, izmanto arī KPSP sagatavoto aprēķinu izklājlapu (tā saukto Atkritumu modeli (sk. piemēru 6.5. att.)), kas pielāgojama dažādiem detalizācijas līmeņiem. 1. detalizācijas līmeņa pieejā kā nepieciešamie izejas dati (gan aktivitātes apjoms, gan parametri) pieņemtas KPSP noteiktās standarta vērtības. 2. detalizācijas līmeņa pieejā izmanto datus par valstij specifisko aktivitātes apjomu – atkritumu noglabāšanas apjomiem atkritumu poligonos, turklāt šie dati nepieciešami par vismaz 10 gadu periodu. 3. detalizācijas līmeņa pieejā papildus 2. līmeņa pieejai izmanto arī citus valstij specifiski izmērītus vai aprēķinātus parametrus, piemēram, atkritumu pussabrukšanas periods,

metāna ražošanas potenciāls (L_0), vidējais svērtais noārdāmā organiskā oglekļa saturs atkritumos (DOC) un DOC daļa, ko iespējams noārdīt [11].

Atkritumu modelis ir KPSP sagatavota izklājlapa atkritumu apglabāšanas sektora emisiju aprēķinam. Modelis ar pielāgojumiem izmantojams visu trīs detalizācijas līmeņu aprēķiniem un ietver gan standarta vērtības un konstantes, gan iespēju ievadīt valstij specifiskus aktivitāšu datus. Izklājlapa pieejama angļu valodā, un tajā pieejamie termini atbilst KPSP metodikā lietotajiem.

Lai ņemtu vērā jau minēto metāna ražošanas mainību laikā, emisijas rēķina, izmantojot vēsturiskos jeb laikrindu datus. Atkritumu apglabāšanas emisiju auditā lielākajā daļā ES valstu ņem vērā (vai aplēst) apglabāto atkritumu daudzums, sākot ar 1950. gadu. Latvijas gadījumā dati par periodu no 1950. līdz 2001. gadam netika sistemātiski vākti, tādēļ nacionālajos ziņojumos izmantotie dati par noglabāto atkritumu apjomu balstīti pieņēmumos no 2016. gadā veiktās izpētes [14]. Pamatojoties uz šo pētījumu, pieņemts, ka visas līdz 2001. gadam izmantotās atkritumu izgāztuves ir neapsaimniekotās atkritumu apglabāšanas vietas, bet tajās noglabāto atkritumu morfoloģiskais sastāvs nav zināms. Atkritumu apglabāšanas emisiju aprēķinu iedala divās daļās [2]: par 1950.–2001. gada periodu tiek izmantota kopējo atkritumu pieeja (1. detalizācijas līmeņa pieeja) un pieņemts, ka pilsētās radītie atkritumi tiek apglabāti dziļās krātuvēs, kur labāk tiek nodrošināti anaerobās sadalīšanās apstākļi, bet lauku teritorijās radītie atkritumi tiek apglabāti seklākās krātuvēs, kur tie vairāk pakļauti aerobiem apstākļiem. Sākot 2002. gadu, ir pieejama precīza atkritumu uzskaitē un iespējams precīzi norādīt, cik daudz atkritumu tiek apsaimniekots Latvijas atkritumu poligonos, kā arī kopš modernu sanitāru atkritumu poligonu izveidošanas, tiek pieņemts, ka tajos tiek



INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE
 NATIONAL GREENHOUSE GAS INVENTORIES PROGRAMME



2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

This spreadsheet implements the Tier 1 method for estimating emissions of methane from solid waste disposal sites. For details of the method see the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 5 Chapter 3

©IPCC 2006

Introduction

This spreadsheet has been developed by the IPCC to enable countries to estimate emissions of methane from solid waste disposal sites (SWDS) using the first order decay method. It also allows an estimation of the carbon stored in the SWDS by in the Harvested Wood Products (HWP) category as well as methane from HWP in SWDS. See Volume 4 Chapter 12 for details.

Worksheets

Name	Details
Instructions	(This worksheet) Step by step guidance for using the model
Parameters	Data entry for parameters such as DOC and decay half-life
MCF	Data entry for distribution of waste management types (used to estimate a time series for the weighted average

6.5. attēls.

Klimata pārmaiņu starpvalstu padomes Atkritumu modeļa izklājlapa.

pilnībā nodrošināti anaerobi procesa apstākļi. Šī iemesla dēļ kopš 2002. gada tiek veikts detalizēts emisiju aprēķins dalījumā pēc atkritumu sastāva un pēc katrai frakcijai raksturīgā noārdāmā oglekļa satura (2. detalizācijas līmeņa pieeja).

CH₄ emisiju aprēķiniem ar 1. un 2. detalizācijas līmeņa pieeju izmanto gan Latvijai specifiskus datus, gan vispārīgas standarta vērtības. Lai gan reakcijas, kas norisinās biomasas anaerobas noārdīšanās procesā ir sarežģītas, laikā mainīgas un atkarīgas no apstākļiem katrā konkrētajā atkritumu apsaimniekošanas poligonā, KPSP izmantotā pirmās pakāpes sabrukšanas metode paredz vienkāršotu, tuvinātu aprēķinu [11]. Radītā metāna apjumu ietekmē anaerobi noārdāmā organiskā oglekļa saturs atkritumos jeb tas, cik liela daļa no atkritumos pieejamā organiskā oglekļa spēj sadalīties tieši anaerobos apstākļos. Dažādiem atkritumu veidiem šis noārdāmā organiskā oglekļa saturs ir atšķirīgs. Vidējo svērtu noārdāmā organiskā oglekļa apjomu atkritumos nosaka, konkrētās kategorijas radīto atkritumu daudzumu reizinot ar noārdāmā oglekļa proporciju šāda veida atkritumiem (sk. 6.1. vienādojumu). Lai noteiktu tieši anaerobos apstākļos noārdāmā oglekļa masu, DOC reizina ar DOC_f jeb noārdāmā oglekļa daļu, kas spēj noārdīties anaerobos apstākļos. Papildus jāņem vērā arī tā atkritumu daļa, kas noārdās aerobos apstākļos, jeb pirms apstākļu atkritumu krātuvē kļūst anaerobi. 6.2. vienādojumā parādīts, kā visi šie parametri tiek ņemti vērā, lai aprēķinātu kopējo uzskaites gadā ar atkritumiem krātuvē pievienoto jauna noārdāmā organiskā oglekļa apjomu.

$$DOC \left[\frac{GgC}{Gg \text{ atkritumi}} \right] = \sum_i \left(DOC_i \left[\frac{GgC}{Gg \text{ atkritumi}} \right] \times w_i \right), \quad (6.1.)$$

kur

DOC – vidējais svērtais noārdāmā organiskā oglekļa saturs atkritumos, Gg C/Gg atkritumu;

DOC_i – atsevišķai atkritumu kategorijai raksturīgais noārdāmā organiskā oglekļa saturs, Gg C/Gg atkritumu;

w_i – konkrētas kategorijas atkritumu daļa kopējos atkritumos, bez dimensijas.

$$DDOCm[GgC] = W[Gg \text{ atkritumi}] \times DOC \left[\frac{GgC}{Gg \text{ atkritumi}} \right] \times DOC_f \times MCF, \quad (6.2.)$$

kur

DDOCm – kopējais noārdāmā organiskā oglekļa saturs atkritumos konkrētajā gadā, Gg C;

W – apglabāto atkritumu daudzums konkrētajā gadā, Gg atkritumu;

DOC_f – noārdāmā oglekļa daļa, kas spēj noārdīties anaerobos apstākļos, bez dimensijas;

MCF – korekcijas faktors oglekļa aerobas noārdīšanās dēļ, bez dimensijas.

Ja krātuvē pievienotā noārdāmā oglekļa apjomu aprēķina par visu apskatīto periodu līdz uzskaites gadam (to var saukt arī par akumu-lēto $DDOCm$), iespējams noteikt uzskaites gadā noārdītā organiskā oglekļa apjomu (sk. 6.3. vienādojumu). Tad var aprēķināt konkrētajā gadā atkritumu apglabāšanas darbību radītā metāna apjomu (sk. 6.4. vienādojumu).

$$DDOCm \text{ noārd.}_T[Gg C] = DDOCm_{T-1}[Gg C] \times (1 - e^{-k}), \quad (6.3.)$$

kur

$DDOCm \text{ noārd.}$ – uzskaites gadā noārdītā organiskā oglekļa apjoms, $Gg C$;

T – uzskaites gads;

k – reakcijas konstante, kas atkarīga no konkrētā atkritumu veida pussabrukšanas perioda, y^{-1} .

$$CH_4 \text{ radīts}_T[t_{CH_4}] = DDOCm \text{ noārd.}_T[Gg C] \times F \times \frac{M_{CH_4}}{M_C}, \quad (6.4.)$$

kur

F – radītā metāna tilpuma daļa poligonu gāzē;

M_{CH_4} – metāna molmasa;

M_C – oglekļa molmasa.

Kopējais metāna emisiju apjoms atšķiras no radītā metāna apjoma par atgūtā metāna daļu. 6.5. vienādojumā ietverts viss radītais metāna apjoms, taču ņemts vērā arī tas, ka daļa radītā metāna tiek atgūta un izmantota, piemēram, poligona koģenerācijas stacijā. Oksidācijas faktors izmantots, lai koriģētu aprēķinu par to daļu no metāna emisijām, kas atkritumu krātuves pārklājuma dēļ nokļūst saskarē ar apkārtējo gaisu un oksidējas.

$$CH_{4\text{emisijas}}[t_{CH_4}] = [\sum_x CH_{4\text{radīts},T} - R_T] \times (1 - OX_T), \quad (6.5.)$$

kur

$CH_{4\text{emisijas}}$ – kopējās CH_4 emisijas uzskaites gadā, tonnas CH_4 ;

$CH_{4\text{radīts}}$ – radītās CH_4 emisijas uzskaites gadā, tonnas CH_4 ;

T – uzskaites gads;

x – atkritumu kategorija;

R_T – atgūtā CH_4 apjoms gadā, tonnas CH_4 ;

OX_T – oksidācijas faktors gadā T , proporcija.

Izmantojot pirmās pakāpes sabrukšanas metodi, pieņem, ka reakcijas produktu apjoms ir proporcionāls izmantoto materiālu apjomam [11]. No KPSP rekomendētās metodikas izriet, ka vieni no svarīgākajiem ievaddatiem ir aktivitātes apjoms jeb radīto sadzīves atkritumu un dalīti savāktu bioloģisko atkritumu apjomi.

Radīto atkritumu apjoms valstī ir atkarīgs no iedzīvotāju labklājības līmeņa, patēriņa paradumiem, vides izglītības līmeņa un atkritumu šķirošanas kultūras un pieredzes. Ņemot vērā, ka rūpniecībā radīti nebīstami atkritumi pielīdzināmi mājsaimniecību atkritumiem, kopējās atkritumu radīšanas un apsaimniekošanas un līdz ar to emisiju tendences ietekmē arī rūpniecības nozaru struktūra valstī.

Kā uzsvērts KPSP metodikā [11], cieto sadzīves atkritumu sastāvs vienmēr būs atkarīgs no atrašanās vietas. Arī pētījumā par sadzīves atkritumu morfoloģisko sastāvu 32 Latvijas pilsētās [15] novērotas atkritumu sastāva atšķirības. Tās rodas, jo atkritumu radīšana nav viendabīgs process, ko ietekmē gan sezonalitāte un iedzīvotāju patēriņa paradumu atšķirības. Lai mazinātu sezonalitātes ietekmi uz rezultātiem, pētījumā paraugi no katras pilsētas ievākti dažādos gadalaikos. Atbilstoši pētījuma rezultātiem Latvijā vislielāko daļu no nešķirotiem sadzīves atkritumiem veido bioloģiski noārdāmi atkritumi (29,2 %), turklāt faktiskais bioloģiski noārdāmo atkritumu īpatsvars ir vēl lielāks, jo tie veido arī līdz pat 50 % no smalknes frakcijas, kas pētījumā uzskaitīta atsevišķi. Tekstila atkritumu apjoms vidēji ir 5,04 %, papīra un kartona atkritumu apjoms vidēji – 4,65 %, papildus atsevišķi uzskaitīts papīra un kartona iepakojumu atkritumu apjoms – 3,44 %. Koksnes atkritumi veidoja 0,56 % no kopējās atkritumu plūsmas, savukārt koksnes iepakojuma atkritumi – 0,16 %. Salīdzinājumam KPSP metodikas standartvērtībās Austrumeiropas reģionam pārtikas atkritumu daļa pieņemta 30,1 %, papīra un kartona atkritumi – 21,8 %, koksnes atkritumi – 7,5 %, tekstila – 4,7 %. Redzams, ka bioloģiski noārdāmo atkritumu un tekstila atkritumu frakcijas ir līdzīgas, savukārt papīra un kartona un koksnes atkritumu frakcijas Latvijas mēroga pētījumā, kurš ir nesenāks, ir mazākas, kas skaidrojams ar atkritumu šķirošanas sistēmas uzlabošanu pēdējās desmitgadēs.

Lai Latvijas gadījumā izmantotu pēc iespējas precīzākus datus, emisiju novērtējumam izmantotas ne tikai standartvērtības, bet arī konkrēto atkritumu apsaimniekošanas poligonu ziņotie atkritumu apjomi un atkritumu sastāva dati no poligonu ikgadējām atskaitēm. Šajos empīriskajos datos pēdējos gados vērojama tendence, ka apglabāto sadzīves atkritumu sastāvā samazinās bioloģiski noārdāmo atkritumu frakcija (sk. 6.1. tabulu), kas īpaši saistāms ar bioloģisko atkritumu pārstrādes iekārtu ieviešanu saskaņā ar Atkritumu apsaimniekošanas valsts plānu 2021.–2028. gadam. Atkritumi tiek manuāli atšķiroti no nešķirotu sadzīves atkritumu plūsmas un novirzīti uz bioloģiskās pārstrādes iekārtām. Tādā veidā tiek koncentrēta bioatkritumu plūsma, efektīvāk nodrošināti anaerobie pārstrādes apstākļi, kā arī mazināts noglabājamo atkritumu apjoms, bet līdz ar to mainās arī noglabājamo atkritumu sastāva proporcijas.

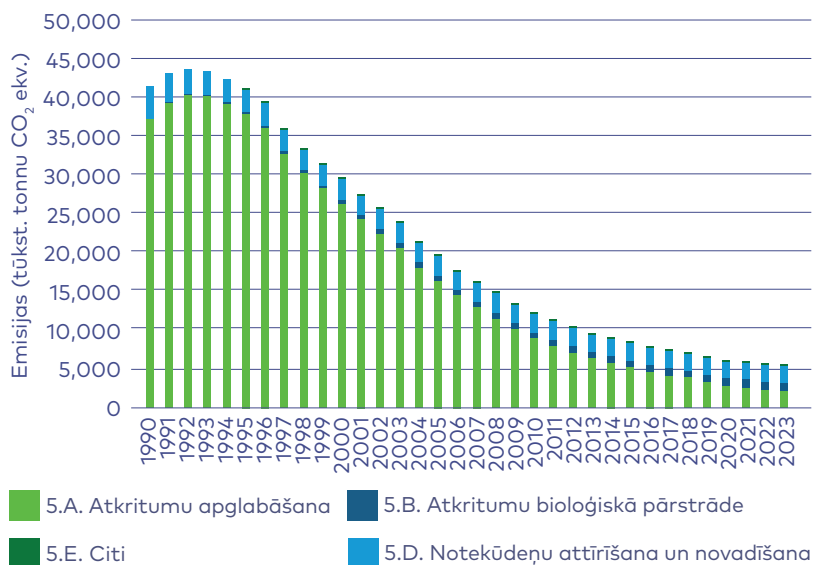
6.1. tabula

Apglabāto sadzīves atkritumu sastāvs
(dati no [2], DOC – autoru aprēķins)

	Pārtikas atkritumi	Dārzu atkritumi	Papīrs	Koks	Tekstils	Autiņbiksītes	Plastmasa un citi inertie atkritumi	DOC
2021	21,3	22,2	6,3	2,4	2,8	0,0	45,0	0,119
2022	17,8	18,3	9,3	2,6	2,8	0,1	49,0	0,118
2023	10,3	8,4	7,9	1,7	7,9	0,0	63,8	0,090

Izmantojot 6.1. tabulā redzamos datus par atkritumu sastāvu un KPSP standartvērtības par dažādām atkritumu kategorijām raksturīgo noārdāmā organiskā oglekļa saturu, iespējams aprēķināt vidējo svērto noārdāmā organiskā oglekļa saturu atkritumos. Samazinot bioloģiskas izcelsmes atkritumu daļu apglabātajos atkritumos, tiek samazināta arī noārdāmā organiskā oglekļa ievade krātuvē, kas attiecīgi samazina radītā metāna apjomu. Tomēr kopējais emisiju situācijas uzlabojums nerodas tieši no atkritumu novirzīšanas prom no krātuves, bet gan novirzot koncentrēto bioatkritumu plūsmu uz bioloģiskās pārstrādes iekārtām (biotuneļiem), kur efektīvāk tiek īstenots anaerobās pārstrādes process. Uzskaites ziņā var šķist, ka emisijas tādā veidā tiek pārvirzītas no atkritumu apglabāšanas uz atkritumu bioloģiskās pārstrādes sektoru, jo, tāpat kā pēc atkritumu apglabāšanas energošūnā, tā arī pēc pārstrādes biotuneļos atgūtais metāns tiek sadedzināts un ieskaitīts enerģētikas sektorā. Svarīgākais ir tas, ka, izmantojot biotuneļus, tiek nodrošināta efektīva bioloģisko atkritumu pārstrāde un samazināts atkritumu apglabāšanas tilpums, kā arī papildus tiek iegūts komposts.

Piemērs. Vācija laika posmā no 1990. gada līdz 2022. gadam samazinājusi atkritumu apglabāšanas apakšsektora emisijas par vairāk nekā 93 %. Lielā mērā tas sasniegts, pateicoties Vācijas stingrajiem atkritumu apsaimniekošanas noteikumiem un ieviestajai dalītās atkritumu vākšanas sistēmai. Kopš 2005. gada jūnija ir pilnībā aizliegts apglabāt bioloģiskos atkritumus, tādēļ līdz minimumam samazinājies kopējais apglabāto atkritumu apjoms, bet palielinājies dalīti vākto bioloģisko atkritumu un atkārtoti izmantojamu materiālu apjoms. Šis piemērs liecina, ka, pārtraucot apglabāt bioloģiskos atkritumus, sasniedzama būtiskāka ietekme uz klimata pārmaiņu mazināšanu, nekā īstenojot noglabāto atkritumu radītā metāna atgūšanu un izmantošanu [16].



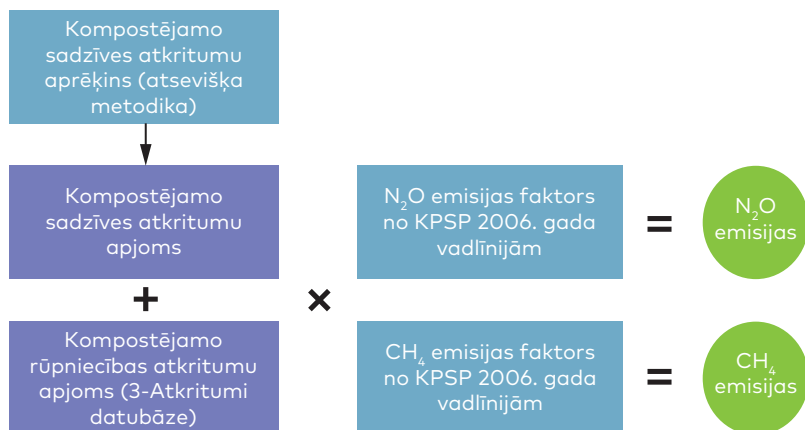
6.6. attēls. Ikgadējās atkritumu apsaimniekošanas sektora radītās SEG emisijas Vācijā laikposmā no 1990. līdz 2023. gadam [16].

6.1.2. Atkritumu bioloģiskā pārstrāde

Atkritumu bioloģisko pārstrādi var īstenot, nodrošinot aerobus vai anaerobus apstākļus. Atkritumu kompostēšanas jeb aerobās pārstrādes rezultātā rodas gan CO_2 , gan CH_4 un N_2O emisijas. CO_2 emisijas kompostēšanā rodas no dabiskas izcelsmes materiālu noārdīšanas, tāpēc tās netiek ziņotas kā biogēnu avotu SEG emisijas. Lielāka CH_4 un N_2O emisiju klātbūtne liecina par sliktu kompostēšanas procesa darbību, jo anaerobajās zonās radušās emisijas netiek pietiekami oksidētas aerobajā zonā [17]. Savukārt, ja mērķēti tiek īstenota anaerobā atkritumu pārstrāde, tad metāna emisiju veidošanās ir vēlama. Metānu var kontrolēti savākt un sadedzināt enerģijas atgūvei, jo tādā veidā iespējams gan atgūt poligonu gāzē ietverto enerģiju, gan atmosfērā novadīt klimatam mazāk kaitīgu piesārņotāju. Pat ja atgūtais metāns tiek sadedzināts bez enerģijas atgūšanas (piemēram, lāpā), radītās CO_2 emisijas tiek uzskatītas biogēnu avotu emisijām un nav būtiskas kopējā atkritumu apsaimniekošanas sektora griezumā. Atgūtā metāna apjomu ņem vērā atkritumu bioloģiskās pārstrādes radīto CH_4 emisiju aprēķinā (emisijas tiek samazinātas par atgūtā metāna daudzumu, sk. 6.6. vienādojumu), bet emisijas, kas rodas, iegūto biogāzi sadedzinot un enerģiju atgūstot, attiecinā uz enerģētiskās sektoru. Turpretī kompostēšana mājāsaimniecībās (decentralizēta bioloģiskā pārstrāde) norisinās bez metāna atgūšanas. Svarīgi, ka, izmantojot jebkuru tehnoloģiju, bioloģisko atkritumu pārstrāde samazina to atkritumu apjomu un tilpumu, kas jāapglabā.

Latvijā papildus bioloģiskās pārstrādes iekārtai, kas vienā no atkritumu apsaimniekošanas poligoniem darbojas kopš 2013. gada [18], līdz 2025. gadam vēl sešos atkritumu apsaimniekošanas poligonos ieviestas bioloģiskās atkritumu pārstrādes sistēmas. Tā rezultātā arvien vairāk atšķīroto bioloģiski noārdāmo atkritumu netiks apglabāti, bet gan bioloģiski pārstrādāti, tā palielinot šajā apakšsektorā radīto emisiju apjomu. 2022. un 2023. gadā, kad lielākā no jaunieviestajām pārstrādes sistēmām strādāja ar 50–60 % noslodzi, anaerobās pārstrādes apakšsektora emisijas palielinājās par attiecīgi 10,67 % un 13,6 %. Lai gan emisiju pieaugums procentuāli ir nozīmīgs, absolūtajos skaitļos tas nav tik liels. Ir svarīgi laikus sekot līdzi šīm izmaiņām atkritumu bioloģiskās pārstrādes apakšsektorā. Nākotnē var nākties izmantot augstāka detalizācijas līmeņa aprēķinu metodi, piemēram, veicot gadījuma izpēti, lai noteiktu precīzākus konkrēto iekārtu emisiju faktorus. Tomēr ir būtiski, ka emisiju pieaugums apakšsektorā nav atkritumu kopējā apjoma palielinājuma dēļ, bet gan izmantotās pārstrādes metodes maiņas dēļ. Papildu ieguvumi no bioloģiskās pārstrādes attīstīšanas atkritumu poligonos ir poligona darbības laika paildzināšana, jo par 10–60 % tiek samazināts noglabājamo atkritumu apjoms [19]. Tāpat pārstrādes rezultātā varētu iegūt kvalitatīvu kompostu, ko iespējams izmantot, lai atgrieztu augsnē vērtīgas uzturvielas [19]. Līdz šim Latvijā bioloģisko atkritumu šķīrošana atkritumu rašanās avotā nodrošinājusi zema apjoma un kvalitātes materiālu, tādēļ tikai daļa saražotā komposta atbilst augstākajai kvalitātes klasei.

Šī sektora emisiju audits balstīts mājāsaimniecību un rūpniecības sektora radīto kompostējamo atkritumu apjoma aplēsēs (sk. 6.7. att.). Arī atkritumu bioloģiskās pārstrādes emisiju aprēķinus iespējams veikt trīs dažādos detalizācijas līmeņos. Visplašāk izmantots 1. detalizācijas līmenis (arī Latvijā). 6.6. un 6.7. vienādojums raksturo aprēķina gaitu attiecīgi CH_4 un N_2O emisiju aprēķinam. 1. detalizācijas



6.7. attēls.
Kompostēšanas emisiju novērtējums.

līmeņa aprēķiniem šajos vienādojumos izmantojami KPSP standarta emisiju faktori metāna un slāpekļa oksīda emisijām, 2. detalizācijas līmeņa aprēķinos – nacionāla mēroga mērījumu dati, bet 3. detalizācijas līmeņa aprēķinos – nepārtrauktu vai periodisku mērījumu dati konkrētās iekārtās.

$$CH_4_{emisijas}[Gg_{CH_4}] = \sum_i (M_i \times EF_i) \times 10^{-3} - R, \quad (6.6.)$$

kur

$CH_4_{emisijas}$ – kopējās CH_4 emisijas uzskaites gadā, Gg CH_4 ;

M_i – izmantojot i pārstrādes metodi, pārstrādāto bioloģisko atkritumu apjoms, Gg atkritumu;

EF – i pārstrādes metodes emisiju faktors, g CH_4 / kg atkritumu;

R – atgūtā CH_4 apjoms gadā, Gg CH_4 .

$$N_2O_{emisijas}[Gg_{N_2O}] = \sum_i (M_i \times EF_i) \times 10^{-3}, \quad (6.7.)$$

kur

$N_2O_{emisijas}$ – kopējās CH_4 emisijas uzskaites gadā, Gg N_2O ;

M_i – izmantojot i pārstrādes metodi, pārstrādāto bioloģisko atkritumu apjoms, Gg atkritumu;

EF – i pārstrādes metodes emisiju faktors, g N_2O / kg atkritumu.

Izmantojot jaunākos pieejamos datus par 2023. gadu [2], kad uz kompostēšanu novirzītas 169,48 kt māsaimniecību atkritumu un 122,24 kt uzņēmumu atkritumu, un KPSP standarta CH_4 un N_2O emisiju faktoros (Latvijas gadījumā gan māsaimniecību, gan rūpnieciskajai kompostēšanai pieņemti vienādi emisiju faktori), iespējams sniegt vienkāršu emisiju aprēķina piemēru (sk. 6.8. un 6.9. vienādojumu). Vislielāko ietekmi uz radīto emisiju apjomu var sasniegt, samazinot kompostēto atkritumu apjomu, tā vietā tos novirzot uz anaerobās pārstrādes iekārtām ar metāna atgūšanu, tā samazinot nevēlamās CH_4 emisijas gaisā. Savukārt metodikas ziņā precīzākus aprēķinus var panākt, izmantojot augstāka detalizācijas līmeņa pieeju. Ņemot vērā, ka kompostēšanas emisiju aprēķinam tiek izmantota visvienkāršākā jeb 1. detalizācijas līmeņa pieeja, ir iespējams salīdzināt tikai ar augstāka detalizācijas līmeņa gadījumu. Literatūrā pieejami dati liecina, ka pēdējos 20 gados veikti vairāki pētījumi par kompostēšanas radīto emisiju apjomu. Atsevišķos pētījumos izmantotais metāna emisijas faktors sadzīves organiskajiem atkritumiem ir no 0,03 g CH_4 /kg $_{atkritumu}$ līdz 3,6 g CH_4 /kg $_{atkritumu}$, taču tas var sasniegt pat 11,9 g CH_4 /kg $_{atkritumu}$, ja sadzīves atkritumi ir sajaukti ar zariem un krūmu atgriezumiem [20]. Arī slāpekļa (I) oksīda emisijas faktora vērtību diapazons šajā pētījumā norādīts plašāks, nekā rekomendēts KPSP metodikās, tas ir, no 0,0165 g N_2O /kg $_{atkritumu}$ līdz 0,252 g N_2O /kg $_{atkritumu}$. Tādējādi pastāv iespēja, ka, precizējot izmantotos emisiju faktoros atbilstoši faktiskajai situācijai (piemēram, balstoties eksperimentālā pārbaudē), būtu iespējams precizēt ziņojamo emisiju apjomus.

$$CH_4 \text{ emisijas} [Gg_{CH_4}] = \left(169,48 \times Gg \times 4 \frac{g_{CH_4}}{kg} + 122,24 \times Gg \times 4 \frac{g_{CH_4}}{kg} \right) \times 10^{-3} =$$

$$= 1,1668 Gg \quad (6.8.)$$

$$N_2O \text{ emisijas} [Gg_{N_2O}] = \left(169,48 \times Gg \times 0,24 \frac{g_{CH_4}}{kg} + 122,24 \times Gg \times 0,24 \frac{g_{CH_4}}{kg} \right) \times 10^{-3} =$$

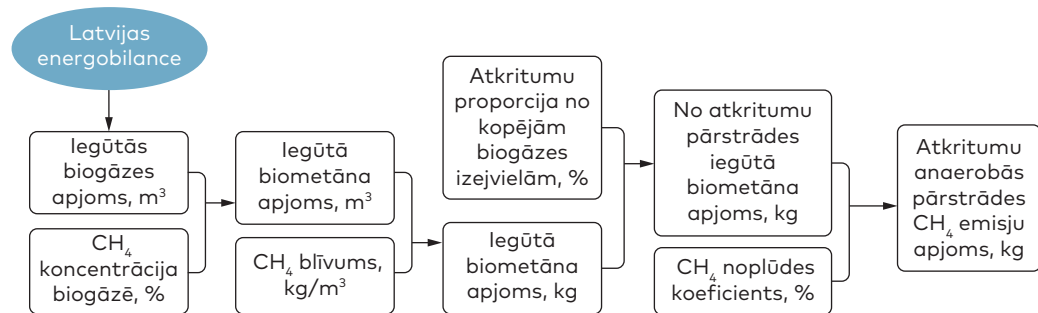
$$= 0,070 Gg \quad (6.9.)$$

Dažādu bioloģisko atkritumu anaeroba pārstrāde Latvijā notiek, tos pievienojot kā papildu izejvielu esošajās lauksaimniecības biogāzes iekārtās, kur tiek pārstrādāti lauksaimniecības atlikumi. Ņemot vērā, ka šīs iekārtas nodrošina visa metāna atgūšanu un izmantošanu enerģijas ieguvei, metāna sadedzināšanas emisijas Latvijas gadījumā attiecinā uz enerģētikas un lauksaimniecības sektoriem (turklāt ņemot vērā, ka tās ir biogēnas izcelsmes). Atkritumu bioloģiskās pārstrādes sektorā ņem vērā biogāzes potenciālās noplūdes normālas darbības apstākļos. Tās iespējams aprēķināt, noplūdes raksturošanai izmantojot konstantu koeficientu (atbilstoši KPSP metodikai pieņemta 5 % CH₄ noplūde [17]) un veicot saražotā metāna pārrēķinu, jo atkritumu sektorā attiecinā tikai emisijas, kas rodas, pārstrādājot atkritumus (nevis lauksaimniecības izcelsmes izejvielas)). Kopējais saražotās biogāzes daudzums iegūstams no Latvijas energobilances, un citi aprēķiniem nepieciešamie izejas dati ir laika gaitā mainīgi biogāzes parametri (vidējā CH₄ koncentrācija, sausnas saturs, CH₄ blīvums). Aprēķinu gaita parādīta 6.8. attēlā.

Saražotās biogāzes apjomu reizina ar CH₄ koncentrāciju biogāzē (kas, piemēram, 2023. gadā bija 54 %), tad iegūto metāna apjomu reizina ar metāna blīvumu, lai pārvērstu no tilpuma uz masas vienībām. Tad iegūto biogāzes apjomu reizina ar koeficientu (0,25), kas raksturo bioloģisko atkritumu proporciju no kopējās pārstrādātās organisko atlikumu masas. Šādi tiek iegūtas kopējās atkritumu

6.8. attēls.

Atkritumu anaerobās pārstrādes radīto metāna emisiju aprēķina gaita.



radītās CH_4 emisijas. Tās reizinot ar koeficientu 0,05 (kas raksturo potenciālās noplūdes), iegūst ikgadējo noplūdes jeb anaerobās atkritumu pārstrādes CH_4 emisiju apjomu [2].

6.1.3. Atkritumu sadedzināšana

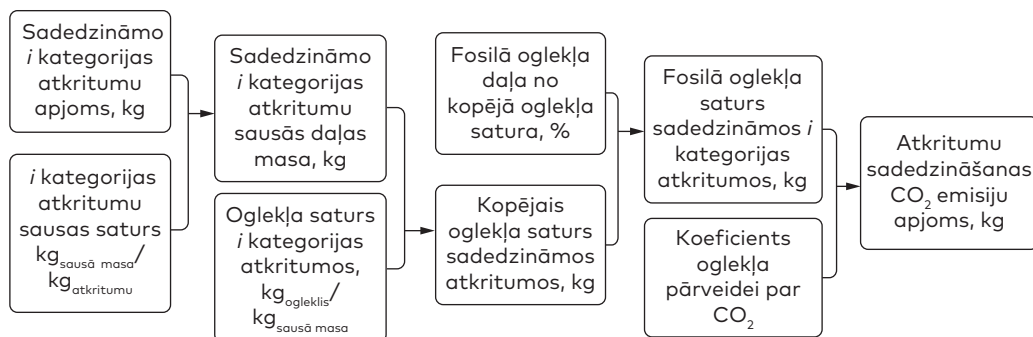
KPSP izveidotā metodika šajā apakšsektorā ietver emisijas, kas rodas, sadedzinot sadzīves, rūpniecības, bīstamos un medicīnas atkritumus vai notekūdeņu attīrīšanas dūņas gan atklāti, gan specializētās atkritumu dedzināšanas iekārtās [21]. Ja atkritumi tiek sadedzināti bez enerģijas atgūšanas, tad radītās emisijas tiek ziņotas atkritumu apsaimniekošanas sektorā, bet emisijas no iekārtām, kurās atkritumi tiek dedzināti ar enerģijas atgūšanu, tiek ziņotas enerģētikas sektorā, turklāt ņemot vērā, vai sadedzinātie atkritumi ir biogēnas vai fosilas izcelsmes. Atkritumu sadedzināšanas emisiju aprēķina piemērs visvienkāršākajā (1. detalizācijas līmeņa) pieejā parādīts 6.9. attēlā.

Latvijā nav tādu iekārtu, kurās atkritumi tiktu sadedzināti bez enerģijas atguves [2], un ir aizliegta arī atkritumu atklāta dedzināšana [8]. Taču atkritumu apsaimniekošanas apakšsektorā tiek ziņots par citām emisijām, kas rodas, sadedzinot bīstamos un medicīnas atkritumus. Atkritumu sadedzināšana atkarībā no atkritumu veida var radīt arī NMGOS , CO , NO_x , SO_x emisijas, kas atmosfērā var izraisīt sekundārā piesārņojuma veidošanos [21].

Dati par sadedzināto bīstamo un medicīnas atkritumu apjomu pieejami "3-Atkritumi" datubāzē [22], kur tie apkopoti arī dalījumā pēc apsaimniekošanas veida (reģenerācija vai apglabāšana). Kremēšanas rezultātā rodas un tiek ziņotas biogēnas izcelsmes NMGOS , CO , NO_x , SO_x emisijas. Emisijas no kremēšanas aprēķina, izmantojot EMEP metodoloģiju un emisiju faktoru standarta vērtības. Savukārt klīnisko un bīstamo atkritumu sadedzināšanā tiek radītas arī nebiogēnas izcelsmes CO_2 emisijas, kā arī N_2O , NMGOS , CO , NO_x , SO_x emisijas. Lai gan atkritumu sadedzināšanas emisijas Latvijā neveido lielu

6.9. attēls.

Atkritumu sadedzināšanas radīto emisiju aprēķina gaita.



daļu no kopējām SEG emisijām, būtiski, ka ir ieviesta un tiek uzturēta šo emisiju uzskaites sistēma, lai pēc iespējas mazinātu kopējo ietekmi uz vidi.

6.1.4. Notekūdeņu attīrīšana un novadīšana

Šajā apakšsektorā emisijas rodas, apsaimniekojot sadzīves, rūpniecības un citus notekūdeņus. Notekūdeņu attīrīšanas kvalitāte atšķiras atkarībā no attīrīšanas tehnoloģijas un notekūdeņu slodzes. Notekūdeņu anaerobas apstrādes apstākļos rodas metāna (CH_4) un slāpekļa oksīda (N_2O) emisijas, kā arī NMGOS. Līdzīgi kā bioloģisko atkritumu sadalīšanās gadījumā, arī tiešas CO_2 emisijas no notekūdeņu attīrīšanas tiek uzskatītas par biogēnas izcelsmes emisijām un par tām netiek atsevišķi ziņots [23]. Pat ņemot vērā, ka daļa radītā metāna tiek savākta un sadedzināta ar enerģijas atgūšanu (tā izvairoties no metāna emisiju novadīšanas atmosfērā), Latvijā joprojām notekūdeņu attīrīšanas apakšsektors rada ap 120 kt CO_2 ekv. nevajag apakrakstā emisiju, kur lielāko daļu veido sadzīves notekūdeņu un notekūdeņu attīrīšanas dūņu apsaimniekošana [2].

Atšķirībā no atkritumu apsaimniekošanas notekūdeņu emisiju aprēķinā Latvijā izmanto gan 1., gan 2. detalizācijas līmeņa metodi. Lai noteiktu metāna un slāpekļa oksīda emisijas no mājāsaimniecību notekūdeņiem, galvenais aktivitātes rādītājs ir katra attīrīšanas sistēmu veida lietotāju skaits un tam proporcionālā organisko vielu piesārņojuma slodze (angļu val. *organic load*). Lielākā daļa Latvijas iedzīvotāju izmanto centralizētās notekūdeņu savākšanas un attīrīšanas sistēmas. Šādās sistēmās iespējams nodrošināt pat 100 % emisiju samazinājumu, ja notiek biogāzes atgūšana un sadedzināšana. Turklāt, izmantojot biogāzi koģenerācijas iekārtās, kā tas tiek darīts, piemēram, notekūdeņu attīrīšanas stacijā "Daugavgrīva", Rīgā, tiek arī saražota elektroenerģija un siltums. Tomēr 19 % no Latvijas iedzīvotājiem jeb tā daļa, kas neizmanto centralizētās notekūdeņu savākšanas un attīrīšanas sistēmas, rada 98 % notekūdeņu attīrīšanas un novadīšanas apakšsektora emisiju [2].

Notekūdeņu apsaimniekošanas emisiju aprēķiniem nepieciešamie dati par notekūdeņu attīrīšanas iekārtām, apkalpoto iedzīvotāju skaitu un attīrīšanas līmeni, kā arī par rūpniecības notekūdeņu apsaimniekošanu no uzņēmumu ikgadējām atskaitēm ir pieejami "2-Ūdens" datubāzē [22]. Ņemot vērā, ka ir pieejami uzskaites dati par pieslēgumu skaitu dažādām sistēmām, Latvijas gadījumā emisiju aprēķini pielāgoti tieši datu augstākas pieejamības dēļ (sk. 6.10. vienādojumu). Katras tehnoloģijas emisijas faktoru iegūst, reizinot tās radīto metāna emisiju apjomu un metāna korekcijas faktoru. Savukārt notekūdeņu organiskās slodzes vērtības tiek aprēķinātas, izmantojot kopējo iedzīvotāju skaitu, īpatnējo bioķīmiskā skābekļa

patēriņu uz iedzīvotāju, kas noteikts MK noteikumos Nr. 34 [24], un papildus ņemot vērā rūpniecības radīto organisko slodzi.

$$CH_4 \text{ emisijas} [kg_{CH_4}] = [\sum_i (U_i \times EF_i)] \times (TOW - S) - R, \quad (6.10.)$$

kur

$CH_4 \text{ emisijas}$ – kopējās CH_4 emisijas uzskaites gadā, $kg \text{ } CH_4$;

U_i – iedzīvotāju daļa, kas izmanto i kategorijas notekūdeņu attīrīšanas tehnoloģiju, %;

EF_i – attīrīšanas tehnoloģijas i emisiju faktors, $g \text{ } CH_4/kg$ atkritumu;

TOW – notekūdeņu kopējais organisko vielu saturs, $kg \text{ BOD}$;

S – ar dūņām aizvadīto organisko vielu daļa;

R – atgūtā CH_4 apjoms, $kg \text{ } CH_4$.

Daļu no sektora metāna emisijām rada notekūdeņu dūņu apstrāde. Notekūdeņu dūņas rodas dažādos attīrīšanas posmos, taču emisiju aprēķinā nozīmīgākā ir bioloģiskās attīrīšanas dūņu apsaimniekošana. Dūņas apstrādājamās, izmantojot aerobo vai anaerobo stabilizāciju, kondicionēšanu, centrifugēšanu, kompostēšanu un žāvēšanu [23]. Ar dūņām atdalītā noārdāmā oglekļa kopējais apjoms tiek proporcionāli sadalīts starp visiem centralizēti organizētajiem attīrīšanas veidiem [2].

Emisiju ietaupījuma scenārijs. Decentralizēto kanalizācijas sistēmu izmantošanas dēļ radītās metāna emisijas rēķina, balstoties pieņēmumos, tādēļ ir iespējams tās definēt kā konstantu vērtību – par katru jaunizveidotu modernu pieslēgumu centralizētajai kanalizācijas sistēmai, ja pakalpojumu lietotājs iepriekš izmantoja septiķi, rastos ietaupījums $6,57 \text{ kg } CH_4/gadā$, bet sauso tuaļu gadījumā – $9,20 \text{ kg } CH_4/gadā$. Samazinot decentralizēto kanalizācijas sistēmu lietotāju skaitu par 10 % no 2023. gada rādītāja jeb pieslēdzot centralizētajām kanalizācijas sistēmām 35 002 patērētājus, CH_4 emisiju samazinājums veidotu $0,24 \text{ kt } CH_4 / gadā$, kas ir 9,8 % no kopējām notekūdeņu apsaimniekošanas apakšsektora emisijām. Šis piemērs liecina, ka būtiska ietekme uz notekūdeņu apsaimniekošanas sektorā uzskaitītajām emisijām ir arī precīzas statistikas pieejamībai, par centralizētajai kanalizācijas sistēmai nepieslēgto patērētāju skaitu.

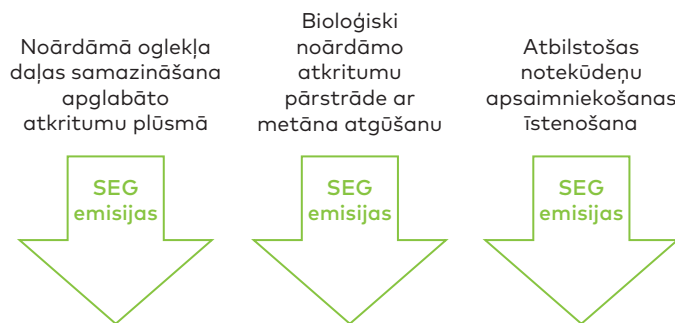
6.2. Tehnoloģiskie paņēmieni atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektora dekarbonizācijai

SEG emisiju audita rezultāti liecina, ka galvenie ietekmes punkti sektora emisiju samazināšanai ir noārdāmā oglekļa daļas samazināšana apglabāto atkritumu plūsmā, bioloģiski noārdāmo atkritumu pārstrāde ar metāna atgūšanu, kā arī atbilstošas notekūdeņu

apsaimniekošanas īstenošana visā Latvijā. Tam papildus vides un ilgtspējas labā jātiecas pēc plašāka mēroga uzvedības izmaiņām sabiedrībā tā, lai mazinātu resursu pārtēriņu un veicinātu ilgtspējīgu paradumus, piemēram, lietu labošanu un atkārtotu izmantošanu.

Atbilstošas notekūdeņu apsaimniekošanas īstenošana

Lai veicinātu atkritumu apsaimniekošanas sektora SEG emisiju un ietekmes uz vidi samazinājumu, iespējams plašāk ieviest gan jau izmantotos tehnoloģiskos risinājumus, gan inovatīvas pieejas. Atkritumu apsaimniekošanas politikas ieviešanai līdz šim Latvijā izmantoti tādi instrumenti kā atkritumu apsaimniekošanas maksa, atkritumu apglabāšanas tarifs, dabas resursu nodoklis, dzērienu iepakojuma depozīta sistēma, kā arī ir pieejami brīvprātīgi politikas instrumenti kā zaļais publiskais iepirkums, vides pārvaldības sistēmu ieviešana, ekomarķējuma izmantošana [18]. Savukārt zinātniskajos pētījumos papildus atkritumu apglabāšanas tarifa palielināšanai skatītas tādas atkritumu sektora emisiju samazināšanas stratēģijas kā investīcijas atkritumu šķirošanas infrastruktūrā un izglītojošu informācijas kampaņu īstenošana [6], kā arī tehnoloģiskie paņēmieni – bioatkritumu un notekūdeņu dūņu izmantošana jaunu produktu ražošanai, tā novēršot atkritumu rašanos, atkritumu plūsmu samazināšana.



6.10. attēls.

Stratēģijas atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektora emisiju samazināšanai.

6.2.1. Atkritumu neradīšana, veicinot inovatīvu bioproduktu ražošanu

Atkritumu bioloģiskā pārstrāde ir vērtīga metode atkritumu tilpuma un tajos ietvertā oglekļa satura samazināšanai, taču dalīti vāktu bioloģisko atkritumu plūsmas var pavērt arī daudz plašākas iespējas. Latvijas normatīvajos aktos paredzēts, ka ražošanas procesā radušies blakusprodukti jeb produkti, kas ir procesa neatņemama sastāvdaļa, bet nav procesa galvenais mērķis, netiek uzskatīti par atkritumiem, ja tos iespējams izmantot bez papildu apstrādes, tiem ir zināms un likumīgs turpmākais lietošanas veids [25]. Jau

šobrīd pienotavas un siera ražotnes tiecas efektīvi izmantot sūkulas, no tām ražojot piena sūkalu pulveri, piena sūkalu proteīna pulveri, laktozes pulveri, kā arī sūkalu dzērienus [26], taču būtu iespējams attīstīt arī citu augstas pievienotās vērtības produktu ražošanu un vienlaicīgi mazināt rūpniecības notekūdeņu apjomus.

Kvalitatīvu organisko atkritumu masu var izmantot kā izejvielu rauga vienšūnu proteīnu ražošanā. Izmantojot biotehnoloģijas, ir iespējams pārvērst cilvēku patēriņam nepiemērotus pārtikas rūpniecības un lauksaimniecības blakusproduktus no tādām nozarēm kā augļu, dārzeņu, piena produktu pārstrāde, par augstas pievienotās vērtības olbaltumvielām [27]. Ir aprēķināts, ka, pieņemot vienšūnu proteīnu un eļļu ražības standarta vērtības un pieejamos izejvielu apjomus, ja par izejvielu izmantotu siera suliņas, Latvijā būtu iespējams saražot 800 t proteīnu vai 2250 t eļļas [26]. Arī notekūdeņu dūņas iespējams izmantot par izejvielu vienšūnu eļļas ražošanai aerobos vai anaerobos apstākļos, lai no šīs eļļas ražotu biodegvielas [28]. Tādā veidā tiek samazināts kopējais radīto atkritumu apjoms, jo, radot šim materiālam lietojuma veidu, tas neķļūst par atkritumu. Svarīgākais šādā pieejā ir komunikācijas un sadarbības nodrošināšana starp iesaistītajām pusēm, jo bieži eksistē netehnoloģiski šķēršļi, piemēram, mitru biomasas atlikumu loģistikas problēmas.

Plašas iespējas paver starpproduktu ražošana no bioatkritumiem un atlikumiem. Pārtikas atkritumus var izmantot arī plaša patēriņa vielu (skābes, cukuru un to atvasinājumu), specializētu ķīmisko vielu (šķīdinātāju, antioksidantu u. c.) un energoresursu (biogāzes, biodegvielu) ražošanai [29].

Dzintarskābe, ko iegūst ogļhidrātu fermentācijas ceļā, izmantojama kā izejviela poliolu [30], virsmaktīvu vielu un mazgāšanas līdzekļu ražošanai [31], farmaceitisko vielu ražošanai [32], kā skābuma regulētājs un garšas pastiprinātājs pārtikas rūpniecībā [33]. Dzintarskābes ražošanai izmantojami ogļhidrāti, kas rodas kā blakusprodukti un atkritumi, piemēram, pārtikas ražošanā [33], kā arī citās ražošanas apakšnozarēs un lauksaimniecībā [32]. Kā izejvielu izmantojot maizes atkritumus, sasniegts pat 0,55 g/g_{maizes} kopējais ražīgums. Salīdzinājumam, izmantojot kviešus, sasniegts 0,4 g/g_{maizes} kopējais ražīgums, bet, izmantojot kviešu graudu atsisas, tikai 0,087 g/g_{maizes} [34], [35], [36].

6.2.2. Notekūdeņu dūņu izmantošanas veidi

Notekūdeņu dūņu apsaimniekošanas plānā 2024.–2027. gadam [37], atsaucoties uz Notekūdeņu apsaimniekošanas investīciju plānu 2024.–2027. gadam [38], minētas prognozes, ka 10 gadu laikā

centralizētajiem kanalizācijas tīkliem varētu pievienot līdz pat 146 290 jaunu patērētāju. Ņemot vērā gan izdzīvotāju skaita samazinājumu (ar to saistīts radīto notekūdeņu samazinājums), gan jaunu pieslēgumu veidošanas prognozes, attīrāmo notekūdeņu apjomi un līdz ar to arī saražoto dūņu apjomi mainīsies procentuāli maz.

Šobrīd gandrīz puse no centralizēti savāktajiem notekūdeņiem Latvijā tiek apsaimniekota bioloģiskās attīrīšanas stacijā “Daugavgrīva” un lielākā daļa (vairāk nekā 80 %) no stacijā radītajām notekūdeņu dūņām tiek pārstrādātas izmantojot vienu labākajām pieejām – metāna tvertnēs nodrošinot, biogāzes ražošanu [37]. Anāerobās bioloģiskās pārstrādes ceļā mikroorganismi noārda dūņās esošās organiskās vielas.

Notekūdeņu dūņu apsaimniekošanu ierobežo to kvalitatīvais sastāvs – augsts organisko vielu un ūdens saturs, kā arī bīstamo piesārņotāju klātbūtnes iespējamība [39]. 2021. gadā galvenie notekūdeņu dūņu pārstrādes veidi Latvijā bija:

- nodošana pārstrādei citās notekūdeņu attīrīšanas iekārtās;
- uzkrāšana dūņu mineralizatorā un pārstrāde uz vietas vai nodošana pārstrādei citās notekūdeņu attīrīšanas iekārtās;
- pārstrāde dūņu laukos;
- dūņu termofilā un mezofilā sadalīšana vai stabilizēšana;
- komposta gatavošana [40].

Notekūdeņu dūņu mitrums var būt pat 95–98 % [41], tādēļ to izmantošanai nepieciešama priekšapstrāde. Savukārt notekūdeņu dūņu sastāvs ir atkarīgs no tā, kādi notekūdeņi tiek attīrīti un no izmantotās attīrīšanas tehnoloģijas. Pasaulē tiek attīstīti pētījumi par inovatīvām notekūdeņu dūņu izmantošanas iespējām, kas novērš šī materiāla nokļūšanu atkritumu poligonos, tā samazinot atkritumu poligonu aizpildījumu, mazinot metāna emisijas, kā arī veicinot apriņķa resursu izmantošanu. Žāvētas notekūdeņu dūņas līdz pat 60 % proporcijā no kopējām izejvielām ir izmantotas kā izejviela keramisko flīžu ražošanā [42], līdz 15 % – kā izejviela māla ķieģeļu ražošanā [43].

Pētījumā [44] skatīta iespēja izmantot dūņas no notekūdeņu attīrīšanas iekārtām Latvijā, lai ražotu bezapdedzināšanas ķieģeļus. Šī tehnoloģija ietver tādu būvmateriālu izveidi, kuru galvenās sastāvdaļas ir smiltis, koagulants, notekūdeņu dūņas, industriālo blakusproduktu maisījums, cements, bet atšķirībā no tradicionālās pieejas netiek izmantota apdedzināšana augstā temperatūrā. Pētījumā vērtētas ražošanas procesa izmaksas, enerģijas patēriņš un CO₂ emisijas, secinot, ka lielāko enerģijas patēriņa daļu bezapdedzināšanas tehnoloģijas gadījumā veido vecināšanas process, ko īsteno, izturot sagataves klimata kamerā 28 dienas 45 °C [44]. Alternatīvo izejvielu izmantošana ne tikai ļauj rast risinājumu notekūdeņu dūņu pārstrādei veidā, kas samazina atkritumu apsaimniekošanas sektora SEG emisijas, bet arī veicina emisiju samazinājumu minerālu

rūpniecības sektorā, jo ļauj aizstāt mālu, kura kalcinēšana rada CO₂ emisijas. Svarīga tehnoloģijas priekšrocība ir tas, ka šāda notekūdeņu dūņu izmantošana nerada vides risku smago metālu izskalošanās ziņā [45].

Bezappedzināšanas metodes priekšrocība ir arī zemāka procesa energointensitāte, salīdzinot ar tradicionālo ķieģeļu ražošanu, bet kā trūkums var būt radīto ķieģeļu zemāki veiktspējas parametri [44]. Arī notekūdeņu dūņu proporcija pret citām izejvielām bezappedzināšanas ķieģeļu gadījumā (maksimāli līdz 20 %, bet pietiekamas tehniskās īpašības iegūst pie 10 %) ir zemāka nekā, ražojot apdedzinātos ķieģeļus [45]. Neskatoties uz to, alternatīvu būvmateriālu ražošana no notekūdeņu dūņām veicinātu piedāvājuma dažādību tirgū un izmaksu efektīvu produktu pieejamību tādiem lietojuma veidiem, kur pietiek ar šo ķieģeļu tehniskajām īpašībām.

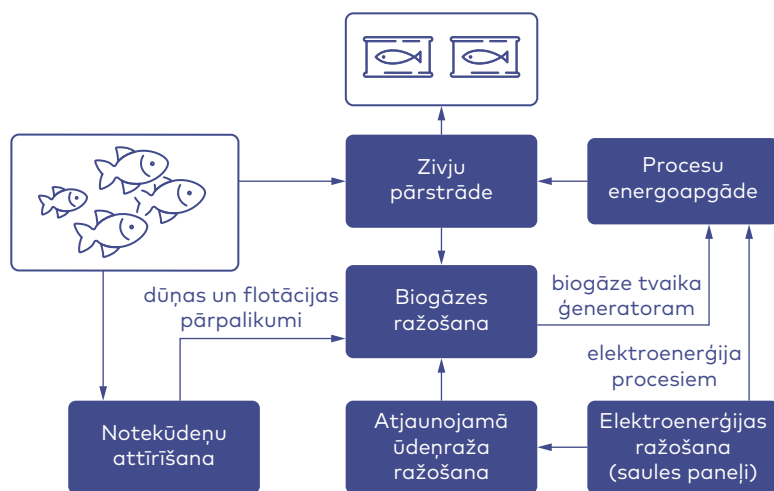
6.2.3. Noārdāmā oglekļa daļas samazināšana apglabāto atkritumu plūsmā

Daudz tehnoloģisko risinājumu atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektora emisiju mazināšanai Latvijā jau ieviesti iepriekšējās desmitgadēs, piemēram, metāna atgūšanas iekārtu uzstādīšana sadzīves atkritumu poligonos un notekūdeņu attīrīšanas iekārtās, kā arī atkritumu apsaimniekošanas poligonos uzstādītās atkritumu bioloģiskās pārstrādes sistēmas. Šobrīd aktuālā atkritumu apsaimniekošanas valsts plāna 2021.–2028. gadam ieviešanas ietvarā Latvijas atkritumu poligonos līdz 2025. gadam uzstādītas jaunas bioloģisko atkritumu pārstrādes iekārtas ar jaudu līdz 231 500 t/gadā, kas summāri ar iepriekš uzstādītajām iekārtām veido kopējo bioloģiskās pārstrādes jaudu 251 500 t/gadā [18]. Atkritumu poligonos uzstādītās iekārtas atbilst labākās prakses piemēriem, taču emisiju samazinājuma nodrošināšanai būtiska ir arī saņemto atkritumu kvalitāte. 2021. gadā veiktā reprezentatīvā aptaujā norādīts [46], ka bioloģiski noārdāmos atkritumus Latvijā šķiro tikai ļoti aktīvi šķirotāji un to īpatsvars ir neliels. Pētījuma ietvaros identificēti visu veidu atkritumu šķirošanas šķēršļi, kurus var grupēt trīs kategorijās: (1) neinteresē šķirošana, nevēlas tam veltīt laiku; (2) objektīvi ierobežojumi šķirošanai (nav sasniedzami konteineri, nesaprot sistēmu, nav vietas šķirošanai); (3) šķirošanai nav ieguvumu – ekonomiski vai jēgpilni. Kvalitatīvi šķirotu bioloģisko atkritumu trūkuma dēļ līdz šim poligoni bioloģiskās pārstrādes iekārtu jeb biotuneļu aizpildījumu nodrošina, pāršķirot poligonā ienākošās nešķirotu atkritumu plūsmu un atdalot bioloģiski noārdāmo frakciju. Lai gan šis risinājums ļauj pilnvērtīgāk izmantot uzstādītās iekārtas, tā trūkums ir zemāka komposta kvalitāte un līdz ar to ierobežotas izmantošanas iespējas. Lai labāk

apsaimniekotu iepakotas pārtikas atkritumus (piemēram, derīguma termiņā nerealizēto produkciju) tiek uzstādītas tehnoloģijas pārtikas un iepakojuma atdalīšanai [47].

Atkritumu apsaimniekošanas sektora emisiju mazināšanai svarīga ir arī pāreja uz jauniem biznesa modeļiem jeb praksēm. Viena no tādām pieejām ir noslēgta materiālu cikla jeb bezatlikumu ražošanas pieeja, lai uzlabotu pieejamo resursu izmantošanas efektivitāti un samazinātu ražotnes ietekmi uz vidi [48]. Zivju pārstrādes nozare ir būtiska gan cilvēku pārtikas nodrošināšanai, gan zivju barības ražošanai [49]. Zivju pārstrādes blakusproduktu (galvu, ādu, astu) izmantošana citādi, nevis noglabājot atkritumu poligonos, uzskatāma par minimālo priekšnosacījumu virzībā uz resursu efektivitāti. Piemēram, no zivju atlikumiem var ražot zivju miltus, proteīnu, kolagēnu, eļļu un biodīzeļdegvielu [50].

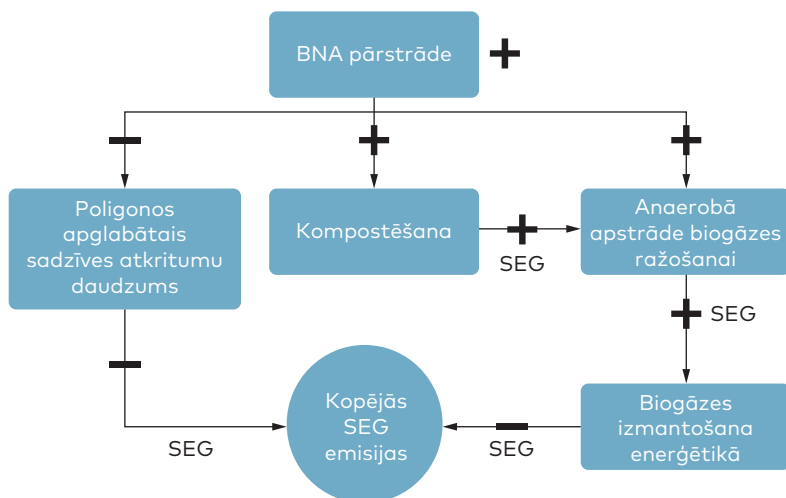
Zivju un alģu ražošanas industrijas gadījumā inovatīva biznesa modeļa shēmā ietilpst zivju resursu ieguve zivju dīķos (sk. 6.11. att.) un to nogādāšana pārstrādei. Papildus ierastajai procesu organizācijai bezatlikumu ražošanā tiek nodrošināta arī materiālu un enerģijas pārpalikumu pilnvērtīga izmantošana, tostarp zivju pārstrādes atlikumu un notekūdeņu attīrīšanas dūņu izmantošana biogāzes ražošanai, pārpalikuma siltuma izmantošana gan zivju resursu audzēšanai, gan biogāzes ražošanai. Papildus šādai sistēmai var pievienot arī saules elektroenerģijas un atjaunojamā ūdeņraža ražošanas sistēmu, kur saražoto elektroenerģiju var izmantot ražošanas procesos un saražoto ūdeņradi – biogāzes bagātināšanai [48].



6.11. attēls. Bezatlikumu ražošanas pieeja zivju pārstrādes uzņēmumā (adaptēts no [48]).

6.12. attēlā parādīts, kā bioloģiski noārdāmu atkritumu pārstrāde ietekmē SEG emisiju samazinājumu. Atdalot bioloģiskos atkritumus no nešķīroto atkritumu plūsmas, samazināsies apglabāto sadzīves atkritumu kopējais apjoms un mainīsies to morfoloģiskais sastāvs (par novirzīto bioloģisko atkritumu daļu). Samazinoties bioloģiski noārdāmo atkritumu daļai nešķīrotos sadzīves atkritumos, samazināsies ar šiem atkritumiem krātuvē ievadītais anaerobi noārdāmā oglekļa apjoms, tādējādi samazināsies CH_4 emisijas no sadzīves atkritumu apglabāšanas. Savukārt uz bioloģiskās pārstrādes iekārtām novirzītā atkritumu plūsma pieaug. Šis atkritumu plūsmas pieaugums paaugstinās bioloģiskajā pārstrādē radītā metāna apjomu, taču šādas pārstrādes rezultātā noārdāmais organiskais ogleklis tiek efektīvi noārdīts (to īpaši veicina anaerobo apstākļu intensificēšana) un radītais metāns tiek atgūts un izmantots. Izmantojot saražoto gāzi enerģētikā (koģenerācijā) vai nākotnē arvien vairāk attīstot metāna attīrīšanu un izmantošanu, piemēram, par transporta degvielu, tiek veicināts emisiju samazinājums arī šajos sektoros, samazinot atmosfērā emitēto SEG apjomu. Lai gan pēc anaerobās apstrādes un metāna maksimālas atgūšanas atkritumu masa tiek pakļauta kompostēšanai, tās rezultātā radītās CO_2 emisijas neņem vērā kā antropogēnu avotu SEG, jo tās rodas biomasas noārdīšanās rezultātā, un tās pieņem kā daļu no dabiskā aprites cikla.

Lai pilnvērtīgi nodrošinātu resursu efektivitāti un pārstrādes procesa rentabilitāti, ir jāveicina kvalitatīvu bioloģisko atkritumu šķirošana atkritumu rašanās vietā. Atkritumu šķirošana veicina emisiju mazināšanu, jo tiek samazināts kopējais poligonos apglabāto atkritumu apjoms (tādēļ samazinās emisiju apjoms atkritumu apglabāšanas sektorā) un dalīti savāktos bioatkritumus var efektīvāk pārstrādāt. Jau 2015. gadā [51], izvērtējot dažādas bioloģiski noārdāmo



6.12. attēls.
Bioloģiski noārdāmu atkritumu pārstrādes radītās emisijas.

atkritumu pārstrādes iespējas, iezīmēts, ka Latvijas gadījumā vislabākais risinājums bioloģiski noārdāmo atkritumu izmantošanai ir attīstīt dalītu šādu atkritumu savākšanu un anaerobo pārstrādi. Tajā laikā Latvijā vēl nebija sistēmiski attīstīta šāda pieeja, taču līdz ar ES regulējuma attīstību un dalībvalstīm uzstādītajiem mērķiem ieviest bioloģiski noārdāmo atkritumu dalītu vākšanu, 2023. gadā šāda sistēma Latvijā oficiāli ieviesta.

6.2.4. Tekstila atkritumu apjoma samazināšana un tekstila izmantošana

Lai mazinātu SEG emisijas, kas rodas nešķiroto sadzīves atkritumu plūsmas apsaimniekošanas rezultātā, ir jāveicina dažādu atkritumu frakciju dalītu vākšanu. Tekstila izstrādājumu šķirošanai, kas Latvijas Nacionālajā klimata un enerģētikas plānā [52] ietverta kā rīcībpolitikas pasākums atkritumu apsaimniekošanas jomā, ir vairāki pozitīvi efekti. Pirmkārt, piedāvājot iedzīvotājiem šķirošanas iespējas, tiek veicināta atkritumu šķirošanas kultūras nostiprināšanās sabiedrībā. Tas liek aizdomāties arī par lietu aprites ciklu un pārtēriņa samazināšanu. Pilnveidojot tekstila savākšanas un šķirošanas sistēmu, tiek samazināts arī sadzīves atkritumu poligonos apglabātais tekstila daudzums un varētu samazināties SEG emisijas, jo faktiskais šķirošanas radītais SEG emisiju ietaupījums ir atkarīgs no savākto tekstila atkritumu tālāka lietojuma.

Lai analizētu iespējamus pasākumus tekstila atkritumu šķirošanas un aprites ekonomikas veicināšanai, izveidots simulācijas modelis, kur, izmantojot sistēmdinamikas analīzes metodes, skatīti divi scenāriji: apgērba šķirošana un patēriņa samazināšana [53]. Modelī skatīta situācija un attīstības scenāriji ES mērogā, kā arī analizētas tieši apgērbu tekstila plūsmas, jo tām ir visaugstākais aprites ekonomikas potenciāls [53]. Secinājumi liecina, ka, veicinot iedzīvotāju paradumu maiņu un apgērbu patēriņa samazinājumu, tiek sasniegts lielāks efekts, nekā tikai palielinot šķirošanas jaudas. Tāpat abas stratēģijas jāizmanto papildinoši, lai efektīvi virzītos uz aprites ekonomiku.

Kā skaidrots 6.1.1. nodaļā, šobrīd Latvijas ziņoto SEG emisiju apjomi ir atkarīgi arī no izmantotajiem pieņēmumiem. KPSP definētā tekstilmateriālu noārdāmā oglekļa satura vērtību diapazons ir 20–40 %, taču rekomendētā un Latvijas gadījumā aprēķinots izmantotā vērtība ir 24 %. Līdz ar to, samazinot tekstila atkritumu frakcijas apjomu, samazināsies arī kopējās atkritumu plūsmas noārdāmā oglekļa saturs, un tādā veidā iespējams samazināt atkritumu apsaimniekošanas sektora metāna emisijas.

Par piemēru izmantojot 2023. gada datus, ja nešķiroto atkritumu sastāvā pilnībā nebūtu tekstilatkritumu, tad visu nešķiroto sadzīves

atkritumu īpatnējais *DOC* samazinātos no 0,09 uz 0,077 un kopējais ar nešķīrotajiem atkritumiem krātuvē ievadītais noārdāmā organiskā oglekļa daudzums samazinātos no 15,55 kt C līdz 14,32 kt C. Kopējais radīto emisiju apjoms gan samazinās mazāk, jo daļa no radītajām emisijām tiek atgūta metāna veidā. Papildus ieguvumi no dalītas tekstila šķirošanas ir arī tā atkārtota lietošana vai cita veida izmantošana, kas attiecīgi samazina pieprasījumu un emisiju veidošanos rūpniecībā.

6.2.5. Biogāzes uzlabošana biometāna ieguvei

Poligonu gāze, kas tiek saražota no nešķīrotu atkritumu plūsmas atkritumu poligonos, un biogāze, kas tiek saražota, pārstrādājot bioloģisko atkritumu plūsmas lauksaimniecības biogāzes ražotnēs, līdz šim Latvijā izmantota, galvenokārt sadedzinot to stacionārās koģenerācijas iekārtās [54], ko veicinājis pieejamais atbalsts elektroenerģijas ievades tarifa veidā [55]. Ņemot vērā, ka poligonu gāzes un biogāzes sastāvā aptuveni 50 % ir metāns [56], poligonu gāzes attīrīšana līdz biometāna kvalitātei un izmantošana, piemēram, par degvielu transporta sektorā, ļautu vienlaicīgi risināt klimata pārmaiņu cēloņus divos sektoros: atkritumu apsaimniekošanas un transporta. Biogāzes izmantošana par atjaunojamu autodegvielu ir īpaši veiksmīgs tehnoloģiskais risinājums sektoros, kurus ir sarežģīti elektrificēt, kā smagā transporta, traktortehnikas un citas tehnikas lietošana [54]. Pāreja no biogāzes izmantošanas koģenerācijā uz attīrīšanu līdz biometāna kvalitātei veicinātu arī lauksaimniecības sektora dzīvotspēju un ilgtspēju [54]. Turklāt lauksaimniecībā biogāzes ražotnēs radīto un uzlaboto metānu izmantojot lauksaimniecības tehnikā, tiktu mazināta lauksaimniecības nozares kopējā ietekme uz vidi.

Pētījumā [57] par potenciālu atkritumu apsaimniekošanas un transporta sistēmu integrēšanu, īstenojot poligonu gāzes uzlabošanu un izmantošanu Valmieras pilsētas transporta infrastruktūrā, izvērtēti četri alternatīvi scenāriji:

- 1) jaunas sausās fermentēšanas tehnoloģijas uzstādīšana un poligonu gāzes izmantošana koģenerācijas stacijā;
- 2) jaunas sausās fermentēšanas tehnoloģijas uzstādīšana, poligona gāzes izmantošana koģenerācijas stacijā līdz 2020. gadam, pēc tam aizstājot to ar poligonu gāzes uzlabošanu;
- 3) jaunas slapjās fermentēšanas tehnoloģijas uzstādīšana un poligonu gāzes izmantošana koģenerācijas stacijā;
- 4) jaunas slapjās fermentēšanas tehnoloģijas uzstādīšana, poligona gāzes izmantošana koģenerācijas stacijā līdz 2020. gadam, pēc tam aizstājot to ar poligonu gāzes uzlabošanu [57].

Abos scenārijos, kuros ietverta poligona gāzes uzlabošanas tehnoloģija, pieņemts, ka izmantota spiediena svārstību adsorbēcija. Šī

metode balstīta CO₂ selektīvā adsorbcijā un papildus ļauj atdalīt H₂S, N₂ un O₂, tai ir zemākas uzstādīšanas un izmantošanas izmaksas nekā alternatīvām [58], kā arī tā ļauj sasniegt pat 98 % metāna koncentrāciju [59].

⁵ 2025. gada cenās ap 0,96 EUR/Nm³.

Scenāriju analīzes secinājumi [57] liecina, ka divi no scenārijiem (1. un 2. scenārijs) ļautu sasniegt 7 % iekšējās peļņas normu bez papildu subsīdijām, 4. scenārijs to ļautu sasniegt ar nosacījumu, ja biometāna pārdošanas cena pārsniedz minimālo sliekšni 0,74 EUR⁵/nm³, bet 3. scenārija gadījumā būtu nepieciešamas papildu subsīdijas vismaz 71 % apmērā no kopējām investīcijām vai arī atkritumu apsaimniekošanas tarifa paaugstināšana. Salīdzinot abas anaerobās pārstrādes metodes gadījuma izpēti pieņemtajos apstākļos, slapjās fermentācijas metode nodrošina labāku biogāzes iznākumu, bet sausā fermentēšana sasniedz labākus projekta kopējos rezultātus, kas skaidrojams ar augstākām slapjās fermentēšanas tehnoloģijas investīciju izmaksām. Savukārt sasniegtā emisiju ietaupījuma ziņā biometāna izmantošana, transportā aizstājot dīzeļdegvielu, radītu 1,12 reizes lielāku ietaupījumu salīdzinājumā ar ievadi dabasgāzes tīklā. Izskatītās alternatīvas transporta degvielas aizstāšanai ietver izmantošanu atkritumu savākšanas transportā vai Valmieras pilsētas sabiedriskajam transportam. Zemāku nepieciešamo investīciju un gandrīz līdzvērtīga emisiju samazinājuma dēļ visizdevīgākais no izskatītajiem scenārijiem ir 10 sabiedriskā transporta autobusu aizstāšana ar transportu, kas darbināms ar sausajā fermentācijā saražotu biometānu. Vislielākā ietekme uz projekta ekonomisko izdevīgumu ir potenciālajai biometāna pārdošanas cenai. Savukārt slapjās fermentēšanas metodes izvēle nodrošinātu lielāku biometāna ražošanas apjomu un potenciālo emisiju samazinājumu, kas ilgtermiņā, kad ieviesta dalīta bioatkritumu savākšanas sistēma, varētu kļūt izdevīgāka.

Papildus tam, ka bioloģisko atkritumu pārstrādes iekārtas uzstādītas septiņos atkritumu apsaimniekošanas poligonos, arī uzņēmumi veicina atkritumus samazināšanu un meklē atkritumu valorizācijas iespējas. Piemēram, 2025. gadā AS “Balticovo” Iecavā atklāja biometāna ražotni [60], kurā par izejvielu tiek izmantota biogāze, kas saražota no putnkopības kūsmēsliem. Saražotais biometāns tiek ievadīts dabasgāzes tīklā. Citās Latvijas biogāzes ražotnēs par izejvielām kalpo gan izmantotās cepšanas eļļas un tauki, gan zivju pārstrādes atlikumi, pārtikas atkritumi, piena produkti un pat konservēta lolojumdzīvnieku barība [61].

Lai plašāk izvērtētu biometāna attīstības potenciālu visas Latvijas mērogā, izmantots sistēmdinamikas modelis, kurā ietverta biometāna ražošana, izmantojot dalīti savāktus organiskos atkritumus, notekūdeņu attīrīšanas dūņas un lauksaimniecības atlikumus, kā arī

analizētas iespējas biometāna izmantošanai transportā [55]. Rezultāti liecina, ka biometāna ražošana vēl nav konkurētspējīga bez papildu atbalsta pamatā dabasgāzes cenas konkurences dēļ. Tomēr, beidzoties atbalstam elektroenerģijas ievades tarifa veidā, paredzams, ka biometāna ražošana kļūs izdevīgāka. 2025. gadā Latvijā jau uzsākti pasākumi biometāna ražošanas veicināšanai, piemēram, izveidota atbalsta programma biometāna ražošanai un pārvadāšanai [62].

6.2.6. Patērētāju paradumu ietekme uz atkritumu apsaimniekošanu

Viena no būtiskām atkritumu apsaimniekošanas sistēmas sastāvdaļām ir atkritumu radītāji. Sadzīvē radušies atkritumi 2024. gadā veidoja 33 % no kopējiem nebīstamajiem atkritumiem Latvijā [63], tāpēc mājsaimniecības ir nozīmīgi atkritumu radītāji. Līdz ar to arī resursu patēriņa un atkritumu samazināšana ir atkarīga no ļoti daudziem individuāliem lēmumu pieņēmumiem un miljoniem viņu ikdienas izvēļu. Zinātniskajos pētījumos noteikts, ka iedzīvotājus pēc to atkritumu apsaimniekošanas uzvedības var klasificēt tādos, kas viegli uzsāk atkritumu neradīšanas un šķirošanas prakses, tādos, kam to uzsākt ir grūtāk, taču iespējams, kā arī grūti sasniedzamajos lietotājos jeb tajos, kas aktīvi pretojas ilgtspējīgu atkritumu apsaimniekošanas ieviešanai.

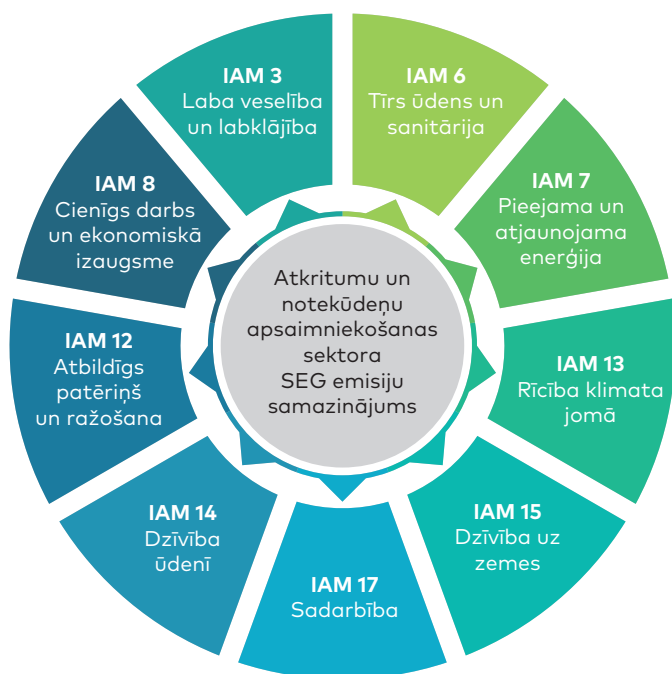
Pētījumā [64], izmantojot kognitīvās kartes, analizēta dažādu patērētāju grupu atkritumu samazināšanas prakses mentālie modeļi. Šāda pieeja ļauj izprast sakarības, kas ietekmē dažādu patērētāju grupu izvēles, un meklēt veidus, kā ietekmēt tās ilgtspējīgu praksi virzienā. Atšķirības starp viegli un grūti sasniedzamiem lietotājiem un ekspertiem skaidrojamas ar atšķirīgiem mentālajiem modeļiem jeb sistēmas izpratnes līmeni. Ekspertiem piemīt visplašākās zināšanas par atkritumu apsaimniekošanas sistēmas uzbūvi, turklāt eksperti spēj saredzēt cēloņsakarības, kas ietekmē sistēmas elementu sasaisti. Savukārt viegli sasniedzamie patērētāji, lai gan spēj raksturot atkritumu apsaimniekošanas sistēmas būtību, saredz to daudz vienkāršāk un mazāk izteikti spēj saskatīt dažādu sistēmas elementu ietekmi vienam uz otru. Kā trešie tika skatīti grūti sasniedzamie patērētāji, kas atkritumu apsaimniekošanas sistēmu uztver vēl vienkāršotāk, piemēram, viņu izpratnē šajā sistēmā neietilpst lietu atkārtota izmantošana un labošana, koplietošana, ražošana no atgūtiem materiāliem, kā arī tādi elementi kā sezonālitate, zināšanas, infrastruktūra. Dažādu grupu mentālo modeļu atšķirības uzsver atšķirīgu spēju noteikt ietekmes starp faktoriem, patērētāju uzskatiem un viņu pieejām aprites un lineārajai ekonomikai. Patērētāju grupēšana ļauj testēt un piemēlēt labākos rīcībpolitikas pasākumus atkritumu šķirošanas un neradīšanas veicināšanai.

6.3. Klimata pārmaiņu mazināšanas ilgtspējas vērtējums atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektorā

Lai novērtētu atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektora risinājumu ilgtspēju, papildus tehnoloģiskajiem aspektiem jāņem vērā arī ietekme uz vidi, ekonomiskā un sociālā dimensija. Bieži vien vides aizsardzības un klimata pārmaiņu mazināšanu veicinošie pasākumi viens otru papildina, taču ir arī gadījumi, kad vienas jomas mērķi ir pretrunā otram vai arī tie rada negatīvu ietekmi ekonomiskajā vai sociālajā dimensijā.

6.3.1. ANO Ilgtspējīgas attīstības mērķu sasaiste ar atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektoru

Šajā apakšnodaļā skatīta ilgtspējīgas attīstības mērķu (IAM) un to apakšmērķu sasaiste ar analīzes sektoru. 6.13. attēlā uzskaitīti tie IAM, kuru izpildi ietekmē atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas tehnoloģiskie pasākumi. Atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektoram ir abpusēja vai vienpusēja sasaiste ar daudziem IAM, kas galvenokārt skaidrojams ar potenciālā atkritumu un to



6.13. attēls.

Atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektora sasaiste ar IAM.

izraisītā piesārņojuma plašo ietekmi uz augsni, ūdeņiem, ekosistēmām un cilvēku veselību.

Atkritumiem (it īpaši to nepiemērotai apsaimniekošanai, piemēram, izmešanai dabā vai ūdeņos) ir liela negatīva ietekme uz vidi, cilvēku veselību un ekosistēmām. Plastmasas atkritumiem nonākot apkārtējā vidē, tie pakāpeniski sadalās, un tā augsne un ūdeņos nonāk mikroplastmasas piesārņojums [65], [66]. Attiecīgi atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektors var tieši ietekmēt IAM 6 "Tīrs ūdens un sanitārija" [67] mērķu izpildi vai neizpildi. Atbilstoša plastmasas atkritumu apsaimniekošana un reģenerācija rada pozitīvu ietekmi uz tādu IAM sasniegšanu kā "Rīcība klimata jomā" (IAM13), jo tiek samazināts fosilo izejvielu pieprasījums, kā arī, novēršot ekosistēmu piesārņojumu ar plastmasu, tiek radīta pozitīva ietekme uz IAM 6, IAM 14 "Dzīvība ūdenī" un IAM 15 "Dzīvība uz zemes" sasniegšanu. [67] Plastmasas piesārņojuma apsaimniekošanu var saistīt arī ar IAM 3 "Laba veselība un labklājība" [67], [58], jo mikroplastmasas monitorings ļauj noteikt, kuri iedzīvotāji potenciāli vairāk pakļauti ar mikroplastmasu saistītiem veselības riskiem.

Aprites ekonomikas pieeja ietver vairākus no iepriekšējā nodaļā skatītajiem tehnoloģiskajiem risinājumiem – atkritumu apjoma samazināšanu, resursu efektīvu izmantošanu, inovatīvu produktu ražošanu no bioloģiskajiem atkritumiem un notekūdeņu dūņām. Uzsvērts [68], ka aprites ekonomikas īstenošana ir cieši saistīta ar IAM 6, IAM 7 "Pieejama un atjaunojama enerģija", IAM 8 "Cienīgs darbs un ekonomiskā izaugsme", IAM 12 "Atbildīgs patēriņš un ražošana" un IAM 15, kā arī tieši ietekmē 21 apakšmērķa sasniegšanu, bet netieši – vēl 28 apakšmērķus.

Ņemot vērā, ka atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sektora SEG emisijas visvairāk atkarīgas no bioatkritumu apjomiem un to apsaimniekošanas, svarīgi apskatīt IAM 12 apakšmērķus, vairāki no kuriem saistīti ar pārtikas atkritumu samazināšanu. IAM 12 trešais apakšmērķis paredz līdz 2030. gadam uz pusi samazināt pārtikas atkritumu apjomu pasaulē, it īpaši atkritumus, kas rodas izplatīšanas un lietošanas fāzēs, bet arī tos, kas rodas izejvielu un pārtikas ražošanas procesos. Uzlabojot pārtikas ražošanas un izmantošanas resursu efektivitāti, tiek panākti arī vēlamie apstākļi atkritumu apsaimniekošanas sektora emisiju samazinājumam. Citiem vārdiem – mazāk atkritumu rada mazāk emisiju. Pārtikas izplatīšanas vērtību ķēdes optimizēšana ļauj arī uzlabot lietošanai nederīgu produktu savākšanu un potenciāli nodrošināt to valorizāciju. Šī paša IAM ceturtais apakšmērķis paredz drošu ķīmisko vielu un atkritumu apsaimniekošanu to aprites ciklā, tai skaitā ietekmes uz vidi un cilvēku veselību mazināšanu; piektais apakšmērķis paredz kopējā atkritumu apjoma samazināšanu. Pasākumi šo mērķu sasniegšanai labvēlīgi ietekmēs arī atkritumu apsaimniekošanas sektora emisiju samazinājumu, jo, uzlabojoties iedzīvotāju

paradumiem un izpratnei, mainīsies atkritumu morfoloģiskais sastāvs, labākajā gadījumā – samazināsies nepieciešamība apglabāt atkritumus. Turklāt informētības par resursu patēriņu uzlabošana ir IAM 12 astotais apakšmērķis.

No otras puses, emisiju samazināšanas pasākumu ieviešana atkritumu apsaimniekošanas sektorā var ietekmēt IAM 12 sasniegšanu. Šī sasaiste rodas, novēršot atkritumu rašanos. Īstenojot pasākumus bioloģisko atkritumu vai notekūdeņu dūņu izmantošanai inovatīvos bioproduktos, piemēram, viensūnu eļļas ražošanai, tiek optimizētas materiālu un resursu plūsmas, kā arī iespējams mazināt fosilo resursu patēriņu (ja viensūnu eļļa tiek izmantota biodeģvijas ražošanai). Tādā veidā tiek veicināts ilgtspējīgs resursu patēriņš un ražošana.

Atkritumu un notekūdeņu sektora SEG emisiju samazināšana saistīta arī ar IAM 17 “Sadarbība”. Šī IAM apakšmērķi paredz veicināt vietējo resursu izmantošanu un pašnodrošinājumu, veicināt starpvalstu sadarbību un starptautiskās finanšu palīdzības sniegšanu attīstības valstīm. Literatūrā norādīts [68], ka aprites ekonomikas veicināšanai ir jāattīsta IAM 17 paredzētās daudzpusējas ieinteresēto personu partnerības, savukārt [67] norāda, ka starptautiskos līgumus var izmantot kā rīku plastmasas piesārņojuma ierobežošanai. Reģionu, daudznazaru sadarbība, kā arī finanšu palīdzība un tehnoloģiju pārnese ir līdzekļi, lai veicinātu ilgtspējīgu atkritumu apsaimniekošanu un mazinātu mikroplastmasas piesārņojumu.

6.3.2. Vides, sociālais un ekonomiskais novērtējums

Atkritumu apglabāšana poligonos rada ietekmi uz vidi, tai skaitā trokšņa piesārņojumu, augsnes un ūdens piesārņojuma risku, SEG un citas emisijas gaisā. Turklāt gan atkritumu poligону vides, gan sociālekonomiskā ietekme saglabājas arī pēc atkritumu noglabāšanas fāzes beigām, jo jānodrošina poligona uzturēšana pēc slēgšanas. ES mērogā izvērtējot sadzīves atkritumu noglabāšanas poligону ietekmi uz vidi, pētnieki [69] norāda, ka ļoti liela loma ir konkrētā poligona atkritumu sastāvam, tam, vai tiek atgūts un kā tiek izmantots radītais metāns, kā arī lokālajiem klimatiskajiem apstākļiem.

Lai analizētu dažādas organisko atkritumu apsaimniekošanas stratēģijas Itālijā, izmantota aprites cikla analīze [70]. Salīdzinot bioloģiski noārdāmo atkritumu dalītu savākšanu un tai sekojošu mēslojumu ražošanu ar nešķirotu atkritumu savākšanu, to mehāniski bioloģisko apstrādi un sekojošu apglabāšanu (bez metāna atgūšanas), secināts, ka atkritumu noglabāšanai ir mazāka ietekme vairākumā apskatīto novērtējuma kategoriju, izņemot, piemēram, globālās sasilšanas potenciālu, kur labāks vērtējums bija šķirotu bioatkritumu pārstrādei. Dalīta atkritumu savākšana rada izteikti

lielāku ietekmi uz emisijām gaisā (tostarp NMGOS dēļ, kas rodas, stabilizējot organiskos atkritumus) un neatjaunojamās enerģijas izmantošanu. Savukārt atkritumu apglabāšanas scenārijā ietekmi varētu mazināt, nodrošinot metāna atgūšanu un izmantošanu.

Savukārt citā pētījumā salīdzināta efektīva atkritumu dalītas vākšanas sistēma, kurā iegūtie bioatkritumi tiek bioloģiski pārstrādāti, bet nešķiroti sadzīves atkritumi tiek pārstrādāti termiski [71]. Par efektīvu atkritumu šķirošanu to rašanās vietā uzskatāma vismaz 50 % atkritumu nošķirošana, taču nešķiroto sadzīves atkritumu sastāva kontekstā to var pielīdzināt atkritumu priekššķirošanai, jo kopējā nešķiroto atkritumu plūsma tāpat būs mehāniski jāšķiro. Augsts atkritumu dalītas vākšanas līmenis spētu nodrošināt ilgtspējību tikai tad, ja vienlaicīgi tiktu uzlabotas arī šķirošanas sistēmas un pārstrādes tehnoloģijas, lai tās spētu atdalīt dažādus toksiskus piemaisījumus (kā kadmiji, svins, cinks u. c.) [71].

Latvijas atkritumu pārvaldības sistēmas aprites cikla analīzes [72] apskatīto scenāriju rezultāti apstiprina, ka, palielinot atkritumu pārstrādi un samazinot atkritumu apglabāšanu, var ievērojami samazināt kopējo ietekmi uz klimata pārmaiņām, resursu patēriņu, cilvēku veselību un ekosistēmu kvalitāti. Scenārijs, kur ietverta arī atkritumu šķirošanas veicināšana, tā nodrošinot kvalitatīvāku materiālu pārstrādei, un bioloģisko atkritumu dalīta vākšana, sasniedz par 80 % labākus rezultātus.

Bioloģisko atkritumu frakcijas samazināšana apglabātajos atkritumos, papildus pozitīvajai ietekmei uz klimata pārmaiņu mazināšanu, samazina ietekmi uz vidi, piemēram, mazinot infiltrāta apjomu [69]. Ietekmes apjoms ir atkarīgs no tā, ar kādu pārstrādes tehnoloģiju tiek aizstāta atkritumu apglabāšana. Kā jau skatīts 6.1.2. apakšnodaļā, pēdējos gados atkritumu bioloģiskās pārstrādes emisijas Latvijā pieaug, taču šī tendence vērtējama pozitīvi, jo bioloģiskie atkritumi tiek apsaimniekoti mērķtiecīgāk un vienlaicīgi tiek samazinātas emisijas atkritumu apglabāšanas apakšsektorā. Emisiju mazināšanas rīcībpolitika var radīt arī dažāda veida papildu ieguvumus, tādus kā zaļo darbavietu attīstība, resursu efektīvāka izmantošana tautsaimniecībā, inovāciju veicināšana [73].

Atkritumu kompostēšana ietekmē apkārtējo vidi arī ar SEG emisijām nesaistītā veidā. Kompostēšanas procesā vislielāko ietekmi uz cilvēku veselību rada cieta daļiņu un amonjaka emisijas, kā arī amonjaka emisijas ietekmē ekosistēmu kvalitāti [70]. Piemēram, NH_3 un GOS emisijas no atkritumu kompostēšanas izraisa gan smakas piesārņojumu, gan var radīt sekundāro $\text{PM}_{2,5}$ piesārņojumu un līdz ar to ietekmi uz cilvēku veselību, turklāt GOS atmosfēras procesu ietekmē var veicināt troposfēras ozona veidošanos, kas ietekmē gan cilvēku veselību, gan augus un ekosistēmas [19].

Pieaugot tādām klimata pārmaiņu sekām, kas izpaužas kā ekstrēmi laikapstākļi (plūdi, karstuma un sausuma periodi), pieaug arī

riski, kas var ietekmēt atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas sistēmas darbību. Plūdi rada infrastruktūras bojājumu riskus, kas savukārt var izraisīt piesārņotāju nokļūšanu ūdenstecēs un tilpnēs un apdraudēt cilvēku veselību, ekosistēmas un ūdens kvalitāti [74]. Savukārt, modelējot plūdu, piekrastes erozijas un sausuma summāro ietekmi, noteikts neattīrītu notekūdeņu pārplūdes risks, nogulumu un atkritumu poligonu piesārņotāju izplūdes risks, paaugstinātu piesārņotāju koncentrāciju risks, kā arī sālsūdens ieplūdes un aļģu ziedēšanas risks. Iespējamās stratēģijas šādu risku mazināšanai ietver labākas monitoringa sistēmas izveidi un uzturēšanu, ilgtspējīgu drenāžas sistēmu izbūvi, kā arī dabā balstītus risinājumus [74].

Jaunākajos pētījumos [75] pieejams arī iepriekš minētā tehnoloģiskā risinājuma – dzintarskābes ražošana, izmantojot maizes atkritumus, – aprites cikla novērtējums. Noteikts, ka šī risinājuma ietekme uz vidi ir mazāka, salīdzinot ar fosilās izcelsmes izejvielu lietošanu, taču emisiju un enerģijas patēriņa kategorijās maizes atkritumu izmantošana rada lielāku ietekmi uz vidi nekā tādi biomasas avoti kā kukurūzas un sorgo graudi. Speciāli audzētu graudu izmantošanas scenārijā lielāku ietekmi uz vidi rada nepieciešamība pēc aramzemes.

Izmantotā literatūra

- [1] Circle Economy & Deloitte, 'Circularity Gap Report 2025: A global call to action', 2025.
- [2] 'Ministry of Climate and Energy of the Republic of Latvia. Latvia's National Inventory Document under the UNFCCC and Paris Agreement. 2025 submission.'
- [3] 'Ministru kabineta noteikumi Nr. 301. Noteikumi par atkritumu apsaimniekošanas reģioniem. Latvijas Vēstnesis, 115, 15.06.2023.'
- [4] 'Latvijas vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs, Ķīmisko vielu un bīstamo atkritumu nodaļa. Pārskats par atkritumu poligoniem Latvijā 2013.'
- [5] Centrālā statistikas pārvalde, 'Pievienotās vērtības īpatsvars pa darbības veidiem, %'. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://data.stat.gov.lv/pxweb/lv/OSP_PUB/START_VEK_IK_IKR/IKR020/table/tableViewLayout1/
- [6] Blumberga A., Timma L., Lauka D., Dace E., Barisa A., and Blumberga D., 'Achieving sustainability in non-ets sectors using system dynamics modelling practice', *Chemical Engineering Transactions*, vol. 45, pp. 871–876, Oct. 2015, doi: 10.3303/CET1545146.
- [7] 'Latvijas vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs. Kopsavilkums par 2024. gada siltumnīcefekta gāzu inventarizāciju. Rīga, 2024.'
- [8] 'Latvijas Republikas Saeima. Atkritumu apsaimniekošanas likums. Latvijas Vēstnesis, 183, ar 16.03.2023. grozījumiem.'
- [9] 'Belgian interregional Environment Agency (CELINE-IRCEL). Belgium's greenhouse gas inventory (1990-2023).'
- [10] Q. Wang *et al.*, 'Gas transport in landfill cover system: A critical appraisal', *Journal of Environmental Management*, vol. 321, p. 116020, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116020.
- [11] 'Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5, Chapter 3, Solid Waste Disposal'.
- [12] 'Greenhouse Gas Protocol. IPCC Global Warming Potential Values. Version 2.0. 07.08.2024.'
- [13] U. Lee, J. Han, and M. Wang, 'Evaluation of landfill gas emissions from municipal solid waste landfills for the life-cycle analysis of waste-to-energy pathways', *Journal of Cleaner Production*, vol. 166, pp. 335–342, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.016.
- [14] 'Latvijas vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs. Landfill data collection and compilation for GHG estimates'.
- [15] A. Kubule, K. Klavenieks, R. Vesere, and D. Blumberga, 'Towards Efficient Waste Management in Latvia: An Empirical Assessment of Waste Composition', *Environmental and Climate Technologies*, vol. 23, no. 2, pp. 114–130, Nov. 2019, doi: 10.2478/ruect-2019-0059.
- [16] 'National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2023. German Environment Agency. 15.04.2025.'
- [17] 'Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5, Chapter 4, Biological Treatment of Solid Waste'.
- [18] 'Ministru kabineta 2021. gada 22. janvāra rīkojums Nr. 45. Atkritumu apsaimniekošanas valsts plāns.'
- [19] S. L. Nordahl, C. V. Preble, T. W. Kirchstetter, and C. D. Scown, 'Greenhouse Gas and Air Pollutant Emissions from Composting', *Environ. Sci. Technol.*, vol. 57, no. 6, pp. 2235–2247, Feb. 2023, doi: 10.1021/acs.est.2c05846.
- [20] A. Saer, S. Lansing, N. H. Davitt, and R. E. Graves, 'Life cycle assessment of a food waste composting system: environmental impact hotspots', *Journal of Cleaner Production*, vol. 52, pp. 234–244, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.03.022.
- [21] 'Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5, Chapter 5, Incineration and Open Burning of waste'.
- [22] LVGMC, 'Valsts statistisko pārskatu "2-Gaiss", "2-Ūdens" un "3-Atkritumi" publikā pieeja'. Accessed: June 20, 2025. [Tiešsaiste]. Pieejams: http://parskati.lvgmc.lv/public_reports

- [23] 'Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5, Chapter 6, Wastewater treatment and discharge.'
- [24] 'Ministru kabineta noteikumi Nr.34. Noteikumi par piesārņojošo vielu emisiju ūdenī. Latvijas Vēstnesis, 16, 30.01.2002. ar 04.04.2023. grozījumiem.'
- [25] 'Ministru kabineta noteikumi Nr.302. Noteikumi par atkritumu klasifikatoru un ipašībām, kuras padara atkritumus bīstamus. Latvijas Vēstnesis, 64,26.04.2011.'
- [26] 'Spalvins, K., Blumberga, D. A simple tool for resource availability optimization: A case study of dairy whey supply for single cell protein and oil production in Latvia. *Agronomy Research* 18(S2), 1516-1525, 2020. <https://doi.org/10.15159/AR.20.112>'.
- [27] S. Raita, Z. Kusnere, K. Spalvins, and D. Blumberga, 'Optimization of Yeast Cultivation Factors for Improved SCP Production', *Environmental and Climate Technologies*, vol. 26, no. 1, pp. 848–861, Jan. 2022, doi: 10.2478/rtuect-2022-0064.
- [28] K. Spalvins, I. Vamza, and D. Blumberga, 'Single Cell Oil Production from Waste Biomass: Review of Applicable Industrial By-Products', *Environmental and Climate Technologies*, vol. 23, no. 2, pp. 325–337, Nov. 2019, doi: 10.2478/rtuect-2019-0071.
- [29] X. Xiong *et al.*, 'Value-added chemicals from food supply chain wastes: State-of-the-art review and future prospects', *Chemical Engineering Journal*, vol. 375, p. 121983, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.cej.2019.121983.
- [30] O. Gotkiewicz *et al.*, 'Biobased Ultralow-Density Polyurethane Foams with Enhanced Recyclability', *ACS Sustainable Chem. Eng.*, vol. 12, no. 4, pp. 1605–1615, Jan. 2024, doi: 10.1021/acssuschemeng.3c06924.
- [31] R. K. Saxena, S. Saran, J. Isar, and R. Kaushik, 'Production and Applications of Succinic Acid', in *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, Elsevier, 2017, pp. 601–630. doi: 10.1016/B978-0-444-63662-1.00027-0.
- [32] Y. Wibisono *et al.*, 'Valorization of agricultural waste through microbial fermentation into industrial-grade bio-succinic acid: A review', *Biomass and Bioenergy*, vol. 202, p. 108183, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.biombioe.2025.108183.
- [33] D. Blumberga *et al.*, *Biotehonomika*. 2016.
- [34] C. C. J. Leung, A. S. Y. Cheung, A. Y.-Z. Zhang, K. F. Lam, and C. S. K. Lin, 'Utilisation of waste bread for fermentative succinic acid production', *Biochemical Engineering Journal*, vol. 65, pp. 10–15, June 2012, doi: 10.1016/j.bej.2012.03.010.
- [35] C. Du, S. K. C. Lin, A. Koutinas, R. Wang, P. Dorado, and C. Webb, 'A wheat biorefining strategy based on solid-state fermentation for fermentative production of succinic acid', *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 17, pp. 8310–8315, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2008.03.019.
- [36] M. P. Dorado, S. K. C. Lin, A. Koutinas, C. Du, R. Wang, and C. Webb, 'Cereal-based biorefinery development: Utilisation of wheat milling by-products for the production of succinic acid', *Journal of Biotechnology*, vol. 143, no. 1, pp. 51–59, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.jbiotec.2009.06.009.
- [37] 'Ministru kabineta rīkojums Nr. 237. Notekūdeņu dūņu apsaimniekošanas plāns 2024.–2027. gadam. Latvijas Vēstnesis, 66, 04.04.2024.'
- [38] 'Nitekūdeņu apsaimniekošanas investīciju plāns 2021.–2027. gadam'.
- [39] T. Zat *et al.*, 'Sustainable red ceramic block: recycling of a sewage sludge as raw material', *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 25, no. 2, pp. 1019–1034, 2023, doi: 10.1007/s10163-022-01587-3.
- [40] Biedrība Latvijas Ūdensapgādes un kanalizācijas uzņēmumu asociācija, 'Nitekūdeņu dūņu apsaimniekošana Latvijā. Esošā situācija notekūdeņu apsaimniekošanā Latvijā', Rīga, Nov. 16, 2021.
- [41] Z. Chang, G. Long, J. L. Zhou, and C. Ma, 'Valorization of sewage sludge in the fabrication of construction and building materials: A review', *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 154, p. 104606, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104606.

- [42] J. Zhou, T. Li, Q. Zhang, Y. Wang, and Z. Shu, 'Direct-utilization of sewage sludge to prepare split tiles', *Ceramics International*, vol. 39, no. 8, pp. 9179–9186, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.ceramint.2013.05.019.
- [43] C. Martínez-García, D. Eliche-Quesada, L. Pérez-Villarejo, F. J. Iglesias-Godino, and F. A. Corpas-Iglesias, 'Sludge valorization from wastewater treatment plant to its application on the ceramic industry', *Journal of Environmental Management*, vol. 95, pp. S343–S348, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.jenvman.2011.06.016.
- [44] E. Miķelsons, 'Pašvaldību notekūdeņu staciju blakusproduktu izmantošanas iespējas. Bakalaura darbs.', Rīgas Tehniskā universitāte, 2025.
- [45] T. Zat *et al.*, 'Potential re-use of sewage sludge as a raw material in the production of eco-friendly bricks', *Journal of Environmental Management*, vol. 297, p. 113238, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113238.
- [46] Ziemeļvalstu Ministru padomes birojs Latvijā, 'Atkritumu šķirošanas esošās prakses Latvijā. Aptaujas rezultātu apkopojums', Rīga, 2021. [Tiešsaiste]. Pieejams: https://norden.lv/files/Norden_%C5%A0%C4%B7iro%C5%A1ana_Aptauja_2021.pdf
- [47] 'ZAAO prezentē jauniegādāto pārtikas un iepakojuma atdalīšanas iekārtu', Dec. 2025. [Tiešsaiste]. Pieejams: <https://zaao.lv/zaao-prezente-jauniegadato-partikas-un-iepakojuma-atdalisanas-iekartu/>
- [48] 'Patents LV 15643 B1. Zivju resursu ieguves un pārstrādes simbiozes sistēma un paņēmieni. Rīgas Tehniskā universitāte, D.Blumberga, I.Veidenbergs, J.Pubule, Z.Indzere, 20.07.2023.'
- [49] Z. Indzere and D. Blumberga, 'Fish Processing Efficiency Ranking', *Environmental and Climate Technologies*, vol. 24, no. 3, pp. 135–144, Nov. 2020, doi: 10.2478/rtuect-2020-0092.
- [50] D. Blumberga *et al.*, 'Zivju apstrādes efektivitātes ceļvedis. Zinātniskā monogrāfija', RTU Izdevniecība, Rīga, 2021.
- [51] J. Pubule, A. Blumberga, F. Romagnoli, and D. Blumberga, 'Finding an optimal solution for biowaste management in the Baltic States', *Journal of Cleaner Production*, vol. 88, pp. 214–223, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.04.053.
- [52] 'Ministru kabineta rīkojums Nr. 573. Aktualizētais Nacionālais Enerģētikas un Klimata plāns 2021. - 2030. gadam. Latvijas Vēstnesis, 137, 17.07.2024.'
- [53] M. Valtere, T. Bezrucko, D. Lauka, A. Blumberga, and D. Blumberga, 'What Drives the Circular Economy? Textile Sorting or Consumption Reduction', *Circ.Econ.Sust.*, May 2025, doi: 10.1007/s43615-025-00584-6.
- [54] K. Bumbiere, J. Pubule, and D. Blumberga, 'What Will Be the Future of Biogas Sector?', *Environmental and Climate Technologies*, vol. 25, no. 1, pp. 295–305, Jan. 2021, doi: 10.2478/rtuect-2021-0021.
- [55] A. Barisa, V. Kirsanovs, and A. Safronova, 'Future transport policy designs for biomethane promotion: A system Dynamics model', *Journal of Environmental Management*, vol. 269, p. 110842, Sept. 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110842.
- [56] V. Terjanika, A. A. Sanchez Valdespino, and J. Pubule, 'Calculation of Greenhouse Gas Savings: Switch from Electricity Production to Biomethane. Case Study', *Environmental and Climate Technologies*, vol. 27, no. 1, pp. 836–849, Jan. 2023, doi: 10.2478/rtuect-2023-0061.
- [57] A. Barisa, I. Dzene, M. Rosa, and K. Dobraja, 'Waste-to-biomethane Concept Application: A Case Study of Valmiera City in Latvia', *Environmental and Climate Technologies*, vol. 15, no. 1, pp. 48–58, Dec. 2015, doi: 10.1515/rtuect-2015-0005.
- [58] A. A. Abd, M. R. Othman, S. Z. Naji, and A. S. Hashim, 'Methane enrichment in biogas mixture using pressure swing adsorption: process fundamental and design parameters', *Materials Today Sustainability*, vol. 11–12, p. 100063, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.mtsust.2021.100063.

- [59] A. Alonso-Vicario *et al.*, 'Purification and upgrading of biogas by pressure swing adsorption on synthetic and natural zeolites', *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 134, no. 1–3, pp. 100–107, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.micromeso.2010.05.014.
- [60] "'Balticovo" svinīgi atklāj "BOVO GAS" biometāna rūpnīcu, preses relīze. Pieejams tiešsaistē: <https://balticovo.lv/lv/aktualitates/balticovo-svinigi-atklaj-bovo-gas-biometana-rupnicu>.'.
- [61] 'Pārtikas un veterinārā dienesta reģistrs Atzītie un reģistrētie dzīvnieku izcelsmes blakusproduktu aprītes uzņēmumi (regula 1069/2009), 6.sekcija - Biogāzes ražošanas uzņēmumi. 16.09.2025. versija'.
- [62] *Ministru kabineta noteikumi Nr. 21. Eiropas Savienības kohēzijas politikas programmas 2021.–2027. gadam 2.1.2. specifiskā atbalsta mērķa 'Atjaunojamo energoresursu enerģijas veicināšana – biometāns' īstenošanas noteikumi*. 2025.
- [63] Centrālā Statistikas Pārvalde, 'AKS010. Savāktais sadzīves (visu nebīstamo) atkritumu daudzums (tonnas) 2021–2024'.
- [64] I. Bremane, V. Liberova, A. E. Bezrucko, D. Blumberga, and A. Blumberga, 'Mind Over Waste: Decoding the Mental Models of Hard-to-Reach in Household Waste Practices', *Environmental and Climate Technologies*, vol. 29, no. 1, pp. 35–50, Jan. 2025, doi: 10.2478/rtuct-2025-0003.
- [65] S. Mahapatra *et al.*, 'Microplastics and nanoplastics in environment: Sampling, characterization and analytical methods', *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 26, p. 101267, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.gsd.2024.101267.
- [66] P. J. Landrigan *et al.*, 'Human Health and Ocean Pollution', *Annals of Global Health*, vol. 86, no. 1, p. 151, Dec. 2020, doi: 10.5334/aogh.2831.
- [67] X. Zhao and F. You, 'From sustainable macro debris chemical recycling to microplastic reclamation: Overview, research challenges, and outlook', *Journal of Cleaner Production*, vol. 454, p. 142281, May 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.142281.
- [68] P. Schroeder, K. Anggraeni, and U. Weber, 'The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals', *J of Industrial Ecology*, vol. 23, no. 1, pp. 77–95, Feb. 2019, doi: 10.1111/jiec.12732.
- [69] G. Sauve and K. Van Acker, 'The environmental impacts of municipal solid waste landfills in Europe: A life cycle assessment of proper reference cases to support decision making', *Journal of Environmental Management*, vol. 261, p. 110216, May 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110216.
- [70] C. Buratti, M. Barbanera, F. Testarmata, and F. Fantozzi, 'Life Cycle Assessment of organic waste management strategies: an Italian case study', *Journal of Cleaner Production*, vol. 89, pp. 125–136, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.11.012.
- [71] U. Arena and F. Di Gregorio, 'A waste management planning based on substance flow analysis', *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 85, pp. 54–66, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.resconrec.2013.05.008.
- [72] E. Kavals and J. Guska, 'Life Cycle Assessment-Based Approach to Forecast the Response of Waste Management Policy Targets to the Environment', *Environmental and Climate Technologies*, vol. 25, no. 1, pp. 121–135, Jan. 2021, doi: 10.2478/rtuct-2021-0008.
- [73] E. Cilinskis, J. Ziemeles, A. Blumberga, and D. Blumberga, 'Analysis of support measures for promoting energy efficiency and renewables for GHG emissions reduction in non-ETS sector', *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 2838–2843, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.430.
- [74] E. Laino and G. Iglesias, 'Extreme climate change hazards and impacts on European coastal cities: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 184, p. 113587, Sept. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113587.
- [75] S. Gadkari, D. Kumar, Z. Qin, C. S. Ki Lin, and V. Kumar, 'Life cycle analysis of fermentative production of succinic acid from bread waste', *Waste Management*, vol. 126, pp. 861–871, May 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.04.013.

Summary

We all live in a time when we are convinced every day of climate change and that it will not be possible to avoid it. If only we could do everything we can to minimise the impact on them. It is undeniable that one of the main roles is played by the climate policy of the United Nations (UN) and politicians from all over the world, who have made important decisions. It all started in 1992 in Rio de Janeiro with the Convention on Biological Diversity. The Kyoto Protocol, adopted in 1997, is a protocol to the UN Framework Convention on Climate Change, which was established as a means of combating global warming, and plays an important role. Every year, the UN Climate Change Conference (COP) is held in one of the countries of the world, where small steps are being taken towards agreeing on new activities to reduce global warming. Very often, previously prepared protocols and other documents are not accepted. For example, in 2025, COP30 in Brazil failed to agree on a clear plan, or roadmap, for the phase-out of fossil fuels. On this occasion, it was the oil-producing countries that prevailed, blocking any meaningful wording. The leaders of the rich powers still do not see business and economic development as solutions to the problems of climate change.

For their part, European Member States are strongly committed to implementing climate policies to mitigate the impact of climate change. The European Green Deal sets out an ambitious path towards climate neutrality through various initiatives to decarbonise economic sectors. This process is essential not only to



Fig. 1.
GHG emission
sectors of the
economy.

achieve the EU's target of reducing GHG emissions by at least 55 % by 2030, but also to ensure the long-term sustainability of Member States economies.

Latvia is preparing to achieve climate neutrality in 2050. The intermediate target is ambitious – to reduce GHG emissions by at least 17 % by 2030. The task is not easy. Delivering on this commitment requires targeted and massive work, not only in each sector individually, but also in developing a national climate policy and looking for instruments to implement it. Current climate neutrality measures are summarised in the National Energy and Climate Plan 2021–2030 (NECP 2030).

Regardless of the political turns, scientists need to continue their research to provide arguments that will help politicians not deviate from the path that leads to mitigating the effects of climate change. Recently, at international scientific conferences, there has been more and more talk about the glass wall that has formed between scientists and representatives of the state administration. This book could be the reasoned bell that will try to sound the problems of understanding MPs and ministry officials by making them listen to scientists.

The monograph outlines trails and paths that will move us, step by step, individually and collectively, towards mitigating the impact of climate change. It is created using the results of the scientific research of the authors. The book explains the contribution and opportunities of Latvian economic sectors to climate change mitigation as the country moves towards sustainable development and climate neutrality. The aim of the authors of the book is, based on the results of scientific research, to explain the contribution of the Latvian economic sectors to climate change mitigation.

The monograph examines and analyses sets of greenhouse gas (GHG) emission reduction measures in sectors for which all countries in the world collect GHG emission data every year. The country submits a UN National Inventory (NIR) report on GHG emissions in six sectors:

- the energy sector includes volatile emissions of fuels in the energy balance and all technological processes in which combustion processes are realised;
- the transport sector includes emissions from the fuel used by vehicles;
- the waste management sector includes technological solutions for waste storage, including sewage treatment sludge farms;
- the industrial sector includes only those technological solutions in which GHG emissions are released during the processing of raw materials, as well as emissions from the use of certain substances;

- agriculture is agricultural, forestry and other land use (AFOLU), which is one component of the AFOLU sector;
- LULUCF is land use, land use change and forestry, which is the second component of AFOLU.

The book takes a creative look at each sector of the GHG emissions economy from three perspectives. It is not possible to use one recipe for all sectors. The first chapters of the six sectors are devoted to the audit of GHG emissions, based on input data, mathematical processing and analysis of results. The following chapters are key to identifying options for achieving climate neutrality objectives. They analyse selected GHG emission reduction measures and technological solutions. The final chapters of the sectoral characterisation assess the sustainability and resilience of climate change mitigation, taking into account the UN Sustainability Goals and the analysis of climate adaptation options.

The audit of GHG emissions has been implemented on the basis of the methodologies for the acquisition and processing of input data, which are regulated by national and international documents. The accounting of emissions for each sector is based on the guidelines for the national GHG inventory developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). More detailed information on the levels of calculation detail tier used, country-specific emission factors and emission sources, as well as emission volumes is obtained from the databases of the Central Statistical Bureau, Latvian National Greenhouse Gas Inventory Report in accordance with the UN Framework Convention on Climate Change and the Paris Agreement (NIR) (Latvia's National Inventory Document under the UNFCCC and Paris Agreement), its annexes and the data tables of the Central Data Repository (Common Reporting Format (CRF)).

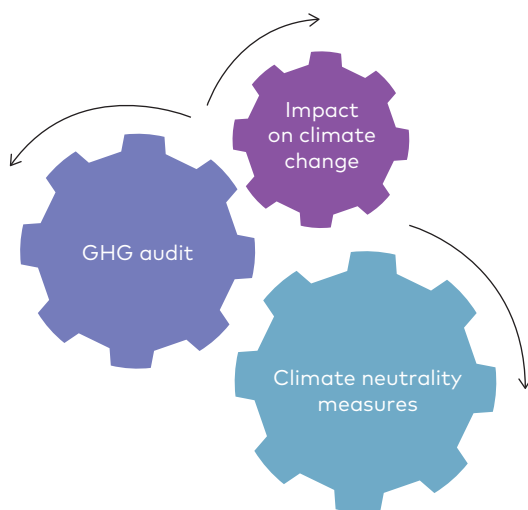


Fig. 2.
Visual explanation
of the content of
the monograph.

The book includes an outline of the methodology for evaluating measures to mitigate the impact on climate change, a description and interpretation of the results obtained. GHG reduction measures differ both in the amount of investment required and in the results obtained. Large reductions in GHG emissions are often possible with small investments and vice versa; therefore, indicators that measure the cost of reducing GHG emissions per unit (EUR/tCO₂ eq) play an important role. Sectoral climate-neutrality measures also differ in their complementary impact on the economy and its potential for sustainable development. Such examples can be found in each sector. For example, an increase in the share of renewables in the energy sector could help the country become a hydrogen-exporting country. Another example involves the storage of carbon contained in sewage sludge pellets in building materials, replacing valuable raw materials for building materials.

Mitigating the impact of climate change is one of the key prerequisites for sustainable development. The contribution of sectors varies and depends on the sources, volume and composition of GHGs. For example, the energy sector is the main source of GHG emissions at the global, regional and national level. In order to facilitate the transition to a climate-neutral and sustainable energy supply, it is essential to assess the extent to which technological solutions or policy measures introduced or planned contribute to environmental, social and economic sustainability and resilience.

The book assesses the sustainability of climate neutrality measures in the context of the UN Sustainable Development Goals (SDGs). The methodology provides a structured approach that helps countries and regions assess and integrate sustainability principles across sectors. The sectoral sustainability assessment serves as a

Fig. 3.
The UN Sustainable Development Goals.



tool to determine how the chosen solutions affect the achievement of climate objectives, how they are consistent with the provision of economic development and social well-being, and the extent to which they meet global sustainability standards.

The monograph is intended for scientists, university students, officials of ministries and agencies, employees of municipalities and enterprises, as well as any representative of the public, in order to encourage them to look into the future through the prism of systemic development and innovative solutions in terms of dynamic development.

**Klimatneitralitātes
dimensijas**

Rīgas Tehniskā universitāte
Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Rīga 2026

