

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības inženierzinātņu fakultāte

Ceļu un tiltu institūts

Artūrs Riekstiņš

Doktora studiju programmas “Būvniecība” doktorants

**CEĻA SEGAS ILGTSPĒJAS NOVĒRTĒŠANAS
METODIKAS UN RĪKA IZSTRĀDE
UN PIELIETOŠANA DAŽĀDU MATERIĀLU
UN TEHNOĻIJU IZVĒRTĒŠANAI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs

Dr. sc. ing.

VIKTORS HARITONOVŠ

RTU Izdevniecība

Rīga 2023

Riekstiņš, A. Ceļa segas ilgspējas novērtēšanas metodikas un rīka izstrāde un pielietošana dažādu materiālu un tehnoloģiju izvērtēšanai. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2023. 40 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-06” 2023. gada 3. februāra lēmumu, protokols Nr. L1.



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu darbības programmas “Izaugsme un nodarbinātība” 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa “Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” projekta Nr. 8.2.2.0/20/I/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku Augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” ietvaros.

Šis pētījums ir tapis ar Rīgas Tehniskās universitātes Doktorantūras grantu programmas atbalstu.

Vāka attēla autors – Artūrs Riekstiņš

<https://doi.org/10.7250/9789934229008>

ISBN 978-9934-22-900-8 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023. gada 12. maijā plkst. 14.15 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē, Ķīpsalas ielā 6A, 342. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Aleksandrs Korjamins,

Rīgas Tehniskā universitāte

Dr. ing. Ovidijus Šernas,

Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

Asoc. profesore *Ph. D. Dr. Liseane Padilha Thives,*

Federal University of Santa Catarina, Brazīlija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Artūrs Riekstiņš (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, astoņas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 80 attēli, 29 tabulas, kopā 144 lappuses. Literatūras sarakstā ir 96 nosaukumi.

SATURS

1. Ievads	5
1.1. Promocijas darba pamatojums	5
1.2. Pētījuma zinātniskā novitāte	5
1.3. Promocijas darba mērķis	6
1.4. Promocijas darba uzdevumi	6
1.5. Darba praktiskais lietojums	6
1.6. Aprobācija konferencēs	6
1.7. Doktorantūras laikā izstrādāto publikāciju saraksts	7
2. Zinātniskais pamatojums	8
2.1. Ilgtspējīga attīstība	8
2.2. Ilgtspējīgas attīstības novērtēšanas paņēmieni	9
2.3. Ilgtspējīgas attīstības novērtēšanas izaicinājumi	10
3. Pieejamie <i>LCA</i> un <i>LCCA</i> rīki	12
4. Ceļu būvniecības materiālu, tehnoloģiju un stratēģiju ilgtspējas novērtēšanas metodikas izstrāde	14
4.1. Ilgtspējas novērtēšana	14
5. Rīks <i>PAVE/LCA/LCCA</i>	18
6. Aprēķina rīka <i>PAVE/LCA/LCCA</i> validācija	19
6.1. SEG vērtību validācija asfalta virskārtai	19
6.2. SEG un enerģijas vērtību validācija A scenārijā, izmantojot rīku <i>ECORCE M</i>	19
6.3. Izmaksu validācija ceļa segas konstruktīvajām kārtām	20
7. Materiālu un tehnoloģiju ilgtspējas novērtēšana, izmantojot izstrādāto metodiku un rīku	22
7.1. Metodika	22
7.2. Rezultāti un diskusija	30
8. Secinājumi	39

1. IEVADS

1.1. Promocijas darba pamatojums

Ceļu tīkls ir valsts, reģiona un kontinenta asinsrites sistēma, tā blīvums un stāvoklis ir būtisks iedzīvotāju pamatvajadzību nodrošināšanai un attīstībai. Tajā pašā laikā, lai uzturētu šo tīklu, ir nepieciešami lieli finansiālie un mūsu planētas neatjaunojamie resursi. Ceļu tīkla kopgarums Eiropas Savienībā vien ir 5,5 miljoni kilometru, un aplēsts, ka infrastruktūras kopējā vērtība ir aptuveni 8 triljoni. Latvijas ceļu tīkla kopgarums veido vien 1,27 % no šī daudzuma, tomēr salīdzinoši mazā iedzīvotāju skaita dēļ mums ir devītais augstākais ceļu kilometru daudzums uz vienu iedzīvotāju pasaulē – 0,0363 km. Tā blīvums ir 1094 km uz 1 km². Iedzīvotāju skaitam turpinot samazināties, šis apjoms uz vienu iedzīvotāju tikai pieaugs, kas proporcionāli prasīs vēl lielāku daļu no ikgadējā valsts budžeta tā atjaunošanai un uzturēšanai.

Neatkarīgi no iedzīvotāju skaita samazināšanās ceļu tīkls ir jāuztur tā, lai tas būtu pieejams ikvienam un netiktu traucēti ekonomiskie procesi. Neskatoties uz ierobežotajiem līdzekļiem, ceļu tīkls ir jāatjauno un jāuztur ilgtspējīgi, kas šobrīd ir īpaši aktuāli saistībā ar Eiropas zaļo kursu. Viens no Eiropas zaļā kursa mērķiem ir līdz 2030. gadam samazināt kopējo emisiju apjomu par 50 %. Tajā pašā laikā blakus ekonomiskajiem un vides aspektiem eksistē arī sabiedrības vēlmes jeb sociālie aspekti. Sabiedrība vēlas ilgmūžīgākus ceļus, braukšanas komfortu, drošību, zemu trokšņu līmeni. Tādēļ uzskatāms, ka visi iepriekš minētie aspekti (ekonomiskie, vides, sociālie) būtu iekļaujami lēmumu pieņemšanā. Par to, cik katram no faktoriem ir liela ietekme lēmuma pieņemšanā, ir jāizvērtē ceļu tīkla pārvaldītājam, saskaņojot prasības ar vēlmēm un iespējām.

Šī promocijas darba laikā tika izstrādāta ilgtspējīgas attīstības novērtēšanas metodika un aprēķina rīks *PAVE/LCA/LCCA*. Tas ir solis uz priekšu objektīvu kvantitatīvos lielumos balstītu materiālu, tehnoloģiju un/vai atjaunošanas stratēģiju novērtēšanā ceļu būvē un ar to saistītajos procesos.

1.2. Pētījuma zinātniskā novitāte

Promocijas darbā tika izstrādāta metodika un rīks ceļa segas materiālu, tehnoloģiju un atjaunošanas stratēģiju ilgtspējas novērtēšanai, iekļaujot vides, ekonomiskos un sociālos faktorus. Lai gan metodika paredzēta visu trīs ilgtspējas parametru iekļaušanai novērtējumā, izstrādātais rīks iekļauj divus no tiem – vides un ekonomisko. Šobrīd neeksistē aprēķinu rīks, ar ko būtu iespējams novērtēt ceļa segas vides un ekonomiskos parametrus brīvi izstrādātam ekspluatācijas laika kalendārajam plānam. Rīks ir izstrādāts *Microsoft Office Excel*, papildinot ar *Visual Basic for Applications (VBA)*. Pati metode ir būtisks palīgs, lai veicinātu ceļu nozares izpratni par izmantoto materiālu, tehnoloģiju un stratēģiju ietekmi uz izmaksām un vidi, tādējādi veicinot kvantificējamus datus balstītu lēmumu pieņemšanas politiku. Izstrādātais rīks ir publiski pieejams un interesentiem tālāk pilnveidojams un pielāgojams.

1.3. Promocijas darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt ilgtspējīgas attīstības novērtēšanas metodiku un rīku ceļa segas projekta novērtēšanai, analizējot nozarei saistošos standartus, esošās prakses, izmantotos rīkus, to validēt un veikt dažādu materiālu un tehnoloģiju ilgtspējas parametru izvērtējumu.

1.4. Promocijas darba uzdevumi

1. Veikt saistīto normatīvu un standartu analīzi ilgtspējas novērtēšanai.
2. Analizēt pieejamos rīkus ilgtspējas parametru novērtēšanai.
3. Izstrādāt dzīves cikla tehnikās balstītu metodi, kas novērtētu dažādu tehnoloģiju, materiālu, atjaunošanas stratēģiju ekonomiskos un vides aspektus.
4. Izstrādāt rīku uz *Excel* bāzes, papildinot ar *Visual Basic (VB)* kodu varbūtiskajam aprēķinam.
5. Atlasīt ievaddatus dzīves cikla novērtējumam (LCA) un dzīves cikla izmaksu analīzei (LCCA) no literatūras, datubāzēm, materiālu ražotājiem un vietējiem ceļu būves uzņēmumiem.
6. Veikt izstrādātā rīka validāciju.
7. Veikt aprēķinus, lai novērtētu dažādu potenciāli ilgtspējīgu materiālu un tehnoloģiju vides un ekonomiskos parametrus.

1.5. Darba praktiskais lietojums

Izstrādāto metodiku un rīku var izmantot jebkurš ceļa īpašnieks/pārvaldītājs Latvijā (pašvaldības, novadi, VSIA “Latvijas Valsts ceļi” un citas organizācijas) un ārpus tās, lai uzlabotu lēmuma pieņemšanas politiku ceļa tīkla ilgtspējīgākai atjaunošanai un uzturēšanai. Izstrādātais rīks ir bezmaksas un pieejams lejupielādei, lietošanai, koriģēšanai ikvienam ([saite](#)). Tāpat izstrādātā metodika un rīks var kalpot zinātniskiem mērķiem.

1.6. Aprobācija konferencēs

1. 11th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, June 28–30, 2022, Trondheim, Norway.
2. “Use of local materials and by-products of industry in road construction” 8.10.2020. Workshop.
3. BUP VII PhD Students Training in Rogow, Poland, 24–28 November, 2019.
4. 18th International Scientific Conference, Engineering for Rural Development, May 22–24, 2019, Jelgava, Latvia.

1.7. Doktorantūras laikā izstrādāto publikāciju saraksts

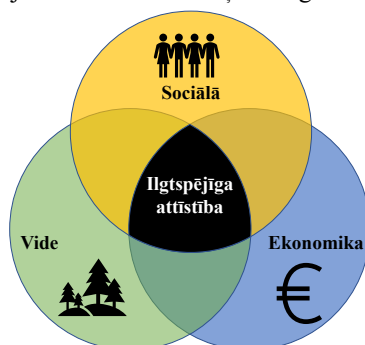
1. Riekstins, A., Haritonovs, V., & Straupe, V. (2022). Economic and environmental analysis of Crumb Rubber Modified Asphalt. *Construction and Building Materials*, 335, 127468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127468>.
2. Riekstins, A., Haritonovs, V., Merijs-Meri, R., & Zicāns, J. (2021). Ethylene-Octene-Copolymer as an alternative to Styrene-Butadiene-Styrene bitumen modifier. *Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Volume 1*, 96–107. <https://doi.org/10.1201/9781003222880-10>.
3. Riekstins, A., Baumanis, J., Krastins K., Kalinka K. (2021). Assessment of Surface Characteristics of Coarse Aggregates by Flow Coefficient Method. *Baltic Road Conference 2021*.
4. Riekstins, A., Baumanis, J., & Barbars, J. (2021). Laboratory investigation of crumb rubber in dense graded asphalt by wet and dry processes. *Construction and Building Materials*, 292, 123459. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123459>.
5. Riekstins, A., Haritonovs, V., & Straupe, V. (2020). Life Cycle Cost Analysis and Life Cycle Assessment for Road Pavement Materials and Reconstruction Technologies. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 15 (5), 118–135. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2020-15.510>.
6. Riekstins, A., Haritonovs, V., & Balodis, A. (2019). Evaluation of adhesion between bitumen and aggregate with the digital image processing method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 660, 012047. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/660/1/012047>.
7. Riekstins, A., Haritonovs, V., Abolins, V., Straupe, V., & Tihonovs, J. (2019). Life cycle cost analysis of BBTM and traditional asphalt concretes in Latvia. *Engineering for Rural Development*. doi:10.22616/erdev2019.18.n400.
8. Riekstins, A., Haritonovs, V. (2017). Research on Restoration and Reconstruction Technologies of Asphalt Concrete for Very Thin Layers. *Baltic Road Conference 2021*.

2. ZINĀTNISKAIS PAMATOJUMS

2.1. Ilgtspējīga attīstība

Zinātnieku un lēmējvaras līmenī jautājumi par ilgtspēju ir plaši diskutēti jau vairākas desmitgades. Pirmo reizi ilgtspējas jēdziens tika definēts 1987. gadā ANO Pasaules Vides un attīstības komisijas ziņojumā “Mūsu kopējā nākotne”. Vienkāršota ilgtspējīgas attīstības definīcija – ilgtspējīga attīstība ir attīstība, kas nodrošina šodienas vajadzību apmierināšanu, neradot draudus nākamo paaudžu vajadzību apmierināšanai. Definīcija pasaka, ka visiem ir jārūpējas par savu planētu, resursiem un cilvēkiem ilgtspējīgā veidā. Turklāt tā, lai planētas Zeme stāvoklis būtu tāds pats vai labāks, nekā to saņēmām.

Balstoties iepriekš minētajos principos, tiek uzskatīts, ka ilgtspējīgai attīstībai ir trīs pamatnostādnes – vides, ekonomiskās un sociālās (2.1. att.). Dažādās nozarēs ilgtspējīgas attīstības principi var būtiski atšķirties. Neskatoties uz to, ir skaidrs, ka visās nozarēs ir iespēja iedzīvīnāt vai jau papildināt esošos ilgtspējīgas attīstības darbības principus. Lai to izdarītu, svarīgi apzināties esošo situāciju un definēt īstermiņa un ilgtermiņa mērķus.



2.1. att. Ilgtspējas attīstības pamatnostādnes.

Galvenais katalizators ilgtspējīgas attīstības politikas iedzīvīnāšanai ir klimata pārmaiņas. Kopš 1880. gada pasaulē vidējais jūras līmenis ir pieaudzis par 50 cm. Tiek prognozēts, ka līdz 2050. gadam tas pieaugs vēl par 20–30 cm. Šādam pieaugumam ir būtiska ietekme uz meteoroloģiskajiem, klimatiskajiem un hidroloģiskajiem procesiem.

Apzinoties, ka cilvēku radītā ietekme uz vidi, ir lielāka, nekā iepriekš domāts, 1972. gadā notika pirmā ANO konference par starptautiskajiem vides jautājumiem. Tā iezīmēja pagrieziena punktu starptautiskās vides politikas attīstībā. Šim notikumam sekoja vairākas būtiskas sanāksmes un vienošanās, piemēram, Rio Zemes samits, Kioto protokols, Parīzes klimata vienošanās.

Neskatoties uz to, ka ietekmes uz vidi un klimatu mazināšana ir augstākā prioritāte, lēmumu pieņemšanā jāizvērtē arī ekonomiskās iespējas un sociālie faktori. Ceļu tīkls ir valsts, reģiona un kontinenta asinsrites sistēma, tā blīvums un stāvoklis ir būtisks iedzīvotāju pamatvajadzību nodrošināšanai un attīstībai. Tajā pašā laikā, lai uzturētu šo tīklu, ir nepieciešami lieli finansiālie un mūsu planētas neatjaunojamie resursi. Tādējādi ir īpaši būtiski ceļiem paredzēto budžetu

izlietot pēc iespējas efektīvāk, balstoties ilgtspējīgas attīstības principos. Sabalansēt finansiālās iespējas ar vides prasībām un sociālajām vajadzībām ceļu būvē ir nozares 21. gadsimta galvenais izaicinājums.

Neskatoties uz ceļu nozares izmēriem un nozīmīgumu, patlaban nav standarta, kas noteiktu to, kā novērtēt tehnoloģiju, materiālu vai stratēģiju ilgtspēju. Zināms, ka notiek darbs pie vienota Eiropas standarta ceļa ilgtspējas novērtēšanai – *EN 17472*, kas ietver būvdarbu ilgtspēju ilgtspējas novērtējumu, inženiertehniskos darbus un aprēķina metodes.

2.2. Ilgtspējīgas attīstības novērtēšanas paņēmieni

Lai varētu iedzīvināt un veicināt ilgtspējīgas attīstības principus, ir jāsaprot pamatprincipi, kā dažādus materiālus, tehnoloģijas vai stratēģijas ir iespējams salīdzināt. Viens no paņēmieniem, kas arī ir autora izstrādātās metodes pamatā, ir dzīves cikla tehnikas, par kurām plašāk aprakstīts nākamajās apakšnodaļās.

2.2.1. DZĪVES CIKLA NOVĒRTĒJUMS (*LCA*)

LCA ir ietekmes uz vidi novērtēšanas paņemiens, kas kvantitatīvi analizē noteiktas sistēmas ietekmi visā plānotajā dzīves ciklā. Ideālā gadījumā – iekļaujot visus procesus, kas saistīti ar produktu no “šūpuļa” (*cradle*) materiālu ieguves līdz “kapam” (*grave*) jeb kalpošanas beigām. Aprēķins var tikt veikts arī tikai daži dzīves cikla posmiem, ja tas nav pretrunā ar definēto mērķi un noteiktajām sistēmas robežām. Šobrīd pasaulē ietekmes uz vidi novērtēšanai pētnieki galvenokārt atsaucas uz Starptautiskās standartizācijas organizācijas (*ISO*) standartu *14040:2006*.

Minētais standarts ir vispārējs un paredzēts visu industriju *LCA* aprēķinu veikšanai. Tajā nav detalizēti aprakstītas *LCA* veikšanas tehnikas, kā arī nav norādīta metodoloģija dažāda tipa *LCA* veikšanai. Ceļu būvē *LCA* veikšanai plaši tiek izmantots ASV izstrādātais dokuments *Pavement Life Cycle Assessment Framework*. Tajā ir aprakstīta *LCA* piemērošana ceļu novērtēšanai, kas arī tika ņemts par pamatu promocijas darba mērķa izpildei.

2.2.2. DZĪVES CIKLA IZMAKSU ANALĪZE (*LCCA*)

LCCA ir analīze, ar kuru iespējams novērtēt projekta varianta un to alternatīvu (nav obligāti) kopējo ekonomisko vērtību, analizējot sākotnējās izmaksas un diskontētās nākotnes izmaksas, piemēram, ceļa uzturēšanas, lietotāja, rekonstrukcijas vai rehabilitācijas izmaksas visā projekta dzīves laikā. Analīzi var veikt gan projekta, gan ceļa tīkla līmenī. Aprēķins ir noderīgs dažādu konkurējošu materiālu, tehnoloģiju un/vai atjaunošanas stratēģiju sākotnējo un nākotnes ieguldījumu salīdzināšanai visā plānotajā aprēķina periodā. Veicot analīzi, ir iespējams salīdzināt gan ceļa īpašnieka (pārvaldītāja), gan ceļa lietotāju izmaksas projektam.

LCCA analīzei nav izstrādāts un apstiprināts starptautisks standarts. Taču jau kopš 20. gs. 70. gadiem *LCCA* principi ir iekļauti dažāda līmeņa projektos ASV. *LCCA* analīzes principi plaši aprakstīti vairākos ASV Transporta departamenta Federālās lielceļu administrācijas dokumentos, kas izmantoti arī teorijas analīzē un aprēķina metodes izstrādē.

2.2.3. DZĪVES CIKLA SOCIĀLĀ ANALĪZE (*SLCA*)

SLCA ir analīze, ar kuru iespējams novērtēt projekta sociālo ietekmi un salīdzināt ar citām alternatīvām. *SLCA* ir salīdzinoši jauns koncepts, tādēļ līdz šim nav izstrādāts standarts un netiek plaši lietota kāda metodika. Līdz ar to šai dzīves cikla tehnikai gan vispārēji, gan tieši ceļu būvei vēl ir jāpilnveidojas. Zināms, ka notiek darbs pie standarta izstrādes. Tomēr, ņemot vērā to, ka konkrētu vadlīniju *SLCA* veikšanai nav, šajā pētījumā tas netika plašāk apskatīts. Atšķirībā no *LCA* un *LCCA* šos analīzes rezultātus var nebūt viegli savstarpēji salīdzināt. Ir sociāli faktori, kas ir subjektīvi, tāpēc to iekļaušana ir jāizvērtē. Daži no zināmākajiem sociālajiem faktoriem ir braukšanas kvalitāte, drošība, atjaunošanas darbu biežums.

2.3. Ilgtspējīgas attīstības novērtēšanas izaicinājumi

2.3.1 RĪKI

Mūsdienās ir pieejams plašs rīku/programmu klāsts segas dzīves cikla ietekmes uz vidi un/vai izmaksu aprēķināšanai. Tomēr nav universāla rīka/programmas, kas ietver gan vides, gan ekonomiskos lielumus pilnam ceļa segas dzīves ciklam. Zināmākais rīks/programma šim raksturojumam ir *PaLATE 2.0* un tās nākamās versijas. Pētnieki un praktiķi ir novērtējuši, ka dažādu rīku izmantošana var dot būtiski atšķirīgus rezultātus. Šādas atšķirības ir izteikti raksturīgas *LCA* rīkiem. Turklāt šiem rīkiem var atšķirties aprēķina tvērums, pieņēmumi, materiālu plūsmas. Tādēļ, veicot aprēķinus, ieteicams izmantot tikai vienu rīku. Situācijās, kad izvēlētais rīks nosedz tikai daļu no nepieciešamās informācijas, rūpīgi jāizvērtē, lai materiālu un procesu plūsmas starp rīkiem būtu identiskas.

2.3.2 DATU KVALITĀTE

LCA veikšanas gadījumā parasti izmantotajos rīkos jau ir iekļauti arī materiālu un procesu radītās ietekmes. Atsevišķi komerciālie rīki pat ļauj izvēlēties datubāzes, lietojot savam reģionam atbilstošākos datus. Komerciālo rīku izmantošanas gadījumā lielākais ieguvums ir augstāka ticamība datiem, kā arī tie tiek atjaunoti un papildināti. *LCA* datu avoti ir datubāzes (zināmākās – *EcoInvent*, *GaBi*), literatūra, vides produktu deklarācijas (*EPD*) vai pašu iegūtie dati. Lai gan vides datiem arī ir sava reģionālā specifika, lielākoties tos var pielāgot arī reģioniem, par kuriem šādu datu nav.

Izmaksām ir būtiski izteikta reģionālā specifika. Tās var ietekmēt inflācija, ģeopolitiskie notikumi, piedāvājums un pieprasījums, piegādes ķēdes un citi faktori. Tādēļ arī *LCCA* rezultātu salīdzināšana pat vienas valsts ietvaros var būt problemātiska. Izmaksu dati jāatjauno gadu no gada, atsevišķos gadījumos pat biežāk.

2.3.3 SISTĒMAS ROBEŽU DEFINĒŠANA

Atkarībā no pētījuma mērķa vai izmantotā rīka (vides un/vai ekonomiskā) būtiski noteikt pareizas aprēķina robežas jeb tvērumu. Salīdzinot, piemēram, stingru segu ar elastīgu segu,

aprēķina robežas būtu jānosaka, iekļaujot arī izejmateriālu iegūšanas ceļa segas dzīves cikla posmu. Pretējā gadījumā ir augsts risks iegūt maldinošus rezultātus.

Ir rīki, kas aprēķinā ietver tikai dažādus ceļa segas dzīves cikla posmus, piemēram, būvniecības un izmantošanas posmus, izejmateriālu ieguves un būvniecības posmus vai citus. Izmaksu aprēķinā atšķirībā no vides aprēķina gala cena precīzi atspoguļo materiāla vai tehnoloģijas pašizmaksu, kas ietver visas iepriekšējo darbību (transports, materiālu ražošana, būvniecība u. c.) vai atsevišķu komponentu (izejvielu) izmaksas.

2.3.4 PIENĒMUMU NOTEIKŠANA

Nekorektu pieņēmumu noteikšana aprēķinu vienkāršošanas nolūkos vai to nenorādīšana ir viena no tipiskākajām kļūdām *LCA* un *LCCA* aprēķinos. Pieņēmumu noteikšana ir kritisks priekšnosacījums korekta rezultāta iegūšanai. Pieņēmumi var būtiski atvieglot un vienkāršot aprēķinu, tādēļ ir svarīgi izvērtēt, vai konkrētajam pieņēmumam ir/nav nozīme galarezultāta iegūšanā. Turklāt visi veiktie pieņēmumi ir jānorāda, lai veiktais aprēķins ir izsekojams un saprotams ikvienam.

2.3.5 KALPOŠANAS LAIKA PROGNOZE

Materiālu, tehnoloģiju un/vai stratēģiju kalpošanas laika prognoze ir milzīgs izaicinājums jebkurai dzīves cikla analīzei. Piemēram, virskārtas, kas būs jāmaina pēc 10 vai 11 gadiem, ilgtspējas atšķirība veido 10 %. Tradicionāli kalpošanas laika prognoze tiek balstīta vēsturiskajos datos vai ekspertu viedokļos par izmantotajām tehnoloģijām. Jāatzīmē, ka ilgmūžību var ietekmēt daudzi faktori un šādas prognozes var būtiski atšķirties no reālā produkta, jau izbūvēta dzīvē. Papildus attīstoties arvien vairāk dažādām inovācijām (materiāliem un tehnoloģijām), šādu pieredzē balstītu prognozi vairs nav iespējams veikt. Tādēļ tieši kalpošanas laika prognoze ir lielākais izaicinājums ilgtspējas novērtēšanai.

3. PIEEJAMIE *LCA* UN *LCCA* RĪKI

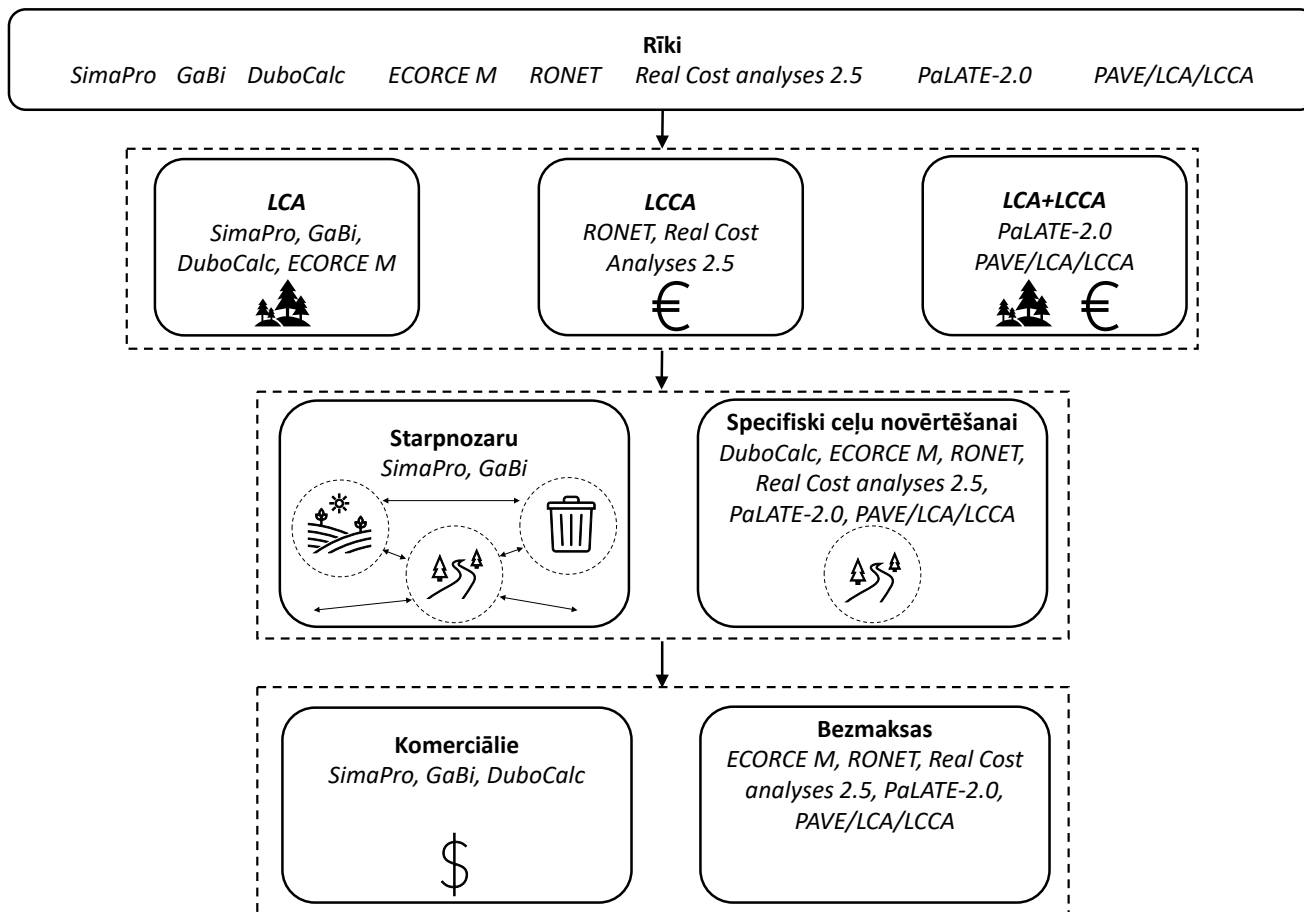
Mūsdienās ir pieejami dažādi rīki ceļa dzīves cikla ietekmes uz vidi un/vai izmaksu aprēķināšanai. Šos rīkus var iedalīt vairākās būtiskās kategorijās: (1) paredzēts vides un/vai izmaksu aprēķiniem; (2) starpnozaru vai specifiski ceļu nozarei; (3) komerciāls vai bezmaksas (3.1 att.). Rīku salīdzinājumā ir iekļauts arī autora izstrādātais rīks *PAVE/LCA/LCCA*.

Zināmākie *LCA* rīki ir *SimaPro*, *GaBi*, *DubuCalc* un *ECORCE M*. Pazīstamākie *LCCA* rīki ir *RONET* un *Real Cost analyses 2.5*. Patlaban tikai *PaLATE-2.0* ir uzskatāms par tādu rīku, kas ir domāts gan vides, gan izmaksu aprēķināšanai.

Būtisks rīku iedalījuma aspekts ir, vai tie paredzēti tieši ceļu nozarei vai ir starpnozaru. Tie, kas paredzēti ceļu nozarei, jau ir ar pielāgotu izkārtojumu veicamajiem darbiem, iespējami plašāku detalizācijas pakāpi dažādiem procesiem, kā arī tos ir salīdzinoši vieglāk apgūt. *LCCA* rīki ir iedalāmi arī pēc tā, vai tie paredzēti ceļa īpašnieka izmaksu aprēķiniem, vai ceļa lietotāju izmaksu aprēķiniem. *LCA* un *LCCA* rīki, kas izstrādāti tieši ceļu nozarei, ir *DubuCalc*, *ECORCE M*, *RONET*, *Real Cost analyses 2.5*, *PaLATE-2.0* un *PAVE/LCA/LCCA*. Lielākā priekšrocība šiem rīkiem ir to vienkāršība, kas ļauj salīdzinoši ātri izveidot analīzei nepieciešamo modeli. *LCA* rīki *SimaPro* un *GaBi* ir ar plašu lietošanas spektru. Ar šiem rīkiem ir iespējams veikt gan uz sistēmu attiecināmus, gan no sistēmas izrietošus *LCA* aprēķinus. Ar *SimaPro* un *GaBi* atšķirībā no citiem *LCA* rīkiem ir iespējams veikt detalizētāku *LCA*, jo tiem ir ievērojami plašākas datubāzes par dažādu cieto atkritumu vai blakusproduktu vides indikatoriem. Turklāt plašie un regulāri atjaunotie dati datubāzēs dod pārlicību par rezultātu pareizību.

Trešā kategorija – komerciāls vai pieejams bez maksas. No apskatītajiem rīkiem tikai *LCA* ir komerciāli. Galvenais iemesls tam ir piesaistītās datubāzes.

Ņemot vērā to, ka materiāli un procesi *LCA* un *LCCA* daļēji pārklājas, abu analīžu ietveršanai vienā rīkā ir zināmas vairākas priekšrocības: (1) potenciāli mazāk laika nepieciešams, lai izveidotu aprēķinu; (2) informācija ir vienviet; (3) pārskatāmāka ietekmju izvērtēšana. Balstoties šajos apsvērumos un tajā, ka patlaban nozarē nav pieejams rīks, kas apvienoto *LCA* un *LCCA* ar iespēju izstrādāt vēlamu atjaunošanas stratēģiju, tika pieņemts lēmums izstrādāt tādu, kā arī darīt to brīvi pieejamu citiem pētniekiem un praktiķiem gan lietošanai, gan papildināšanai.

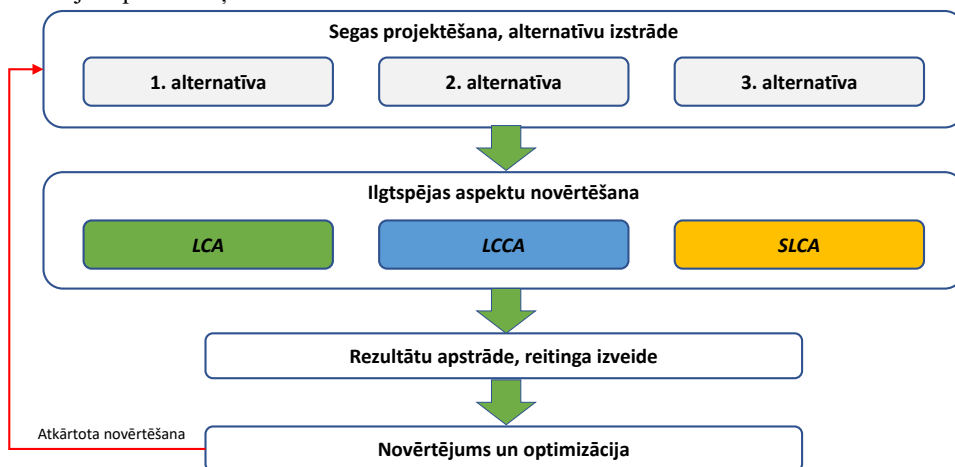


3.1. att. Ilgtspējas parametru novērtēšanai izmantoto rīku iedalījums.

4. CEĻU BŪVNICĪBAS MATERIĀLU, TEHNOLOĢIJU UN STRATĒGIJU ILGTSPĒJAS NOVĒRTĒŠANAS METODIKAS IZSTRĀDE

4.1. Ilgtspējas novērtēšana

Atbilstoši pētījuma mērķim tika izstrādāts projekta alternatīvu novērtēšanas metodes ietvars, izmantojot dzīves cikla tehnikas (4.1. att.). Šis ietvars izmantojams gan pilnas pārbūves, gan vienkāršotas atjaunošanas pieejās. Ilgtspējīgas ceļa dizaina un atjaunošanas stratēģijas noteikšanas metodika iedalāma četros soļos: (1) segas projektēšana, alternatīvu izstrāde; (2) ilgtspējas aspektu novērtēšana, izmantojot dzīves cikla tehnikas – *LCA*, *LCCA*, *SLCA*; (3) rezultātu apstrāde, reitinga izveide; (4) rezultātu novērtējums un optimizācija. Par ilgtspējīgas ceļa dizaina un rehabilitācijas stratēģijas noteikšanas metodi plašāk aprakstīts nākamajās apakšnodaļās.

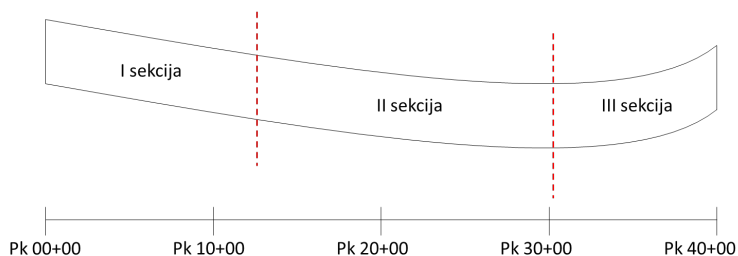


4.1. att. Projekta variantu ilgtspējas novērtēšanas princips. Segas projektēšana, alternatīvu izstrāde

Šī soļa galvenais mērķis ir izstrādāt potenciāli vairākas (vismaz vienu) alternatīvas vai pieejas. Segas projektēšanu ir iespējams sākt tūlīt pēc nepieciešamo datu saņemšanas (pārbūves objektu gadījumā). Izpētes rezultātā iegūtie dati par grunts sastāvu, gruntsūdens līmeni, ceļa segā esošo materiālu īpašībām, ceļa segas viendabību, nestspēju vai citiem rādītājiem ir būtiski, lai izstrādātu aprēķinos balstītu ceļa segas piedāvājumu. Vienam un tam pašam satiksmes sastāvam, vides apstākļiem seguma konstrukcijas biežums atšķirsies atkarībā no izmantotajiem materiāliem vai tehnoloģijām. Gadījumos, kad ceļa segas pamatu kārtas jau ir ar labām īpašībām, tās iespējams atstāt un iekļaut segas projekta izstrādē.

Atjaunošanai paredzētais ceļa posms var būt izteikti neviendabīgs visā tā garumā (stāvoklis, konstruktīvo kārtu biežumi, grunts), tādēļ var tikt izmantotas dažādas atjaunošanas metodes

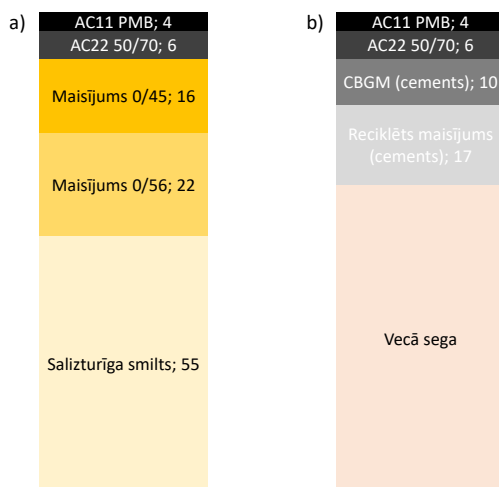
(pilna dziļuma rekonstrukcija, reciklēšana u. c. risinājumi) vai konstruktīvo kārtu biezumi. Tādos gadījumos ceļu nepieciešams sadalīt zīmīgās sekcijās (4.2. att.). Ieteikums tomēr izvairīties no pārmērīgi daudzu sekciju izveides, kas var ievērojami apgrūtināt aprēķina veikšanu un ilgtspējīgākā risinājuma novērtēšanas procesu.



4.2. att. Ilustratīva ceļa projekta sadalīšana sekcijās, kurās ir izmantota vienāda tipa materiāli, konstruktīvo kārtu biezumi un/vai izbūves tehnoloģijas.

Neatkarīgi no izvēlēta atjaunošanas risinājuma – pilna pārbūve, daļēja vecā seguma reciklēšana vai cita risinājuma – izstrādātajai ceļa segai jāizpilda izmantotās projektēšanas metodikas pārbaudes prognozētajai satiksmes intensitātei un sastāvam. Visticamāk, izmantotā metodika var neatbilstīt netradicionālu vai inovatīvu materiālu vai tehnoloģiju iekļaušanu aprēķinā. Tādos gadījumos materiālu vai tehnoloģiju iekļaušanu segas projektēšanā ieteicams pielīdzināt esošiem vai balstīt citā pieejā, piemēram, ņemot vērā laboratorijā iegūtos rezultātus. Laboratorijas rezultāti ir būtiski, lai pamatotu to, ka materiāls/tehnoloģija ir līdzvērtīgs vai labāks/sliktāks nekā tradicionāli izmantotais, iekļaujot to aprēķinā.

Veicot alternatīvu segas risinājumu izveidi, svarīgi ir nodrošināt to savstarpēji korektu salīdzināšanu. 4.3. attēlā redzamas ceļa segas konstrukcijas: a) pilnā pārbūve; b) vecās segas reciklēšana, jaunu kārtu izbūve atbilstoši VSIA “Latvijas Valsts ceļi” aprēķinu programmai. Abas konstrukcijas uzskatāmas par līdzvērtīgām. Elastības modulis uz virskārtas abām konstrukcijām ir 1 % robežās.

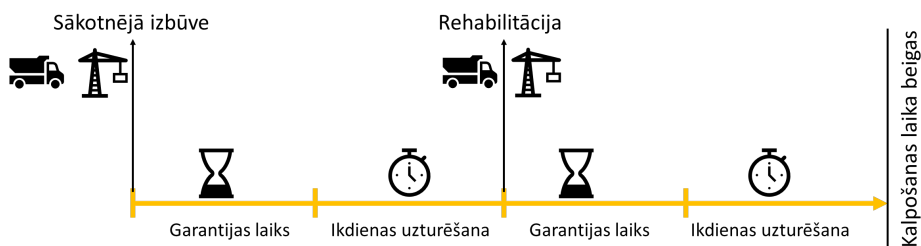


4.3. att. a) Ceļa segas pilna pārbūve; b) vecās segas reciklēšana un jauna seguma izbūve.

Risinājumu ilgtspējas novērtēšana pēc būtības iedalāma divās daļās – sākotnējā konstrukcija un turpmākā ceļa uzturēšanas un atjaunošanas stratēģija. Atbilstoši plānotajiem uzturēšanas un atjaunošanas darbiem jāizvēlas piemērotākais analīzes perioda garums. Analīzes perioda garumam jābūt tādā, lai tā laikā varētu korekti novērtēt alternatīvu atšķirības. Ieteicamais analīzes perioda garums augsti noslogotiem ceļiem ir no 30 līdz 50 gadiem, vidējas noslodzes asfaltētiem ceļiem – no 20 līdz 30 gadiem, ceļiem ar grants segumu – no 10 līdz 20 gadiem. Vienkāršotu atjaunošanas darbu gadījumā (virsmas apstrāde, *microsurfacing*, *fog seal* u. c.) dzīves cikla garums jābalsta izmantoto metožu kalpošanas laika pieredzē.

Atbilstoši analīzes perioda garumam tiek izstrādāta detalizēta uzturēšanas un atjaunošanas stratēģija katram no scenārijiem. Uzturēšanas un atjaunošanas stratēģijā jāiekļauj tādas aktivitātes kā garantijas periods, ikdienas uzturēšana, periodiskās uzturēšanas, rehabilitācijas vai citi darbi, kas ietekmē vidi, izmaksas vai sociālos faktoros. Izstrādātajai stratēģijai jābūt reālistiskai, tādēļ ieteicams to balstīt vēsturiskajos datos par dažādu tehnoloģiju vai materiālu kalpošanas laiku, literatūrā pieejamos datos, laboratorijas ekspluatācijas īpašību testēšanas rezultātos, ekspertu viedokļos vai to kombinācijās. Izmantojot citu valstu pieredzes datus, rūpīgi jāizvērtē, vai tie ir pielīdzināmi vietēji izmantotajām tehnoloģijām, materiāliem, klimatiskajiem apstākļiem un ģeoloģijai. Kalpošanas laika prognozei ir augsta ietekme uz rezultātiem.

Vizualizēts kalendārā plāna piemērs no sākotnējās konstrukcijas izbūves līdz kalpošanas laika beigām redzams 4.4. attēlā. Pēc sākotnējās konstrukcijas izbūves seko garantijas laiks, kura ilgums ir atkarīgs no veikto darbu apmēra. Šajā laikā būvuzņēmējs novērš visus radušos defektus par saviem līdzekļiem. Pēc garantijas laika beigām izbūvētajam ceļam tiek veikta ikdienas uzturēšana, tas ir, plaisu un bedrīšu aizpildīšana par ceļa īpašnieka līdzekļiem. Pēc noteikta laika konstrukcijai ir nepieciešama atjaunošana, piemēram, virskārtas nomaiņa, kas iekļauj vecās kārtas frēzēšanu un jaunas kārtas ieklāšanu. Pēc seguma atjaunošanas atkal seko garantijas laiks, ikdienas uzturēšana. Tās beigās konkrētā aprēķina robežas noslēdzas, tiek pieņemts, ka iestājas ceļa kalpošanas laika beigas.



4.4. att. Vienkāršota kalendārā plāna vizualizācija.

4.1.1. ILGTSPĒJAS ANALĪZU VEIKŠANA

Pēc alternatīvu izstrādes visam aprēķina periodam analīze pāriet nākamajā fāzē, kas ir ilgtspējas faktoru novērtēšana, izmantojot dzīves cikla tehnikas. Par ilgtspējas galvenajām dimensijām tiek uzskatīta vide, ekonomika un sociālie aspekti. Atbilstoši šīm pamatnostādņēm tiek definēti ilgtspēju ietekmējošie faktori katrā no tām. Izvēloties piemērotu analīzi, iespējams

katrā no šīm pamatnostādņēm veikt izvērtējumu. Tas darāms, izmantojot pašizstrādātu aprēķinu vai rīku/programmu vai izmantojot kādu bezmaksas vai komerciāli pieejamu rīku/programmu. Atkarībā no analīzes mērķa un aprēķina tvēruma tās veicējs izvēlas piemērotāko risinājumu. Veicot sava aprēķina izstrādi, būtiski pārliecināties par analīzes tvēruma piemērotību, izmantoto datu kvalitāti un veikto pieņēmumu pamatotību. Kā jau tika norādīts 3. nodaļā, patlaban nav tāda viena rīka, kas varētu novērtēt alternatīvu ilgtspēju visās trīs dimensijās – vides, ekonomiskās, sociālās. Atsevišķi rīki, piemēram, *PaLATE 2.0* un *PAVE/LCA/LCCA* (autora izstrādātais rīks), novērtē daļu no ilgtspēju ietekmējošajiem lielumiem – vides un ekonomiskos faktorus.

Kā jau tika minēts 2.2.3 nodaļā, *SLCA* tikai tiek pētīta tās potenciālajai izmantošanai ceļu būvē risinājumu ilgtspējas novērtēšanai. Tādēļ patlaban šim nolūkam galvenokārt tiek izmantotas tieši *LCA* un *LCCA*. Vides un ekonomiskie lielumi netieši ietekmē arī sociālos faktorus. Visas šīs pamatnostādnes ir savstarpēji saistītas, no tā izriet, ka arī rezultāti divās no tām jau sniedz plašu informāciju par kopējo scenārija ilgtspēju.

4.1.2. REZULTĀTU APSTRĀDE, RANGA IZVEIDE

Iegūtie rezultāti no analīžu inventarizācijas veikšanas tiek apstrādāti, sagrupēti. Rezultātu apstrāde ir atšķirīga determinētās un/vai varbūtiskās analīzes izmantošanas gadījumā. Atkarībā no izvirzītā mērķa tiek paturēti tikai tie indikatori, kas tam atbilst. Rezultāti tiek piešķirti izvēlētajām ietekmes kategorijām. Piemēram, no *LCA* inventarizācijas analīzes rezultāti var tikt izdalīti par tādām ietekmes kategorijām kā klimata pārmaiņas, eitrofikācija, resursu izsīkšana, ozona noārdīšanās u.c. Savukārt no *LCCA* inventarizācijas rezultāti var tikt izdalīti, piemēram, ceļa īpašnieka izmaksas un ceļa lietotāju izmaksas. *SLCA* gadījumā var tikt izmantotas tādas kategorijas kā drošība, braukšanas komforts, netraucēta satiksme u. c.

To, kāds ir katras kategorijas “svars” jeb nozīmīgums, lēmuma pieņemšanā ir izšķirīgs. To var balstīt, piemēram, par pamatu ņemot aptaujas rezultātus, kurā ekspertiem, inženieriem, un/vai citām grupām ir jāatbild uz noteiktiem jautājumiem, tajā skaitā par kategoriju svarīgumu.

4.1.3. NOVĒRTĒJUMS UN OPTIMIZĀCIJA

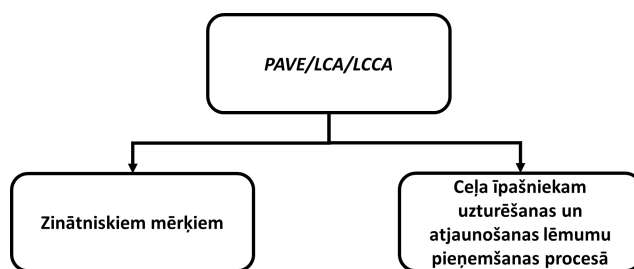
Pēc reitinga izveides tiek secināts par ilgtspējas analīzes rezultātiem un lemts par to, vai potenciāli ilgtspējīgākais risinājums ir saskaņā ar analīzes mērķi vai citiem nosacījumiem. Ja tas tā nav, tad analīzes veicējam jāatgriežas pirmajā solī – segas projektēšana, alternatīvu izstrāde. Tādējādi ilgtspējīgākā risinājuma izstrāde un meklēšana jāsāk no jauna.

5. RĪKS *PAVE/LCA/LCCA*

Lai varētu veikt ilgtspējas novērtēšanu dažādiem materiāliem, tehnoloģijām vai stratēģijām saskaņā ar metodiku, tika izstrādāts rīks *PAVE/LCA/LCCA*. Ar to iespējams novērtēt vides (CO_2 ekv., patērēto enerģiju) un ekonomiskos (ceļa īpašnieka izmaksas) parametrus izstrādātajam scenārijam. Plašāk par to iespējams lasīt pilnajā promocijas darba tekstā. Rīks tika izstrādāts *MS Office* programmā *Excel*, papildinot ar *Visual Basic* kodu. Rīks tika izstrādāts ar mērķi, lai to var piemērot gan pilnas pārbūves objektiem, gan vienkāršotas atjaunošanas objektiem. Izstrādātajam rīkam tika piešķirts nosaukums – *PAVE/LCA/LCCA*. Nosaukumā ir iestrādāts paredzamais lietojums, *PAVE* ir saīsinājums no vārda *PAVEMENT* (ceļa sega), *LCA* un *LCCA* apzīmē ilgtspējas aspektu novērtēšanas analīzes, proti, vides un ekonomisko faktoru novērtēšanai. Rīks izstrādāts angļu valodā.

Ierobežotu laiku *PAVE/LCA/LCCA* ir pieejams [šeit](#).

Iespējamais *PAVE/LCA/LCCA* lietojums ir zinātniskiem mērķiem un ceļa īpašniekam vai pārvaldītājam uzturēšanas un atjaunošanas lēmumu pieņemšanas procesā. (5.1. att.). Izveidotais rīks nav aizsargāts, lai aprēķina veicējs vajadzības gadījumā var veikt korekcijas, papildināt materiālu sadaļu, mainīt iekārtu produktivitāti, degvielas patēriņu, pielāgot to analīzes veikšanai. Tādējādi tiek dota iespēja attīstīt un pilnveidot rīku.



5.1. att. Rīka *PAVE/LCA/LCCA* potenciālais lietojums.

Bez papildu aprēķinu veikšanas ar rīku *PAVE/LCA/LCCA* ir iespējams veikt izvērtēšanu šādām ietekmēm:

- transportēšanas distanču ietekme;
- reciklētā asfalta (RA) un reciklētās ceļa segas (RAP) ietekme;
- bitumena, cementa, vieglo pelnu saturs izmaiņu ietekme;
- vietējo un importēto materiālu ietekme;
- konstruktīvo kārtu biezumu, asfalta tipu un atjaunošanas stratēģiju;
- diskonta likmes ietekme uz dzīves cikla izmaksām;
- izmantotā degvielas tipa ietekme;
- tehnikas vienību (produktivitātes, degvielas patēriņa) ietekme.

Lai izvērtētu specifisku, piemēram, ar gumiju modificētu asfalta ietekmi uz vidi un izmaksām, ir jāveic papildu aprēķini.

6. APRĒĶINA RĪKA *PAVE/LCA/LCCA* VALIDĀCIJA

Lai pārliciecinātos par to, ka aprēķina rīks *PAVE/LCA/LCCA* un tajā ievadītie dati dod ticamas *LCA* un *LCCA* vērtības, tika definēti trīs uzdevumi: (1) salīdzināt siltumnīcefekta gāzu (SEG) un enerģijas patēriņu asfalta virskārtai no A scenārija (7. nodaļa) ar citām literatūras avotos atrodamām vērtībām; (2) salīdzināt SEG un enerģijas patēriņu visam dzīves ciklam no A scenārija (7. nodaļa) ar rīka *ECORCE M* vērtībām; (3) salīdzināt izmaksas ceļa segas konstruktīvajām ar LVC 2022. gada autoceļu būvniecības cenu katalogu. Par šiem salīdzinājumiem plašāk aprakstīts nākamajās apakšnodaļās. Plašāk par validāciju iespējams lasīt pilnajā promocijas darba versijā.

6.1. SEG vērtību validācija asfalta virskārtai

A scenārijā iegūtās SEG vērtības tika salīdzinātas ar citu autoru pētījumu rezultātiem (6.1. tab.). Šajā analizē iegūtā SEG emisiju vērtība A scenārijā 1 tonnai *AC11* virskārtai ir salīdzināma ar citu pētījumu rezultātiem. Ar pētnieku *Rathore*, *Hammond* un *Jones* vērtības ir izteikti tuvas un atšķiras 0,5–1,1 % robežās. Turpretī, salīdzinot ar *Giani* un *Miliutenko*, iegūtā vērtība 63,7 ir līdz pat 13,0 % augstāka. Neskatoties uz to, var uzskatīt, ka kopumā iegūtā SEG vērtība ir ļoti tuva citu pētnieku aprēķinātajām vērtībām.

6.1. tabula

Salīdzinājums SEG 1 asfalta tonnai ar rīku *PAVE/LCA/LCCA* un informāciju no literatūras

	<i>PAVE/LCA/LCCA</i>	<i>Rathore</i>	<i>Giani</i>	<i>Miliutenko</i>	<i>Hammond</i> un <i>Jones</i>
SEG, kg	63,7	63,0	52,0–	57,0	64,0
CO ₂ ekv/t			60,2		

6.2. SEG un enerģijas vērtību validācija A scenārijā, izmantojot rīku *ECORCE M*

A scenārijā iegūtās SEG vērtības tika salīdzinātas ar rīka *ECORCE M* vērtībām (6.2 tab.). Rīks *ECORCE M* tika izvēlēts, jo tas ir izstrādāts Eiropā (Francijā) un to var izmantot bez maksas.

Tika salīdzināts visa A scenārija dzīves cikls – no sākotnējās izbūves līdz kalpošanas laika beigām. Funkcionālā vienība atbilstoši 7.1 nodaļā aprakstītajam.

Kopumā iegūtie rezultāti uzrāda būtisku atšķirību starp SEG emisijām, kas konkrētajā piemērā ir 45,6 %. Tajā pašā laikā atšķirība starp patērētās enerģijas vērtībām ir būtiski mazāka, tas ir, 12,0 %.

Pēc detalizētākas rezultātu analīzes redzams, ka būtiskākās SEG atšķirības starp šo rīku SEG kategorijām uzrāda minerālmateriālu pozīcijas. Piemēram, smilts materiāla pozīcijā rīkā *ECORCE M* kopējais CO₂ ekv. ir 27,4 t, savukārt rīkā *PAVE/LCA/LCCA* šī vērtība ir vairākas

reizes lielāka – 128,9 t. Tas pats novērojams arī citu minerālmateriālu veidiem. Salīdzinot pārējo kategoriju rezultātus (demontāža, izbūve, transports, asfalta ražošana un bitumens) starp rīkiem, iegūstamas līdzīgākas vērtības, uzrādot tikai 3,2 % atšķirību. Ņemot vērā to, ka, izstrādājot šo pētījumu, CO₂ ekv. un enerģijas patēriņa vērtības tika iegūtas, apskatot vairākus avotus, iespējams, ka rīkā *ECORCE M* izmantotās vērtības attiecībā uz minerālmateriāliem ir noteiktas pārāk zemes.

6.2. tabula

Rīka *PAVE/LCA/LCCA* iegūto rezultātu salīdzinājums ar rīku *ECORCE M* 1 km ceļa segai

	<i>PAVE/LCA/LCCA</i>	<i>ECORCE M</i>	Atšķirība, %
SEG, t	982,7	675,0	45,6
Enerģija, MJ	10 759 748	9 607 000	12,0

Neskatoties uz to, ka SEG vērtības starp *PAVE/LCA/LCCA* un *ECORCE M* būtiski atšķiras, lielākajā daļā kategoriju iegūtās vērtības ir ļoti līdzīgas, kas dod pārliecību par izstrādātā rīka funkcionalitāti un izmantoto ievaddatu kvalitāti. *Santos* iepriekš ir uzsvēris to, ka vides ietekmes aprēķināšanai starp alternatīvām ir ieteicams izmantot tikai vienu rīku tieši šo potenciāli būtisko atšķirību dēļ.

6.3. Izmaksu validācija ceļa segas konstruktīvajām kārtām

A un B scenārija konstruktīvo kārtu izmaksas, iegūtas ar rīku *PAVE/LCA/LCCA*, tika salīdzinātas ar VSIA “Latvijas Valsts ceļi” 2022. gada autoceļu būvniecības cenu katalogu. Rīkā *PAVE/LCA/LCCA* materiāli tiek izteikti kvadrātmetros (m²), Autoceļu būvniecības cenu katalogā – tonnās (t). Lai salīdzināšana būtu iespējama, Autoceļu būvniecības cenu kataloga izmaksas tika pārrēķinātas no m² uz t. Salīdzinājums redzams 6.3. tabulā.

Rezultāti parāda, ka visās pozīcijās iegūtās tonnas izmaksas ar rīku *PAVE/LCA/LCCA* ir mazākas nekā tās, kas minētas Autoceļu būvniecības cenu katalogā. Atšķirība ir diapazonā no 2,7 % līdz 20,4 %.

Izmaksas var ietekmēt konkurence un materiālu pieejamība konkrētajā reģionā, ko ne vienmēr ir iespējams precīzi novērtēt. Iegūtie rezultāti ir apmierinoši, ņemot vērā to, ka peļņas sadaļa analizē nav iekļauta, tādēļ no izmaksu validācijas pozīcijas var apgalvot, ka plānotie *LCCA* rezultāti būs ar augstu ticamības pakāpi.

PAVE/LCA/LCCA izmaksu salīdzinājums ar LVC Autoceļu būvniecības cenu katalogu

Konstruktīvā kārtā	Rīks <i>PAVE/LCA/LCCA</i>	Autoceļu būvniecības cenu katalogs 2022	Atšķirība, %
Seguma virskārta, €/t	86,6	105,1	-17,6
Seguma apakškārta, €/t	63,2	79,4	-20,4
Pamata kārtā ar šķembām, €/t	14,4	14,8	-2,7
<i>CBGM</i> , €/t	20,8	21,8	-4,6
Reciklēts pamats, €/t	3,0	3,6*	-16,7
Salizturīgā kārtā, €/t	11,8	10,7	-10,3

* Interpolēta 2021. gada cena.

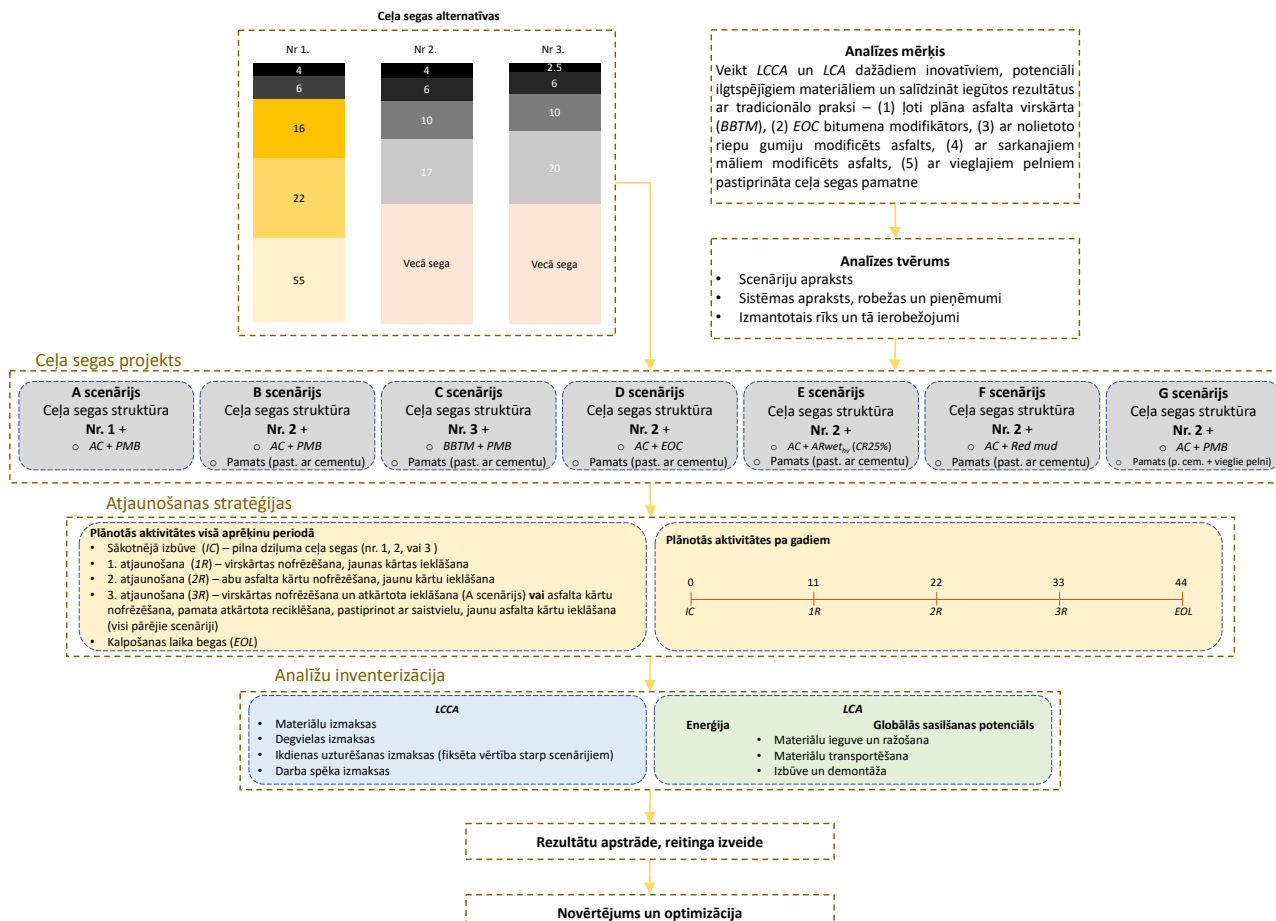
7. MATERIĀLU UN TEHNOLOĢIJU ILGTSPĒJAS NOVĒRTĒŠANA, IZMANTOJOT IZSTRĀDĀTO METODIKU UN RĪKU

Lai pārlicinātos par metodikas un rīka darbību, promocijas darba gaitā tika novērtēti šādu materiālu un tehnoloģiju ekonomiskie un vides parametri:

- *BBTM* dilumkārtā;
- *EOC* bitumena modifikators;
- ar nolietoto riepu gumiju modificēts bitumens pēc slapjās metodes;
- sarkanie māli bitumena modificēšanā;
- vieglie pelni ceļa segas pastiprināšanā;
- pilnas segas demontāžas un daļējas segas reciklēšanas tehnoloģijas.

7.1. Metodika

Plūsmas diagramma ar plānotajiem soļiem redzama 7.1. attēlā. Vispirms tika definēts analīzes mērķis tvērumam. Atbilstoši analīzes mērķim un tvērumam tika izstrādāti septiņi scenāriji, kuriem tika doti šādi apzīmējumi – A, B, C, D, E, F un G. A un B ir references scenāriji, ar kuriem plānots salīdzināt citos scenārijos iegūtos rezultātus. Starp visiem scenārijiem ir iespējamas trīs dažādas ceļa segas konstrukcijas (Nr. 1, Nr. 2 un Nr. 3). Pēc scenāriju konstruktīvo kārtu definēšanas tika izstrādātas atjaunošanas un uzturēšanas stratēģijas. Pēc tam, kad visi scenāriji tika definēti un ar to saistītie vides un ekonomiskie dati iegūti, izmantojot rīku *PAVE/LCA/LCCA*, tika veiktas *LCA* un *LCCA* analīzes, kas tika papildinātas ar individuāliem aprēķiniem specifisku procesu iekļaušanai galarezultātā. Pēc rezultātu iegūšanas plānota to apstrāde, reitinga izveide, novērtējums un optimizācija.



7.1. att. Analīzes veikšanas blokshēma.

7.1.1. ANALĪZES MĒRĶIS

Analīzes mērķis ir, izmantojot izstrādāto metodiku un rīku *PAVE/LCA/LCCA*, novērtēt dažādu patlaban reti lietotu vai ceļu būvei inovatīvu materiālu vides un ekonomiskos parametrus un salīdzināt tos ar tradicionālo praksi. Izmantotie materiāli/tehnoloģijas: (1) ļoti plāna asfalta virskārta (*BBTM*); (2) *EOC* bitumena modifikators; (3) ar noliektu riepu gumiju modificēts asfalts; (4) ar sarkanajiem māliem modificēts asfalts; (5) ar vieglajiem pelniem pastiprināta ceļa segas pamatne.

7.1.2. ANALĪZES TVĒRUMS

Aprēķina veikšanai tika definēta izmantotā sistēma, tās robežas un būtiskākie pieņēmumi. Visi vērā ņemtie procesi ir saskaņoti ar izstrādātā rīka *PAVE/LCA/LCCA* aprēķina iespējām, kas detalizētāk tika aprakstītas 5. nodaļā. Pētījumā ir šādi ietekmes novērtējuma indikatori:

- izmaksas, €;
- SEG, t;
- enerģijas patēriņš, MJ;
- materiālu daudzums, t.

7.1.2.1. FUNKCIONĀLĀ VIENĪBA

Analīzes funkcionālā vienība ir 1 km garš divvirzienu (viena josla katrā virzienā) ceļš. Ceļa platums – 7,5 m, nomales no aprēķina tiek izslēgtas. Analīzes periodā ir četri cikli (sākot no sākotnējās būvniecības līdz kalpošanas laika beigām). Projektēto segu nestspējas rādītāji ir maksimāli pietuvināti, lai izprojektētās konstrukcijas varētu uzskatīt par līdzvērtīgām. Esošā un plānotā satiksmes intensitāte ir nemainīga visos scenārijos.

7.1.2.2. SISTĒMAS APRAKSTS

Atbilstoši mērķim un aprēķina rīka iespējām tika noteiktas aprēķina sistēmas robežas. Analīze tika veikta pēc *cradle-to-cradle* pieejas, kas nozīmē, ka ietekme uz vidi tiek skaitīta, jau sākot ar materiālu iegūšanu (nafta, minerālmateriāli karjeros), līdz pat materiālu atkārtotai izmantošanai. Atkārtoti izmantotajiem materiāliem tiek iekļauta tikai demontāža un to transportēšana, ja tas ir nepieciešams.

Ceļa segas aprites ciklā ir vairāki posmi. Pastāv vairāki iedalījumi, šī pētījuma veikšanā tika izmantota četru ceļa dzīves cikla posmu pieeja. Šo posmu iedalījums redzams 7.1. tabulā, kas papildināts ar indikatoriem un procesiem, kas iekļauti katrā posmā.

Ceļa segas dzīves cikla posmi, aktivitātes un procesi, kas tika iekļauti analīzē

Ceļa segas dzīves cikla posmi	Procesi, kas tika iekļauti katrā dzīves cikla posmā
1. posms. Izejmateriālu iegūšana, kompozītmateriālu ražošana	Indikatori, kas tika iekļauti – izmaksas, enerģija, CO ₂ ekv., materiālu apjomi. <i>LCA</i> – ietver enerģiju, kas tiek patērēta, un CO ₂ ekv., kas tiek emitēts, lai iegūtu izejvielas. Demontētā materiālu transportēšana uz atbērtni vai asfalta rūpnīcu. Izejvielu transportēšana uz asfalta rūpnīcu un emulsijas ražotni. Asfalta, emulsijas un cementa ražošana. <i>LCCA</i> – materiālu, darbaspēka, degvielas izmaksas.
2. posms. Izbūve	Indikatori, kas tika iekļauti – izmaksas, enerģija, CO ₂ ekv., materiālu apjomi. <i>LCA</i> – izejvielu transportēšana no karjera uz objektu vai asfalta rūpnīcu. Materiālu transportēšana no asfalta rūpnīcas uz objektu. Izbūve – emulsijas izsmidzināšana, materiāla ieklāšana, blīvēšana u. c. darbi. Demontāžas procesi – frēzēšana, izrakšana. Nokalpojušo materiālu transportēšana uz atbērtni, asfalta rūpnīcu. <i>LCCA</i> – materiālu, darbaspēka, degvielas izmaksas.
3. posms. Eksploatācija	Indikatori, kas tika iekļauti – izmaksas, enerģija, CO ₂ ekv., materiālu apjomi. Ietver visus vides un ekonomikas procesus, sākot no izejvielu ieguves un ražošanas stadijas (1. posms) un izbūves (2. posms). Papildus tiek iekļautas nemainīgas uzturēšanas izmaksas pēc garantijas laika beigām līdz ceļa atjaunošanai (plaisu un bedrīšu labošanai).
4. posms. Kalpošanas laika beigas	Indikatori, kas tika iekļauti – materiālu apjomi.

7.1.3. SEGU SCENĀRIJI

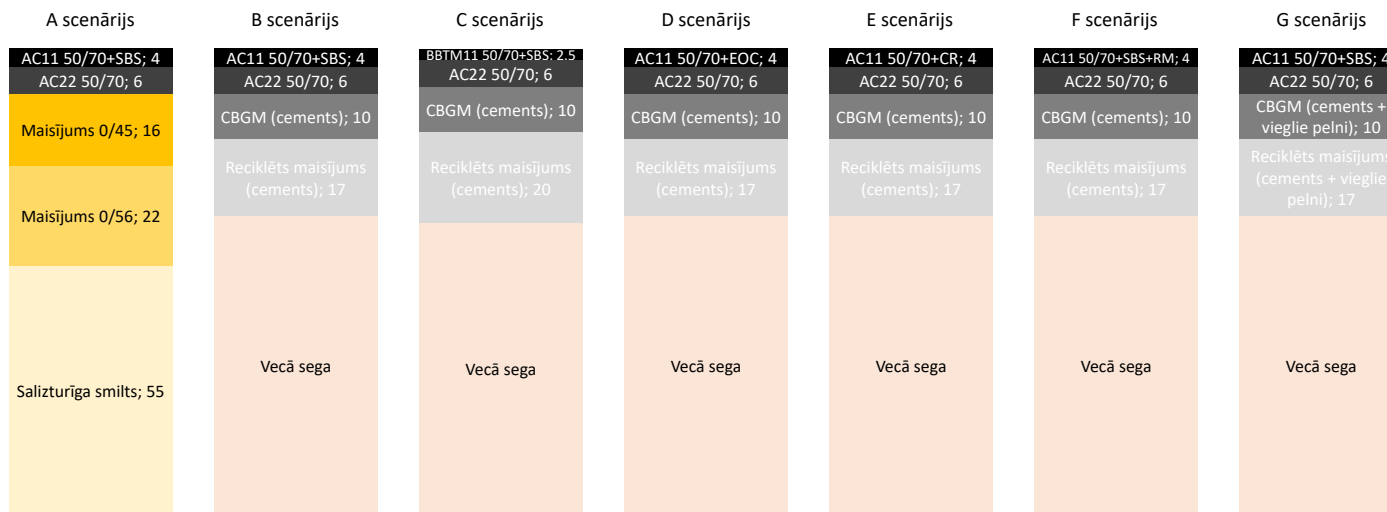
Atbilstoši promocijas darba mērķim tika izprojektētas septiņas dažādas ceļa segas konstrukcijas (7.2. att.). A scenārijs ir pilna ceļa segas konstrukcija, kurā esošajam ceļam ir paredzēts veikt vecās segas pilnīgu demontāžu un jaunas izbūvi. Šajā scenārijā paredzēts izbūvēt salizturīgo kārtu 55 cm biežumā, nesošās kārtas apakškārtu 22 cm biežumā, nesošās kārtas virskārtu 16 cm biežumā, bituminētu AC22 apakškārtu 6 cm biežumā un AC11 virskārtu, kurai izmantots *SBS PMB* 4 cm biežumā. Plānotā konstrukcija ir 103 cm bieža. Šādas konstrukcijas izbūve nerada riskus, tomēr prasa lielu materiālu apjomu, kas jāiegūst karjeros, jāpārvieta un jāizbūvē.

B, C, D, E, F un G scenārijā paredzēts izmantot veco konstrukciju un veikt daļēju tās reciklēšanu, iegūstot saistītu reciklēta maisījumu kārtu 17 cm biežumā (C scenārijā – 20 cm biežumā), *CBGM* kārtu 10 cm biežumā, bituminētu apakškārtu 6 cm biežumā un bituminētu virskārtu 4 cm biežumā (C scenārijā – 2,5 cm biežumā). Visos scenārijos visās no jauna būvētajās kārtās paredzēts izmantot dolomītu. Vienīgā atšķirība starp A un B scenāriju ir izvēlēta ceļa atjaunošanas tehnoloģija. A un B scenārijs ir uzskatāms par references scenāriju, un pārējie scenāriji pētījumā tika salīdzināti ar tiem.

C scenārijā paredzēts izmantot *BBTM* virskārtu 2,5 cm biežumā. Virskārtas biežuma samazinājumu paredzēts kompensēt ar par 3 cm biežāku reciklētās kārtas biežumu. D, E un F

scenārijā virskārtas atšķiras ar izmantotajiem modifikatoriem. Visos šajos scenārijos bitumena modificēšanai paredzēts izmantot ceļu bitumenu 50/70. D scenārijā paredzēts izmantot *EOC* modifikatoru bitumena modificēšanai. *EOC* modifikators paredzēts 4 % apjomā no kopējās saistvielas masas, identiski kā ar *SBS* modifikatoru virskārtā A, B un G scenārijā. E scenārijā paredzēts izmantot *ARwet_{hv}* (ar riepu gumiju modificēts asfalts pēc slapjās metodes) virskārtas tipu, kurā gumijas daudzums ir 15 % no kopējās saistvielas masas. F scenārijā papildus *SBS* modifikatoram paredzēts pievienot sarkanos mālus (*RM*) 7 % apmērā no saistvielas kopējās masas (bitumens un *SBS*).

G scenārijā atšķirībā no pārējiem ir paredzēts veikt ceļa segas pamata kārtu daļēju pastiprināšanu, izmantojot vieglos pelnus. Vieglos pelnus ir paredzēts izmantot, lai par 50 % samazinātu izmantotā cementa daudzumu. Vieglie pelni nespēj saistīt kārtu tikpat efektīvi kā cements, līdz ar to tie jāizmanto lielākā apjomā.



7.2. att. Plānoto segu konstrukciju salīdzinājums.

Visos scenārijos virskārtai paredzēts izmantot ceļa bitumenu 50/70. Jāatzīmē, ka no bitumena ražotājiem nav pieejami uzticami dati par polimēru klātbūtni, modificēšanas procesa ietekmi uz vidi un enerģijas patēriņu. Tādēļ šīs analīzes ietvaros tika pieņemts, ka A, B, C un G scenārijā izmantotā *PMB* saistviela tiks iegūta līdzīgos apstākļos kā citiem modifikatoriem modificētās virskārtas (*EOC*, sarkanie māli, drupināta riepū gumija).

AC asfalta tipam paredzētais kopējais saistvielas saturs (kopā ar modifikatoru) ir 5,2 %, *BBTM* – ,0 %, *ARwet_{hv}* – 6,2 %. *ARwet_{hv}* gadījumā gan jāņem vērā, ka faktiskais bitumena saturs ir zemāks – 5,27 %.

ARwet_{hv} saistvielai atbilstoši autora publikācijas norādījumiem ir plānots pievienot *WMA* piedevu asfalta maisījuma izgatavošanas temperatūras samazināšanai par 20 °C. Tādējādi visos scenārijos virskārtas izgatavošanas temperatūra ir vienāda – 160 °C.

Visos scenārijos izmantotā seguma apakškārta ir identiska. Izmantotais bitumena tips tajā ir 50/70, saistvielas saturs – 3,8 %, asfalta maisījuma izgatavošanas temperatūra – 160 °C.

Tika pieņemts, ka visiem maisījumiem ir vienādas tūluma īpašības.

7.1.4. ATJAUNOŠANAS UN UZTURĒŠANAS PLĀNS

Saskaņā ar atjaunošanas stratēģijām visos scenārijos tika izstrādāts detāls atjaunošanas un uzturēšanas plāns (7.3. att.). Tikai A scenārijā ir paredzēta pirmā atjaunošanas stratēģija, savukārt pārējos scenārijos (B, C, D, E, F, G) – otrā stratēģija.

Year	Reconstruction plan	Acronym of mayor construction	Scenario A	Scenarios B, C, D, E, F, G
0	2023	IC	Initial construction	Initial construction
1	2024		Warranty	Warranty
2	2025		Warranty	Warranty
3	2026		Warranty	Warranty
4	2027		Warranty	Warranty
5	2028		Warranty	Warranty
6	2029		Maintenance	Maintenance
7	2030		Maintenance	Maintenance
8	2031		Maintenance	Maintenance
9	2032		Maintenance	Maintenance
10	2033		Maintenance	Maintenance
11	2034	1R	Surface Relaying (SR)	Surface Relaying (SR)
12	2035		Warranty	Warranty
13	2036		Warranty	Warranty
14	2037		Warranty	Warranty
15	2038		Maintenance	Maintenance
16	2039		Maintenance	Maintenance
17	2040		Maintenance	Maintenance
18	2041		Maintenance	Maintenance
19	2042		Maintenance	Maintenance
20	2043		Maintenance	Maintenance
21	2044		Maintenance	Maintenance
22	2045	2R	Surface-Binder- Relaying (SBR)	Surface-Binder- Relaying (SBR)
23	2046		Warranty	Warranty
24	2047		Warranty	Warranty
25	2048		Warranty	Warranty
26	2049		Maintenance	Maintenance
27	2050		Maintenance	Maintenance
28	2051		Maintenance	Maintenance
29	2052		Maintenance	Maintenance
30	2053		Maintenance	Maintenance
31	2054		Maintenance	Maintenance
32	2055		Maintenance	Maintenance
33	2056	3R	Surface Relaying (SR)	Recycling (R) and laying of asphalt courses
34	2057		Warranty	Warranty
35	2058		Warranty	Warranty
36	2059		Warranty	Warranty
37	2060		Maintenance	Warranty
38	2061		Maintenance	Warranty
39	2062		Maintenance	Maintenance
40	2063		Maintenance	Maintenance
41	2064		Maintenance	Maintenance
42	2065		Maintenance	Maintenance
43	2066		Maintenance	Maintenance
44	2067	EOL	-	-

7.3. att. Atjaunošanas un uzturēšanas plānu scenāriji (izvilums no rīka *PAVE/LCA/LCCA*).

Atbilstoši analīzes mērķim tika pieņemts, ka asfalta kārtu kalpošanas laiks visos scenārijos ir identisks. Iemesls šādai pieejai ir uzticamu datu neesamība par izvēlēto materiālu un tehnoloģiju kalpošanas laiku. Šāda pieeja dod iespēju vienlīdzīgi novērtēt pamata ietekmes, nedodot kādam no materiāliem priekšrocību. Vidējais determinētais kalpošanas laiks vienam ciklam visos scenārijos tika noteikts 11 gadi. Šāds cikla garums tika izvēlēts, konsultējoties ar VSIA "Latvijas Valsts ceļi" un Rīgas Tehniskās universitātes ceļu būves ekspertiem. Aprēķina vienkāršošanas nolūkos tiek pieņemts, ka visi atjaunošanas darbi aizņem tieši vienu gadu. Analīzes periods sākas ar sākotnējās konstrukcijas izbūvi 2023. gadā. Garantija pārbūves gadījumā tika pieņemta – pieci gadi, asfalta kārtas(u) nomaiņas gadījumā – trīs gadi.

7.1.5. FAKTORI UN PROCESI, KAS NETIKA IETVERTI ANALĪZĒ

Analīzes veikšanā netika ietverti šādi faktori un procesi:

- iekārtu, rūpnīcu, ofisu izbūve, apkope, uzturēšana;
- horizontālās un vertikālās ceļa zīmes, barjeras, luksofori un citas konstrukcijas;
- darbaspēka, aprīkojama un iekārtu mobilizācija uz objektu un atpakaļ;
- ceļu tīkla pārvaldītāja un būvnieka administratīvās izmaksas un to ietekme uz vidi;
- ar būvniecības procesu tieši nesaistīto darbinieku atalgošana;
- atkritumi, blakusprodukti, kas rodas, veicot izejvielu ieguvī, materiālu ražošanu;
- ceļa lietotāju izmaksas.

7.1.6. PIENĒMUMI

Pirms šīs analīzes veikšanas tika pieņemts, ka:

- nepastāv funkcionalitātes atšķirības dažādos scenārijos visā analīzes perioda laikā;
- iestrādes procesi dažādos scenārijos neatšķiras;
- atjaunošana aizņem vienu pilnu gadu;
- neatkarīgi no ceļa segas tipa vai konstruktīvo kārtu atšķirībām visos scenārijos pieņemtas identiskas gada vidējās uzturēšanas izmaksas;
- aprēķinā netiek iekļautas izmaksas un potenciālās ietekmes uz vidi garantijas laikā;
- asfalta rūpnīcas produktivitāte neatšķiras, izņemot ar gumiju modificēta bitumena izmantošanas gadījumā;
- bitumena modifikācijas iekārtas atrodas blakus asfalta rūpnīcai;
- tehnikas vienību operatoram nav ietekmes uz tās produktivitāti;
- viegļie pelni kā materiāls ir bezmaksas, izņemot to transportēšanu;
- viegļo pelnu izmantošana ceļa segas pamatā nesamazina kalpošanas laiku;
- reciklēts asfalts vai reciklēta sega kā materiāls ir bezmaksas, izņemot to reciklēšanu un/vai transportēšanu.

7.2. Rezultāti un diskusija

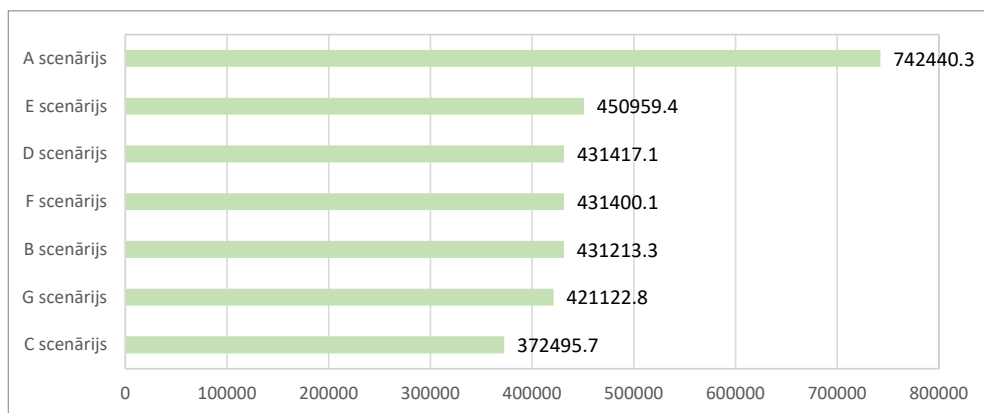
7.2.1. DETERMINĒTĀS PIEEJAS REZULTĀTU APKOPOJUMS

Izmaksu rezultātu apkopojums redzams 7.4. attēlā. Iegūtie *LCCA* rezultāti parāda, ka A scenārijā, kurā paredzēta pilna pārbūve, veicot vecās segas pilnīgu demontāžu, ir ievērojami augstākas dzīves cikla izmaksas plānotajā analīzes periodā nekā citos scenārijos, kuros paredzēta vecās segas pastiprināšana. Galvenais iemesls šādām izmaksām ir augstākas demontāžas un jaunu materiālu izmaksu pozīcijas. Izmaksu pieaugums A scenārijā, salīdzinot ar B (otrs references scenārijs), ir 72,2 %. Šāds pieaugums ir visnotaļ ievērojams. Tajā pašā laikā jāņem vērā, ka vecās segas pilnīga vai daļēja atstāšana un tās reciklēšana negarantē, ka tās kalpošanas laiks būs līdzvērtīgs pilnīgi jaunas konstrukcijas kalpošanas laikam, tādējādi pasūtītājam ir jāizvērtē, kāda tehnoloģija ir piemērojama izvēlētajam ceļam, izvēli pamatojot ar aprēķiniem.

Otras augstākās izmaksas ir E scenārijā, kas saistīts ar augstākām bitumena modificēšanas izmaksām, siltās asfalta piedevas izmantošanu, augstāku bitumena saturu un rūpnīcas efektivitātes samazināšanos. Rezultātā šīs komponentes 44 gadu laikā rada izmaksu pieaugumu par 4,6 %. No visiem iepriekš minētajiem komponentiem vislielāko izmaksu sadārdzinājumu rada asfalta rūpnīcas efektivitātes samazināšanās. Tas saistīts ar augstākas viskozitātes saistvielu, ko asfalta rūpnīcām ir apgrūtināši transportēt caur sistēmu un iesmidzināt maisīšanas bunkurā. Potenciāli šis apgrūtinājums dažādām asfalta rūpnīcām var atšķirties, un šo trūkumu ir iespējams atrisināt, pilnīgi vai daļēji veicot uzlabojumus asfalta rūpnīcas aprīkojumā.

Izmaksu pieaugums ir arī D un F scenārijā. Tomēr jāteic, ka šo scenāriju izmaksu pieaugums ir pavisam niecīgs, tas nav pat 0,1 %, līdz ar to D un F scenārijā dzīves cikla izmaksas aprēķina periodam uzskatāmas par identiskām ar B references scenāriju.

Izmaksu samazinājums, salīdzinot ar B references scenāriju, ir C un G scenārijā. G scenārijā ir par 2,3 % zemākas dzīves cikla izmaksas nekā B references scenārijā. Tas saistīts ar vieglo pelnu izmantošanu G scenārijā. Konkrētajā aprēķinā vieglie pelni samazina cementa patēriņu par 50 %, kā arī jauna minerālmateriāla patēriņu par 8,8 %. C scenārijā ir viszemākās dzīves cikla izmaksas, tās ir par 13,6 % zemākas nekā B scenārijā. Galvenais iemesls izmaksu samazinājumam ir *BBTM* virskārta, kas ir par 37,5 % plānāka nekā citos scenārijos. Jāatzīmē, ka plānāka virskārta C scenārijā tika kompensēta ar 3 cm biezāku pamata apakškārtu.



7.4. att. Izmaksu determinētās pieejas rezultātu apkopojums visos scenārijos.

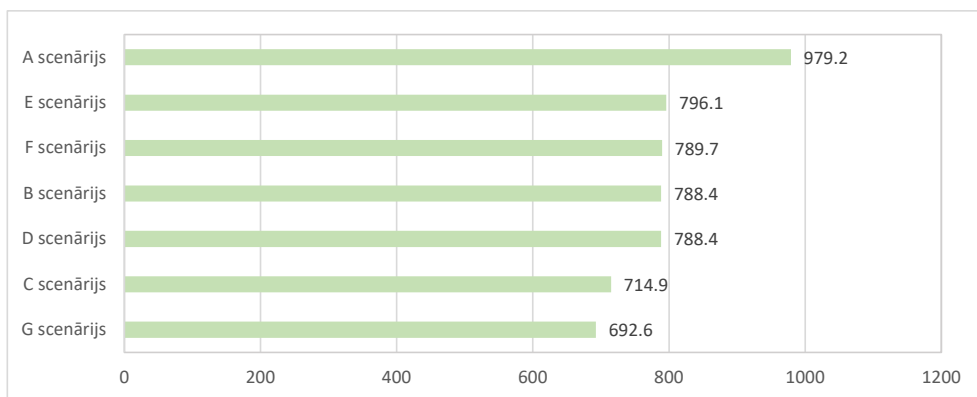
SEG emisiju determinētās pieejas rezultātu apkopojums redzams 7.5. attēlā. *LCA* rezultāti uzrāda, ka A scenārijā ir par 24,2 % augstākas dzīves cikla SEG plānotajā analīzes periodā nekā B scenārijā. Interesanti, ka A scenārijā ir par 14,5 % mazākas SEG izejmateriālu pozīcijā, kas saistīts ar to, ka, lai gan kopējo jauno materiālu daudzums A scenārijā ir ievērojami augstāks, tomēr B scenārijā visā dzīves ciklā divreiz tiek veikta pamata reciklēšana, pievienojot cementu (tā ražošanas procesā tiek emitēts ievērojams daudzums SEG). Neskatoties uz to, A scenārijā tiek radītas būtiski lielākas emisijas materiālu transportēšanā un demontāžā – attiecīgi par 204 % un 152 % vairāk nekā B scenārijā, un tā rezultātā būtiski palielinās dzīves cikla kopējās SEG emisijas.

Lielāks dzīves cikla SEG daudzums tiek uzrādīts arī E scenārijā. E scenārijā šīs emisijas visā dzīves ciklā ir par 0,98 % lielākas nekā B scenārijā. Emisiju pieaugumu rada bitumena modificēšanas process, *WMA* ķīmiskā piedeva un nedaudz augstāks bāzes bitumena saturs.

F scenārijā SEG emisiju pieaugums ir par 0,16 % lielāks, salīdzinot ar B references scenāriju. Šis pieaugums saistīts ar lielākām emisijām bitumena modificēšanas procesā. Dodot iespēju utilizēt sarkanos mālus un samazinot tradicionālā aizpildītāja nepieciešamo daudzumu, šāds pieaugums ir niecīgs 44 gadu aprēķina periodā.

D scenārijā SEG emisijas ir identiskas, salīdzinot ar B scenāriju. Tas saistīts ar to, ka dažādiem bitumena modifikatoriem – *EOC* un *SBS* – CO_2 ekv. Vērtības neatšķiras.

Savukārt C un G scenārijā ir vērojams SEG emisiju samazinājums. C scenārijā tiek uzrādīta otra zemākā CO_2 ekv. Vērtība, kam pamatā ir plānākas virskārtas izmantošana. F scenārijā savukārt tiek uzrādīts vislielākais SEG emisiju samazinājums, un tā iemesls ir par 50 % mazāks cementa daudzums visā ceļa segas dzīves ciklā. Viegļajiem pelniem, ja tie spēj efektīvi aizstāt cementu, neradot citu bīstamību videi, ir milzīgs potenciāls SEG emisiju samazināšanā, G scenārijā uzrādot viszemāko CO_2 ekv. Vērtību no visiem scenārijiem un pat par 12,2 % mazāku CO_2 ekv. Vērtību visā aprēķina periodā nekā B references scenārijā.

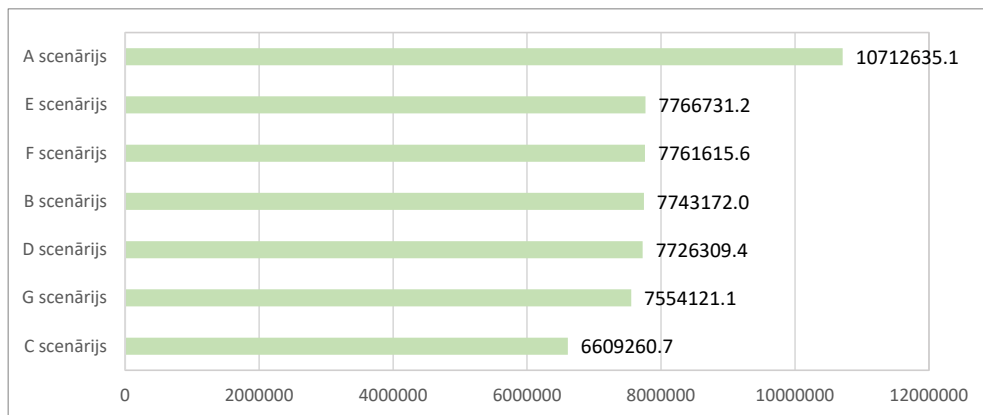


7.5. att. SEG emisiju determinētās pieejas rezultātu apkopojums visos scenārijos.

Enerģijas patēriņa determinētās pieejas rezultātu apkopojums redzams 7.6. attēlā. Līdzīgi izmaksām un SEG emisijām, arī šeit augstākās vērtības tiek uzrādītas A referenes scenārijā, kurā paredzēta pilna dziļuma vecās segas demontāža un jaunas izbūve. Kopumā A scenārijā ir par 38,3 % augstāks enerģijas patēriņš nekā otrajā referenes scenārijā – B scenārijā.

Enerģijas patēriņa pieaugums, salīdzinot ar B scenāriju, ir arī E un F scenārijā, attiecīgi par 0,30 % un 0,24 %. E un F scenārijā dzīves cikla enerģijas pieaugums saistīts ar lielāku enerģijas patēriņu bitumena modificēšanas procesā, neskatoties uz to, pieaugums ir salīdzinoši mazs.

Savukārt C, D un G scenārijā enerģijas patēriņš samazinās, salīdzinot ar B referenes scenāriju. Vislielākais samazinājums ir C scenārijā, tas ir, 14,6 %, kas saistīts ar plānāku asfalta virskārtu. Bitumena iegūšanai tiek patērēta liels enerģijas daudzums, tādējādi, samazinot kopējo asfalta kārtu biezumu, ir iespējams būtiski samazināt kopējās enerģijas patēriņa vērtības. G scenārijā, kurā cements tiek daļēji aizstāts ar pelniem, ir iespējams par 2,4 % samazināt kopējo enerģijas patēriņu, salīdzinot ar B scenāriju. Vismazākais samazinājums ir D scenārijā – 0,21 %. Šis samazinājums saistīts ar *EOC* bitumena modifikatora izmantošanu. Elastomēra vides deklarācijas dati liecina, ka *EOC* modifikatora iegūšanai ir nepieciešams mazāk enerģijas, salīdzinot ar tradicionālo *SBS* modifikatoru.



7.6. att. Enerģijas patēriņa determinētās pieejas rezultātu apkopojums visos scenārijos.

7.2.2. VARBŪTISKĀS ANALĪZES REZULTĀTU APKOPOJUMS

Varbūtiskās pieejas rezultātu ģenerēšanai tika izmantota Montekarlo simulācija. Katrā scenārijā tika ģenerētas 2000 vērtības jeb iterācijas. Sadalījumu veidošanā papildus tika izmantoti šādi parametri:

- izmaksu ģenerēšanas intervāls – 10 000 €;
- SEG ģenerēšanas intervāls – 2 t;
- enerģijas patēriņa ģenerēšanas intervāls – 20 000 MJ;
- standartnovirze – trīs gadi;
- minimālās un maksimālās vērtības no vidējā prognozētā kalpošanas laika – pieci gadi.

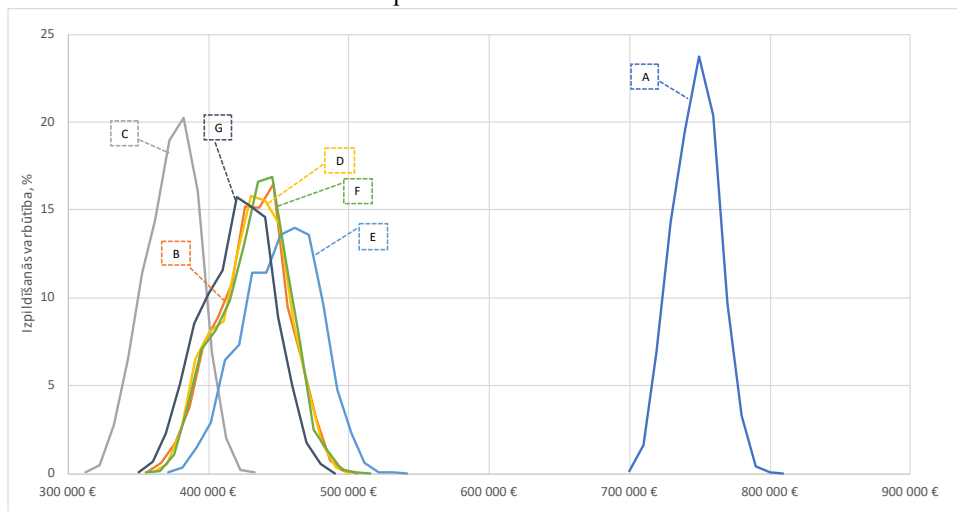
Varbūtiskās analīzes kopējo izmaksu rezultātu apkopojums redzams 7.7. attēlā. Visi sadalījumi parāda simetrisku normālsadalījumu. Visi varbūtiskie sadalījumi pārklājas, izņemot sadalījumu A scenārijā. Rezultāti parāda, ka augstākās izmaksas ir A scenārijā, kurās tās arī tādās būs neatkarīgi no kalpošanas laika garuma. Tā pamatā ir augstās sākotnējās konstrukcijas izbūves izmaksas. Kā jau iepriekš tika minēts, augstās izmaksas saistītas ar pilna dziļuma segas pārbūvi, kas ietver lielu demontējamā materiāla un jauna materiāla izmantošanas daudzumu. Šajā scenārijā lielāko izmaksu daļu veido sākotnējās konstrukcijas izbūve, tāpēc izmaksas visā dzīves ciklā ir iespējams prognozēt ar samērā augstu ticamību. Šajā scenārijā ticamākā intervāla izpildīšanās varbūtība ir tuvu 25 %.

Otras augstākās izmaksas tiek prognozētas E scenārijā, kurā tiek izmantota ar gumiju modificēta asfalta virskārta pēc slapjās metodes. Tas, ka ar gumiju modificēta asfalta izmaksas ir augstākas, tika apstiprināts arī iepriekšējā autora publikācijā, kur tika secināts, ka šāda tipa ceļa segai ir jākalpo ilgāk, lai tai būtu zemākas vidējās gada dzīves cikla izmaksas.

B, D un F scenārijā izmaksu sadalījums ir līdzīgs, nedaudz atšķiroties izpildīšanās varbūtībai ticamākajām izmaksām, kas ir 1,05 % robežās. No tā var secināt, ka *EOC* vai sarkano mālu izmantošana nesadārdzina kopējās izmaksas, salīdzinot ar tradicionālo praksi, kur kā bitumena modifikators tiek izmantots *SBS* (B scenārijā). Sarkanie māli ir kā papildu bitumena modifikators *SBS*, tādēļ šajā scenārijā tie varētu uzlabot ekspluatācijas īpašības izmantotajai virskārtai, salīdzinot ar citiem scenārijiem, kuros paredzēts tikai viens modifikators.

Otras zemākās izmaksas ir G scenārijā, kurā ar cementu pastiprinātajās kārtās tas tiek izmatots par 50 % mazāk, to aizstājot/kompensējot ar vieglajiem pelniem.

Viszemākās izmaksas no visiem scenārijiem ir C scenārijā, kur virskārtā tiek izmantots *BBTM* asfalta tips kombinācijā ar 3 cm biežāku reciklētā maisījuma kārtu ceļa segā. Šī scenārija ticamākā izmaksu papildīšanās intervāla varbūtība arī ir augstāka – virs 20 %, kas saistīts ar zemākiem nākotnes izdevumiem tieši plānākas kārtas frēzēšanas un atkārtotas izbūves darbos.



7.7. att. Kopējo izmaksu varbūtiskās pieejas rezultātu apkopojums.

SEG emisiju apkopojums redzams 7.8. attēlā. Visi normālsadalījumi savstarpēji pārklājas. Arī šeit lielākās CO₂ ekv. Vērtības ir A scenārijā. Atšķirībā no izmaksu varbūtiskā sadalījuma ilgākā kalpošanas laikā A scenārijā var būt pat mazāka gada vidējā CO₂ ekv. Vērtība nekā jebkuram citam scenārijam.

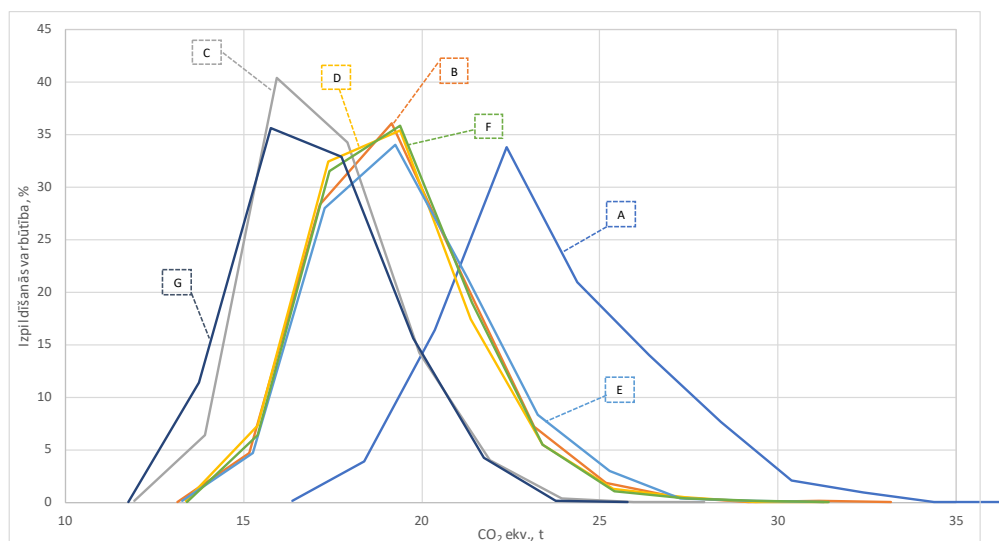
Ļoti līdzīgs varbūtiskais sadalījums SEG pozīcijā ir B, D un F scenārijā. Šo scenāriju galvenā atšķirība ir izpildīšanās varbūtība ticamākajam intervālam, tā ir 0,65 % robežās. Līdz ar to var teikt, ka gan *EOC* modifikatoram, gan sarkanajiem māliem nav negatīva (lielāka) SEG emisiju ietekme uz kopējo ceļa segu, salīdzinot ar tradicionālo praksi ar *SBS* bitumena modifikatoru virskārtai.

E scenārijā, kurā bitumens tiek modificēts ar gumijas granulām pēc slapjās metodes, CO₂ ekv. Vērtību sadalījums ir nedaudz zemāks nekā iepriekš minētajā B, D un F scenārijā. Tajā pašā laikā atšķirība starp ticamāko intervālu vidējām vērtībām ir maza – 0,3–2,1 %.

Otrs zemākais CO₂ ekv. Ir C scenārijā, kurā kā virskārta tiek izmantots *BBTM* asfalta tips. *BBTM* virskārta ir par 37,5 % plānāka, salīdzinot ar virskārtām citos scenārijos. Plānāka virskārta ļauj samazināt jauna bitumena un minerālmateriālu nepieciešamo daudzumu, tādējādi samazinot arī gada CO₂ ekv. Daudzumu.

Viszemākais CO₂ ekv. Ir G scenārijā, kurā par 50 % ir samazināts cementa patēriņš, to daļēji aizstājot ar vieglajiem pelniem. Šajā scenārijā varbūtiskais sadalījums neuzrāda tikai vienu izteikti ticamāko intervāla CO₂ ekv. Vērtību, bet divus ar augstu izpildīšanās varbūtību. Interesanti, ka iespēja izpildīties diviem ticamākajiem intervāliem ir 68,6 %. Neskatoties uz

acīmredzamo vieglo pelnu pozitīvo ietekmi uz CO₂ ekv. Vērtību samazināšu, to izmantošana ir rūpīgi jāizvērtē lielās kvalitātes mainības dēļ, kas var negatīvi ietekmēt konstrukcijas kopējo kalpošanas laiku.



7.8. att. SEG varbūtiskās pieejas rezultātu apkopojums.

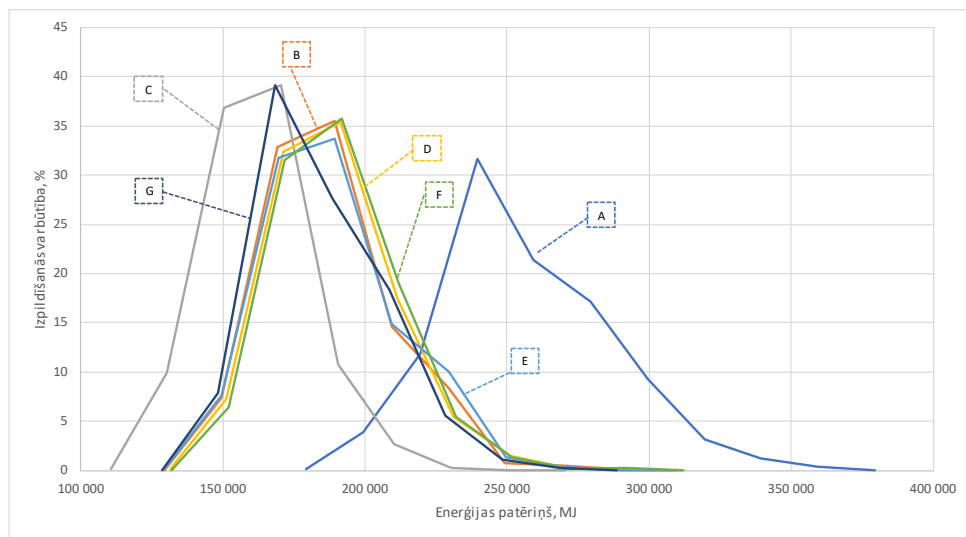
Enerģijas patēriņu rezultātu apkopojums redzams 7.9. attēlā. Tāpat kā izmaksu un SEG emisiju gadījumā, arī lielākās enerģijas patēriņa vērtības ir A scenārijā. Visi varbūtiskie sadalījumi savstarpēji pārklājas. Tādēļ pastāv iespēja, ka A scenārijā var būt pat zemāks gada vidējais patēriņš (salīdzinot ar B, D, E, F un G scenāriju), un šī iespēja ir aptuveni 20 %. A scenārijā iegūtais sadalījums veido zemāku, bet plašāku iegūstamo vērtību iestāšanās diapazonu.

Līdzvērtīgs varbūtiskais sadalījums ir arī B, D un F scenārijā. Šo scenāriju galvenā redzamā atšķirība ir izpildīšanās varbūtība ticamākajam intervālam – 0,35 % robežās. Līdz ar to var teikt, ka gan *EOC* modifikatoram, gan sarkanajiem māliem ar *SBS* ir maza enerģijas patēriņa ietekme uz kopējo ceļa segu, salīdzinot ar tradicionālo praksi asfalta virskārtai izmantot tikai ar *SBS* modificētu bitumenu.

E scenārijā, kurā bitumens tiek modificēts ar riepu gumiju, varbūtiskais sadalījums ir nedaudz zemāks nekā iepriekš minētajā B, D un F scenārijā, tajā pašā laikā atšķirība starp ticamākajām vērtībām ir tikai 1,7 % robežās.

Otrs zemākais enerģijas patēriņš ir G scenārijā, kurā par 50 % ir samazināts cementa patēriņš vieglo pelnu izmantošanas dēļ. G scenārijā ticamākā varbūtiskā sadalījuma intervāla vidējā vērtība ir gandrīz identiska ar C scenāriju. Sadalījums G scenārijā gan ir plašāk vērsts uz augstāku enerģijas patēriņu nekā C scenārijā.

Viszemākais enerģijas patēriņš ticamākā intervāla vidējai vērtībai ir C scenārijā, kurā kā virskārta tiek izmantots *BBTM* asfalta tips. Līdzīgi kā B, D, E un F scenārijā, CO₂ ekv. Pozīcijā C scenārijā nav izteikta viena ticamākā intervāla, bet gan divi augstas ticamības intervāli ar 76,1 % kopējo piepildīšanās varbūtību. Bitumena iegūšana patērē daudz enerģijas, tāpēc, izmantojot plānāku virskārta, ir iespējams būtiski samazināt šo patēriņu. Rezultātā *BBTM* virskārta ļauj samazināt gan enerģijas patēriņu, gan neatjaunojamo resursu izmantošanas apjomu.



7.9. att. Enerģijas patēriņa varbūtiskās pieejas rezultātu apkopojums.

7.2.3. MATERIĀLU IZMANTOŠANAS APJOMS

Visos scenārijos tika aprēķināts izmantoto materiālu apjoms (7.2. tab.). Plašāk par materiālu izmantošanas apjomiem var lasīt pilna teksta promocijas darbā. A references scenārijā ir par 17,6 % mazāk patērētu minerālmateriālu asfalta kārtās nekā otrajā references scenārijā – B scenārijā. Minerālā aizpildītāja un bitumena pozīcijās A scenārijā arī redzams samazinājums – attiecīgi par 11,4 % un 16,6 %. Tāpat A scenārijā netiek izmantots cements atšķirībā no citiem scenārijiem. A scenārijā tiek izmantots liels apjoms jaunu minerālmateriālu pamata kārtās – smilts 12 893,9 t, šķembu maisījums 9810,2 t.

Kopējais minerālmateriālu samazinājums segumā C scenārijā ir 17,3 %, salīdzinot ar B scenāriju. Plānāka virskārta samazina nepieciešamo minerālmateriāla un bitumena daudzumu attiecīgi par 37,5 % un 40 %. Tāpat C scenārijā par 12,2 % vairāk tiek izmantots materiāls no vecās segas, salīdzinot ar B, D, E, F un G scenāriju.

Materiālu apjoma atšķirību B un D scenārijā nav. Vienīgā atšķirība ir izmantotais bitumena modifikators (*SBS* vai *EOC*), kam nav ietekmes uz materiālu apjomiem.

Riepu gumijas izmantošana bitumena modificēšanā izslēdz nepieciešamību ražot bitumena modifikatoru. Šāda modifikatora izmantošana veicina aprites ekonomiku un dod iespēju utilizēt 26,93 t riepu gumijas, kas ir vairāk nekā 50 t riepu uz 1 km ceļa.

F scenārijā atšķirībā no citiem tiek izmantoti divi bitumena modifikatori – *SBS* un sarkanie māli. Sarkanu mālu izmantošana bitumena modificēšanā ļauj utilizēt 10,53 t šī blakusprodukta.

G scenārijā vieglo pelnu izmantošana ļauj samazināt nepieciešamā cementa daudzumu par 50 % jeb 142,4 t. Lai panāktu līdzvērtīgu pastiprināšanas efektu, vieglie pelni tiek izmantoti ievērojami vairāk nekā cements. Tas dod iespēju 1 km garā posmā utilizēt 949,6 t šī produkta. Pelnu izmantošana par 8,8 % samazina nepieciešamību pēc jauna minerālmateriāla pamatā.

7.2. tabula

No jauna izmantoto materiālu daudzums visa dzīves cikla laikā

Pozīcija	A scenārijs	B scenārijs	C scenārijs	D scenārijs	E scenārijs	F scenārijs	G scenārijs
Jauns minerālmateriāls asfalta kārtās, t	4725,2	5732,3	4737,5	5732,3	5730,3	5730,3	5732,3
Jauns minerālais aizpildītājs asfalta kārtās, t	160,9	181,7	137,9	181,7	181,7	171,2	181,7
Jauns minerālmateriāls nesošajā kārtā, t	9810,2	2441,9	2435,17	2441,9	2441,9	2441,9	2228,0
Jauns minerālmateriāls papildkārtā, t	12 893,9	0	0	0	0	0	0
Minerālmateriāls no vecās segas, t	0	6768,9	7597,1	6768,9	6768,9	6768,9	6175,7
Svaigs bitumens (bez modifikatoriem), t	224,9	269,72	211,4	269,72	277,8	269,72	269,72
Rūpnieciski ražots bitumena modifikators, t	6,08	6,08	3,61	6,08	0	6,08	6,08
Drupināta riepu gumija, t	0	0	0	0	26,93	0	0
Sarkanie māli, t	0	0	0	0	0	10,53	0
Cements, t	0	284,9	307,92	284,9	284,9	284,9	142,4
Vieglie pelni, t	0	0	0	0	0	0	949,6

7.2.4. REITINGA IZVEIDE

Aprakstītos rezultātus iespējams sagrupēt un izveidot scenāriju rangu tabulu (7.3. tab.). Šī pētījuma gaitā tas tika darīts, balstoties tikai determinētās pieejas rezultātos. Izstrādātajā promocijas darbā nav informācijas, kā interpretēt varbūtiskās analīzes rezultātus reitinga izveidei, tas tikai piedāvā tādus iegūt, izmantojot rīku *PAVE/LCA/LCCA*.

Visos scenārijos ir četras kategorijās: (1) gada izmaksas; (2) gada enerģijas patēriņš; (3) gada SEG; (4) materiālu izmantošanas apjomi. Gada rezultāti tiek iegūti, dalot dzīves cikla kopējo vērtību ar analīzes periodu. Katra kategorijā tiek ierindota reitinga pozīcijā no 1 (augstākā) līdz 7 (zemākā). Gada izmaksu kategorija visaugstākajā pozīcijā ir C scenārijā, kam seko G un B scenārijs. Gada enerģijas patēriņa kategorija visaugstākajā pozīcijā ir G scenārijā, kam seko C un D. Gada SEG kategorija visaugstākajā pozīcijā ir C scenārijā, kam seko G un D scenārijs. Materiālu izmantošanas apjomu kategorijā vietu sadalījums vairs nav tik viennozīmīgs, jo katrā scenārijā šī kategorija dod kādu noteiktu ieguvumu. Tādēļ, lai varētu izveidot rangu, tika vērtēts no Latvijai izdevīgām pozīcijām, piemēram, kādu materiālu

utilizēšanā ir vietējs pieprasījums. Līdz ar to šī kategorija visaugstākajā pozīcijā ir G scenārijā, kam seko C un E scenārijs.

No visiem scenārijiem augstāko vietu reitingā ieņem C un G scenārijs. C scenārijs ieņem pirmo vietu gada izmaksu un SEG kategorijā, otro vietu gada enerģijas patēriņa un materiālu izmantošanas kategorijā. Savukārt G scenārijs ieņem pirmo vietu gada enerģijas patēriņa un materiālu izmantošanas kategorijā, otro vietu gada izmaksu un SEG kategorijā. Viszemāko vietu visās kategorijās ieņem A scenārijs, kurā izmantota pilna dziļuma vecās segas demontāža un jaunās izbūve. Līdz ar to šīs tehnoloģijas izmantošana ir kritiski izvērtējama, jo tā ir gan dārga, gan videi nedraudzīga. Ja tomēr tā ir jāveic, tad būtu ieteicams meklēt risinājumu, lai uzlabotu ilgtspēju, piemēram, iekļaujot kādu no blakusproduktiem vai industriālajiem atkritumiem asfaltu kārtu ražošanā.

7.3. tabula

Scenāriju reitings

Scenārijs	Gada izmaksas	Gada enerģijas patēriņš	Gada SEG	Materiālu izmantošanas apjomi
A	7	7	7	7
B	3	4	4	6
C	1	2	1	2
D	5	3	3	5
E	6	6	5	3
F	4	5	6	4
G	2	1	2	1

7.2.5. NOVĒRTĒJUMS UN OPTIMIZĀCIJA

Izmantotajiem materiāliem un tehnoloģijām nav noteikti kādi ierobežojumi, tādēļ visi scenāriji praksē būtu īstenojami. Rezultāti gan iezīmē to, ka potenciāli kombinācija starp izmantotajiem materiāliem un tehnoloģijām dažādos scenārijos būtu visilgtspējīgākais risinājums. *BBTM* virskārtas izmantošana (C scenārijs) kombinācijā ar drupinātu riepu gumiju modificētu bitumenu (E scenārijs) un daļēja cementa aizstāšana ar vieglajiem pelniem pamata pastiprināšanā (G scenārijs) būtu potenciāli visilgtspējīgākais ceļa segas risinājums, nodrošinot viszemākās gada izmaksas, SEG, enerģijas patēriņu un vislielāko industriālo atkritumu un blakusproduktu izmantošanas apjomu. Jāņem vērā, ka tas ir ar nosacījumu, ka šī materiālu un tehnoloģiju kombinācija nerada saīsinātu ceļa segas kalpošanas laiku.

8. SECINĀJUMI

Promocijas darbs ir oriģināls pētniecības projekts, kurā izstrādāta metodika un rīks ceļu būvniecības materiālu, tehnoloģiju un stratēģiju ilgtspējas novērtēšanai, izmantojot dzīves cikla tehnikas. Promocijas darbs ietver dažādu potenciāli ilgtspējīgu materiālu un tehnoloģiju novērtēšanu atbilstoši izstrādātajai metodikai, izmantojot darba autora izstrādāto rīku *PAVE/LCA/LCCA*. Balstoties pētījuma rezultātos, definēti vairāki secinājumi.

- Izstrādātā metode dod iespēju kvantitatīvi novērtēt ceļa atjaunošanas vai izbūves pieejas, dodot iespēju uzlabot lēmumu pieņemšanas politiku. Līdz šim realizētā zemākās cenas politikas prakse kā primārais kritērijs ietver būtiskus ilgtspējīgu attīstību ietekmējošus riskus. Šis promocijas darbs ir būtisks solis uz priekšu, lai veidotu izpratni un veicinātu ilgtspējīgas attīstības principu ieviešanu ceļu būves nozarē.
- Patlaban ceļu būves nozarē nav pieejams viens rīks, kas apvieno *LCA* un *LCCA*, ar iespēju pilnībā izstrādāt savām prasībām nepieciešamo atjaunošanas stratēģiju. Ņemot vērā to, ka materiālu plūsmas un procesi analīzēs daļēji pārklājās, to apvienošana vienā rīkā ir loģiska, jo optimizē darbības, informācija ir vienuviet un ietekmju izvērtēšana ir pārskatāmāka.
- Izstrādātais rīks *PAVE/LCA/LCCA* ir inovatīvs ar to, ka tas dod iespēju aprēķināt ceļa atjaunošanai vai izbūvei izmantoto materiālu, tehnoloģiju vai stratēģiju vides un ekonomiskos parametrus vienā rīkā. Papildus ar to iespējams veikt aprēķinus visai ceļa segai ar tvērumu no izejmateriālu iegūšanas līdz kalpošanas laika beigām. Turklāt ar šo rīku rezultātus var izteikt gan determinēti, gan varbūtiski.
- Vienkāršotai izpratnes veidošanai ir izmantojama determinētā rezultātu izteikšanas pieeja, tomēr varbūtiskā pieeja arī ir ieteicama, jo ietver tādu būtisku parametru kā izpildīšanās varbūtība. Tādēļ, lai iegūtu plašāku informāciju par dažādu pieeju rezultātiem, tiek rekomendēts iegūt varbūtiskos rezultātus.
- Ceļa segas pilna dziļuma rekonstrukcija, veicot pilnīgu vecā materiāla demontāžu un jaunas ceļa segas izbūvi pēc determinētās pieejas, 44 gados ir par 72,2 % dārgāks, 38,3 % energoietilpīgāks un 24,2 % SEG emitējošāks risinājums nekā pārbūve, kas daļēji izmanto veco segu jaunas izbūvei. Varbūtiskā aprēķina rezultāti gan uzrāda, ka ilgākā kalpošanas laikā pilna dziļuma rekonstrukcija, veicot pilnīgu vecā materiāla aizvietošanu un jaunas ceļa segas izbūvi, var būt pat ar mazāku gada vidējo enerģijas un SEG apjomu, nekā daļēji izmantojot veco segu, to reciklējot.
- Ceļa sega ar *BBTM* asfalta virskārtu pēc determinētās pieejas 44 gados ir par 13,6 % lētāks, 14,6 % mazāk energoietilpīgs un 9,3 % mazāk SEG emitējošs risinājums nekā ceļa sega ar tradicionālu virskārtu. Ņemot vērā to, ka Latvijā bitumens un augstas kvalitātes minerālmateriāls tiek importēts, *BBTM* virskārtas izmantošana ir ilgtspējīga.
- Ceļa segai, kuras pamata pastiprināšanā 50 % cementa tiek aizstāti ar vieglajiem pelniem, ir potenciāls samazināt dzīves cikla izmaksas par 2,3 %, enerģijas patēriņu par 2,4 % un SEG daudzumu par 12,2 %. Cementa ražošana ir energoietilpīgs un videi nedraudzīgs process. Tajā pašā laikā koģenerācijas stacijās kā blakusprodukts tiek radīti

vieglie pelni, kuriem ir limitēts lietojums. Neskatoties uz augsto potenciālu, vieglo pelnu izmantošanai jābūt atbildīgai (jāveic individuālas pārbaudes), jo tajos var būt dažādi videi un cilvēkam kaitīgi smagie metāli.

- Ar gumiju modificēta bitumena izmantošana pēc slapjās metodes ceļa segas virskārtā par 4,6 % palielina kopējās dzīves cikla izmaksas visai segai 44 gados, tomēr tā ietekme uz kopējajām SEG un enerģijas patēriņu ir mazāka – attiecīgi 1,0 % un 0,3 %. Autora veiktajā pētījumā tika noskaidrots, ka ar gumiju modificēts bitumens var pagarināt kalpošanas laiku, tādējādi samazinot gada izmaksas, enerģijas patēriņu un SEG. Savukārt riepu pārstrāde un iegūtā materiāla izmantošana veicina aprites ekonomikas principu darbību un samazina riepu uzglabāšanas apjomu.
- Sarkano mālu izmantošana bitumena modificēšanas procesā faktiski nepalielina izmaksas, SEG vai enerģijas patēriņu, salīdzinot ar tradicionālo praksi. Tajā pašā laikā sarkano mālu izmantošana, kas ir industriālais blakusprodukts, par 16 % samazina nepieciešamību pēc tradicionāliem aizpildītājiem, tā samazinot neatjaunojamo resursu izmantošanu un veicinot aprites ekonomikas principus, kas ir īpaši būtiska valstīs, kur tiek veikta rūpnieciska alumīnija iegūšana.
- *EOC* kā bitumena modifikatora izmantošana nepalielina izmaksas, SEG vai enerģijas patēriņu, salīdzinot ar tradicionālo praksi ar *SBS* bitumena modifikatoru. Šis elastomērs nav rūpnieciski izmantots bitumena modificēšanai, līdz ar to tā izmantošanā ir potenciāli riski. Līdz šim veiktie laboratoriskie ekspluatāciju īpašību testi liecina, ka ar esošo pieeju *EOC* nav labāks par *SBS*, kas nozīmē, ka tā izmantošana bitumena modificēšanā pagaidām nav gaidāma.
- Visilgtspējīgākie scenāriji ir tie, kuros tiek izmantota ceļa sega ar *BBTM* virskārtu, un ceļa sega, kurā tiek izmantoti vieglie pelni pamata izbūvē, aizstājot cementu 50 % apmērā. Turpretī vismazāk ilgtspējīgākā pieeja ir veikt pilna dziļuma vecās segas demontāžu un jaunas izbūvi. Šī tehnoloģija būtu piemērojama tikai gadījumos, kad ir augsti riski nodrošināt ilgmūžību, izmantojot kādu citu tehnoloģiju.
- Visilgtspējīgākais risinājums būtu materiālu un tehnoloģiju kombinācija no dažādiem scenārijiem. Dažādās valstīs un reģionos šīs kombinācijas var atšķirties. Ņemot vērā reitinga rezultātus un Latvijas apstākļus, visilgtspējīgākā kombinācija būtu *BBTM* virskārtas izmantošana kopā ar drupinātu riepu gumiju modificētu bitumenu un vecā pamata pastiprināšana, daļēji aizstājot cementu ar vieglajiem pelniem.