



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Inga Vagale

INTERNETA PAKALPOJUMA KVALITĀTES NOVĒRTĒŠANAS UN UZRAUDZĪBAS METODIKAS IZSTRĀDE

Promocijas darbs



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

Telekomunikāciju institūts

Inga Vagale

Doktora studiju programmas "Telekomunikācijas" doktorante

INTERNETA PAKALPOJUMA KVALITĀTES NOVĒRTĒŠANAS UN UZRAUDZĪBAS METODIKAS IZSTRĀDE

Promocijas darbs

Zinātniskie vadītāji:

Profesors Dr. sc. ing.

ĢIRTS IVANOVŠ

Profesors Dr. sc. ing.

VJAČESLAVS BOBROVS

Rīga 2022

PATEICĪBA

Izsaku dziļu pateicību promocijas darba vadītājiem, profesoram Ģirtam Ivanovam un profesoram Vjačeslavam Bobrovam, par sniegto atbalstu darba izstrādē un vērtīgajiem padomiem. Vēlos pateikties arī Elektronikas un telekomunikāciju fakultātes kolēģiem par atbalstu un praktiskiem padomiem promocijas darba izstrādē un pētījuma strukturēšanā un noformēšanā.

Nozīmīga daļa no promocijas darbā iekļautajiem pētījumiem ir veikti, izmantojot datus, kas iegūti pildot darba pienākumus Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijā, tāpēc vēlos izteikt īpašu pateicību Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas Pakalpojumu kvalitātes nodaļas kolēģiem par mērījumu datu nodrošināšanu, par vērtīgiem ieteikumiem, atbalstu, dalīšanos ar zināšanām un pieredzi, kā arī par atvērtību kvalitātes uzraudzības ideju realizācijā.

No sirds pateicos manai ģimenei – vīram, vecākiem un tuviniekiem, par nenovērtējamo atbalstu visu šo gadu garumā, par sapratni un pacietību ilgajās darba stundās, kā arī par palīdzību un iedvesmu, kas deva nozīmīgu ieguldījumu promocijas darba izstrādē.

Paldies visiem, ar kuriem kopā esmu strādājusi vai kuri mani ir atbalstījuši, bet kuru vārds šeit nav pieminēts.

ACKNOWLEDGMENT

I express my deep gratitude for the valuable advice and support during the development of the Thesis to the advisers of the Doctoral Thesis – professor Ģirts Ivanovs and professor Vjaceslavs Bobrovs. I would also like to thank the colleagues at the faculty of Faculty of Electronics and Telecommunications for the support and practical advice regarding the development of the Doctoral Thesis, as well as in structuring and designing the research paper.

A significant part of the study results included in the Doctoral Thesis has been carried out using data obtained while performing duties in the Public Utilities Commission (SPRK), therefore I would like to express my sincere appreciation to the colleagues of the SPRK Quality of Service division for providing measurement data and for their valuable recommendations and support, sharing of knowledge and experience, as well as openness in the realization of quality management ideas.

A heartfelt appreciation to my family - my husband, parents, and relatives - for their invaluable support throughout these years, for their understanding and patience during my long working hours, as well as for their help and inspiration, which made a significant contribution to the development of the Doctoral Thesis.

Thanks to everyone with whom I have worked together, or who have supported me, but whose name is not mentioned here.

ANOTĀCIJA

Darba nosaukums:

“Interneta pakalpojuma kvalitātes novērtēšanas un uzraudzības metodikas izstrāde, ievērojot platjoslas attīstības mērķus un tendences”

Darba autors:

Inga Vagale

Darba saturs:

Mūsdienās liela daļa sabiedrībai nozīmīgu pakalpojumu ir pieejama un izmantojama ar interneta starpniecību, tādējādi palielinot interneta pakalpojuma pieejamības lomu iedzīvotāju sociālās un ekonomiskās līdzdalības sabiedrībā sekmēšanā. Veiktie pētījumi un prognozes attiecībā uz interneta pakalpojuma lietošanu paredz ievērojamu pārraidīto datu apjoma pieaugumu turpmākajos gados, ko tostarp ietekmēs jaunu satura pakalpojumu attīstība un ieviešana. Ņemot vērā gan interneta pakalpojuma nozīmi, gan tā izmantošanas tendences, Eiropas Savienības līmenī ir izstrādāta stratēģija un noteiktas attiecīgas prasības platjoslas interneta pieejamības un tā atbilstošas kvalitātes sekmēšanai.

Promocijas darbā ir novērtēts platjoslas interneta kvalitātes uzraudzības un attīstības veicināšanas ietvars, kā arī identificētas ar to saistītās nepilnības vai faktiskās piemērojamības problēmaspekti. Veikts pētījums par interneta kvalitātes rādītāju novērtējumu no galalietotāju skatpunkta un, pamatojoties uz matemātisko analīzi, izstrādāta koncepcija faktisko interneta pakalpojuma kvalitātes vērtību noteikšanai un atspoguļošanai. Īpašs uzsvars darbā likts uz objektīvu pieslēguma ātruma rādītāju novērtēšanas metožu noteikšanu un mērīšanas principu definēšanu. Sniegti priekšlikumi nepietiekama platjoslas interneta pārklājuma teritoriju noteikšanai, pamatojoties uz ģeogrāfiskā apsekojumā iegūto informāciju, kas izmantojami platjoslas tīklu izvēršanas un tam nepieciešamo investīciju plānošanai, tādējādi sekmējot universālā pakalpojuma pieejamību valstī. Apkopoti ar platjoslas interneta pakalpojuma kvalitāti saistīti pētījuma rezultāti, sniegti priekšlikumi praktiski lietojamas interneta pakalpojuma kvalitātes novērtēšanas un mērīšanas metodoloģijas ieviešanai.

Darba apjoms:

161 lappuse, darbā ir 27 tabulas, 91 attēls, 116 literatūras avoti un 3 pielikumi

ANNOTATION

Title of the thesis:

“Elaboration of internet service quality assessment and monitoring methodology in the scope of broadband development targets and trends”

Author of the thesis:

Inga Vagale

Content of the thesis:

Today, a large number of services of public importance are accessible and usable via the Internet, thus increasing the role of the availability of internet services in promoting the consumers' social and economic participation in society. Studies and forecasts for the use of the Internet service suggest a significant increase in the amount of data transmitted in the coming years, which will be influenced, inter alia, by the development and introduction of new content services. Given both the importance of the internet service and the trends in its use, a strategy has been developed at the European Union level and relevant requirements have been implemented to promote the availability and quality of broadband Internet.

In the Doctoral Thesis the framework for monitoring and promoting quality and development of broadband Internet has been evaluated, as well as related shortcomings and problems of its actual applicability have been identified. An assessment of end-user's centric Internet quality indicators has been performed and based on mathematical analysis, a concept for determining and reflecting the actual internet service quality values has been developed. Special emphasis is placed on determination of the objective methods for the evaluation of connection speed indicators and definition of measurement principles. The Thesis provides suggestions of determining the areas of insufficient broadband Internet coverage, based on the information obtained within the geographical survey, which in turn can be used to plan the deployment of broadband networks, thus facilitating the availability of universal service in the country. Study results related to the quality of broadband internet services have been summarised in this Thesis. In addition, it contains suggestions for the implementation of a practical methodology that evaluates the quality of the internet service that is being provided.

Thesis contains:

161 pages, 27 tables, 91 figures, 116 literature sources and 3 supplements

SATURS

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS.....	7
1. PLATJOSLAS INTERNETA PAKALPOJUMA PIEPRASĪJUMS, PIEEJAMĪBA UN ATTĪSTĪBAS NEPIECIEŠAMĪBA.....	12
1.1. Mobilā platjoslas interneta pakalpojuma lietošanas tendences un ekonomiskie rādītāji	13
1.2. 5G tehnoloģijas platjoslas attīstība un tai definētie kvalitātes rādītāji.....	16
1.3. Platjoslas interneta kvalitātes prasību noteikšanas nepieciešamība un tiesiskais pamatojums	21
1.4. Platjoslas interneta piekļuves rādītāji un Eiropas stratēģisko mērķu sasniegšanas novērtējums.....	27
1.5. Platjoslas interneta pakalpojuma pieejamības un kvalitātes rādītāju kartēšana.....	30
1.6. Promocijas darba veikuma kopsavilkums.....	42
2. INTERNETA PAKALPOJUMA KVALITĀTI RAKSTUROJOŠIE MĒRI.....	48
2.1. Vispārīgs interneta pakalpojuma kvalitātes rādītāju apkopojums.....	48
2.2. Interneta pakalpojuma kvalitāti raksturojošie tehniskie parametri	53
3. TCP CAURLAIDSPĒJAS MĒRĪJUMU ĪPAŠĪBU IZPĒTE.....	64
3.1. TCP pārraides vadības protokola darbības princips.....	64
3.2. TCP algoritmi atbilstoša datu pārraides ātruma noteikšanai.....	65
3.3. TCP caurlaidspēju ietekmējošo faktoru analīze.....	71
4. INTERNETA PAKALPOJUMA KVALITĀTES NOVĒRTĒŠANAS METODIKAS DEFINĒŠANA.....	81
4.1. Datu pārraides ātruma mērījumu rezultātu analītika.....	81
4.2. Piemērotākā izlases kopas raksturlieluma noteikšana kvalitātes parametru vērtību atspoguļošanai.....	88
4.3. Mērījumu metodikas noteikšana objektīva kvalitātes parametru novērtējuma iegūšanai.....	96
4.4. Nepieciešamā mērījumu apjoma noteikšana.....	107
4.5. Mērījumu vietu apjoma un izvēles principu noteikšana	111
4.6. Mērījumu cikla atkārtojuma biežuma novērtējums	118
4.7. Teritoriju ar nepietiekamas platjoslas interneta pārklājumu identificēšana.....	124
5. ALTERNATĪVU FAKTISKO INTERNETA PAKALPOJUMA KVALITĀTES RĀDĪTĀJU NOVĒRTĒŠANAS IESPĒJU NOVĒRTĒJUMS.....	130
5.1. Vispārīgs MDT darbības principa apskats.....	131
5.2. MDT caurlaidspējas mērījumu novērtējums.....	132
5.3. MDT funkcionalitātes izmantošana ģeogrāfiskā apsekojuma nolūkos.....	133
5.4. MDT risinājuma izmantošanas problēmaspekti.....	139
6. KOPSAVILKUMS UN SECINĀJUMI	141
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	147
PIELIKUMU SARAKSTS	157

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

2G – *2nd generation mobile network* – mobilā elektronisko sakaru tīkla otrā paaudze

3DupAck – *triple duplicate acknowledgment* – trīskāršs apstiprinājuma dublikāts

3G – *3rd generation mobile network* – mobilā elektronisko sakaru tīkla trešā paaudze

3GPP – *3rd Generation Partnership Project* – trešās paaudzes partnerības projekts

4G – *4th generation mobile network* – mobilā elektronisko sakaru tīkla ceturtnā paaudze

5G – *5th generation mobile network* – mobilā elektronisko sakaru tīkla piektnā paaudze

5G-PPP – *Public Private Partnership* – publiskā privātā partnerība

A

ACK – *acknowledgement* – aptiprinājums

ADSL – *asymmetric digital subscriber line* – asimetriskā ciparu abonentlīnija

A-MSDU – *aaggregated media access control service data unit* – apvienotais vides piekļuves vadības dienesta datu bloks

ANOVA – *analysis of variance* – dispersiju analīze

AR – *augmented reality* – paplašinātā jeb papildinātā realitāte

B

BDP – *bandwidth delay product* – caurlaidspējas un turp-atpakaļ aiztures laika reizinājums

BEREC – *Body of European Regulators for Electronic Communications* – Eiropas Elektronisko sakaru regulatoru iestāde

BTC – *bulk transfer capacity* – lielapjoma pārraides kapacitāte

C

Cat-M – *category machines* – kategorija mašīnas

CDN – *content delivery network* – satura piegādes tīkls

CEPT – *The European Conference of Postal and Telecommunications Administrations* – Eiropas Pasta un telekomunikāciju administrāciju konference

CIoT – *critical internet of things* – kritisko lietu internets

CN – *core network* – pamattīkls

CRS – *coordinate reference system* – koordināšu atskaites sistēma

Cwnd – *congestion window* – pārslodzes logs

D

D2D – *device-to-device* – starpierīču saziņa

DESI – *Digital Economy and Society Index* – Digitālās ekonomikas un sabiedrības indekss

DG CONNECT – *The Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology* – Eiropas Komisijas Sakaru tīklu, satura un tehnoloģiju ģenerāldirektorāts

DNS – Domain Name Service/ Domain Name System – domēnu nosaukumu pakalpojums/
Domēnu nosaukumu sistēma

DOCSIS – data over cable service interface specification – datu pārraide izmantojot optisko un koaksiālo kabeļu hibrīdtīklu

DSL – digital subscriber line – ciparu abonentlīnija

DSM – digital single market – Digitālais vienotais tirgus

E

E2E – end-to-end – posms “pieslēguma punkts - pieslēguma punkts”

EC – edge computing – mobilā perifērijas skaitļošana

E-Cell ID - enhanced cell identifier – uzlabots šūnu identifikators

eMBB – enhanced mobile broadband – uzlabotā mobilā platjosla

ETRS89 – European Terrestrial Reference System 1989 – Eiropas zemes atskaites sistēma 1989

ETSI – European Telecommunications Standards Institute – Eiropas telekomunikāciju standartizācijas institūts

F

FDDI – fiber distributed data interface – optiskās šķiedras dalīto datu interfeiss

FTP – File Transfer Protocol – datņu pārsūtīšanas protokols

FTTB – fibre to the building – optiskās šķiedras kabeļu nodrošināšana līdz ēkai

FTTH – fibre to the home – optiskās šķiedras kabeļu nodrošināšana līdz galalietotājam ar pieslēguma punktu galalietotāja telpā vai galalietotāja telpas robežās

FWA – fixed wireless access – fiksētā bezvadu piekļuve

G

GNSS – Global Navigation Satellite System – satelītnavigācija

GPS – Global Positioning System – Globālā pozicionēšanas sistēma

GSM – Global System for Mobile communications – globālā mobilo sakaru sistēma

GSMA – Global System for Mobile Communications Association – globālā mobilo sakaru sistēmu asociācija

H

HD – high definition – augsta izšķirtspēja

HSPA – High Speed Packet Access – ātrdarbīga pakešu piekļuves datu pārraide

HSS – Home Subscriber Server – mājas abonentu serveris

HTTP – Hypertext Transfer Protocol – hiperteksta pārsūtīšanas protokols

I

ICMP – Internet Control Message Protocol – interneta vadības ziņojumu protokols

ID – identifier – identifikators

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers* – Elektronikas un Elektrotehnikas inženieru institūts

IETF – *Internet Engineering Task Force* – Interneta inženierijas darba grupa

IMEI – *International Mobile Equipment Identity* – starptautisks mobilās iekārtas identifikators

IMT-2020 – *International Mobile Telecommunications-2020* – starptautiskas mobilās telekomunikācijas-2020

IoT – *Internet of things* – lietu internets

IP – *Internet Protocol* – Interneta protokols

IPDV – *inter-packet delay variation* – Starppakešu pārraides aiztures laika variācija jeb “trīce”

IPTV – *Internet Protocol Television* – interneta protokola televīzija

IPv4 – *Internet Protocol version 4* – interneta protokols, versija “4”

IPv6 – *Internet Protocol version 4* – interneta protokols, versija “6”

ITEST – Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas Interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes kontroles sistēma

ITU – *International Telecommunication Union* – Starptautiskā Telekomunikāciju (Telesakaru) Savienība

IXP – *Internet exchange point* – interneta apmaiņas punkts (IAP)

K

KPI – *key performance indicator* – galvenie veiktspējas rādītāji

KQI – *key quality indicator* – galvenie kvalitātes rādītāji

L

LAEA – *The Lambert Azimuthal Equal Area* – Lamberta azimutāli vienādais apgabals

LIX – *Latvian internet exchange* – Latvijas interneta apmaiņas punkts

LTE – *Long-Term Evolution* – ilglaicīga (pakāpeniska) attīstība, 4.paaudzes (4G tehnoloģijas) mobilie sakari

M

M2M – *machine-to-machine* – mašīnsaziņa

MAX – *maximum value* – maksimālā vērtība

MDT – *minimization of drive tests* – izbraukuma pārbaužu mazināšana

MIN – *minimum value* – minimālā vērtība

mMTC – *massive machine-type communications* – masīvā mašīntipa komunikācija

MOB – *mobile network* – mobilais elektronisko sakaru tīkls

MOS – *mean opinion score* – vidējais uztveres novērtējums

MSS – *maximum segment size* – maksimālais segmenta lielums

MTU – *maximum transmission unit* – maksimālā pārraides vienība

N

NB-IoT – *narrow band Internet of things* – šaurjoslas lietu internets

NFV – *network function virtualisation* – tīkla funkciju virtualizācija

NGA – *next generation access* – Nākamās paaudzes piekļuve

NP – *network performance* – tīkla veiktspēja

NR – *New Radio* – jaunais radio

NUTS; *NUTS classification* – *common classification of territorial units for statistics* – kopēja statistiski teritoriālo vienību klasifikācija

O

OAM – *operations, administration and management* – darbības, administrēšana un vadība

OECD – *Organisation for Economic Cooperation and Development* – Ekonomiskās sadarbības un attīstības organizācija

OTT – *over-the-top services* – “over-the-top” pakalpojumi jeb virspakalpojumi

P

P2P – *peer-to-peer* – vienādranga

PDCP – *Packet Data Convergence Protocol* – pakešu datu konverģences protokols

PDV – *packet delay variation* – pakešu aiztures variācija

PRB - *Physical Resource Block* – fiziskais resursu bloks

Q

QoE – *quality of experience* – pieredzes kvalitāte

QoS – *quality of service* – pakalpojumu kvalitāte

R

RAN – *radio access network* – radio piekļuves tīkls

RRT – *Lietuvos Respublikos ryšių reguliavimo tarnyba* – Lietuvas republikas elektronisko sakaru regulējošā iestāde

RSCP – *received signal code power* – saņemtā signāla koda jauda

RSRP – *reference signal received power* – references signāla uztvertā jauda

RTT – *round-trip delay time* – datu pārraides turp-atpakaļ ceļa aiztures laiks jeb latentums

Rwnd – *receive window* – saņēmēja logs

RxLev – *received signal level* – saņemtā signāla līmenis

S

SD – *stadard definition* – standarta izšķirtspēja

SDN – *software-defined networking* – programmatūras definēts tīklošana

SINR – *signal to interference + noise ratio* – signāla un traucējumi plus trokšņa attiecība

SPRK – Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisija/ Regulators

SSthersh – *slow start threshold* – lēnā starta sliekšņa vērtība

T

TAC – *Type Allocation Code* – koda piešķiršanas tips

TCE – *Trace Collection Entity* – trasējumu ievākšanas vienība

TCP – *Transmission Control Protocol* – Pārraides vadības protokols

TTJA – *Tarbijakaitse ja Tehnilise Järelevalve Amet* – Igaunijas Patērētāju tiesību aizsardzības un tehniskās uzraudzības iestāde

TV – *television* – televīzija

U

UDP – *User Datagram Protocol* – lietotāja datogrammu protokols

UHD – *ultra high definition* – īpaši augsta izšķirtspēja

UMTS – *Universal Mobile Telecommunications System* – universālā mobilo telesakaru sistēma

URLLC – *ultra-reliable low latency communications* – īpaši uzticami un zema latentuma sakari

V

VDSL – *very high bit-rate digital subscriber line* – ļoti ātrdarbīga ciparu abonentlīnija

VDSL2 Vectoring – *very high bit-rate digital subscriber line with vectoring method for reduction of crosstalk levels and improvement of performance* – ļoti ātrdarbīga ciparu abonentlīnija, izmantojot trokšņa signālus slāpējošu tehnoloģiju

VHCN – *very high capacity networks* – ļoti augstas kapacitātes tīkli

VoIP – *Voice over Internet Protocol* – balss pārraide ar interneta protokolu / IP balss pārraide

VoLTE – *Voice over Long-Term Evolution* – balss pārraide, izmantojot LTE

VR – *virtual reality* – virtuālā realitāte

W

WGS – *World Geodetic System* – Pasaules ģeodēziskā sistēma

WiFi – *wireless fidelity* – bezvadu augstas kvalitātes pieslēgums (bezvadu interneta savienojuma protokols)

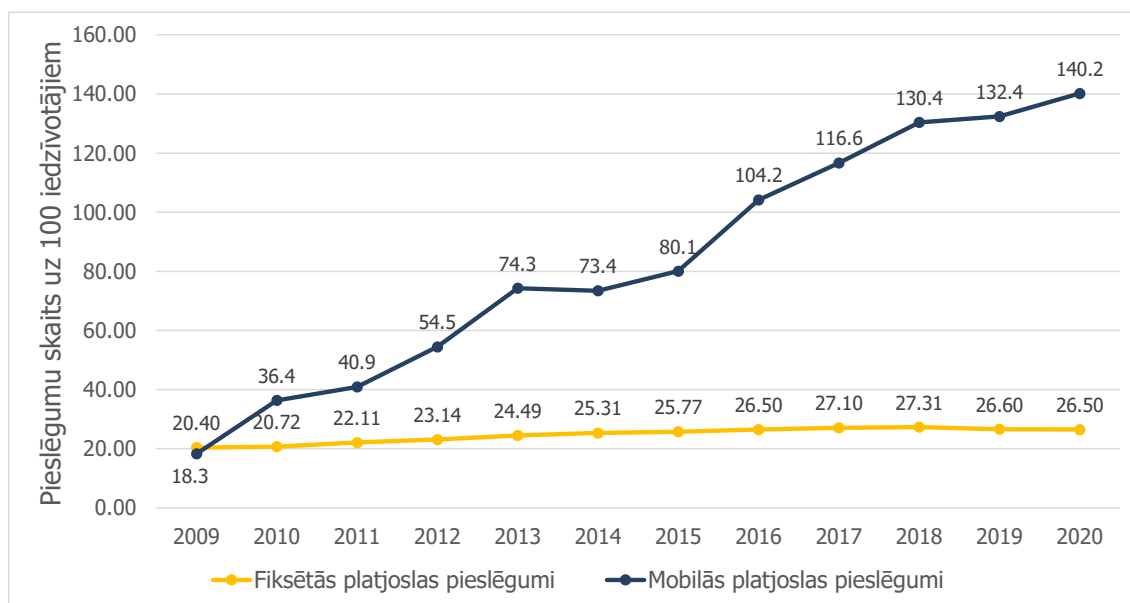
WiMAX – *worldwide interoperability for microwave access technology* – visaptverošas savietojamības mikroviļņu piekļuves tehnoloģija, kuru apraksta IEEE 802.16 standartu grupa

WLAN – *wireless local area network* – bezvadu lokālie tīkli

WWW/ Web – *world wide web* – globālais tīmeklis

1. PLATJOSLAS INTERNETA PAKALPOJUMA PIEPRASĪJUMS, PIEEJAMĪBA UN ATTĪSTĪBAS NEPIECIEŠAMĪBA

Mūsdienās piekļuve internetam ir kļuvusi par neatņemamu cilvēka ikdienas sastāvdaļu. Interneta pieejamība ievērojami ietekmē iedzīvotāju sociālo un ekonomisko līdzdalību sabiedrībā. Interneta pakalpojumam ir nozīmīga loma kopējā iedzīvotāju dzīves līmeņa uzlabošanai, nodrošinot visiem vienlīdzīgas iespējas piedalīties dažādās sabiedriskās dzīves jomās. Piemēram, piekļuve interneta pakalpojumam sniedz iedzīvotājiem iespēju iegūt izglītību, apgūt jaunas prasmes, meklēt darbu, sazināties ar citiem, izmantot e-pakalpojumus, veikt pirkumus un arī komercdarbību internetā u.tml. Tādā veidā ikvienam iedzīvotājam, neatkarīgi no viņa atrašanās vietas, finansiālajām iespējām un citiem faktoriem tiek nodrošinātas līdzvērtīgas iespējas. Īpaši būtiski iepriekš minēto aspektu īstenošanas iespējas ir cilvēkiem ar ierobežotām iespējām. Papildus tam, piekļuve internetam atbalsta visus ekonomiskos sektorus, sekmējot to veikspēju un radot augsti kvalificētas darbavietas. Platjoslas savienojamība veicina starpvalstu ekonomisko integrāciju un paaugstina iedzīvotāju dzīves līmeni. Iekļaujoša piekļuve interneta pakalpojumam veicina elastības un produktivitātes paaugstināšanu mazo uzņēmumu vidū, kā arī pārredzamāku valsts iestāžu darbību.



1.1 att. OECD pētījuma dati par fiksētās un mobilās platjoslas pieslēgumu skaita dinamiku uz 100 iedzīvotājiem Latvijā laika periodā no 2009. gada līdz 2020. gadam. Avots: OECD [2]

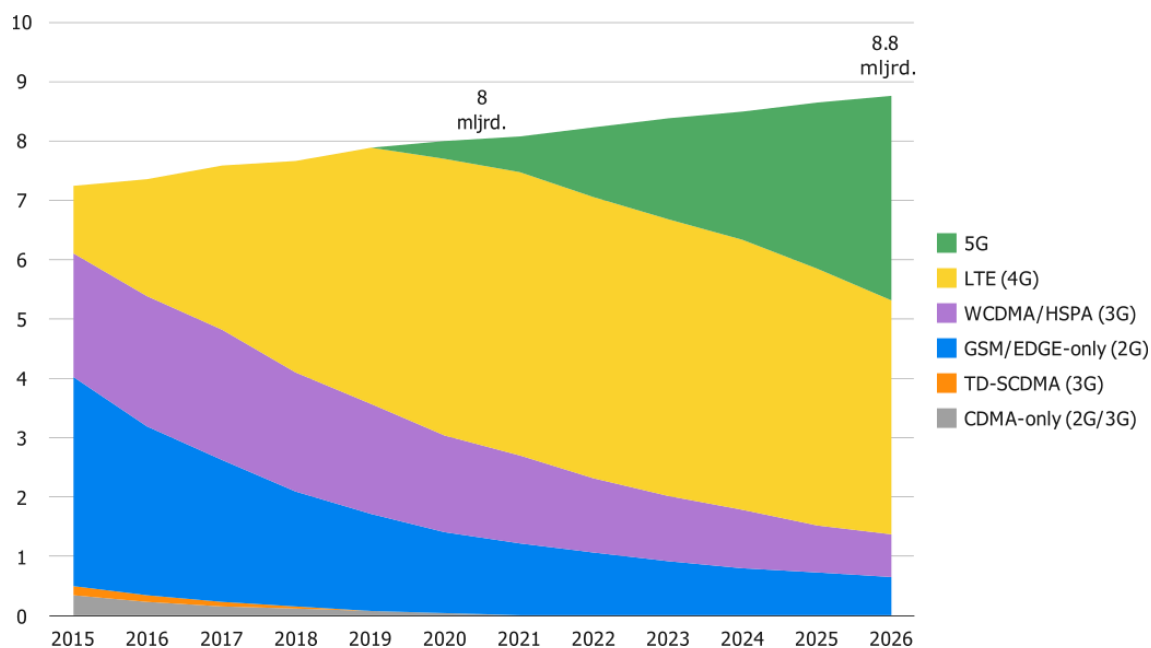
Izvērtējot fiksētās un mobilās platjoslas pieslēgumu skaita dinamiku vairāk nekā 10 gadu griezumā, ir vērojams, ka kopumā pasaulē strauji pieaug tieši mobilo pieslēgumu skaits. Latvijā pēdējo 10 gadu laikā ir vērojams septiņkārtējs mobilās platjoslas pieslēgumu skaita pieaugums, savukārt fiksētās platjoslas pieslēguma skaitā pēdējos gados vērojams pat neliels samazinājums. Iemesls šādai tendencei var būt mobilo tehnoloģiju attīstība, nodrošinot arvien ātrākus datu

pārraides ātrumus un stabilāku pakalpojumu, kā arī to pieejamība, kas atsevišķos gadījumos nodrošina fiksētā interneta aizvietojamību (piemēram, reti apdzīvotās vietās fiksētā interneta pieslēgums var nebūt pieejams un tā ierīkošana ir ekonomiski neizdevīga).

Lai arī pašlaik fiksētās un mobilās platjoslas pakalpojumi nevar tikt novērtēti kā pilnībā aizvietojami, tā iemesla dēļ, ka mobilais interneta pakalpojums nespēj nodrošināt līdzvērtīgi stabilus datu pārraides ātrumus un datu apjoma pieejamību par līdzvērtīgu cenu kā fiksētā interneta pakalpojumi. Tomēr, mobilām tehnoloģijām attīstoties šī tendence mainās. Šobrīd kā nekad iepriekš ir kritiski nozīmīga droša, uzticama un elastīga piekļuve internetam. 2020. gada COVID-19 pandēmija ievērojami palielināja šo pieprasījumu un paātrināja tīklu transformāciju, vēl jo vairāk indicējot tehnoloģiju un it īpaši savienojamības nozīmi gan sabiedrībai, gan uzņēmējdarbībai daudzo cilvēku ikdienas aspektu uzturēšanā un atbalstīšanā. Pandēmijas rezultātā paātrinājās digitalizācija, kā arī palielinājās ātras un uzticamas mājsaimniecību platjoslas savienojamības nozīme un nepieciešamība, kam ātrākā alternatīva daudzos gadījumos ir fiksētā bezvadu piekļuve (FWA). Pastāv vairāki faktori, kas veicina FWA izplatību: pirmkārt, tas ir pastāvošais un pieaugošais patērētāju un uzņēmumu pieprasījums pēc platjoslas savienojamības arī vietās, kur fiksētais interneta pieslēgums nav pieejams un tā izvēršana nav ekonomiski pamatota. FWA ir ievērojami rentablāka alternatīva fiksētiem tīkliem, kas ir otrais tā izplatību veicinošais faktors. Kapacitātes pieaugums, kas tiek nodrošināts pateicoties lielākam spektra piešķīrumam un tehnoloģiskiem sasniegumiem, palielina tīkla efektivitāti attiecībā uz izmaksām par piegādāto gigabaitu. Turklāt, pateicoties 5G tehnoloģiskiem risinājumiem, ir iespēja izvērst fiksētās bezvadu piekļuves FWA tīklus plaša mēroga izmantošanai. Tāpat, ņemot vērā platjoslas pieejamības būtisko nozīmi digitalizācijā un ekonomiskajā izaugsmē, valsts pārvaldes organizācijas ir ieinteresētas plaša mēroga platjoslas izplatības un savienojamības sekmēšanā, piemērojot dažādas atbalsta programmas un subsīdijas. Savukārt ņemot vērā FWA priekšrocības un ekonomisko ieguvumu, īpaši nozīmīgs kļūst atbalsts mobilās platjoslas izvēršanas veicināšanā.

1.1. Mobilā platjoslas interneta pakalpojuma lietošanas tendences un ekonomiskie rādītāji

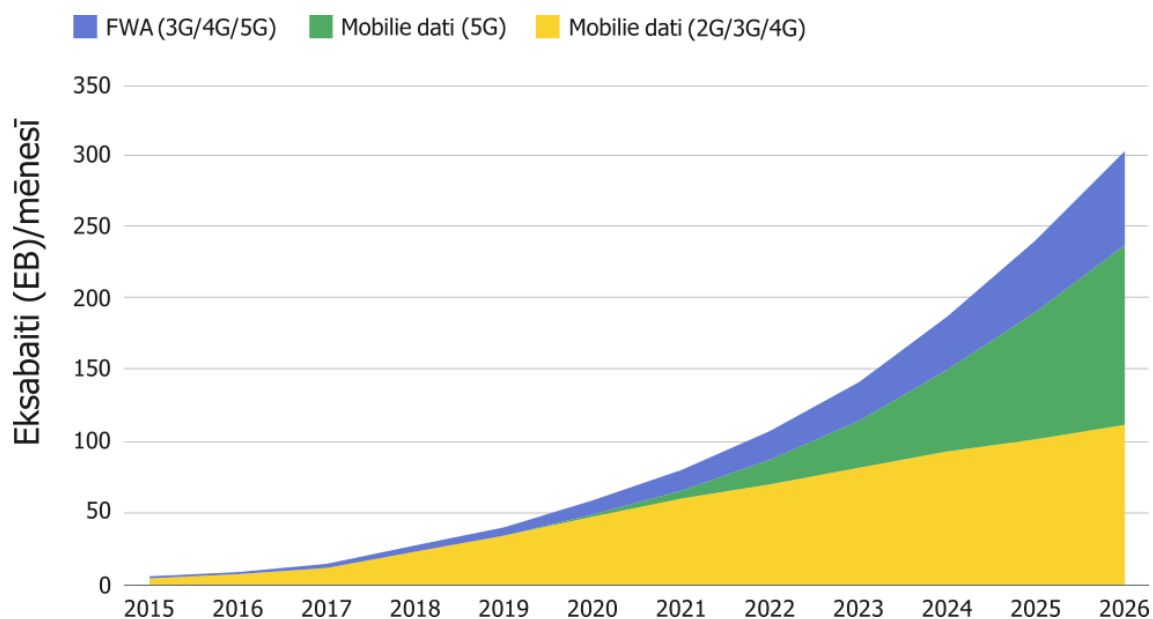
Pēdējās desmitgades laikā ir notikušas ievērojamas izmaiņas interneta pakalpojuma nepieciešamībā, tā datu patēriņā, kā arī savienoto iekārtu klāstā, kas atbilstoši pieprasījumam piedzīvojis izteiktu pieaugumu, tādējādi sekmējot izmaiņas interneta pakalpojuma izmantošanas tendencēs. Līdz ar datu pārraides tehnoloģiju attīstību un interneta pieejamību, pieaug arī ar interneta starpniecību nodrošināto pakalpojumu un lietojumprogrammu daudzveidība, kā arī pieprasījums pēc augstākas pakalpojumu kvalitātes, kas rezultējas nepārtraukti pieaugošos pārraidīto datu apjomos un rada pieaugošu pieprasījumu elektronisko sakaru tīkla kapacitātei, kurā tie tiek nodrošināti.



1.2. att. Ericsson prognozētais mobilo pieslēgumu skaits pēc tehnoloģijām¹; Avots: Ericsson [1]

Lai novērotu globālos un reģionālos ekonomiskos un tehnoloģiju attīstības rādītājus, kā arī prognozētu to turpmāko attīstību, kas ir būtiski, veicinot tehnoloģiju atbilstību esošajam pieprasījumam un tādējādi sekmējot ekonomisko izaugsmi, vairākas starptautiskas organizācijas un privātas kompānijas veic pētījumus, kas saistīti ar dažādiem interneta pakalpojuma lietošanas aspektiem. Atbilstoši Ericsson un GSMA prognozēm mobilo pieslēgumu skaits tuvāko piecu gadu laikā palielināsies no 8 mljrd. līdz 8,8 mljrd., turklāt 3,5 mljrd. no tiem būs 5G tehnoloģijas pieslēgumi. Paredzams, ka kopumā 91 % no visiem pieslēgumiem būs platjoslas pieslēgumi. Kā jau minēts, pieaug fiksētās bezvadu piekļuves FWA pieslēgumu skaits un paredzams, ka līdz 2026. gadam to skaits trīskāršosies, sasniedzot 180 mljrd. pieslēgumu, no kuriem 70 mljrd. jeb 40 % būs 5G tehnoloģijas pieslēgumi. Paredzams arī, ka 2026. gadā FWA datplūsma aizņems 15 % no kopējā pārraidītā datplūsmas apjoma, tādējādi sasniedzot septiņkārtīgu pieaugumu un kopumā pārraidot 64 EB lielu datu apjomu. Kopumā mobilo datu apjoma pieaugumu veicina trīs galvenie faktori: uzlabota iekārtu veiktspēja, apjomīgu datu saturs, kā arī tīklu izplatības un veiktspējas uzlabojumi.

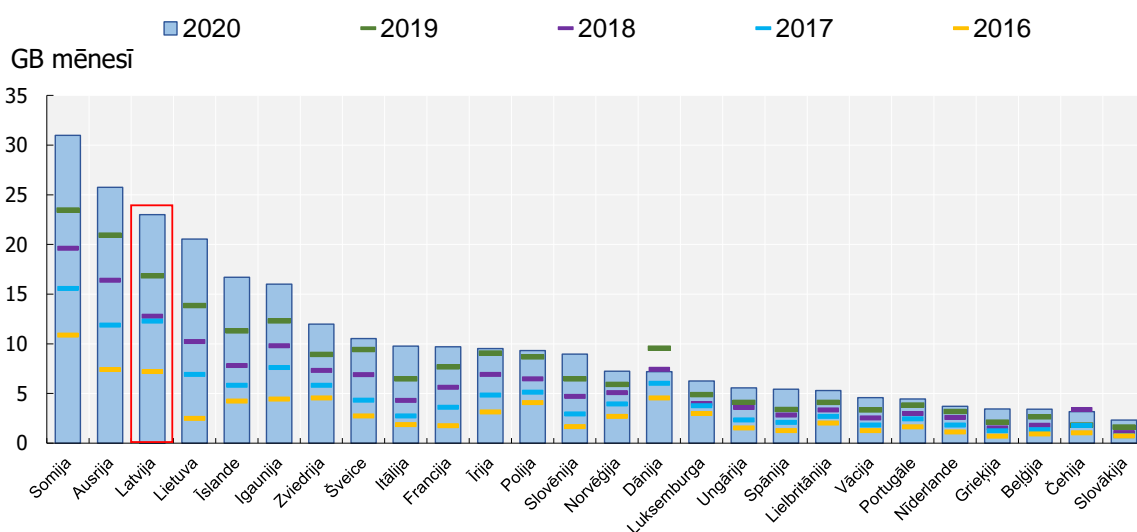
¹ Attēlā nav iekļauts IoT savienojumu skaits. FWA pieslēgumi ir iekļauti



1.3. att. Ericsson prognozētais kopējais mobilo datu apjoms, EB/mēnesī; Avots: Ericsson [1]

Pēc Ericsson datiem kopumā 2020. gada beigās pārraidītais mobilo datu apjoms sasniedza 58EB mēnesī un līdz 2026. gadam ir paredzams gandrīz pieckārtējs tā pieaugums, sasniedzot 300EB mēnesī. Pašlaik vidējas datu patēriņš mēnesī uz vienu viedtālruna lietotāju kopumā pasaulē pārsniedz 10GB un līdz 2026. gada beigām paredzams tā pieaugums līdz 35GB. Tieši viedtālruni ģenerē vislielāko mobilo datu apjomu šobrīd – aptuveni 95 %, un paredzams, ka šī daļa palielināsies.

Jāņem vērā, ka datu apjoma pieaugums dažādos reģionos un valstīs atšķiras ļoti plašā mērogā un atsevišķās valstīs datu patēriņš ir ievērojami augstāks par kopējo vidējo. Piemēram, atbilstoši OECD datiem, Latvijā 2020. gadā vidējais datu patēriņš mēnesī uz vienu pieslēgumu bija 23GB.



1.4. att. OECD pētījuma dati par mobilo datu apjoma patēriņu mēnesī uz vienu pieslēgumu Eiropas valstīs; Avots: OECD [2]

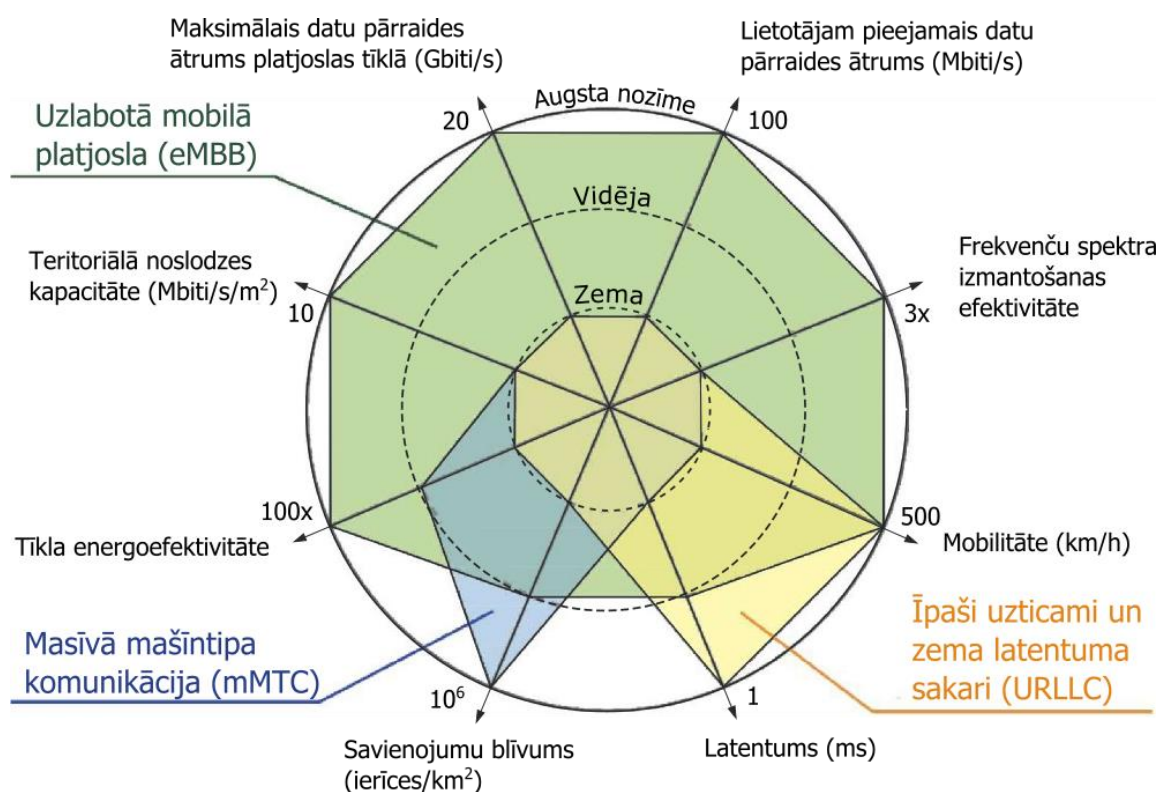
1.2.5G tehnoloģijas platjoslas attīstība un tai definētie kvalitātes rādītāji

Pieaugot platjoslas interneta nozīmei cilvēku ikdienas dzīvē, īpaši svarīga kļūst platjoslas kvalitāte. Vairāki veiktspējas indikatori atspoguļo platjoslas kvalitātes rādītājus un ietekmē lietotāju saņemto pakalpojumu veiktspēju, piemēram tādi kā pieslēguma ātrums, datu pārraides aizture jeb latentums, pakešu zuduma biežums un citi.

Attīstoties tīkliem un tehnoloģijām, parādās tādi pakalpojumi, kur noteikta kvalitātes līmeņa nodrošināšana ir kritiski svarīga.

ITU standarts IMT-2020 nosaka specifikācijas 5G tehnoloģijas tīkliem un to kvalitātes rādītājiem. Standarts paredz astoņus galvenos veiktspējas parametrus:

- Maksimālais jeb pīķa datu pārraides ātrums mobilās platjoslas tīklā (gigabiti/s);
- Individuālam lietotājam pieejamais datu pārraides ātrums (megabiti/s);
- Frekvenču spektra izmantošanas efektivitāte (reizes);
- Mobilitāte (km/h);
- Latentums (ms);
- Savienojumu blīvums (ierīces/km²);
- Tīkla energoefektivitāte (reizes);
- Teritoriālā noslodzes kapacitāte (megabiti/s/m²).



1.5. att. Starptautiskās telekomunikāciju savienības (ITU) Starptautisko mobilo telekomunikāciju standarta IMT-2020 ieviešanas scenāriji un to galvenie veiktspējas rādītāji 5G tehnoloģijas izvēršanā; Avots: ITU-R M.2083 [5]

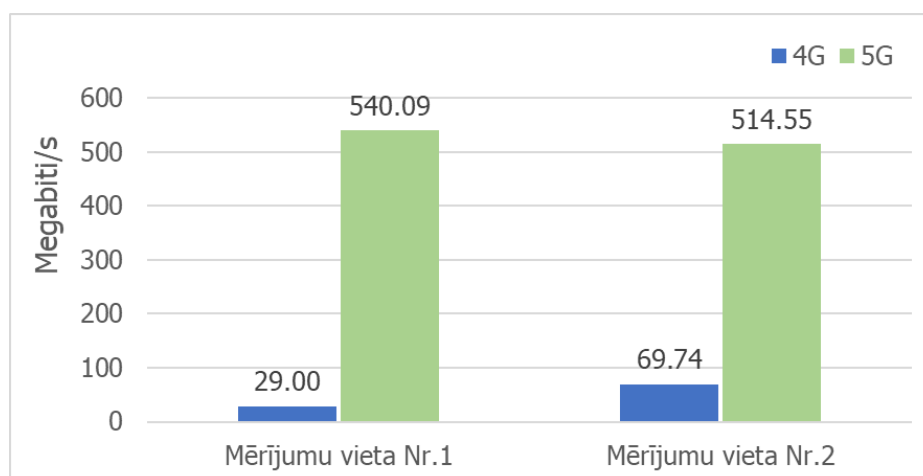
Katra šī parametra nozīme ir atkarīga no definētā izmantošanas scenārija. Kopumā IMT-2020 standartā ir izdalīti trīs galvenie izmantošanas scenāriji: uzlabotā mobilā platjosla (eMBB), īpaši uzticami un zema latentuma sakari (URLLC) un masīvā mašīntipa komunikācija (mMTC), kas ietver galvenos, tieši šiem izmantošanas veidiem raksturīgos kvalitātes parametrus.

Uzlabota mobilā platjosla (eMBB)

Uzlabotās mobilās platjoslas scenārijā būtiski ir tādi parametri kā lietotājiem nodrošinātais datu pārraides ātrums, mobilitāte, energoefektivitāte un spektra efektivitāte, tomēr atkarībā no izmantošanas gadījumiem, vienlaicīgi ne visi šie rādītāji var būt vienlīdz nozīmīgi.

Ņemot vērā interneta pakalpojuma izmantošanas tendences, pieaugošo datu apjoma patēriņu, arvien lielāku izklaides sektora (video, tiešsaistes spēļu, papildinātās un virtuālās realitātes (AR/VR) pakalpojumi un savienotās patērētāju valkājmierīces) pāreju tiešsaistē, kā arī pieaugošo pieprasījumu pēc to nodrošināšanas augstākā kvalitātē, būtiska nozīme ir paaugstinātai mobilo tīklu kapacitātei un lietotājiem nodrošinātiem datu pārraides ātrumiem, kā arī samazinātiem latentuma rādītājiem. Līdz ar to eMBB ir evolucionārais 5G tehnoloģijas aspekts, kas nodrošina pakāpeniskus uzlabojumus salīdzinājumā ar 4G tehnoloģiju, lai apmierinātu pieaugošā datu patēriņa vajadzības. [5][6][8][10]

Lai novērtētu kvalitātes parametru atšķirību 4G un 5G tīklā Latvijā, tika veikti interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumi viena mobilā operatora tīklā Rīgā, vietās, kur mērījumu laikā bija pieejams 5G tehnoloģijas tīkls (1.6. att.). Rezultāti liecina, par ievērojamu lejupeļādes ātruma paaugstinājumu 5G tīklā, salīdzinot ar 4G. Jāņem vērā, ka mērījumi veikti laikā, kad 5G tehnoloģija pētāmā mobilā operatora tīklā bija tikko izvēsta, kā arī 5G atbalstošu galiekārtu skaits ir salīdzinoši zems, kā rezultātā visticamāk mērījumu laikā tīkls bija brīvs. Līdz ar to, paredzams, ka palielinoties lietotāju skaitam, datu pārraides ātrumi var samazināties, tomēr saglabājot ievērojamu pārsvaru pār 4G tehnoloģijas pieslēgumiem pieejamiem datu pārraides ātrumiem.



1.6. att. Divās mērījumu vietās Rīgā veikto lejupeļādes ātruma mērījumu rezultātu salīdzinājums 4G un 5G tehnoloģijas tīklos

Īpaši uzticami un zema latentuma sakari (URLLC)

URLLC scenārijā īpaši liela nozīme ir zemiem latentuma rādītājiem, kas ir būtiski, piemēram, drošībai kritiskām lietojumprogrammām, vai arī augstas mobilitātes gadījumos (transporta drošība), kur savukārt datu pārraides ātrums ir mazāk svarīgs raksturlielums. [5][6]

Masīvā mašīntipa komunikācija (mMTC)

Masīva mašīntipa komunikācijas (mMTC) scenārijā, saukts arī par masīvo IoT, īpaši būtisks ir augsts savienojumu blīvums, kas nepieciešams, lai atbalstītu milzīgo tīklam pieslēgto iekārtu skaitu (aptuveni 100 tūkst. uz vienu piekļuves punktu), kuras, piemēram, pārraida datus nepastāvīgi, ar zemu pārraides ātrumu un ar ļoti ierobežotu mobilitāti vai stacionāri. Šādam scenārijam ir būtiskas arī zemu izmaksu iekārtas ar garu ekspluatācijas laiku.

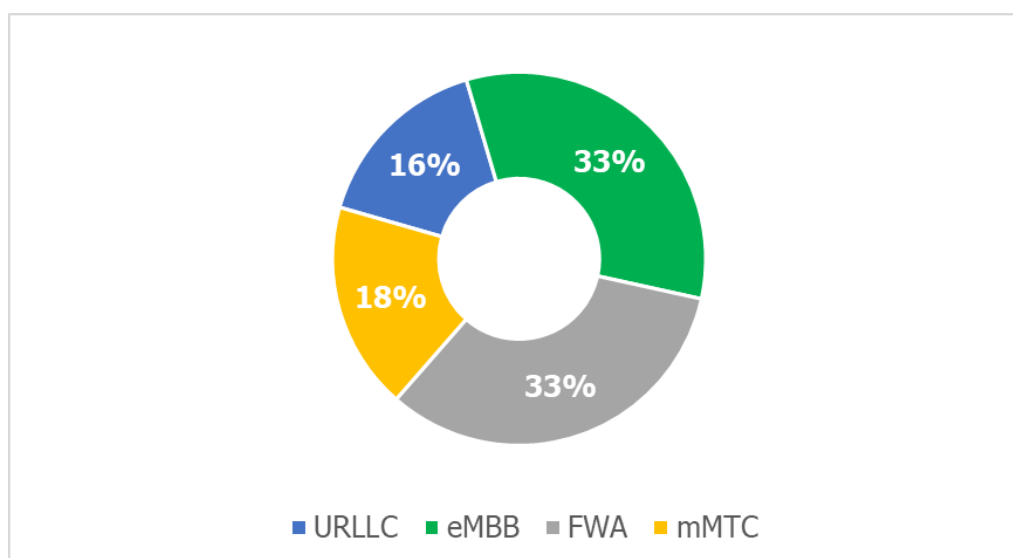
Jau šobrīd ir ieviestas un turpina izvērsties masīvās IoT tehnoloģijas (NB-IoT un Cat-M), kas šobrīd ietver aptuveni 330 milj. pieslēgumu. Masīvie IoT galvenokārt sastāv no plašu teritoriju lietošanas gadījumiem, savienojot zemas sarežģītības un zemas cenas iekārtas, kurām ir ilgs baterijas kalpošanas laiks un relatīvi zema caurlaidspēja. Cat-M un NB-IoT veic vienmērīgu evolūciju 5G tīklos, un tos var turpināt izvērst tajās pašās frekvenču joslās kā šobrīd. Šī brīža visplašāk izvērstās masīvās IoT iekārtas ietver dažāda veida skaitītājus, sensorus un izsekošanas ierīces, jo šīs ierīces un tām atbilstošās lietojumprogrammas (viedā uzskaitē, līdzekļu izsekošana) ir viegli integrējamas un izvietojamas. Platjoslas IoT pārsvarā aptver plašu teritoriju lietošanas gadījumus, kuriem nepieciešama augstāka caurlaidspēja, zemāks latentums un lielāks datu apjoms, kas šobrīd var būt nodrošināts, izmantojot 4G tehnoloģiju. Paredzams, ka līdz 2026. gada beigām 44 % no visiem mobilo IoT pieslēgumiem būs platjoslas IoT.

Ar 5G (NR) ieviešanu, arī šajā segmentā nodrošināmie caurlaidspējas rādītāji ievērojami palielināsies. Kritiskie IoT (CIoT), kas paredzēti laika ziņā kritiskai saziņai gan plaša, gan lokāla mēroga lietošanas gadījumos, un kuriem ir būtiska garantēta datu piegāde ar noteiktiem latentuma rādītājiem, tiks ieviesti 5G tehnoloģijas tīklos. Tādējādi galalietotājiem, uzņēmumiem un sabiedriskām organizācijām dažādos sektoros varēs tikt nodrošināts plašs laika ziņā kritisku pakalpojumu klāsts, piemēram, mākoņbalstītu AR/VR, attālināta mašīnu un transporta kontrole, mākoņrobotika, uzlabotā tiešsaistes spēlēšana un reāllaika mašīnu un procesu koordinēšana un kontrole. Paredzams, ka 2022. gadā tiks ieviestas pirmās komerciālās ierīces, kas atbalsta laika ziņā kritiskos sakarus. [1][5][6][10]

ITU IMT-2020 rekomendācijas izmantošanas scenāriji un tiem atbilstošie pakalpojumu piemēri [8][9][10]

Izmantošanas scenārijs	Nodrošināmo pakalpojumu piemēri
eMBB	4K/8K UHD video; AR/VR; tīmekļa spēles; uzlabotie mobilie mediju pakalpojumi; mājas platjosla; automašīnu darbības u.c.
URLLC	Industriālā automatizācija; attālināta rūpniecība/ ķirurģija; pašbraucošas automašīnas; īpaši uzticamas lietojumprogrammas.
mMTC	Guadrās mājas/ ēkas; sabiedriskie pakalpojumi; gudrā lauksaimniecība; loģistika; gudrā pilsēta.

GSMA iedala FWA kā atsevišķu 5G izmantošanas scenāriju un lēš, ka tas kopā ar uzlaboto mobilo platjoslu eMBB, nākamajā desmitgadē nodrošinās divas trešdaļas no kopējiem ar 5G tehnoloģiju saistītajiem ekonomiskajiem ieguvumiem [4].



1.7. att. Prognozētais globālais ar 5G tehnoloģiju saistīto ekonomisko ieguvumu procentuālais sadalījums pēc lietošanas gadījuma 2020.–2030.gadā; Avots: GSMA [4]

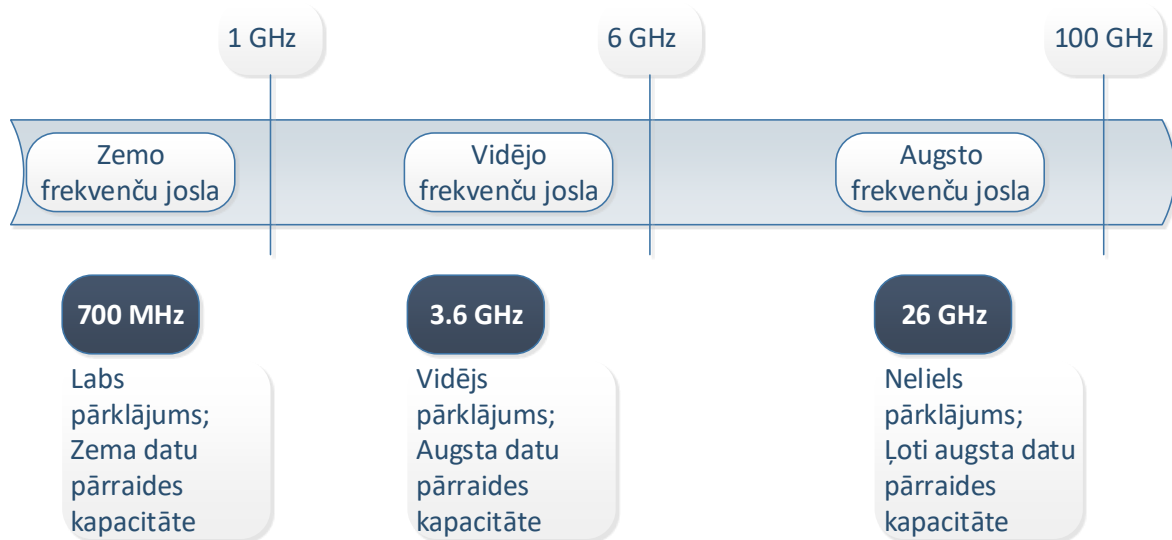
IMT-2020 standartā paredzēto kvalitātes rādītāju nodrošināšana

Uzlaboti kvalitātes rādītāji 5G tehnoloģijas tīklos ir iespējami, pateicoties tajā izmantotajām tehnoloģijām un tā izbūvei paredzētam frekvenču joslu iedalījumam. Tā vispārīgi 5G tehnoloģijas ieviešana ir paredzēta trīs dažādās frekvenču joslās, kas nodrošina atšķirīgas tīkla iespējas atbilstoši identificētajiem lietošanas gadījumiem. Eiropā ir identificētas trīs 5G ieviešanai piemērotākās radiofrekvenču spektra joslas:

- 700 MHz² radiofrekvenču spektra josla, kas ir piemērota plašāku teritoriju pārklājuma ar 5G nodrošināšanai, piemēram, lauku teritorijās.

² 694-790 MHz

- 3,6 GHz³ radiofrekvenču spektra josla, kas ļauj nodrošināt lielus datu pārraides ātrumus blīvi apdzīvotās teritorijās.
- 26 GHz⁴ radiofrekvenču spektra josla, kas ņemot vērā šīs joslas signāla izplatīšanās īpašības, tiks izmantota, lai nodrošinātu pārklājumu ierobežotās teritorijās, kur nepieciešami ļoti augsti datu pārraides ātrumi (1 gigabits sekundē un vairāk), piemēram, transporta mezglos, izklaides vietās, rūpniecības vai mazumtirdzniecības vietās. [1][11]



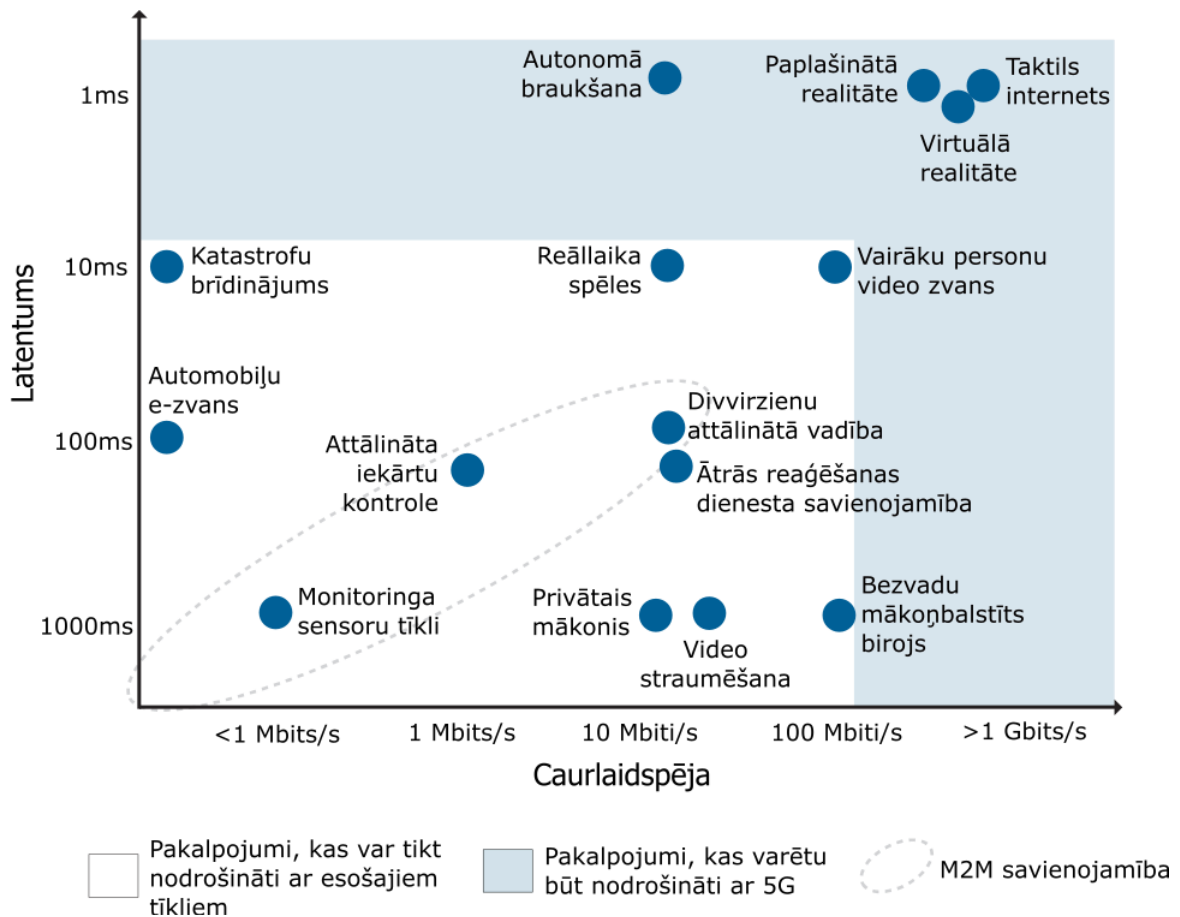
1.8. att. 5G tehnoloģijas izvēršanai izmantojamie frekvenču diapazoni un to vispārīgs raksturojums atbilstoši Pasaulē radiosakaru konferences WRC-15 darba kārtībai un Starptautiskās telekomunikāciju savienības (ITU) pētījumiem; Avots: [50]

Zemajā un vidējā frekvenču joslā pakalpojums var būt nodrošināts, izmantojot esošos makro torņus, nodrošinot arī, ka tas ir pieejams iekštelpās. Pakalpojuma nodrošināšanai augstajā frekvenču joslā tiks izmantoti torņi un tuvas darbības bezvadu piekļuves punktu (“mazās šūnas”) masti, lai pārklātu ārtelpas, savukārt iekštelpās pārklājums tiks nodrošināts, izmantojot iekštelpu tuvas darbības bezvadu piekļuves punktu risinājumus. [1]

Platjoslas interneta plašāka pieejamība sekmē iespējamo sniegto pakalpojumu klāsta daudzveidību dažādu 5G lietošanas scenāriju ietvaros.

³ 3,4-3,8 GHz radiofrekvenču spektra josla;

⁴ 24,25-27,5 GHz radiofrekvenču spektra josla;



1.9. att. Potenciāliem 5G izmantošanas gadījumiem nepieciešamo caurlaidspējas un latentuma rādītāju atspoguļojums; Avots: GSMA Intelligence [9]

Ņemot vērā interneta pakalpojuma izmantošanas tendences un paredzētos interneta pielietojumus, kļūst acīmredzami, ka papildus platjoslas izplatības sekmēšanai, ir svarīgi arī nodrošināt tās pieejamību atbilstošā kvalitātē. Līdz ar to par vienu no atskaites punktiem platjoslas tīklu plānošanā un izvēršanā, kā arī noteiktu kvalitātes līmeni prasīšu tehnoloģisko risinājumu ieviešanā, kļūst interneta pakalpojuma kvalitātes rādītāji, kādus esošajā momentā ir iespējams nodrošināt konkrētā teritorijā.

Ņemot vērā platjoslas izplatības nozīmi, kā arī kvalitātes parametru rādītājus, kādiem ir jābūt nodrošinātiem, lai veicinātu pakalpojumu attīstību, sekmētu digitālās ekonomikas izaugsmi un nodrošinātu iedzīvotāju sociālo un ekonomisko līdzdalību sabiedrībā, Eiropas Savienības līmenī ir izstrādāts vispusīgs regulējums.

1.3. Platjoslas interneta kvalitātes prasību noteikšanas nepieciešamība un tiesiskais pamatojums

Elektronisko sakaru tirgus Eiropā ir atvērts konkurencei kopš 1998. gada. Tirgus liberalizācija veicināja gan jaunus, gan vēsturiskos elektronisko sakaru komersantus ieviest inovācijas un veikt ieguldījumus elektronisko sakaru tīkla attīstībā. Tā pavēra lietotājiem lielākas izvēles iespējas, rosināja pakalpojumu cenu samazinājumu, stimulēja arvien lielāku

fiksēto un mobilo pakalpojumu klāsta pieejamību, kā arī ietekmēja pakalpojumu kvalitātes uzlabošanu.

Jau tajā laikā Eiropas varasiestādes apjauta digitālo tehnoloģiju nozīmi Eiropas ekonomikas attīstībā. 2000. gada Lisabonas stratēģijā tika uzsvērts, cik svarīga Eiropas uzņēmumiem un iedzīvotājiem ir piekļuve lētai pasaules klases sakaru infrastruktūrai un plašam pakalpojumu spektram [12]. Lai nodrošinātu virzību uz šo mērķi, bija nepieciešams izstrādāt normatīvo bāzi, kas aptvertu dažādas elektronisko sakaru tīklu un pakalpojumu nodrošināšanas aspektus. Pamatojoties uz to un, lai veicinātu konkurenci elektronisko sakaru tirgū, kas savukārt veicinātu pakalpojumu pieejamību, cenu samazinājumu un pakalpojumu kvalitāti, tika izveidots Eiropas Savienības regulējums, kas sastāvēja no četrām direktīvām. Direktīvās bija noteikti kopējie reglamentējošiem noteikumi attiecībā uz elektronisko komunikāciju tīkliem un pakalpojumiem⁵, prasības attiecībā uz piekļuvi elektronisko komunikāciju tīkliem un ar tiem saistītām iekārtām un to savstarpēju savienojumu⁶, nosacījumi elektronisko komunikāciju tīklu un pakalpojumu atļaušanai (atļauju izsniegšanai)⁷, kā arī principi un noteikumi saistībā ar universālo pakalpojumu un lietotāju tiesībām attiecībā uz elektronisko sakaru tīkliem un pakalpojumiem (universālā pakalpojuma direktīva)⁸. Šīs direktīvas joprojām kalpo par pamatu prasībām, kas noteiktas elektronisko sakaru tīkliem.

Pirmie pamati elektronisko sakaru pakalpojumu kvalitātes prasībām bija ieviesti tieši universālā pakalpojuma direktīvā. Jēdziens universālais pakalpojums nozīmē minimālo elektronisko sakaru pakalpojumu kopumu, kuram par saprātīgu cenu ir jābūt pieejamam ikvienam iedzīvotājam to atrašanās vietā. Tas nozīmē, ka valstī būtu jābūt izveidotam mehānismam, kas uzliek par pienākumu vienam vai vairākiem komersantiem nodrošināt lietotājam pēc viņa pieprasījuma noteiktā atrašanās vietā pieslēgumu pakalpojumam, kas spēj uzturēt balss un datu apmaiņu tādā ātrumā, kas ir pietiekams piekļuvei tiešsaistes pakalpojumiem, kā arī jānodrošina šis pakalpojuma par saprātīgu cenu [13]. Tā kā komersantam, kuram ir uzlikta saistības nodrošināt universālo pakalpojumu, var rasties izmaksu apgrūtinājums, tad tika paredzēti noteikumi to izmaksu kompensācijai un finansējumam. Līdz ar to universālā pakalpojuma regulējums veicina lietotāju iespējas piekļūt lētai sakaru infrastruktūrai, kā arī rosina dibināt finansēšanas mehānismus elektronisko sakaru tīklu izvēršanai, tādējādi sekmējot informāciju un komunikāciju tehnoloģiju izplatību un digitālās ekonomikas pieaugumu.

⁵ Eiropas Parlamenta Un Padomes Direktīva 2002/21/EK (2002. gada 7. marts) par kopējiem reglamentējošiem noteikumiem attiecībā uz elektronisko komunikāciju tīkliem un pakalpojumiem (pamatdirektīva)

⁶ Eiropas parlamenta un padomes direktīva 2002/19/EK (2002. gada 7. marts) par piekļuvi elektronisko komunikāciju tīkliem un ar tiem saistītām iekārtām un to savstarpēju savienojumu (piekļuves direktīva)

⁷ Eiropas Parlamenta Un Padomes Direktīva 2002/20/EK (2002. gada 7. marts) par elektronisko komunikāciju tīklu un pakalpojumu atļaušanu (atļauju izsniegšanas direktīva)

⁸ Eiropas Parlamenta Un Padomes Direktīva 2002/22/EK (2002. gada 7. marts) par universālo pakalpojumu un lietotāju tiesībām attiecībā uz elektronisko sakaru tīkliem un pakalpojumiem (universālā pakalpojuma direktīva)

Kā redzams, universālā pakalpojuma prasībās ir iezīmēta pakalpojuma kvalitātes nozīme, tomēr nav definēti skaidri rādītāji, kas kalpotu par atskaites punktu prasību piemērošanā. Lai definētu skaidru vīziju par rādītājiem, uz kuriem jātiecas, 2010. gada Eiropas komisija sagatavoja stratēģiju “EIROPA 2020. Stratēģija gudrai, ilgtspējīgai un integrējošai izaugsmei”. Šī stratēģija bija pirmais dokuments, kurā bija noteikti skaidri mērķi interneta ātruma un izplatības skaitliskiem rādītājiem, kādi jāsasniedz paredzamā nākotnē. Globālā stratēģijas mērķa “sagatavot Eiropas Savienības tautsaimniecību nākamajai desmitgadei” sasniegšanai tikai izvirzītas darbības prioritātes un izveidotas pamatiniciatīvas, kuru mērķis bija kļūt par katalizatoru virzībā uz katras tematiskās prioritātes īstenošanu [14].

Komisijas paziņojumā tika skaidri uzsvērtā digitālās ekonomikas attīstības nozīme un tās tā brīža atpalicība no citiem pasaules reģioniem. Tika apzināts, ka viens no galvenajiem izaugsmes virzītājspēkiem ir informācijas un komunikācijas tehnoloģijas un viena no dominējošām Eiropas ekonomikas sastāvdaļām ir pakalpojumi. Attīstoties informācijas un komunikācijas tehnoloģijām, radās dažādi jauni pakalpojumi ar milzīgu potenciālu, bet lai šo potenciālu pilnībā izmantotu bija nepieciešamas izmaiņas gan tehnoloģiju attīstībā, it īpaši platjoslas izplatībā un ātrgaitas interneta pieejamībā, gan pakalpojumu plūsmā un to piekļuves iespējās patērētājiem un uzņēmumiem. Tādējādi pamatiniciatīvas “Digitālā programma Eiropai” mērķis bija paātrināt ātrgaitas interneta pakalpojumu ieviešanu un izmantot vienotā digitālā tirgus priekšrocības, ko tas sniedz mājsaimniecībām un uzņēmumiem. [14] Līdz ar to stratēģijas “Eiropa 2020” un “Digitālā programma Eiropai” noteica, ka līdz 2013. gadam visiem eiropiešiem jābūt sagādātai pamata platjoslai, **līdz 2020. gadam – visiem eiropiešiem jābūt piekļuvei internetam ar ātrumu virs 30 Mbiti/s un 50 % no Eiropas mājsaimniecībām vai vairāk jāabonē interneta pieslēgums ar ātrumu vairāk nekā 100 Mbiti/s.** [14][15]

Lai sasniegtu visus minētos mērķus stratēģijā “Digitālā programma Eiropai”, tika aprakstītas pasākumu kopas, kuras būtu jāpiemēro gan Eiropas, gan valsts līmenī, lai sasniegtu vēlamu ekonomisko izaugsmi un radītu noturīgu tautsaimniecisku un sabiedrisku labumu no digitālā vienotā tirgus, kas balstīts uz ātru un īpaši ātru internetu [15]. Lai sekmētu ātra un īpaši ātra interneta attīstību un pieejamību, “Digitālā programma Eiropai” definē vairākas apakšjomā, kas ir būtiskas šī mērķa sasniegšanai, un kuras vēlāk tika nostiprinātas dažādos Eiropas regulējumos, un tās ir: 1) vispārēja platjoslas pārklājuma ar palielinātu ātrumu garantēšana; 2) Nākamās paaudzes piekļuves (NGA) tīklu ieviešanas sekmēšana; 3) atklāta un neitrāla interneta nodrošināšanu.

Vispārēja platjoslas pārklājuma ar palielinātu ātrumu garantēšanai tika izveidota radiofrekvenču spektra daudzgadu politikas programma [16], kura nosaka pamatprincipus un mērķus spektra stratēģiskajai plānošanai, pārvaldībai, spektra piešķiršanai un izmantošanas saskaņošanai Savienības līmenī, tādējādi veicinot bezvadu elektronisko sakaru pakalpojumu un iekārtu iekšējo tirgu, nodrošinot elektroniskos sakarus, jo īpaši tiem iedzīvotājiem un uzņēmumiem, kas atrodas attālākajos un mazapdzīvotos rajonos, piemēram, lauku apvidos, un veicinot Eiropas stratēģijā noteikto platjoslas pieslēguma ātrumu pieejamību iedzīvotājiem.

Nākamās paaudzes piekļuves (NGA) tīklu ieviešanas sekmēšanai tika izdots Komisijas ieteikums par regulētu piekļuvi nākamās paaudzes piekļuves (NGA) tīkliem, kurā tika sniegti ieteikumi efektīvu ieguldījumu un inovāciju sekmēšanai jaunā un uzlabotā infrastruktūrā [17]. Lai veicinātu ātras un īpaši ātras platjoslas piekļuves ieviešanu, tika apzināta nepieciešamība sniegt ieguldījumu atbalstu un paredzēt pasākumus uz optisko šķiedru balstītu nākamās paaudzes piekļuves (NGA) tīklu ieviešanas veicināšanai.

Atklāta un neitrāla interneta nodrošināšanai tika izstrādāta regula par atvērtu internetu [18][19], kuras mērķis, bija veicināt uzņēmumu un lietotāju tiesības izplatīt un piekļūt informācijai un saturam internetā, lietot un sniegt pakalpojumus un aplikācijas, kā arī izmantot galiekārtas pēc savas izvēles, tādējādi neļaujot lieliem satura un aplikāciju sniedzējiem, izmantojot savu tirgus varu, traucēt konkurenci šajā darbības sektorā, kā arī interneta pakalpojuma sniedzējiem maldināt lietotājus par saņemamo pakalpojuma kvalitāti. Tādējādi atvērts un neitrāls internets sekmētu gan lietotāju iespējas piekļūt daudzveidīgam saturam un pakalpojuma klāstam, kas savukārt veicinātu jaunu uzņēmumu ienākšanu tirgū, arvien plašāku pakalpojumu attīstību un rezultātā digitālās ekonomikas izaugsmi.

Turpinot virzību uz digitālo vienoto tirgu un sakaru pakalpojumu attīstību, kā arī ņemot vērā izmaiņas digitālo pakalpojumu lietošanā, kas notika gadu laikā, 2015. un 2016. gadā tika izstrādātas stratēģijas par digitālo vienoto tirgu Eiropā [20] un virzību uz Eiropas gigabitu sabiedrību [21]. Šajās stratēģijās tika precizēti un papildināti jau iepriekš noteiktie stratēģiskie darbības virzieni, lai tie atbilstu aktuālajam digitālo pakalpojumu lietojumam un to turpmākam vajadzībām, kā arī ieteikts pilnveidot un pielāgot tiesisko regulējumu, apvienojot 2002. gada direktīvās noteiktās prasības konsolidētā Eiropas Elektronisko sakaru kodeksā. Jaunās stratēģijas paredzēja arī interneta kvalitātes prasību noteikšanu nākotnei. Tā kā digitālās tehnoloģijas attīstās straujiem tempiem, tad tika precizēti arī ātrgaitas interneta rādītāji un tā pieejamība, kādi nepieciešami, lai sasniegtu digitālās sabiedrības atbilstošu tehnoloģiju attīstību. Tādējādi stratēģija par virzību uz Eiropas gigabitu sabiedrību noteica, ka **līdz 2025. gadam visām Eiropas māsaimniecībām gan laukos, gan pilsētās jābūt pieejamam interneta pieslēgumam ar vismaz 100 Mbit/s lejupielādes ātrumu, ko var uzlabot līdz gigabitu ātrumam.** Papildus tam līdz 2025. gadam visām pilsētu teritorijām un visām sauszemes transporta maģistrālēm ir jābūt nepārtrauktam 5G pārklājumam. [21] 5G pieslēguma tehnoloģijas tīkla ieviešanai un izvēršanai Eiropā pastāv liela interese politisku un ekonomisku apsvērumu dēļ. Lai nodrošinātu vienotu 5G tehnoloģijas ieviešanas scenāriju īstenošanu, kā arī lai stimulētu tīkla izvēršanu nospraustajos termiņos, tika izdots Eiropas Komisijas rīcības plāns [22], kurā tika noteikti 5G tehnoloģijai atvēlamais frekvenču diapazons, ieviešanas laika grafiks un citi aspekti, kas būtiski tehnoloģijas izvēršanai.

Kā jau tika minēts, lai sasniegtu gan 2020. gadam nospraustos mērķus, gan tos, kurus paredzēts īstenot līdz 2025. gadam, bija nepieciešama kardināla tiesiskā regulējuma pārskatīšana. Tādējādi, kā to paredzēja stratēģija par vienoto digitālo tirgu, 2018. gadā tika izdots Eiropas elektronisko sakaru kodekss, kurš ietver atjauninātas un precizētas 2002. gada

direktīvu prasības un paredz dažādu jaunu principu un noteikumu piemērošanu, tajā skaitā attiecībā uz platjoslas izplatību un ātrdarbīgu tīklu definēšanu. Tas iekļauj: 1) noteikt kritērijus, kuriem ir jāatbilst elektronisko sakaru tīklam, lai to varētu uzskatīt par ļoti augstas veiktspējas tīklu; 2) veikt apsekojumu par to, kur ģeogrāfiski iesniedzas elektronisko sakaru tīkli, kas spēj nodrošināt platjoslu; 3) koordinēt laika grafiku 5G frekvenču joslu piešķiršanai; 4) noteikt lietotāju tiesību aizsardzību, tajā skaitā attiecībā uz pakalpojumu kvalitāti; 5) nodrošināt, ka visiem patērētājiem to teritorijās par pieņemamu cenu, ir pieejams atbilstīga platjoslas interneta pakalpojums fiksētā atrašanās vietā, kurš atbalsta vismaz minimālo pakalpojumu komplektu, tādu kā, e-pasts, meklētājprogrammas, mācību un izglītības pamatrīki tiešsaistē; avīzes vai ziņas tiešsaistē; preču un pakalpojumu iegāde vai pasūtījumi tiešsaistē; darba meklēšana un darba meklēšanas rīki; profesionālo kontaktu veidošana; internetbankas pakalpojumi; e-pārvaldes pakalpojumu izmantošana; sociālie plašsaziņas līdzekļi un tūlītējā ziņapmaiņa; izsaukumi un videoizsaukumi (standarta kvalitātē); 6) nodrošināt, ka galalietotājiem ir piekļuve bezmaksas salīdzināšanas rīkam, kurā ir iekļauta pārredzama, atjaunināta un salīdzināma informācija par pakalpojumiem un to cenām [23].

Visu šo un citu Kodeksā noteikto mērķu koordinēšanai un to īstenošanas scenāriju definēšanai, tika dibinātas Eiropas Elektronisko komunikāciju regulatoru iestādes (BEREC) ekspertu darba grupas, kurās tika izstrādātas vadlīnijas un ziņojumi par attiecīgajiem jautājumiem.

Lai noteiktu kritērijus ļoti augstas veiktspējas tīklam, pirmkārt, tika izstrādātas BEREC vadlīnijas, par pakalpojuma kvalitātes parametriem, kas ir būtiski tīkla veiktspējas raksturošanai [24]. Tāpat BEREC izstrādāja vadlīnijas kurās definēja ļoti augstas veiktspējas tīkla kritērijus un tiem atbilstošās kvalitātes parametru sliekšņa vērtības [25].

Saistībā ar ģeogrāfisko apsekojumu BEREC izstrādāja vadlīnijas, kurā iekļāva redzējumu par platjoslas tīklu, tajā skaitā ļoti augstas veiktspējas tīklu izplatības novērtēšanas un atspoguļošanas metodēm. Kopumā vadlīnijas paredz informācijas iegūšanu no operatoriem, atspoguļojot fiksētās un mobilās platjoslas teorētisko pieejamību [26]. Vadlīnijas nosaka kādā mērogā jābūt pieejamai informācijai par pieslēgumiem, tas ir, fiksētā tīklā informācijai par platjoslas pieslēgumu jābūt nodrošinātai katrā pieslēguma adresē, bet mobilā – vismaz 100 m × 100 m poligona ietvaros. Paredzēts arī attēlot pieslēgumu kvalitātes rādītājus, precīzāk, maksimālo un lielākās noslodzes stundās prognozēto lejupielādes un augšupielādes ātrumu. Šāda teorētiska informācija raksturo pakalpojuma pieejamību un kvalitāti QoS-1 līmenī (turpmākās nodaļās tiks sniegta plašāka informācija par kvalitātes līmeņiem), kas, atbilstoši vadlīnijās noteiktajam, ir vispārīgs apzīmējais un nav attiecināms uz lietotāju pieredzi [26].

Veids, kā nodrošināt piekļuvi ļoti augstas veiktspējas tīklam plašā mērogā, ir izvērst 5G bezvadu pieslēguma tehnoloģiju. Tomēr, lai īstenotu novatorisko uzņēmējdarbības modeļu ieviešanas iespējamību, ko sagaida industrija no 5G tīkla, ir nepieciešama vienotu standartu izstrāde un harmonizēta tehnoloģijas ieviešana, kas ir būtiska, lai nodrošinātu pakalpojuma nepārtrauktību pāri robežām (piemēram, savienoto transportlīdzekļu gadījumā) [22]. Lai

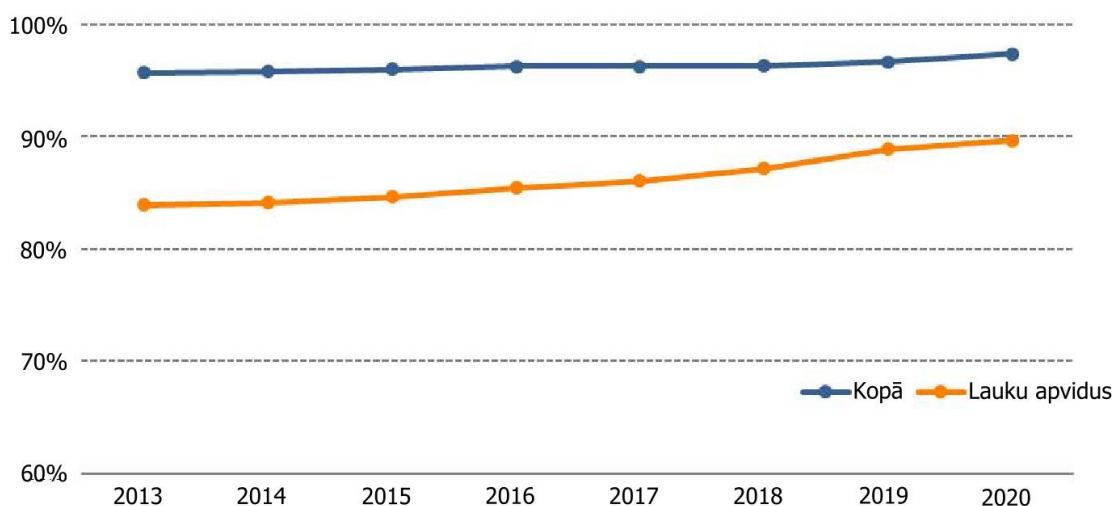
veicinātu 5G tehnoloģijas tīklu koordinētu ieviešanu, Eiropas Komisijas rīcības plānā [22] ir paredzēti virkne dažādu aspektu, tajā skaitā dalībvalstīm ir nepieciešams izstrādāt tehnoloģijas ieviešanas programmu nacionālā līmenī. Latvijā 5G ieviešanas plāns ir noteikts satiksmes ministrijas izstrādātā 5G tehnoloģijas ieviešanas ceļvedī [28]. Jāņem vērā, ka 5G tehnoloģijas ekosistēmas izvēršanai var būt ietekme uz esošo regulēšanas ietvaru, kā arī uz lietotāju un vertikālo tirgu saņemto pakalpojumu kvalitāti. Šīs iespējamās ietekmes un to sekas ir iztīrītas BEREC ziņojumā par 5G tehnoloģijas ietekmi regulēšanā un tās lomu veicinot 5G ekosistēmu [30].

Attiecībā uz lietotāju tiesību aizsardzību, ir noteikts, ka lietotājiem ir jābūt pilnā mērā informētiem par sniegto interneta pakalpojumu, tostarp par šī pakalpojuma kvalitātes nosacījumiem. Atbilstoši Regulai par atvērtu internetu un tās ieviešanas vadlīnijām, lietotājiem ir jābūt pieejamai skaidrai un saprotamai informācijai par jebkādiem piemērotiem datplūsmas pārvaldības pasākumiem, kā arī par minimālo, parasti pieejamo, maksimālo un reklamēto pieslēguma ātrumu [18][19]. Turklāt valsts regulatīvās iestādes interneta pakalpojuma sniedzējiem var noteikt prasības attiecībā uz pakalpojuma tehniskiem raksturlielumiem, minimālās pakalpojumu kvalitātes prasības un citus piemērotus un nepieciešamus pasākumus. Latvijā Vispārējās atļaujas noteikumos elektronisko sakaru nozarē ir noteiktas prasības, ka mobilajā tīklā operatoram ir pienākums nodrošināt minimālo garantēto augšupielādes un lejupielādes pieslēguma ātrumu, kas nav zemāks kā platjoslas ātruma zemākā robeža 256 kilobiti sekundē, savukārt fiksētajā tīklā – minimālo garantēto augšupielādes un lejupielādes ātrumu, kas nav zemāks kā 20 % no elektronisko sakaru pakalpojumu līgumā norādītā maksimālā (reklamētā) pieslēguma ātruma skaitliskās vērtības vai ātruma diapazona augšējās robežas [29]. Lai novērtētu, vai sniegtais pakalpojums atbilst noteiktajiem rādītājiem, ir nepieciešama mērīšanas sistēma. Lai veicinātu vienotu pieeju mērījumu veikšanā, tika izstrādāta BEREC tīkla neitralitātes regulējuma novērtēšanas metodoloģija [31], atbilstoši kurai tika sagatavota BEREC tīkla neitralitātes mērīšanas sistēmas specifikācija [32] atvērtā koda interneta mērīšanas sistēmas programmatūras koda [33] izstrādei, kas nodrošina dažādu interneta pakalpojuma kvalitātes parametru novērtēšanu un datplūsmas pārvaldības piemērošanas noteikšanu [31][32].

Attiecībā uz salīdzināšanas rīku ir noteikts, ka galalietotājiem vajadzētu būt iespējai bez grūtībām salīdzināt dažādu tirgū piedāvāto pakalpojumu cenas, pamatojoties uz viegli pieejamā veidā publiskotu informāciju par tarifiem, pakalpojuma kvalitāti, nosacījumiem, kas attiecas uz piegādātajām galiekārtām, un citiem attiecīgiem rādītājiem. Šim nolūkam jābūt nodrošinātiem neatkarīgiem bezmaksas salīdzināšanas rīkiem [23].

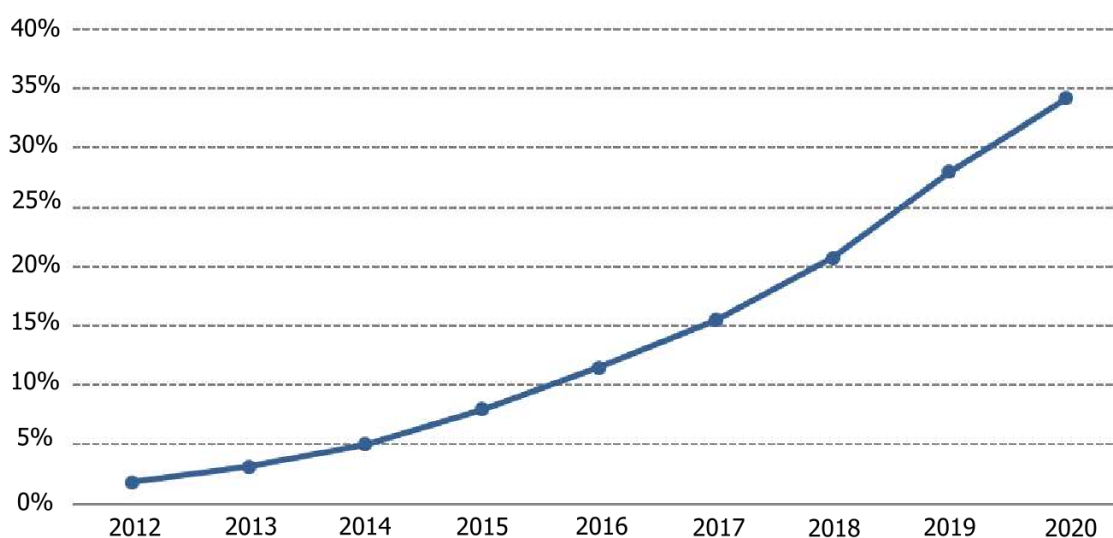
1.4. Platjoslas interneta piekļuves rādītāji un Eiropas stratēģisko mērķu sasniegšanas novērtējums

Izvērtējot 2021. gada Digitālās ekonomikas un sabiedrības indeksa (DESI) rādītājus par digitālo infrastruktūru, ko analizē un publicē Eiropas Komisija [3], secināms ka kopumā tuvu 100 % Eiropas mājsaimniecību ir nodrošināta fiksētā platjoslas interneta pieejamība, savukārt lauku apvidos – aptuveni 90 % mājsaimniecību.



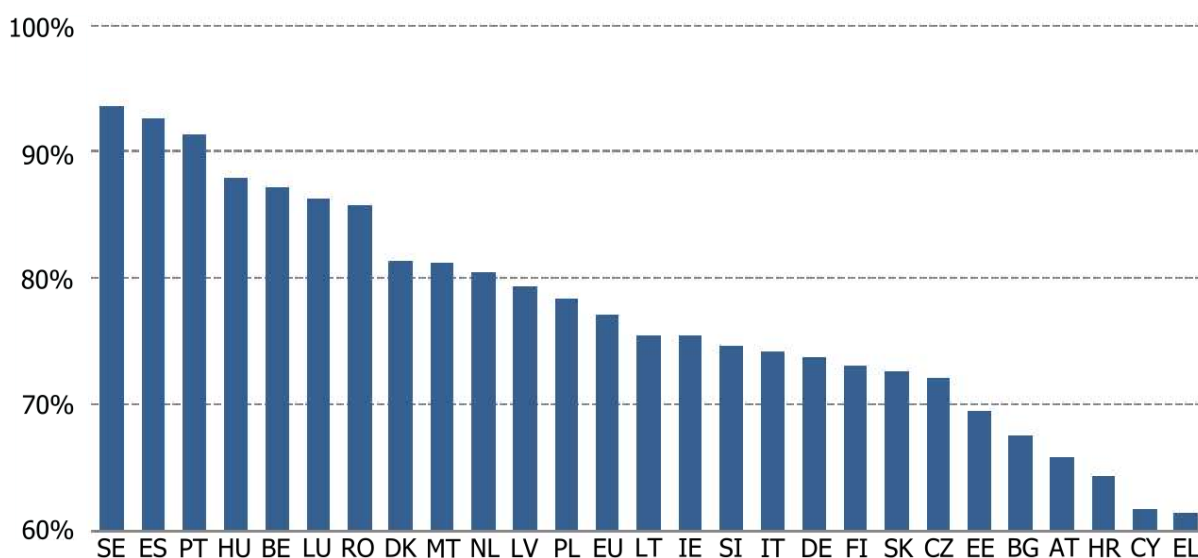
1.10. att. DESI dati par fiksētās platjoslas pārklājumu Eiropā (% no mājsaimniecībām) 2013-2020.gadā; Avots: [3]

Ņemot vērā, ka ar platjoslas internetu uzskata pieslēgumus ar datu pārraides ātrumu vismaz 256 kbiti/s, kas mūsdienu interneta lietošanas vajadzībām ir krietni par zemu, tad tiek analizēts arī to mājsaimniecību daļa, kurām tiek nodrošināts vismaz 30 Mbiti/s un vismaz 100 Mbiti/s pieslēguma ātrums.



1.11. att. Mājsaimniecību procentuālais sadalījums, kas izmanto vismaz 100 Mbiti/s fiksētā platjoslas interneta pieslēgumu 2012-2020.gadā; Avots: DESI [3]

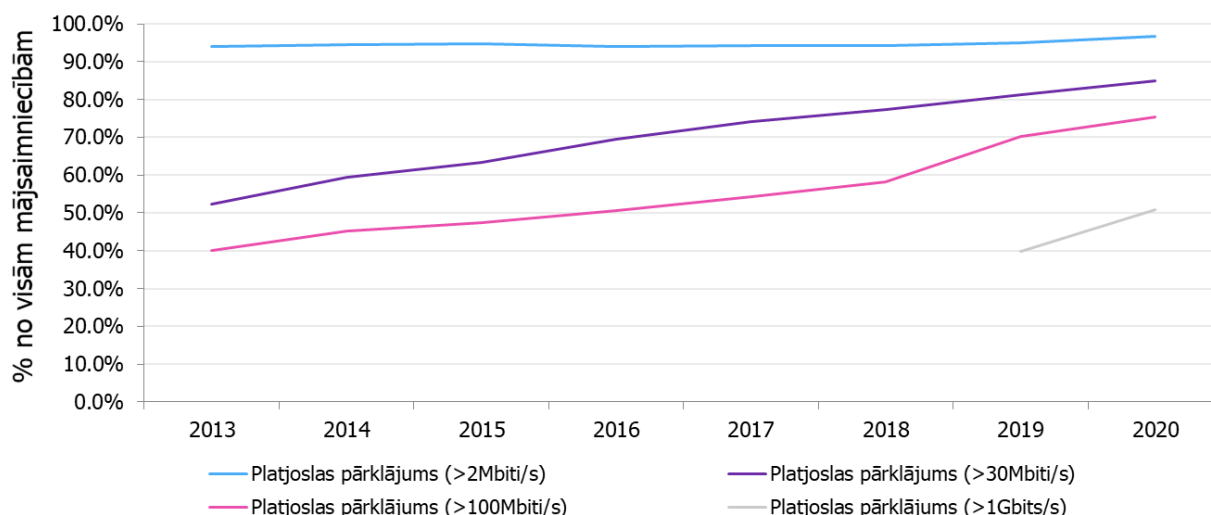
Atbilstoši DESI datiem, kopumā Eiropā vairāk nekā 75 % mājsaimniecību izmanto fiksēto platjoslas pieslēgumu un, kā redzams 1.11. attēlā, tikai 35 % no tām izmanto fiksētā platjoslas interneta pieslēgumu ar ātrumu vismaz 100 Mbiti/s. Par iemeslu tam var būt gan interneta pakalpojuma ar šādu pieslēguma ātrumu nepieejamība, gan arī lietotāju izvēle izmantot pieslēgumu ar zemākiem ātruma rādītājiem, piemēram, cenas vai citu iemeslu dēļ. Latvijā kopumā aptuveni 60 % mājsaimniecību izmanto fiksēto platjoslas pieslēgumu, no kurām 40 % - ar pieslēguma ātrumu vismaz 100 Mbiti/s. Ņemot vērā Latvijas likumdošanu, šādiem pieslēgumiem nodrošināmais minimālais garantētais ātrums ir vismaz 20 Mbiti/s. Tātad vienai trešdaļai no tām Latvijas mājsaimniecībām, kas izmanto fiksēto platjoslas internetu, ir nodrošināti pieslēgumi ar ātrumu zemāku par 100 Mbiti/s, kas, kā jau minēts, var būt attiecīgi pakalpojuma nepieejamības vai lietotāja izvēles dēļ.



1.12. att. Mājsaimniecību procentuālais sadalījums, kas izmanto vismaz 100 Mbiti/s fiksētā platjoslas interneta pieslēgumu dažādās Eiropas valstīs 2020. gadā; Avots: DESI [3]

Tāpat atbilstoši DESI informācijai, 25 % no Latvijas mājsaimniecībām izmanto tikai mobilā interneta pieslēgumu. Par pamatu šādai izvēlei var būt gan mobilā interneta kvalitātes rādītāju nodrošināšana atbilstošā līmenī, kā rezultātā lietotāji fiksētā interneta pieslēguma vietā izvēlas mobilo, gan arī fiksētā interneta pieslēguma nepieejamība vai tā nepietiekama kvalitāte.

Analizējot DESI sniegto informāciju par mobilā platjoslas interneta pieejamību, secināms, ka kopumā Eiropā uz 2020. gadu gan pilsētās, gal lauku apvidos 4G tīkla pārklājums ir nodrošināts vairāk nekā 98 % teritorijas. Tā kā Latvijā šobrīd noteiktās minimālās pieslēguma ātruma prasības mobilā tīklā sniegtam interneta piekļuves pakalpojumam paredz nodrošināt pieslēguma ātrumu ne zemāku kā 256 kbiti/s, tad, lai arī šie pieslēgumi vērtējami kā platjoslas interneta pieslēgumi, to kvalitātes rādītāji var ievērojami atšķirties no Eiropas stratēģiskajos mērķos definētajiem rādītājiem.



1.13. att. OECD sniegtā informācija par platjoslas pārklājumu atkarībā no pieslēguma ātruma grupas; Avots: OECD (pamatojoties uz IHS Markit, Omdia un Point Topic kompāniju pētījuma “Platjoslas pārklājums Eiropā 2020” ietvaros Eiropas Komisijai sagatavotajiem datiem)

Tā kā atspoguļotie rādītāji tiek aprēķināti, pamatojoties uz valstu sniegto informāciju par nodrošinātajiem interneta pakalpojuma pieslēgumiem un teorētiskām pārklājuma aplēsēm, tad faktiskā situācija var ievērojami atšķirties un nodrošinātie interneta pakalpojuma kvalitātes rādītāji nav skaidri identificējami. Tomēr, analizējot DESI rādītājus, secināms, ka arī pamatojoties uz esošajā griezumā ievāktajiem datiem, kopumā Eiropas stratēģijā definētais mērķis “līdz 2020. gadam – visiem eiropiešiem jābūt piekļuvei internetam ar ātrumu virs 30 Mbit/s un 50 % no Eiropas mājsaimniecībām vai vairāk jāabonē interneta pieslēgums ar ātrumu vairāk nekā 100 Mbit/s” nav sasniegts. Savukārt faktiskie platjoslas pakalpojuma pieejamības un kvalitātes rādītāji varētu būt vēl zemāki.

Lai arī stratēģiskie mērķi ir nosprausti, nosacījumi, tostarp atsevišķas kvalitātes prasības, kuriem jāveicina šo mērķu sasniegšana, ir iekļautas, tomēr nav izstrādāts mehānisms, kas ļautu secināt par faktisko attīstības stadiju un nodrošinātu vienotu salīdzinošu rādītāju iegūšanu progresa novērtēšanai. To apliecina gan Komisijas paziņojumā par digitalizācijas programmu paustais, ka **patērētājiem nav pārlicības par tiem sniegto pakalpojumu faktisko ātrumu** [34], gan BEREC vadlīnijās par tīklu ģeogrāfisko apsekojumu noteiktais, ka **informācija, kas tiks iegūta ģeogrāfiskā apsekojuma iniciatīvas rezultātā, ir vispārīgs rādītājs un nav attiecināms uz lietotāju pieredzi**, kā arī to, ka **šo informāciju ir nepieciešams apstiprināt** [26]. Piemēram, noteiktas tehnoloģijas pieslēguma pieejamība nebūt negarantē, ka ātruma rādītāji tieksies uz šīs tehnoloģijas maksimālām vērtībām. Vienas tehnoloģijas ietvaros komersants var piedāvāt izvēlēties pakalpojumu ar atšķirīgiem tarifu plāniem, kuros visbiežāk atšķiras arī piedāvātās pieslēguma ātruma vērtības. Un pat šajā gadījumā, tarifa plāna maksimālais pieslēguma ātrums negarantē lietotājam nepārtrauktu šāda ātruma nodrošināšanu. Pieslēguma ātruma rādītāji var samazināties gan atšķirīgu ārēju apstākļu, gan komersanta

komerciālo apsvērumu dēļ. Mobilos elektronisko sakaru tīklos pārklājuma un pakalpojuma pieejamības novērtēšanai izmanto teorētiskos aprēķinu modeļus. Lai gan šie modeļi ļauj komersantiem ar lielu precizitāti plānot tīkla ierīkošanu un izvēršanu, tomēr attiecībā uz nepārtrauktu pakalpojuma pieejamību vai kvalitātes līmeni, kādā tas pieejams lietotājiem, šādi modeļi nenodrošina faktisku rādītāju noteikšanu un bieži vien atšķiras no reālās pieejamības vai kvalitātes. Līdz ar to iezīmējas šādas būtiskākās problēmas:

- 1) nodrošinot tikai teorētisku informāciju par tīkla izplatību un tā veiktspēju, tiek sniegta informācija par potenciālo platjoslas izvērsumu un iespēju piekļūt ātrdarbīgam internetam. Reālā pakalpojuma pieejamība var ievērojami atšķirties, tāpēc nepieciešama teorētiskās informācijas validācija.
- 2) lai validētu teorētisko informāciju, kā arī lai iegūtu objektīvus un salīdzināmus rādītājus, kas atspoguļo faktisko platjoslas interneta attīstības līmeni valstī, nepieciešami vienoti un definēti mērīšanas principi.
- 3) mērīšanas principiem jāietver gan tehnisko mērīšanas metodoloģiju, gan atbilstošas mērījumu izlases izvēli, gan praktisko mērījumu norisi, kas mazinātu nelabvēlīgu ietekmju iespēju uz rezultātu objektivitāti.
- 4) šādas sistēmas ieviešana, nodrošinātu reālas informācijas iegūšanu, kas ļautu veikt pamatotus finansiālos ieguldījumus turpmākai tīklu attīstībai, ļautu novērtēt sniegto pakalpojumu atbilstību kopējiem Eiropas mērķiem un industrijas vajadzībām, samazinātu informācijas sadrumstalotību, veicinātu digitālo pakalpojumu izplatību.

1.5. Platjoslas interneta pakalpojuma pieejamības un kvalitātes rādītāju kartēšana

Lai pārraudzītu Eiropas stratēģijās “Digitālā programma Eiropai” un “Eiropas gigabitu sabiedrība” definēto mērķu sasniegšanu un platjoslas izplatības progresu visā Eiropā, ir nepieciešams mehānisms, kas nodrošinātu attiecīgās informācijas atspoguļojumu nepieciešamajā mērogā. Kā risinājums, kas ļautu viegli un ērti novērtēt platjoslas izplatību Eiropas mērogā un tādējādi plānot nepieciešamos ieguldījumus un pieņemt lēmumus par valsts atbalsta piemērošanu platjoslas tīklu attīstībai, tika piedāvāts izveidot platjoslas kartēšanas iniciatīvu. Šim nolūkam tika uzsākts projekts Platjoslas pakalpojumu kartēšana Eiropā SMART 2014/0016. Projekta mērķis ir uzraudzīt augstas kapacitātes tīklu izvēršanu un platjoslas interneta kvalitāti Eiropā, kas nodrošināts ar interaktīvas kartēšanas platformas palīdzību. [34] Šajā projektā paredzēts, ka datus brīvprātīgi sniedz dalībvalstu ministrijas un valsts regulatīvās iestādes, kā arī privāto kartēšanas iniciatīvu nodrošinātāji un pūļa resursēšanas (*angl. – crowdsourcing*) lietojumprogrammu sniedzēji. Tā kā dažādās valstīs un dažādos rīkos apkopotā informācija raksturo atšķirīgu interneta kvalitātes interpretāciju, tad projektā ir paredzēti arī vairāki interneta kvalitāti raksturojošie līmeņi.

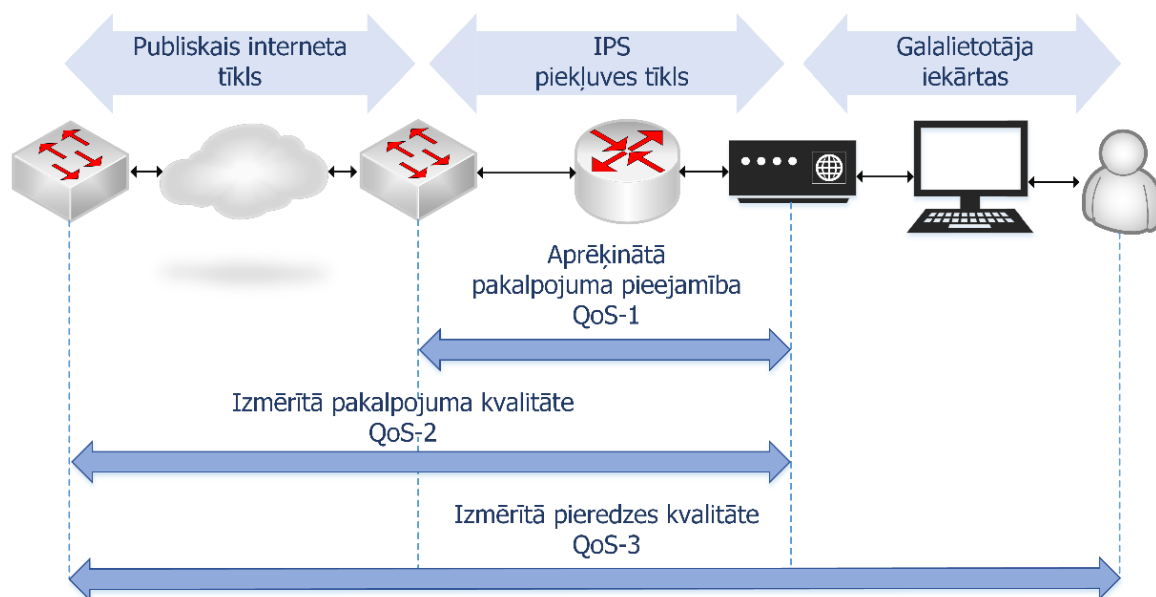
Vēlāk stājoties spēkā Eiropas elektronisko sakaru kodeksam prasība par ģeogrāfisko tīklu apsekošanu jeb kartēšanu kļuva par obligātu. Tādējādi, atbilstoši Eiropas elektronisko sakaru kodeksa 22.pantam līdz 2023.gada 21.decembrim dalībvalstīs jāveic apsekojums par to, kur ģeogrāfiski iesniedzas elektronisko sakaru tīkli, kas spēj nodrošināt platjoslu, kā arī ģeogrāfiskajā apsekojumā savāktajai informācijai jābūt pietiekami detalizētai un jā satur pietiekamas ziņas par pakalpojuma kvalitāti un tās parametriem. [23] Lai veicinātu ģeogrāfiskās apsekošanas un prognozēšanas konsekventu piemērošanu, BEREC tika uzdots izdod pamatnostādnes, kam jāpalīdz valsts regulatīvajām un/vai citām kompetentajām iestādēm konsekventi īstenot savus pienākumus. [23][26]

Ģeogrāfiskā apsekojuma prasību pamatā ir Platjoslas pakalpojumu kartēšanas projekta pamatidejas. Tādējādi interneta pakalpojuma kvalitātes rādītāju atspoguļošanas mērogs un kvalitāti raksturojošo līmeņu princips ir saglabāts.

Interneta pakalpojuma kvalitāti raksturojošo līmeņu un datu atspoguļošanas mēroga novērtējums

Platjoslas pakalpojumu kartēšana projekta izstrādes gaitā tika aptaujāti gan privātā sektorā dibinātie interneta kvalitātes uzraudzības rīku turētāji, gan nacionālā līmenī izveidotās platjoslas interneta novērtēšanas iniciatīvas, kā rezultātā tika konstatēta ievērojama atšķirība nodrošinātajās uzraudzības pieejās un kvalitātes rādītāju atspoguļojuma būtībā. Līdz ar to, lai sagrupētu rezultātus salīdzināmos griezumos, tika definēti trīs kvalitātes novērtēšanas līmeņi:

1. QoS-1 līmenis: aprēķinātā pakalpojuma pieejamība – atspoguļo teorētisko elektronisko sakaru tīkla pārklājuma un attiecīgas kvalitātes interneta pieejamības rādītāju novērtējumu;
2. QoS-2 līmenis: mērītā pakalpojuma pieejamība – atspoguļo faktisko pakalpojuma pieejamību un tā kvalitātes rādītājus, kas novērtēti, veicot mērījumus ar tam paredzētu mērīšanas aprīkojumu, neiekļaujot galalietotāja vidi;
3. QoS-3 līmenis: mērītā pakalpojuma lietošanas pieredze – atspoguļo faktisko galalietotāju pieredzi, lietojot pakalpojumu, kas novērtēts veicot mērījumus ar mērīšanas rīkiem, kas ietver galalietotāja vides ietekmi.



1.14. att. Platjoslas kartēšanas projektā ieviesto interneta pakalpojuma kvalitātes novērtējuma līmeņu shematisks atspoguļojums; Avots: [34]

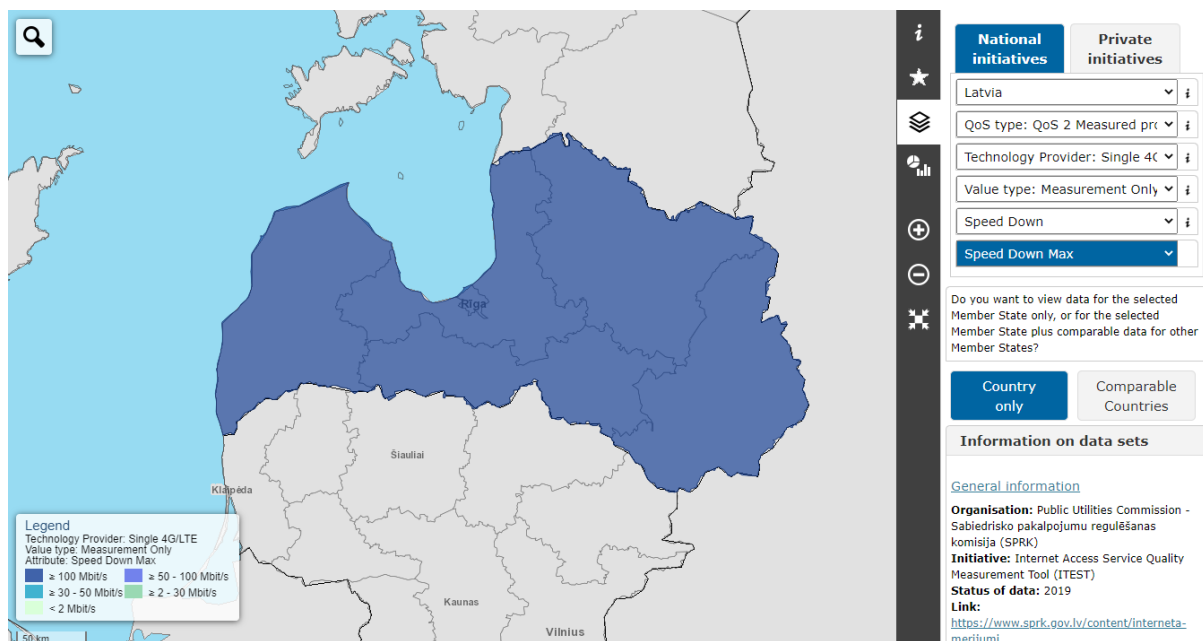
Platjoslas pakalpojumu kartēšana projekta ietvaros tika izstrādāta interaktīva Eiropas karte, kurā informācija par katrā Eiropas valstī novēroto pakalpojumu kvalitāti tiek attēlota divos ģeogrāfisko koordināšu sistēmu dalījumos: NUTS-3 statistisko teritoriālo vienību klasifikācijas sistēmā un EPSG:3035 - ETRS89-LAEA Eiropas sauszemes atskaites koordināšu sistēmā 1 kilometra režģī. NUTS-3 dalījums iedala Latvijas valsti 6 teritoriālās vienībās:

1.2. tabula

NUTS-3 līmeņa dalījums Latvijas teritorijā; Avots: [112]

NUTS-3 identifikators	Aptvertās teritoriālās vienības
LV003	Kurzeme
LV005	Latgale
LV006	Rīga
LV007	Pierīga
LV008	Vidzeme
LV009	Zemgale

Tādējādi, Latvijā, tāpat kā daudzās citās Eiropas valstīs, NUTS-3 līmeņa dalījums ietver plašus teritoriju apgabalus, kā rezultātā platjoslas izplatības un interneta pakalpojuma kvalitātes rādītāju apkopojums šādā ģeogrāfiskā mērogā ir vispārīgs un nesniedz skaidru priekšstatu par tīklu izvērsumu un pakalpojumu kvalitātes rādītājiem, kā arī neveicina Eiropas stratēģijas mērķu izpildes uzraudzību.

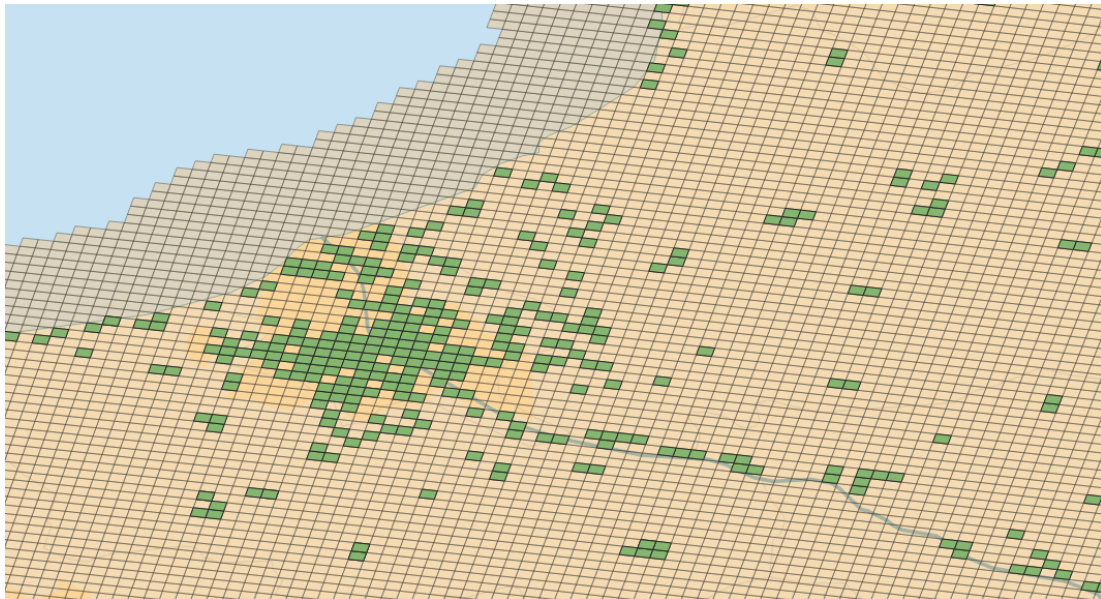


1.15. att. Ekrānšāviņš no Eiropas platjoslas kartēšanas projekta portāla, kur atspoguļots maksimālais novērotais pieslēguma ātrums Latvijas reģionos pēc NUTS-3 iedalījuma [35]

Kā redzams 1.15. attēlā, apkopojot mērījumu rezultātus pēc NUTS-3 līmeņa reģioniem, var secināt, ka visā Latvijā ir novērots ātrums virs 50 Mbit/s. Lai gan iespējams, šāds ātrums ir bijis novērots tikai vienā mērījuma punktā un neraksturo situāciju visā reģionā. Turklāt nav skaidrs, kāds ir mērījumu ar lejupielādes ātrumu >50 Mbit/s īpatsvars, kas arī ir būtiski, lai izvērtētu tīkla attīstību. Līdz ar to, mērījumu rezultātu atspoguļojums tik plašā mērogā ir vispārīgs un nav izmantojams platjoslas attīstības uzraudzībai vai jebkādiem investīciju un platjoslas pakalpojumu izvērsanas projektiem.

Pretēji tam, apkopojot informāciju 1 kilometra režģa mērogā, ir pieejami salīdzinoši precīzi dati smalkās teritoriālās vienībās [36]. 1.16. attēlā zaļā krāsā iekrāsotie lauki atspoguļo tās 1 kilometra režģa šūnas, kurās 2019.gadā tika veikti interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumi. Lai attēlotu mērījumu rezultātus 1 km režģa mērogā, mērījumu vietu ģeogrāfiskā informācija tika atzīmēta GPS (WGS84 koordinātu atskaites sistēma) koordināšu sistēmā, kas vēlāk ar QGIS programmatūru tika attēloti GPS koordinātām atbilstošos 1 km poligonos.

Tomēr ar šī brīža esošām interneta pakalpojuma kvalitātes uzraudzības metodēm, novērtēt kvalitātes rādītājus šādā mērogā visas valsts teritorijā ir praktiski neiespējami. Lai atspoguļotu mērījumu rezultātus, kas sniedz objektīvu un faktisku kvalitātes raksturojumu, ir nepieciešams veikt mērījumus ik pēc kilometra. Lai veiktu novērtējumu QoS-2 līmenī šādā mērogā, tam būtu nepieciešams vēltīt ievērojamus cilvēku un laika resursus. Atspoguļojot mērījumu rezultātus QoS-3 līmenī, būtu nepieciešams nodrošināt, ka galalietotāju veikto mērījumu rezultāti atspoguļo līdzvērtīgus rādītājus, t.i., datiem būtu jāietver dažāda tipa mērījumus gan mērījuma galiekārtu, gan apstākļu (mērījumu skaits, diennakts laiks u.tml.) ziņā. Kilometra režģa dalījumā nodrošināt to, ka katrā režģa šūnā galalietotāju veiktie mērījumi atspoguļo līdzvērtīgu informāciju, ir praktiski neiespējami.



1.16. att. Piemērs mērījumu vietu kartējumam 1 km režģa dalījūmā Latvijas teritorijā, izmantojot QGIS programmatūru.

Līdz ar to pašlaik 1 kilometra režģa mērogā ir iespējams atspoguļot vienīgi QoS-1 līmeņa informāciju, t.i., teorētiski aprēķināto. Tas dod priekšstatu par teorētisko tīkla veiktspēju un ir nozīmīgi operatoru tīkla plānošanai un vispārīgām platjoslas izplatības aplēsēm. Tomēr faktiskie rādītāji var ievērojami atšķirties, līdz ar to tieši praktiskie mērījumi nodrošina reālu informāciju par pakalpojuma pieejamību un tā kvalitātes rādītājiem. Turklāt būtiski, lai mērījumi tiek veikti, nodrošinot to rezultātu ticamību, objektivitāti un salīdzināmību. **Līdz ar to ir nepieciešams izstrādāt metodiku, kas ļaus novērtēt faktiskos interneta pakalpojuma kvalitātes rādītājus blīvi un plašā mērogā.**

Platjoslas interneta ģeogrāfiskā apsekojuma prasību izpēte

Kā minēts iepriekš, novērtējot kartēšanas nozīmīgumu platjoslas attīstības novērtēšanā un uzraudzībā, Eiropas Elektronisko sakaru kodeksā tika noteiktas prasības attiecībā uz platjoslas kartēšanas nodrošināšanu Eiropas dalībvalstīs, veicot platjoslas tīklu ģeogrāfisko apsekojumu.

Lai atvieglotu ģeogrāfiskā apsekojuma uzsākšanu un nodrošinātu vienotu pieeju dalībvalstu vidū, tika sagatavotas BEREC vadlīnijas attiecībā uz ģeogrāfiskā apsekojuma veikšanu [26], kas nosaka, kādai informācijai un kādā ģeogrāfiskā mērogā ir jābūt ievāktai, lai raksturotu fiksēto un mobilo elektronisko sakaru tīklu izplatību un veiktspēju.

BEREC vadlīnijās noteiktās mobilo un fiksēto elektronisko sakaru tīklu veiktspēju raksturojošās ievācamās informācijas apkopojums [26]

	Fiksētais platjoslas internets	Mobilais platjoslas internets		
Mērogs	Adreses līmenis ar precīzu ģeokodējumu.	100 x 100m vai mazāka mēroga režģis (vai līdzvērtīga mēroga poligoni).		
Atspoguļotā pieejamība	Operatora šķērsotās (aptvertās) telpas/ teritorija (“home/ addresses passed”)	Teorētiskā operatora mobilā tīkla pārklājuma platība		
Tehnoloģija/ vide	Tehnoloģija	Vide	Paaudze	Tehnoloģija
	DSL	Vara kabelis	3G	UMTS and HSPA tehnoloģijas
	VDSL		4G	LTE or LTE–advanced tehnoloģijas
	VDSL2 Vectoring		5G	Vai nu 3GPP release 15 (New Radio (NR) non-standalone (neautonomā) – pamattīkls ir 4G), vai arī autonomā NR versija (pamattīkls ir 5G) un tās turpmākie jauninājumi
	DOCSIS 1.0 vai 2.0	Koaksiālais kabelis		
	DOCSIS 3.0 vai 3.1			
	FTTH/FTTB	Optika		
	FWA licencētā spektrā	Gaiss		
	FWA nelicencētā spektrā (Wi-Fi)			
Citi	Cits			
VHCN (loti augstas kapacitātes tīkls) klase	Adrese nav pārklāta ar VHCN	Teritorija nav pārklāta ar VHCN		
	Optika izvērsta līdz adresei	Optika izvērsta līdz bāzes stacijai		
	Optika izvērsta līdz bāzes stacijai (attiecināms uz FWA)	Optika līdz bāzes stacijai nav izvērsta, bet veiktspējas līmenis atbilst VHCN vadlīnijās [25] noteiktajiem kritērijiem ²		
	Optika līdz adresei nav izvērsta, bet veiktspējas līmenis atbilst VHCN vadlīnijās [25] noteiktajiem kritērijiem ¹			
Optika līdz bāzes stacijai nav izvērsta, bet veiktspējas līmenis atbilst VHCN vadlīnijās [25] noteiktajam līmenim ² (attiecināms uz FWA)				
Pieslēguma ātrums Sasniedzamais ātrums, nevis galalietotāju faktiski pieredzētais [26]	Maksimālais un lielākajās noslodzes stundās paredzamais lejupielādes/ augšupielādes ātrums:	<i>Opcionāli</i> Maksimālais lejupielādes/ augšupielādes ātrums:		
		≥1 Gbits/s		
		≥300 Mbit/s < 1 Gbits/s		
		≥100 Mbit/s < 300 Mbit/s		
		≥ 30 Mbit/s < 100 Mbit/s		
		≥ 10 Mbit/s < 30 Mbit/s		
		≥ 2 Mbit/s < 10 Mbit/s		

¹Jebkurš fiksētā pieslēguma tīkls, kas parasotos noslodzes stundas apstākļos nodrošina galalietotājiem pakalpojumu ar sekojošu kvalitāti:

- | | | |
|----|---|---------------|
| 1. | Lejuplīnijas datu pārraides ātrums | ≥ 1000 Mbit/s |
| 2. | Augšuplīnijas datu pārraides ātrums | ≥ 200 Mbit/s |
| 3. | IP pakešu kļūdu koeficients (Y.1540) | ≤ 0.05 % |
| 4. | IP pakešu zuduma koeficients (Y.1540) | ≤ 0.0025 % |
| 5. | Turp-atpakaļ ceļa aizture IP paketēm (RFC 2681) | ≤ 10 ms |
| 6. | IP pakešu aiztures variācija (trīce) (RFC 3393) | ≤ 2 ms |
| 7. | IP pakalpojuma pieejamība (Y.1540) | ≥ 99.9 % gadā |

²Jebkurš bezvadu pieslēguma tīkls, kas parasotos noslodzes stundas apstākļos nodrošina galalietotājiem pakalpojumu ar sekojošu kvalitāti:

- | | | |
|----|---|----------------|
| 1. | Lejuplīnijas datu pārraides ātrums | ≥ 150 Mbit/s |
| 2. | Augšuplīnijas datu pārraides ātrums | ≥ 50 Mbit/s |
| 3. | IP pakešu kļūdu koeficients (Y.1540) | ≤ 0.01 % |
| 4. | IP pakešu zuduma koeficients (Y.1540) | ≤ 0.005 % |
| 5. | Turp-atpakaļ ceļa aizture IP paketēm (RFC 2681) | ≤ 25 ms |
| 6. | IP pakešu aiztures variācija (trīce) (RFC 3393) | ≤ 6 ms |
| 7. | IP pakalpojuma pieejamība (Y.1540) | ≥ 99.81 % gadā |

Minētās informācijas ievākšana un apkopošana ir paredzēta QoS-1 līmenī. Tas ir, atspoguļojums ietvers informāciju par teorētiskiem pakalpojuma kvalitātes rādītājiem. Kā minēts BEREC vadlīnijās **QoS-1 līmeņa pieslēguma ātruma rādītāji ir vispārīgs klasifikators pakalpojumu veiktspējas atspoguļošanai. Šie rādītāji neraksturo lietotāju pieredzi un var būt maldinoši, salīdzinot ar citiem rādītājiem, kā piemēram, QoS-2 līmeņa pieslēguma ātruma informāciju.** QoS-1 līmeņa informācija drīzāk var atspoguļot informāciju par vispārīgu pakalpojuma pieejamību un tā potenciālo izmantošanas veidu, nevis sniegt konkrētu kvalitātes raksturojumu. [26]

Fiksētā platjoslas interneta pieejamību raksturo operatora ierīkoti pieslēgumi, kas ļauj novērtēt, vai konkrētais adreses punkts ir pārklāts un kādus kvalitātes rādītājus ir iespējams nodrošināt šajā punktā. Savukārt mobilā tīkla pārklājuma novērtēšanai tiek pielietoti teorētiskie aprēķinu modeļi. Faktiskais pārklājums un it īpaši pakalpojuma kvalitātes rādītāji var ievērojami atšķirties dažādās atrašanās vietās.

Teorētisko mobilā tīkla pieejamības rādītāju novērtējums

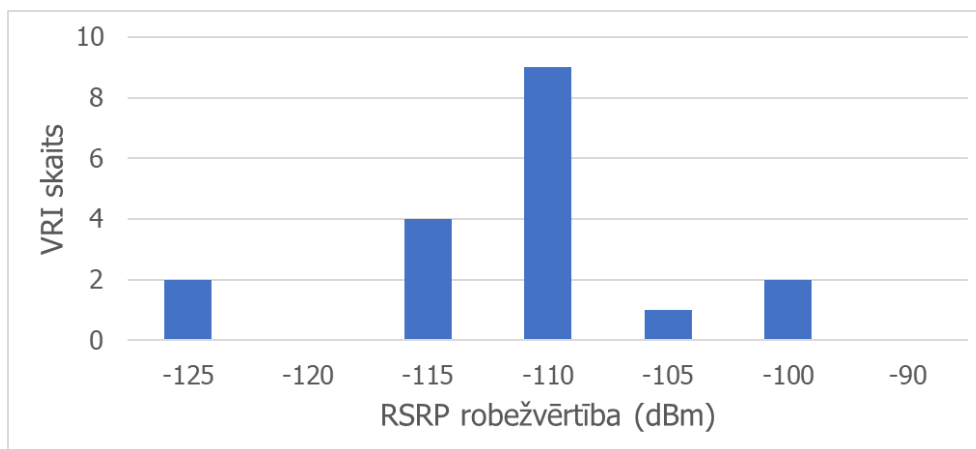
Mobilā tīkla un līdz ar to arī pakalpojumu pieejamību parasti atspoguļo pārklājuma karšu veidā un tā raksturo veiksmīgas pakalpojumu saņemšanas varbūtību. Tas ir, noteikta ģeogrāfiska vieta ir uzskatāma par “pārklātu”, ja pakalpojums šajā vietā ir pieejams ar iepriekš noteiktu minimālo veiksmīgas piekļuves līmeni ($\geq 95\%$). Pakalpojuma pieejamība ir atkarīga no vairākiem parametriem, kā signāla stiprums, šūnas noslodze, kapacitāte un citi [27]. Tā kā signāla stiprums ir parametrs, ko ir relatīvi vienkārši aprēķināt un izmērīt, tad bieži vien pakalpojuma pieejamības novērtēšanai, tiek noteikts tieši šis rādītājs. Savukārt pamatojoties uz pakalpojuma pieejamības rādītājiem, var būt novērtēts tīkla pārklājums.

Teorētiskais mobilā tīkla pārklājums tiek modelēts, nodrošinot mobilā signāla prognozēšanu visas novērtējamās teritorijas (piemēram, valsts) mērogā. Šādas prognozes tiek ģenerētas, ņemot vērā noteiktus ievades parametrus, kā signāla izplatīšanās dažādās frekvenču joslās, zemes virsmas informācija, tīkla un ģeogrāfiskā topoloģija u.c., kas ļauj novērtēt mobilā signāla jaudu vai pieejamos pakalpojumus noteiktā vietā. Jāņem vērā, ka teorētiskais pārklājuma novērtējums ir tikai statistisks reālā pārklājuma novērtējums.

Tā kā Eiropas stratēģiskie mērķi paredz platjoslas pieejamību ikvienam iedzīvotājam, tad valsts uzraugošām institūcijām ir jāveic mobilā pārklājuma nodrošināšanas uzraudzība. Pašlaik radio signāla stipruma līmeņi ir visbiežāk izmantotie kritēriji, lai noteiktu, vai konkrēta ģeogrāfiska vieta ir pārklāta vai nē. Parasti, lai novērtētu atbilstību valstī noteiktajām pārklājuma prasībām, valstu regulatori nosaka sliekšņa vērtības minimāli nepieciešamai saņemtai mobilā signāla jaudai, kas nodrošinātu pakalpojuma veiksmīgas saņemšanas varbūtību. Šīs sliekšņa vērtības tiek noteiktas atkarībā no noteiktajām pārklājuma prasībām konkrētā valstī un var būt noteiktas dažādām mobilā tīkla tehnoloģijām:

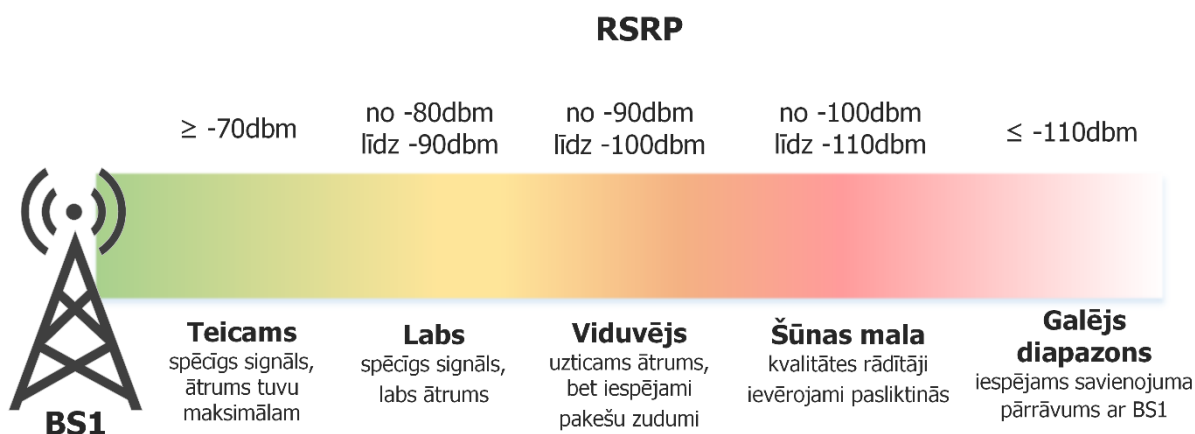
- RxLev (Received Signal Level) – saņemtā signāla līmenis GSM jeb 2G tīklos;
- RSCP (Received Signal Code Power) – saņemtā signāla koda jauda UMTS jeb 3G tīklos;

- RSRP (Reference Signal Received Power) - references signāla uztvertā jauda LTE jeb 4G tīklos.



1.17. att. Valstu regulatīvo iestāžu (VRI) skaits un to noteikto signāla stipruma līmeņi LTE pārklājuma novērtēšanai. Avots: [27]

No atspoguļotajiem datiem redzams, ka signāla līmenis, kas uzskatāms par sliekšņa vērtību, lai teritorija tiktu uzskatīta par pārklātu, dažādās valstīs atšķiras ļoti plašos mērogos. RSRP signāla līmeņi parasti ir robežās no -75 dBm bāzes stacijas tuvumā līdz -120 dBm LTE pārklājuma malā. Pie šādiem signāla līmeņiem galalietotāja iekārta var pieslēgties tīklam. Tomēr tas nenozīmē, ka pieredzes kvalitāte, lietojot pakalpojumus, būs pietiekama.



1.18. att. Aptuvenais paredzamais galiekārtas uztvertais pakalpojuma kvalitātes līmenis atkarībā no references signāla uztvertās jaudas (RSRP) rādītājiem; Avots: [104][105]

Kā rāda pētījumi, lejupielādes ātrums un lietotāju subjektīvais pakalpojuma novērtējums ir atkarīgs ne tikai no signāla līmeņa, bet arī no citiem tīkla radiofrekvenču parametriem, piemēram, fiziskā resursu bloka (PRB) slodzes un signāla un traucējumi plus trokšņa attiecības (SINR) u.tml. Tomēr radio vides, iekārtu veiktspējas un programmatūras implementēšanas atšķirību dēļ, teorētiski nav iespējama precīzi novērtēt sakarību starp caurlaidspējas rādītājiem un SINR, RSRP un fiziskā resursu bloka (PBR) lietojuma vērtībām. Lai nodrošinātu aptuvenu

kartēšanas modeli starp PDCP caurlaidspējas rādītājiem un SINR/RSRP, GSMA veica pētījumu, kurā analizēts liels skaits faktisku testu Ķīnas mobilā operatora tīklā [57]. Jāņem vērā, ka PDCP protokols darbojas protokolu steka fiziskā līmenī, tāpēc atbilstošā TCP caurlaidspēja, ņemot vērā vienai datu paketei pievienojamo TCP un IP protokolu galveņu izmēru (40 B) pret paketes lietderīgo slodzi (1460 B), būs zemāka par aptuveni 2,7 %.

$$\text{PDCP caurlaidspēja} = \text{TCP caurlaidspēja} \cdot (100 \% + 2,7 \%) \quad (1.1.)$$

GSMA pētījuma rezultāti ir atspoguļota 1.4. tabulā.

1.4. tabula

GSMA pētījuma rezultāti par sakarību starp lietotājam pieejamiem caurlaidspējas rādītājiem un SINR/RSRP vērtībām; Avots: GSMA [57]

Frekvenču josla (MHz)	Joslas platums (MHz)	Lejupielādes ātrums (Mbit/s)	Viegla noslodzes tīkls		Vidēja noslodzes tīkls		Liela noslodzes tīkls	
			PRB slodze ≤ 20 %		20 % < PRB slodze ≤ 40 %		40 % < PRB slodze < 60 %	
			SINR (dB)	RSRP (dBm)	SINR (dB)	RSRP (dBm)	SINR (dB)	RSRP (dBm)
1800	20	4,9	-4,1	-115,5	0,4	-109,4	2,6	-105,6
		8	-1,1	-110	3,4	-104,9	5,6	-100,4
		11,8	3,1	-105	7,1	-98,5	9,4	-93,6
		21,3	10,6	-92,1	14,5	-83,8	17,6	-78,6
		28,8	15,5	-81,9	20	-71,4	24,2	-65,7

No GSMA mērījumu datiem secināms, ka pie signāla stipruma rādītājiem, kas ietilpst tajās vērtību robežās, kas liecina par pārklājuma esamību noteiktajā teritorijā, pieslēguma ātruma vērtības var nebūt atbilstošas noteiktu pakalpojumu lietošanai.

Tāpat pētījumā novērtēta lietotāju pieredzes kvalitāte, lietojot VoLTE pakalpojumu, kura izmantošanai nepieciešamā caurlaidspēja ir mērāma dažos simtos kilobitu sekundē. Mērījumu rezultāti liecina, ka signāla stiprumam pazeminoties līdz -110 dBm, lietotāju uztvertā pieredzes kvalitāte ir vērtējama drīzāk kā zema (MOS vērtības: 2 balles – vāja ar ievērojamiem traucējumiem; 3 balles – vidēja ar viegliem traucējumiem; 4 balles – laba, lietotājs traucējumus neizjūt).

1.5. tabula

MOS vērtējums atkarībā no RSRP signāla stipruma vērtībām; Avots:[57]

Apakšējais MOS 10 %	RSRP (zema noslodze < 30 %)	RSRP (augsta noslodze > 50 %)
2,5	-114 dBm	-110 dBm
3,0	-112 dBm	-108 dBm
3,5	-111 dBm	-107 dBm

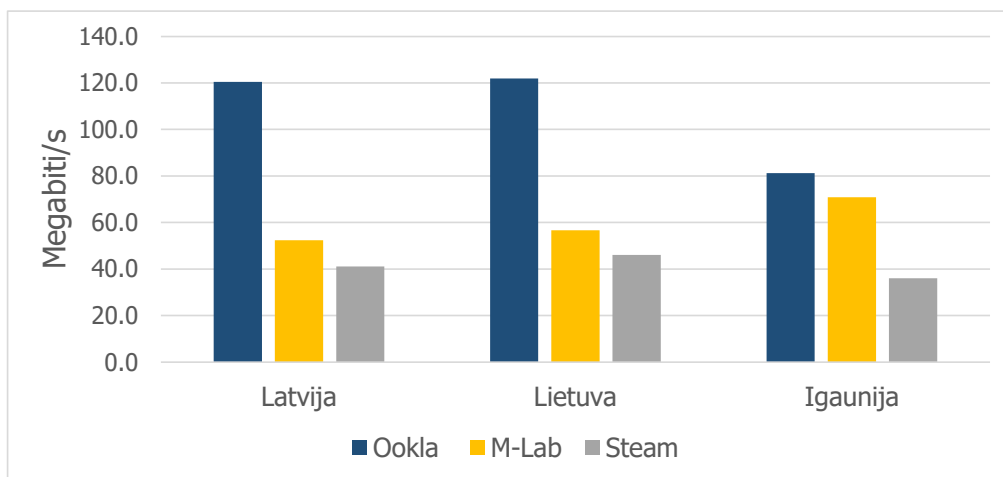
Teorētiskais mobilā tīkla pārklājuma aprēķins ir vienīgais veids, kā novērtēt mobilā tīkla pārklājumu visā valsts teritorijā. Līdz ar to, kamēr vien 100 % teritorijas nav iespējams

nodrošināt lauka mērījumus, teorētiskais jeb prognozētais pārklājuma novērtējums ir neatņemama tīkla plānošanas un uzraudzības sastāvdaļa. Tomēr rādītāja novērtējums ir uztverams kā aplēse, kuras iegūšanai noteiktiem parametriem, piemēram, saņemtā signāla stiprumam, sekmīgo balss pakalpojumu procentuālajam skaitam vai lejupielādes ātrumam, tiek izvirzītas mērķa vērtības. Tāpēc faktiskais pārklājums un minēto parametru vērtības var būtiski atšķirties. Līdz ar to teorētiskā mobilā pārklājuma informācijas ticamību ir nepieciešams pārbaudīt, veicot praktiskus mērījumus. **Tāpat jāņem vērā, ka radiosignāla līmeņa vērtības negarantē to, ka lietotājs var piekļūt un izmantot mobilā tīkla pakalpojumus.** Tāpēc aptuveni puse no valsts regulatīvajām iestādēm, novērtējot vai noteikta teritorija ir pārklāta, veic mērījumus parametriem, kas ir vairāk attiecināmi uz QoS/QoE līmeni, kāds nodrošināts šajā noteiktajā teritorijā. [27]

Faktisko interneta pakalpojuma kvalitātes rādītāju novērtējums

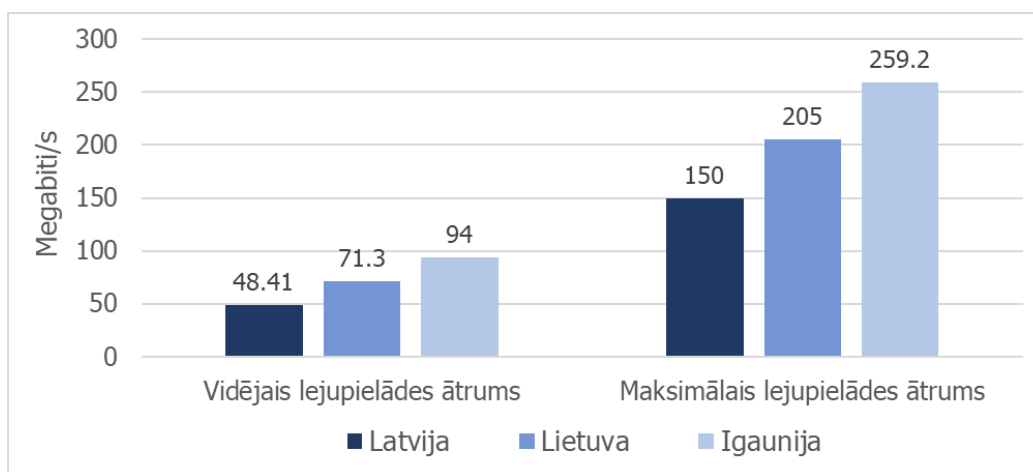
Pieaugot platjoslas interneta nozīmei cilvēku ikdienas dzīvē, par īpaši svarīgu faktoru kļūst tā kvalitāte. It īpaši attīstoties un izplatoties pakalpojumiem, kuru lietošana nav iespējama bez atbilstošiem kvalitātes rādītājiem. Kā jau minēts, teorētiskais kvalitātes novērtējums nodrošina vispārīgu informāciju par potenciālo kvalitātes līmeni, kas tomēr bieži vien atšķiras no reāliem rādītājiem. Tādējādi, citkārt lietotājiem, pakalpojumu sniedzējiem un valsts organizācijām nav pietiekamas informācijas par faktisko tīklu veiktspēju noteiktās teritorijās. Šāda informācija ir būtiska gan valsts organizācijām, nodrošinot finansiālā atbalsta programmas platjoslas tīklu izvēršanā, gan elektronisko sakaru komersantiem, veicot ieguldījumus savu tīklu attīstībā, gan uzņēmējiem, plānojot un ieviešot jaunus pakalpojumus, gan arī lietotājiem, novērtējot interneta pakalpojuma izmantošanas iespējas. Tāpēc vairumā valstu atbildīgās institūcijas ir ieviešas mērījumu programmas, kas ļauj novērtēt faktisko interneta kvalitāti. Tomēr, tā kā nepastāv vienotas mērījumu metodikas, kā arī mērījumiem tiek izmantoti ļoti atšķirīgi mērīšanas sistēmu risinājumi, tad iegūtie rezultāti bieži vien nav interpretējami un savā starpā salīdzināmi.

1.19. attēlā atspoguļoti Baltijas valstu dati no OECD pārskatā ietvertās informācijas. Dati ir iegūti no Ookla “Speedtest” (mērījumi veikti 2021.gada janvārī), M-Lab “Worldwide Broadband Speed League” (mērījumi veikti no 2019.gada 1.jūlija līdz 2020.gada 30.jūnijam) un Steam (mērījumi veikti 2021.gada martā) mērījumu rezultātiem. Kā redzams, mērījumu rezultāti var atšķirties ļoti plašā diapazonā, atkarībā no pielietotāts mērīšanas metodoloģijas, kā arī no mērīšanas pieejas un datu statistiskās apstrādes.



1.19. att. Fiksētā platjoslas interneta vidējais lejupielādes ātrums 2020.-2021.gadā (Ookla, M-Labs un Steam mērījumu dati); Avots: OECD [2]

Lai papildus analizētu mērījumu rezultātus, kas iegūti veicot līdzvērtīgu interneta kvalitātes uzraudzības modeli (valsts regulējošās institūcijas veikti, plānoti un sistemātiski mērījumi), tika veikts trīs Baltijas valstu regulatoru (SPRK – Latvijā, RRT – Lietuvā, TTJA – Igaunijā) nodrošināto interneta mērījumu rezultātu novērtējums. Lai salīdzinātu mērījumu rezultātus un pēc iespējas objektīvāk novērtētu to atšķirību, tika analizēti mērījumu rezultāti, kas veikti mobilā operatora tīklā, kurš ir izvērts visās trīs Baltijas valstīs. Analīzei tika izmantoti Regulatoru pārskatos publicētie 2019.gada mērījumu rezultāti.



1.20. att. Baltijas valstu regulatoru lejupielādes ātruma mērījumu rezultāti viena mobilā operatora tīklā; Informācijas avots: [82][83][84]

Kā vērojams 1.20. attēlā, lejupielādes ātruma mērījumu rezultāti viena un tā paša mobilā operatora tīklā dažādās Baltijas valstīs ievērojami atšķiras. Veicot izpēti, tika noskaidrotas būtiskākās atšķirības mērījumu veikšanā. Pirmkārt, katrā valstī mērījumi tiek veikti, izmantojot atšķirīgas galiekārtas. Lietuvā un Igaunijā mērījumus veica, izmantojot viedtālrunī uzstādītu lietojumprogrammatūru (Lietuvā mērījumi veikti, izmantojot viedtālruni Samsung SM-G973F, Igaunijā – Sony XZ2), savukārt Latvijā mērījumi tika veikti ar portatīvajiem datoriem,

izmantojot pārlūkprogrammā pieejamu interneta mērīšanas sistēmu, un mobilā interneta pieslēgumu nodrošinot, izmantojot maršrutētāju-modemu (Huawei B618s-22d).

1.6. tabula

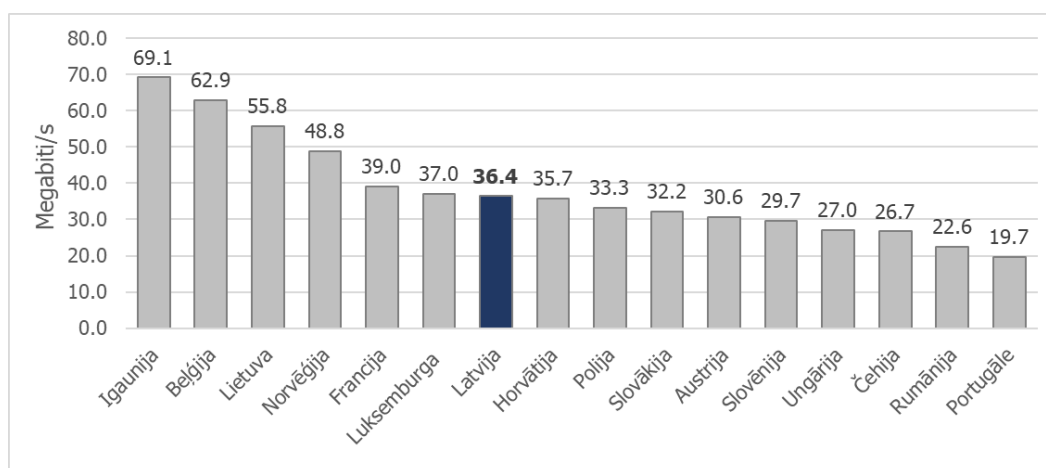
Mērījumos izmantoto galiekārtu tehniskie raksturlielumi

Nosaukums	Samsung SM-G973F	Sony XZ2	Huawei B618s-22d
Rādītājs			
Maksimālais lejupielādes/ augšupielādes ātrums	2000/150 Mbit/s	1200/150 Mbit/s	600/100 Mbit/s
Galiekārtas (UE) kategorija	LTE Cat20	LTE Cat18	LTE Cat.9/ Cat.11

Kā redzams 1.6. tabulā mērījumos izmantoto galiekārtu veikspēja ievērojami atšķiras. Cat20 un Cat18 kategorijas mobilie modemi (pateicoties nesēju apvienošanas un MIMO tehnoloģijām) spēj nodrošināt daudzkārt ātrākus pieslēguma ātruma rādītājus, pie nosacījuma, ka tīkla operators ir attiecīgi aprīkojis arī savu mobilo tīklu. Līdz ar to mērījumos izmantotai galiekārtai var būt ievērojama ietekme uz mērījumu rezultātiem.

Atšķirība ir arī mērījumu izlases apjomā un mērījumu vietu sadalījumā valsts mērogā. Igaunijā mērījumu izlases apjoms ir mērāms simtos, savukārt Latvijā un Lietuvā – tūkstošos, kam pie attiecīga mērījumu vietu sadalījuma var būt zināma ietekme uz mērījumu rezultātiem.

Visbeidzot, mērījumi tiek veikti izmantojot atšķirīgas mērīšanas sistēmas, kam var būt ievērojama ietekme uz mērījumu rezultātiem atkarībā no mērīšanas sistēmas metodoloģijas, piemēram, kāda OSI protokolu steka līmeņa veikspēja tiek novērtēta, kāds pārraides vadības protokols ir izmantots, kāds ir paralēlo TCP savienojumu (sesiju) skaits, pārraidītā testa faila lielums, u.tml.



1.21. att. Vidējais lejupielādes ātrums mobilajā tīklā (dažādu valstu Regulatoru publicētajā informācija); Avots: SPRK, 2019.g.

Tāpat, salīdzinot visu Eiropas valstu regulatoru publicēto informāciju par vidējo lejupielādes ātrumu valstī, var secināt, ka pie esošās kvalitātes uzraudzības modeļu

daudzveidības, mērījumu rezultāti nav salīdzināmi un iegūtie kopējie dati nav informatīvi. 1.21. attēlā redzamais grafiks atspoguļo vidējos lejupielādes ātruma rādītājus dažādās Eiropas valstīs. Šie dati ir iegūti no dažādu valstu Regulatoru publiskotās informācijas. Kā redzams ir vērojama pat trīskārša rādītāju atšķirība dažādās valstīs.

Līdz ar to, **lai nodrošinātu salīdzināmus mērījumus ar līdzvērtīgu interpretāciju ir nepieciešams nodrošināt vienlīdzīgu mērīšanas metodoloģiju un mērīšanas sistēmas tehniskos raksturlielumus, kā arī izstrādāt vienotus mērījumu veikšanas principus.**

Lai nodrošinātu vienlīdzīgu mērīšanas metodoloģiju un mērījumu rezultātu salīdzināmību dažādās valstīs, Eiropas Elektronisko komunikāciju regulatoru iestāde BEREC uzsāka vienotas mērīšanas sistēmas izstrādi [32][33]. Projekts paredzēja, ka šī sistēma tiks ieviesta dažādās valstīs, tādējādi nodrošinot vienādu mērīšanas metodoloģiju, kas savukārt sniegtu salīdzināmus rezultātus. Tomēr vienota mērīšanas sistēmas metodoloģija vien negarantē, ka mērījumu rezultāti var tikt līdzvērtīgi interpretēti un raksturos pakalpojumu kvalitāti salīdzināmā veidā. Būtiska ietekme ir pašai mērīšanas pieejai. **Pašlaik nav definēta vienota mērījumu veikšanas metodika, kas rada būtiskas grūtības objektīvi novērtēt pakalpojuma kvalitātes atbilstību Eiropas stratēģijas mērķiem, it īpaši plašākā mērogā.**

1.6.Promocijas darba veikuma kopsavilkums

Ņemot vērā visu iepriekš minēto, it īpaši ievērojot digitālo pakalpojumu kā ekonomisko un sociālo virzītāju nozīmi, tajā skaitā iezīmējot arvien jaunas tehnoloģisko risinājumu attīstības tendences un tiem nepieciešamos platjoslas interneta rādītājus, ir izvirzīts šāds **promocijas darba mērķis:**

novērtēt un sniegt priekšlikumus platjoslas attīstības uzraudzības mehānisma piemērošanā un matemātiski pamatotas interneta kvalitātes rādītāju novērtēšanas metodoloģijas izstrādē.

Promocijas darba pamatuzdevumi

- 1) Novērtēt interneta piekļuves pakalpojuma kvalitāti raksturojošos parametrus un noteikt to parametru kopu, kas nodrošina visaptverošu informāciju par galalietotājam nodrošināmo pakalpojuma kvalitātes līmeni, kā arī novērtēt šo parametru minimālos nepieciešamos rādītājus atšķirīgu internetā lietojamo pakalpojumu izmantošanai, tādējādi ļaujot secināt par sagaidāmo lietotāju pieredzes kvalitāti (QoE);
- 2) Izpētīt platjoslas attīstības novērtēšanas iespējas dažādos kvalitātes uzraudzības līmeņos (QoS-1, QoS-2, QoS-3), novērtēt to būtiskākās atšķirības un noteikt to piemērojamības aspektus platjoslas attīstības uzraudzības nodrošināšanai;
- 3) Izpētīt un novērtēt interneta pakalpojuma novērtējumu ietekmējošos faktorus un interneta darbības principu aspektus, kas jāņem vērā mērīšanas sistēmas funkcionālo prasību definēšanā un kvalitātes rādītāju analizē un atspoguļošanā;

- 4) Izmantojot matemātiskos aprēķinus un eksperimentālos mērījumus definēt interneta ģeogrāfisko mērījumu vietu izlases aprēķinu platjoslas izplatības novērtēšanai;
- 5) Izmantojot matemātiskos aprēķinus un eksperimentālos mērījumus veikt interneta kvalitātes mērījumu metodoloģijas izstrādi platjoslas attīstības atspoguļošanai QoS-2 līmenī;
- 6) Izstrādāt algoritmu nepietiekamas platjoslas attīstības novērtēšanai un uzraudzībai;
- 7) Izmantojot matemātiskos aprēķinus un eksperimentālos mērījumus noteikt atbilstīga platjoslas interneta minimālos kvalitātes rādītājus, ņemot vērā interneta pakalpojuma kvalitātes līmeni, ko valsts teritorijā izmanto lielākā daļa patērētāju;
- 8) Novērtēt un izstrādāt modeli interneta kvalitātes rādītāju informācijas iegūšanai, izmantojot pakalpojumu sniedzēju rīcībā esošos datus, tādējādi ilgtermiņā nodrošinot pēc iespējas mazāku cilvēkresursu iesaisti platjoslas attīstības rādītāju eksperimentālā novērtēšanā, datu analītiskā apstrādē, sagatavošanā, iesniegšanā un validēšanā.

Pētījuma metode

Promocijas darbā izvirzīto uzdevumu realizācijā un problēmu analīzē veikti eksperimentāli mērījumi, matemātiskie aprēķini, statistikas datu izvērtēšana un skaitliskās simulācijas. Eksperimentāliem mērījumiem izmantota Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas (SPRK), Interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes kontroles sistēma ITEST, kas balstīta uz kompānijas Visualware Inc. programmatūras risinājumu, un ļauj novērtēt tādus interneta kvalitātes parametrus, kā lejupielādes un augšupielādes ātrums, latentums, trīce un pakešu zuduma koeficients. Optimālu mērījumu metožu definēšanai, pamatojoties uz iegūtajiem mērījumu rezultātiem, veikti matemātiskie aprēķini, pielietojot dažādas statistiskās analīzes metodes. Datu analīzei un skaitliskai simulācijai izmantotas R un Python programmēšanas valodas. Mērījumu datu plūsmas novērošanai izmantota Wireshark programmatūra.

Darba praktiskā vērtība un jaunieguvumi

- Izstrādātas koncepcijas, kas tiks izmantotas Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas normatīvo aktu izstrādē un tās nodrošinātajā interneta pakalpojuma kvalitātes uzraudzībā, ieviešot iegūtos jaunus teorētiskos un eksperimentālos rezultātus un principus interneta pakalpojuma kvalitātes novērtēšanas metodikā, kā arī, līdzdarbojoties Eiropas Elektronisko komunikāciju regulatoru iestādes darba grupās, noteiktie principi tiks piedāvāti ieviešanai attiecīgajos iestādes izstrādātajos dokumentos, nodrošinot vienotu interneta kvalitātes uzraudzības pieeju Eiropas līmenī.
- Ar interneta pakalpojuma kvalitātes novērtēšanu saistītie aspekti un izpētes rezultātā konstatētie principi ņemti vērā, izstrādājot tehnisko dokumentāciju jaunās Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas interneta pakalpojuma kvalitātes mērīšanas sistēmas izstrādei un ieviešanai.

- Izpētīti un piedāvāti faktiskā platjoslas interneta pakalpojuma izplatības un tā kvalitātes novērtēšanas principi un uzraudzības varianti, ņemot vērā pieejamos resursus un prognozēto tehnoloģiju attīstību.
- Izstrādāti ģeogrāfiskā apsekojuma informācijas un salīdzināmības rīka vajadzībām nepieciešamo datu nodrošinājuma principi un apkopotā atspoguļojuma ieviešanas shematisks prototips, nodrošinot vispusīgu informāciju par platjoslas interneta pieejamību Latvijā.

Promocijas darba izstrādes laikā tika iegūti šādi galvenie secinājumi:

1. Izvērtējot elektronisko sakaru nozares regulējošā ietvara normatīvu klāstu, secināms, ka ir iespējams izveidot konsekventu un vienotu mehānismu uzraudzības metožu ieviešanai.
2. Lai nodrošinātu platjoslas izplatības novērtēšanu, veicinātu tās turpmāku izplatību un atbilstīgas kvalitātes interneta pakalpojuma pieejamību, ir jāpiemēro algoritms, ar ko noteikt ģeogrāfiskās teritorijas, kurās pietiekamā apjomā un kvalitātē iedzīvotājiem nav nodrošināts interneta pieslēgums. Šādu teritoriju noteikšana nodrošinās iespēju plānot un veikt finansiālos ieguldījumus elektronisko sakaru tīkla attīstībā un veicinās plašāku interneta pakalpojuma pieejamību iedzīvotājiem.
3. Interneta kvalitātes rādītāju novērtēšana ir būtiska, lai iegūtu skaitlisku mēru kvalitātes interpretēšanai. Tie ļauj izvērtēt elektronisko sakaru tīku attīstības līmeni un salīdzināt to nacionālā un starptautiskā līmenī, nodrošināt pakalpojuma atbilstības novērtēšanu tehnoloģiju standartiem, noteikt pamatotas prasības elektronisko sakaru komersantiem un nodrošināt lietotāju tiesību aizsardzību. Līdz ar to izstrādāts kvalitātes rādītāju novērtēšanas mehānisms, kas nodrošinās objektīvas, jēgpilnas un salīdzināmas informācijas iegūšanu.
4. Lai novērtētu elektronisko sakaru tīkla veiktspēju un platjoslas izplatību, nav pietiekami izmantot datus QoS-1 līmenī, kas ietver teorētisku informāciju par sniegto interneta pakalpojumu. Secināms, ka teorētiskais interneta pakalpojuma kvalitātes parametru novērtējums var ievērojami atšķirties no faktiskajiem rādītājiem.
5. Veicot interneta kvalitātes uzraudzību un kartēšanu mobilajos elektronisko sakaru tīklos QoS-2 līmenī, ir nepieciešams noteikt skaitlisku un ģeogrāfisku mērījumu izlasi, pēc kuras plānot un veikt interneta kvalitātes mērījumus, tādējādi nodrošinot faktisku situācijas atspoguļojumu noteiktā ģeogrāfiskā mērogā.
6. Korektu un objektīvu rezultātu iegūšanai un atspoguļošanai, veicot interneta kvalitātes parametru mērījumus, būtiski ir nodrošināt mērījumu izpildi diennakts laika intervālā ar vismazāko pieslēguma ātruma vērtību novirzi no diennakts vidējās pieslēguma ātruma vērtības. Secināts, ka diennakts laikā no plkst. 9 līdz plkst. 15 lejupielādes ātruma novirze no diennakts vidējā ātruma ir vismazākā un visprecīzāk raksturo vidējo lejupielādes ātrumu noteiktā vietā.

7. Lai nodrošinātu atbilstīgu piekļuvi platjoslas internetam ir nepieciešams noteikt minimālos interneta pakalpojuma pieslēguma ātruma rādītājus, kas nodrošinātu pienācīgu iedzīvotāju sociālās iekļaušanas līmeni un dalību digitālajā ekonomikā un sabiedrībā. Secināts, ka fiksētā tīklā sniegtam interneta pakalpojumam un mobilā tīklā sniegtam interneta pakalpojumam, kas nodrošināts fiksētā pieslēguma vietā, minimālais nodrošināmais lejupielādes ātrums ir vismaz 6 Mbiti/s, augšupielādes ātrums – vismaz 2 Mbiti/s.
8. Plānojot interneta kvalitātes uzraudzību nākotnē, plaši izvērsoties 5G tehnoloģijas pieslēguma tīklam, kā arī, lai nodrošinātu faktisku kvalitātes parametru rādījumu atspoguļošanu 100 m × 100 m poligonā atbilstoši ģeogrāfiskā apsekojuma prasībām, ir nepieciešams izstrādāt kvalitātes novērtēšanas metodoloģiju, kas būs balstīta mobilo operatoru datu analītikā.

Promocijas darba galvenie rezultāti prezentēti četrās starptautiskajās zinātniskajās konferencēs, kā arī ietverti divās publikācijās zinātniskajos žurnālos un četros rakstos pilna teksta konferenču rakstu krājumos, kā arī viena publikācija iesniegta zinātniskajā žurnālā 2021. gada nogalē (1. pielikums). No minētajām sešas publikācijas ir iekļautas SCOPUS datubāzē ar citējamības indeksu H=2.

Promocijas darba izstrādes laikā iegūtie un pētījumā atspoguļotie rezultāti izmantoti trīs starptautiskos projektos, trīs starpvalstu elektronisko sakaru nozares semināros (2. pielikums) kā arī trīs Latvijas regulēšanas ietvara normatīvo aktu izstrādē un pilnveidošanā (3. pielikums).

Promocijas darbā aizstāvamās tēzes

- 1) Izstrādājot vienotu interneta pakalpojuma uzraudzības metodiku, ir iespējams nodrošināt pilnīgu, objektīvu, salīdzināmu un faktiskai situācijai atbilstošu informāciju par platjoslas interneta izplatību, pieejamību un tā kvalitātes līmeni, kas izmantojama dažādu informācijas lietotāju loka vajadzībām.
- 2) Darbā ir pierādīts, ka pastāv tieša sakarība starp mobilā interneta pakalpojuma mērījumu laiku un noteiktu pakalpojuma kvalitātes parametru vērtībām, kā arī ir noteikts kvalitātes mērījumiem vispiemērotākais diennakts laiks, kas nodrošina visobjektīvāko mērījumu rezultātus atspoguļojumu.
- 3) Faktisko interneta pakalpojuma kvalitātes novērtējumu nepieciešams veikt, piemērojot matemātiski pamatotu mērījumu veikšanas pieeju, tādējādi nodrošinot mērījumu rezultātu ticamību un objektivitāti.

Veicot eksperimentālos mērījumus un nodrošinot iegūto kvalitātes rādītāju datu analīzi ar matemātiskām un statistiskām metodēm, ir secināms, ka izvirzītās tēzes ir pierādītas.

Promocijas darbā ir apkopoti pabeigtu pētījumu rezultāti un definēti iespējamie **turpmākie pētījumu virzieni**:

- 1) Izvērtēt MDT risinājuma izmantošanu praksē, novērtējot faktiskos pakalpojuma kvalitātes rādītājus plašā teritorijā, kas varētu būt īpaši piemērojams 5G tehnoloģijas tīklu veikspējas uzraudzībā.
- 2) Izstrādāt un pielietot lielo datu analīzes algoritmus ģeogrāfiskā apsekojuma informācijas analītikai un nepietiekama platjoslas interneta pārklājuma teritoriju noteikšanai.

Promocijas darba apjoms ir 161 lappuse. Tajā ir ievads, piecas nodaļas, literatūras saraksts un trīs pielikumi.

Darba pirmajā nodaļā ir veikta platjoslas interneta attīstības un izmantošanas tendenču izpēte. Novērtēta platjoslas izplatības un plašas pieejamības nozīme sociālās un ekonomiskās izaugsmes celšanā. Analizētas Eiropas mēroga stratēģijas un regulējums platjoslas attīstības veicināšanai, kā arī apkopotas no normatīvajiem aktiem izrietošās prasības un to piemērošanas kārtība, kā arī izpētīti esošie valstu un Eiropas līmeņa projekti platjoslas interneta attīstības un tā nodrošināta kvalitātes līmeņa uzraudzībai. Analizētas nepilnības un trūkumi esošajā regulējumā un projektos ietvertajos principos, kas traucē objektīvas un salīdzināmas informācijas iegūšanu par faktisku platjoslas nodrošināšanas kvalitāti, kā arī kavē Eiropas mērķu pilnvērtīgu sasniegšanu.

Darba otrajā nodaļā ir analizēti interneta pakalpojuma kvalitāti raksturojošie parametri, atkarībā no tā novērtēšanas skatupunkta. Ir analizēta virkne starptautisko rekomendāciju attiecībā uz novērtējamo parametru kopu, atkarībā no pakalpojuma nodrošināšanas aspekta. Padziļināti izpētīti kvalitātes parametri, kas sniedz informāciju par tehnisko pakalpojuma kvalitāti un noteikts tas minimālais kvalitātes parametru kopums, kas visdaudzpusīgāk raksturo saņemto kvalitātes līmeni, atspoguļojot ne tikai tīkla un pakalpojuma veikspēju, bet norādot arī uz potenciālo lietotāju kvalitātes pieredzi QoE. Novērtēts interneta savienojuma posms un mērīšanas principi, kas nodrošina kvalitātes rādītāju novērtēšanu no lietotāja viedokļa, kā arī sniedz objektīvus un salīdzināmus mērījumu rezultātus.

Darba trešajā nodaļā ir padziļināti izpētīta TCP pārraides vadības protokola darbība un algoritmi, ko ir īpaši būtiski ņemt vērā, izstrādājot interneta mērīšanas sistēmu un nodrošinot interneta kvalitātes mērījumus, patiesu un objektīvu caurlaidspējas mērījumu rezultātu iegūšanai. Ir analizēti citi mērījumu rezultātus ietekmējošie faktori, kas ņemami vērā definējot mērīšanas pieeju un metodiku.

Ceturtajā nodaļā ir veikta interneta pakalpojuma mērījumu rezultātu analītika, definējot mērīšanas principus un izstrādājot mērījumu veikšanas metodiku. Ir novērtēta iespējamā ietekme uz kvalitātes parametru mērījumiem, kā arī analizēta šo ietekmju mazināšanas iespēja. Ir analizēti mērījumu rezultātu raksturošanai vispiemērotākie statistiskie mēri. Ir noteikti principi, kā šie mērījumu rezultāti atspoguļojami saistībā ar Eiropas regulējumu prasībām.

Piektajā nodaļā ir analizēta alternatīva iespēja praktiskiem interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumiem – MDT risinājums. Novērtēti tā piemērošanas varianti, kā arī analizētas priekšrocības, trūkumi un galvenie tā izmantošanu traucējošie faktori. Novērtēti turpmākie

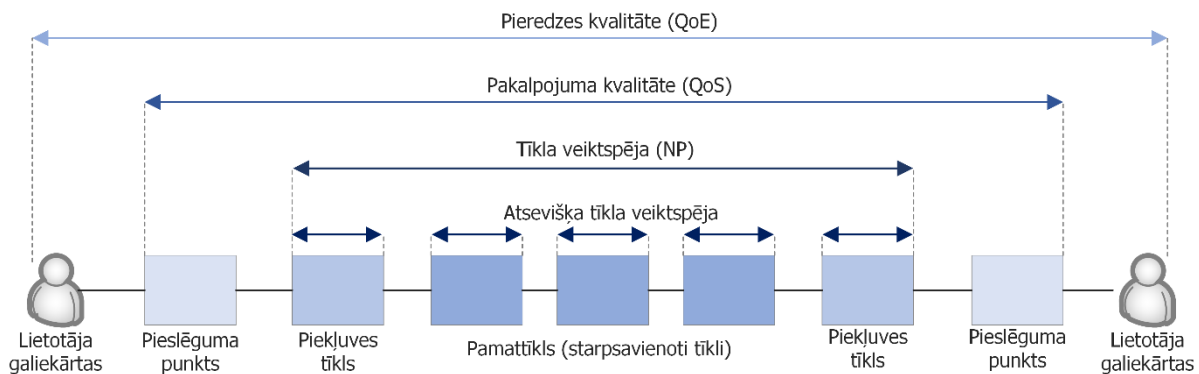
pētījumu virzieni, analizējot šāda risinājuma pielietošanas izdevīgumu un atbilstību, veicot platjoslas interneta izplatības un kvalitātes uzraudzību atbilstoši kopējiem Eiropas mērķiem.

Promocijas darba nobeigumā ir apkopoti pabeigtu pētījumu rezultāti. Nobeigumā apkopoti un pamatoti promocijas darba galvenie secinājumi. Pielikumos ir pievienoti zinātnisko konferenču, publikāciju saraksti.

2. INTERNETA PAKALPOJUMA KVALITĀTI RAKSTUROJOŠIE MĒRI

2.1. Vispārīgs interneta pakalpojuma kvalitātes rādītāju apkopojums

Interneta pakalpojuma kvalitāti raksturo dažādi kvalitātes rādītāji, turklāt tie atšķiras katram pakalpojuma izmantošanas vai sniegšanas posmam un atkarībā no skatupunkta, no kura pakalpojuma kvalitāte tiek vērtēta. Atkarībā no tā tiek definēti atbilstoši kvalitātes novērtēšanas kritēriji.



2.1. att. Shematisks pakalpojuma sniegšanas posmu attēlojums tīkla veiktspējas, pakalpojuma kvalitātes (QoS) un pieredzes kvalitātes (QoE) novērtējumam; Avots: BEREC [79]

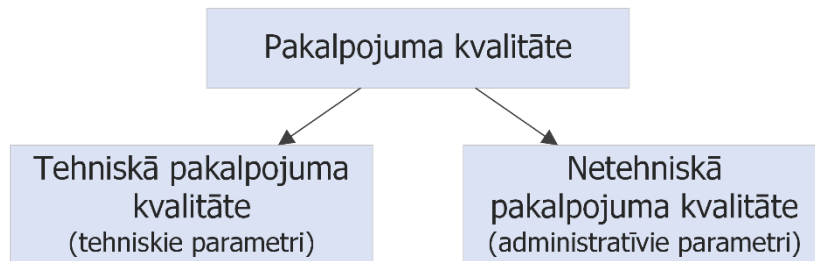
Tīkla veiktspēja ir tīkla vai tīkla daļas spēja nodrošināt datu apmaiņu starp lietotājiem nepieciešamās funkcijas. Tīkla veiktspēju nosaka katra atsevišķa tīkla elementa veiktspēja. Savukārt kopējo tīkla veiktspēju posmā “pieslēguma punkts – pieslēguma punkts” (E2E) nosaka visu atsevišķo elementu un to savstarpējo savienojumu veiktspējas kombinācija. Tīkla veiktspēja tiek noteikta objektīvu parametru izteiksmē, t.i., tie ir izmērāmi (ar instrumentiem vai novērojumiem) un veiktspējas vērtība tiek piešķirta kvantitatīvi. [79]

Pakalpojuma kvalitāte (QoS) ir telekomunikāciju pakalpojuma īpašību kopums, kas atkarīgs no tā spējas apmierināt noteiktās un netiešās pakalpojuma lietotāja vajadzības [78], kurā “pakalpojums” ir funkciju kopums, ko lietotājam piedāvā noteikta organizācija. Pakalpojuma kvalitāte (QoS) vienmēr raksturo E2E posmu, t.i., lietotājs-lietotājs vai lietotājs-saturs. Tādējādi pakalpojuma kvalitātes (QoS) mērījumi tiek veikti E2E posmā, kas tiek izteikta objektīvu (kvantitatīvu) vai subjektīvu (kvalitatīvu) parametru izteiksmē. Pakalpojuma kvalitātes (QoS) mērījums ir rādītājs, kas atspoguļo pakalpojuma lietotāja saskarnē novērojamo funkciju kopuma veiktspēju. [79]

Pieredzes kvalitāte (QoE) ir galalietotāja subjektīvi uztverta vispārēja pakalpojuma vai lietojumprogrammas pieņemamība. Tā ietver visus E2E posma aspektus (klients, terminālis, tīkls, pakalpojumi, infrastruktūra u.tml.) un to var ietekmēt lietotāja cerības un vēlmes, kā arī konteksts. Līdz ar to pieredzes kvalitāte (QoE) parasti ir subjektīvs mērs, kas var atšķirties dažādu lietotāju starpā. Tomēr parasti tā tiek novērtēta, izmantojot objektīvus mērījumus ar

kompleksiem algoritmiem, kas raksturo uz statistiku (pieredzi) balstītu sakarību starp subjektīviem un objektīviem mērījumiem. [79]

Tīkla veiktspējas un pakalpojuma kvalitātes parametri pēc būtības ir atšķirīgi un kalpo dažādiem mērķiem, bet ir acīmredzami, ka starp šiem parametriem pastāv sakarība, kur tiem ir tieša vai netieša un dažkārt pat inversa ietekme vienam uz otru. Tāpat ne vienmēr ir skaidra robeža starp tīkla veiktspējas un pakalpojuma kvalitātes (QoS) parametriem. Eiropas Telekomunikāciju standartu institūta rekomendācija 202 057-4 nosaka, ka tīkla veiktspējas parametri tiek mērīti, lai uzraudzītu savienojuma kvalitāti, un to mērījumu rezultāti var tikt izmantoti, lai novērtētu pakalpojuma vai kāda tā aspekta kvalitāti. Tādējādi, šiem kvalitātes parametriem atrodoties noteiktajās robežās, var secināt par samērīgu pakalpojuma kvalitāti (QoS) [39]. ITU-T Rec.E.800 ir noteikts, ka kopējā pakalpojuma kvalitāte (QoS) ietver gan tehniskos, gan netehniskos jeb administratīvos parametrus:



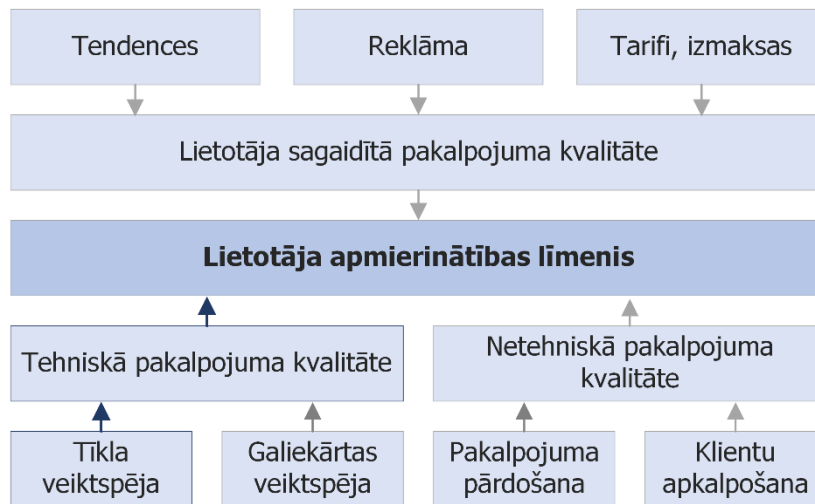
2.2. att. Shematiskais attēlojums pakalpojuma kvalitātes aptvertajiem aspektiem; Avots: ITU [40]

Tādējādi ar pakalpojuma kvalitāti (QoS) saprot rādītāju kopumu, kas attiecināmi uz lietotāju. Atbilstoši tam tika definēti visi ar pakalpojuma nodrošināšanu saistītie aspekti un to pakalpojuma līmeņa mērķi, kā arī sniegti pakalpojuma kvalitātes kritēriji, ar kuru palīdzību tiek raksturota katra šī aspekta kvalitāte un kas nepieciešami, lai novērtētu to sakaru funkciju kvalitāti, kuras jāatbalsta jebkuram pakalpojumam [40][43].

Pakalpojuma kvalitāti noteicošie aspekti; Avots: ETSI [43]

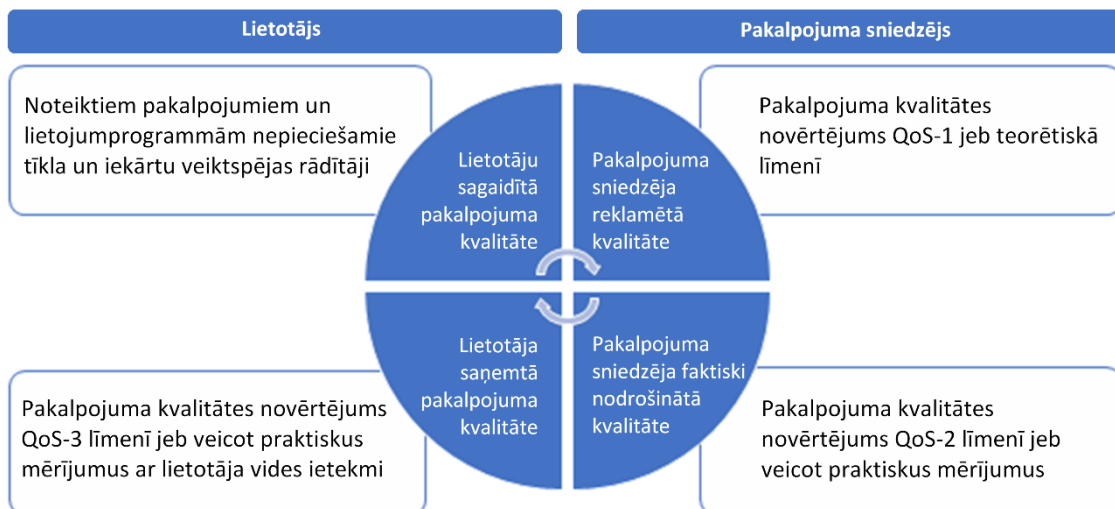
Pakalpojuma sniedzēja atbildība		Lietotāja uztvere	QoS kritēriji				KQI
			Pieejamība	Integritāte	Laiks	Kapacitāte	Uzticamība
Pārdošana		Sākotnējā informācija, reklāma					
		Līguma nosacījumi					
Pakalpojuma administrēšana	Pakalpojuma nodrošināšana	Ierīkošana, aktivizēšana un pieņemšana					
	Pakalpojuma izmaiņas/ tehniskie uzlabojumi	Pēc lietotāja iniciatīvas					
		Pēc pakalpojuma sniedzēja iniciatīvas					
	Atbalsts	Dokumentācija (pakalpojuma uzstādīšanai/ lietošanai)					
		Tehniskais atbalsts					
		Komerčiālais atbalsts					
		Sūdzību izskatīšana					
	Bojājumu novēršana	Cilvēka iesaiste					
	Rēķini	Maksājumu jautājumi					
Pakalpojuma pārtraukšana	Atteikuma tiesības						
Pakalpojuma lietošana	Lietotāja veikta tīkla/pakalpojuma pārvaldība						
	Pakalpojuma izmantošana	Piekļuve					
		Datu pakalpojumi					
		Pakalpojuma lietošana					
		Lietotāja saskarne					

Lai nodrošinātu, ka visi šie kvalitātes aspekti ir izmērāmi un salīdzināmi, tika izdotas virkne rekomendāciju un normatīvo aktu, kas nosaka atbilstošos pakalpojumu kvalitātes parametrus, to mērīšanas metodes, kā arī normatīvie akti, kas nosaka prasības attiecībā uz šiem parametriem. Minētie kvalitātes parametri, atspoguļo rādītājus, kas ir būtiski lietotājiem izvēloties un saņemot pakalpojumu, kā arī komersantiem, plānojot un nodrošinot lietotāju vajadzībām atbilstošu pakalpojumu kvalitātes līmeni. Tādējādi visi šie kvalitātes aspekti var būt sargrupēti sekojošā modelī.



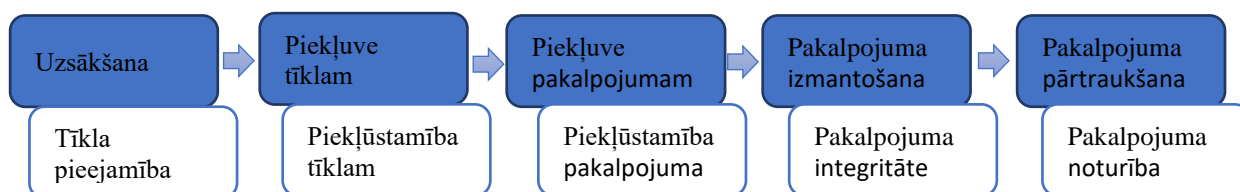
2.3. att. Shematisks attēlojums saistībai starp lietotāju apmierinātību, pakalpojuma kvalitāti QoS un tīkla veiktspēju; Avots: ETSI [45]

Tāpat šie parametri var būt aplūkoti no četrām dažādām perspektīvām (skat. 2.4. att. zilā krāsā iekrāsoto [45]), kas ietekmē to novērtēšanas metodes un interpretāciju. Šajā pētījumā uzsvars ir uz interneta pakalpojuma tehniskiem pakalpojuma kvalitātes parametriem un katrai perspektīvai raksturīgais tehniskais kvalitātes novērtējuma līmenis un interpretējums ir atspoguļots 2.4. attēlā baltajos kvadrātos.



2.4. att. Pakalpojumu kvalitātes aspektu klasifikācija četru skatu punktu kontekstā [45]

Tādējādi katram pakalpojuma nodrošināšanas aspektam var būt raksturīgi atšķirīgi pakalpojuma kvalitātes parametri, kā arī to novērtēšanas principi. Tomēr tie visi atkarībā no pakalpojuma kvalitātes izmantošanas fāzes var būt raksturoti ar vienotiem kvalitātes aspektiem, kas atspoguļoti 2.5. attēlā.



2.5. att. Pakalpojuma kvalitātes (QoS) aspekti atkarībā no pakalpojuma izmantošanas fāzes [45]

Pakalpojuma lietošanas fāzēm raksturīgie kvalitātes aspekti [45]:

- 1) Tīkla pieejamība (*angl. – Network Availability*) – varbūtība, ka pakalpojumi tiek piedāvāti lietotājam, izmantojot tīkla infrastruktūru;
- 2) Piekļūstamība tīklam (*angl. – Network Accessibility*) – varbūtība, ka lietotājs veiksmīgi reģistrējas tīklā, kas nodrošina pakalpojumu. Tīklam var piekļūt tikai tad, ja ir nodrošināta tā pieejamība lietotājam;
- 3) Piekļūstamība pakalpojumam (*angl. – Service Accessibility*) – varbūtība, ka lietotājs var piekļūt pakalpojumam, kuru vēlas izmantot. Piekļūstamība tīklam ir šīs fāzes priekšnoteikums;
- 4) Pakalpojuma integritāte (*angl. – Service Integrity*) – atspoguļo pakalpojuma kvalitāti pakalpojuma lietošanas laikā un ietver tādus elementus kā pārraidītā satura kvalitāte. Pakalpojuma integritāti var noteikt tikai tad, ja pakalpojumam ir veiksmīgi piekļūts;
- 5) Pakalpojuma noturība (*angl. – Service Retainability*) – raksturo pakalpojumu pārtraukšanu (atkarībā no tā, vai pakalpojums pārtraukts pēc lietotāja vēlmes vai nē). Piemēri tam ir visa veida robežvērtības, piem. zvanu pārtraukšanas koeficients vai datu pārtraukšanas koeficients. Tāpat kā iepriekš piekļūstamība pakalpojumam ir šīs fāzes priekšnoteikums.

Katram pakalpojuma kvalitātes aspektam ir raksturīgi atšķirīgi to kvalitāti ietekmējošie faktori, kurus raksturo tīkla un pakalpojuma galvenie veiktspējas pamatrādītāji (KPI) un attiecīgie uz lietotāju vērstie kvalitātes parametri (KQI). Šādi parametri ir aprakstīti virknē starptautisko rekomendāciju [39][40][42][43][44][45][46][47], kā arī izriet no normatīvajiem aktiem [18][23]. Kvalitātes parametri atkarībā no pakalpojuma kvalitātes aspektiem ir vispārīgi apkopoti 2.2. tabulā, tomēr tie ir tikai daži no rekomendācijās iekļautajiem parametriem.

Pakalpojuma kvalitātes tehnisko parametru un lietotājam raksturīgo rādītāju apkopojums atkarībā no pakalpojuma kvalitātes aspekta [18][39][45]

Pakalpojuma kvalitātes aspekts	Kvalitāti ietekmējošie faktori	Uz lietotāju vērstie kvalitātes parametri
Tīkla pieejamība	<u>Fiksētais tīkls</u> : infrastruktūras esamība; <u>Mobilais tīkls</u> : radio tīkla pārklājums (RxLev/RSCP/RSRP)	Tīkla nepieejamība
Pieklūstamība tīklam	<u>Mobilais tīkls</u> : Caurlaidspēja, aizture, radio signāla parametri	Nepieklūstamība tīklam
Pieklūstamība pakalpojumam	Caurlaidspēja (TCP/UDP), aizture, trīce, pakešu zudums; TCP/UDP portu bloķēšana	Nesekmīgo savienojumu skaits – nespēja izveidot savienojumu, savienošanas laiks;
Pakalpojuma integritāte		Datu pārraides ātrums, nesekmīgo datu pārraides koeficients, aizture, aiztures nevienmērība
Pakalpojuma noturība		Nesekmīgo savienojumu skaits (%) – savienojuma pārrāvums
Pieklūstamība noteiktu lietojumprogrammu līmenī	IP adrešu bloķēšana, DNS manipulācija,	Nepieklūstamība noteiktai lietojumprogrammai/ tīmekļa lapai u.tml.
Integritāte noteiktu lietojumprogrammu līmenī	Caurlaidspēja (HTTP/FTP), aizture, trīce, pakešu zudums	Tīmekļa lapu ielādes laiks, HTTP/FTP datu pārraides ātrums, video/audio straumēšanas kvalitāte u.c.
Lietotāja apmierinātība	Visi iepriekš minētie	Kopējais subjektīvais novērtējums

Tādējādi var secināt, ka pastāv noteikti rādītāji, kas ietekmē pakalpojuma saņemšanu un lietotāja pieredzes kvalitāti vairākās pakalpojuma saņemšanas fāzēs. Tā kā lietotājam ir būtiski saņemt samērīgu, pārskatāmu un jēgpilnu informāciju par pakalpojuma kvalitāti, tad ir būtiski atlasīt un atspoguļot tikai to pakalpojumu parametru kopumu, kas vispilnīgāk apraksta sagaidāmo vai saņemto pakalpojuma kvalitāti.

2.2. Interneta pakalpojuma kvalitāti raksturojošie tehniskie parametri

Attiecībā uz interneta pakalpojuma tehnisko pakalpojuma kvalitāti kā uzraugāmi un līgumā norādāmi ir noteikti tādi kvalitātes rādītāji kā datu pārraides ātrums, latentums, trīce, pakešu zuduma koeficients [18][19][23][24]

Datu pārraides ātrums

Atkarībā no novērtējamā skatupunkta, datu pārraides ātrumu raksturo dažādi rādītāji, tādi kā ceļa/savienojuma kapacitāte (*angl. – capacity/ bandwidth*) un caurlaidspēja (*angl. – throughput*) jeb rezerves kapacitāte (*angl. – available bandwidth*). Šiem rādītājiem un to

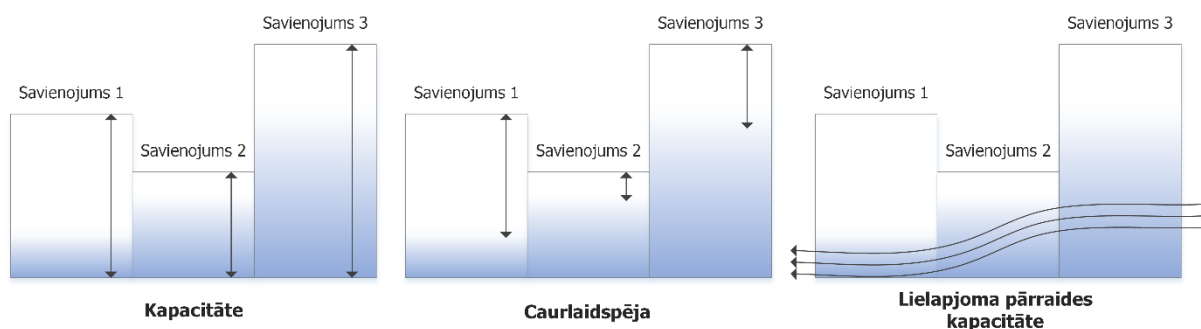
mērījumiem ir atšķirīga nozīme, tāpēc ir būtiski saprast, kāds tieši rādītājs visprecīzāk raksturo datu pārraides ātrumu no lietotāja skatu punkta.

- Kapacitāte ir rādītājs, kas norāda maksimālo iespējamo datu apjomu, kādu iespējams pārraidīt pārraides ceļā vai savienojuma posmā noteiktā laika intervālā.
- Caurlaidspēja ir mērs, kas norāda, cik daudz no kanāla kapacitātes netiek izmantot, jeb kāds ir maksimālais iespējamais datu pārraides ātrums viena pārraides savienojuma ietvaros.

Kapacitāte ir mērs, kas ir vitāli svarīgs tīkla darbības nodrošināšanai un investīciju plānošanai. Piemēram, pieejamais joslas platums, kas raksturo tīkla rezerves kapacitāti, ir noteicošais faktors tīkla kapacitātes palielināšanai. Tomēr, lai gan šie ir ļoti svarīgi rādītāji, tie nav tik viegli interpretējami lietotāja pieredzes izpratnē un līdz ar to, mazāk interesē patērētājus. Tādējādi, datu pārraides ātrumu, kas raksturīgs lietotājam, mēra, novērtējot caurlaidspēju.

Parasti mūsdienu lietojumprogrammas datu pārraidei izmanto vairāk nekā vienu spraudni (*angl. socket - programmas interfeiss procesu datu apmaiņas nodrošināšanai*), lai nodrošinātu labāku tīkla resursu izmantošanu. Tas ir, izmantojot vairākus spraudņus, tiek izmantota lielāka daļa no pieejamās tīkla kapacitātes, tādējādi palielinot savienojuma efektivitāti. Šie pakalpojumi parasti izveido vairākas plūsmas, kas nodrošina paralēlu datu pārraidi, izmantojot tam paredzētos datu spraudņus. Līdz ar to, izmantoto paralēlo plūsmu skaits var būtiski ietekmēt pakalpojuma veiktspēju un atbilstošo caurlaidspēju. [48] Šis faktors ir īpaši nozīmīgs, pārraidot lielus datu apjomus. Savukārt, veicot caurlaidspējas mērījumus, būtiska nozīme ir pārraidāmo datu apjomam – tam ir jābūt pietiekami lielam. Tāpēc, novērtējot lietotājam pieejamo datu pārraides ātrumu, tiek novērtēta lielapjoma pārraides kapacitāte (*angl. – bulk transfer capacity*).

Lielapjoma pārraides kapacitāte (BTC) raksturo tīkla spēju pārraidīt ievērojamus datu apjomus, izmantojot vienu pārraides savienojumu, kurš izmanto pārraides protokolu ar pārslodzes kontroles īpašībām (piemēram, TCP). Līdz ar to bieži ar lielapjoma pārraides kapacitāti saprot viena pārraides savienojuma sasniedzamo caurlaidspēju. Viena TCP savienojuma lielapjoma pārraides kapacitāti nosaka citu konkurējošo TCP plūsmu skaits un dinamika, kā arī TCP iestatījumi katrā pārraides galā, gala sistēmu īpašības u.tml. Daudzām lietojumprogrammām lielāko tās darbības laiku ir raksturīga tieši lielapjoma datu pārraide, tādējādi raksturojot lietotāja novēroto lietojumprogrammu veiktspēju. Kā piemērs šādām lietojumprogrammām ir failu pārraide un piekļuve tīmeklim (izmantojot FTP un HTTP protokolus attiecīgi), kurās tiek pārraidīti lieli datu apjomi. Tāpēc tieši lielapjoma datu pārraides kapacitāte raksturo datu pārraides ātrumu, ko saņem lietotājs. [51][74]



2.6. att. No atšķirīgiem skatpunktiem veiktu datu pārraides ātruma mērījumu shematisks attēlojums; Avots: [74]

Datu pārraides ātruma (caurlaidspējas) novērtējums

Datu pārraides ātrumu raksturo bitu plūsmas ātrums datu kanālā, pārsūtot testa failus starp lietotāja galiekārtu vai pieslēguma punktu līdz definētai vietai interneta vidē vai testa serverim, novērtējot atsevišķi lejupielādes un augšupielādes datu plūsmas ātrumu [50]. Šis rādītājs tiek mērīts, lai noteiktu pieejamo pārraides kapacitāti dažādiem pakalpojumiem, kuru ietekmē aizture un pakešu zudumi. No lietotāju viedokļa datu pārraides ātrums ir galvenais veiktspējas rādītājs, ko lietotājs uztver lietojumprogrammas līmenī jeb kas ir saņemams lietotāja pusē. [48] Datu pārraides ātrumu nosaka pēc sekojošas formulas [48]:

$$\text{Datu pārraides ātrums} = \frac{\text{pārraidīto datu apjoms}}{\text{pārraides ilgums}} \quad (2.1.)$$

Datu pārraides procesā ir iesaistīti daudzi protokoli. Katrā protokolu steka līmenī var tikt novērtēts caurlaidspējas rādītājs.

2.3. tabula

OSI modeļa līmeņi, to funkcijas pārraidāmo datu vienības tipi [37]

Slānis	Datu vienības	Funkcijas	
7	Pielietojuma slānis	Dati	
6	Prezentācijas slānis		
5	Sesijas slānis		
4	Transporta slānis	Segmenti	E2E pārraide, plūsmas kontrole, uzticama datu segmentu pārraide starp tīkla pieslēguma punktiem
3	Tīkla slānis	Paketes	Loģiskā adresēšana, maršrutēšana, komutācija
2	Datu pārraides kanāla slānis	Kadri	Datu kadru pārraide starp diviem tīkla mezgliem, kas savienoti, izmantojot fizisko slāni; fiziskā adresēšana
1	Fiziskais slānis	Biti	Bitu pārraide fiziskajā pārraides vidē

Lietotājiem būtisks ir augstākā protokolu steka līmeņa caurlaidspēja, pretēji tam tīkla operatoram caurlaidspējas rādītājam katrā protokolu steka līmenī ir nozīme.

Tā iemesla dēļ, ka augstākos līmeņos datu paketēm tiek pievienotas attiecīgā līmeņa galvenes, nepieciešamo datu apjoms, kas tiek pārraidīts palielinās, tādējādi samazinot protokola efektivitāti [48]:

$$\text{Protokola efektivitāte} = \frac{\text{lietderīgā datplūsma}}{\text{visa datplūsma}} \quad (2.2.)$$

Līdz ar to zemākos protokola steka līmeņos caurlaidspējas rādītāji ir augstāki. Tādējādi caurlaidspējas rādītāji atšķiras atkarībā, vai tiek novērtēti no lietotāju vai tīkla skatu punkta. IP vidē augstākā līmeņa protokoli tiek izpildīti beigu punktos, t.i., galiekārtās, tajā laikā kad tīkls veic vienīgi transporta funkciju, iekļaujot tikai zemākā līmeņa protokolus. Tā kā galalietotāju ietekmē viss E2E posms, ieskaitot galiekārtas, ir jāņem vērā visu protokolu steka līmeņu ietekme. [48] Tādējādi caurlaidspējas rādītāji, kas tiek novērtēti tīkla līmenī, raksturo tīkla veikspēju (NP), savukārt lietojumprogrammu līmenī – pakalpojuma kvalitāti (QoS). Galvenā atšķirība starp kvalitātes novērtējumu lietotāja līmenī un tīkla līmenī ir tā, ka lietotāju līmenī QoS novērtējums raksturo uz pakalpojumu attiecināmu un E2E posmā saņemtu kvalitāti, turpretī tīkla veikspēja atspoguļo telekomunikāciju sistēmu, t.i., tīkla elementu vai tīkla posmu tehnisko funkcionalitāti.

Pastāv vairāki veidi, kā novērtēt caurlaidspējas rādītājus no lietotāja viedokļa. Visbiežāk IP tīkla caurlaidspēja tiek mērīta pamatojoties uz UDP vai TCP, jo to nav iespējams novērtēt tieši trešajā līmenī [48]. Lai veiktu caurlaidspējas novērtējumu IP protokola līmenī, ir nepieciešams izmantot UDP protokolu. Tomēr tā kā vairums mūsdienu lietojumprogrammu datu pārraidei izmanto TCP protokolu, tieši TCP caurlaidspējas rādītāji vislabāk raksturo lietotājam pieejamo datu pārraides ātrumu. Tāpēc parasti mērījumiem izmanto tieši TCP pārraides vadības protokolu [48][58].

Visbiežākais veids, kā ģenerēt TCP datplūsmu, ir izmantojot FTP vai HTTP protokolu. Novērtējot pieejamo caurlaidspēju, uzsvars nav uz pakalpojuma novērtēšanu, t.i., pakalpojums tiek izmantots, lai ģenerētu datplūsmu [48]. Lai nodrošinātu caurlaidspējas mērījumu precizitāti, ir būtiski ņemt vērā TCP protokola darbības principus. Pamatojoties uz šiem principiem, ir izstrādāti algoritmi, kas jāiestrādā mērīšanas sistēmā, lai nodrošinātu rezultātu objektivitāti un ticamību. Papildus tam, ir nepieciešams ievērot arī citus apstākļus, kas var ietekmēt rezultātu interpretēšanu. Veicot caurlaidspējas mērījumus ir būtiski ņemt vērā dažādus faktorus, kas ietekmē mērījumu rezultātu, piemēram, lietotāja un servera programmatūra, operētājsistēmas iestatījumi, references servera izvietojums un citi.

Aktīvie un pasīvie mērījumi

Pastāv divu veidu caurlaidspējas novērtējuma iespējas – veicot aktīvos un pasīvos mērījumus. Aktīvā mērījuma gadījumā, pārbaudāmajā tīklā tiek ģenerēta speciāla testa datplūsma, kas ļauj pārbaudīt pieejamo pārraides kapacitāti un parasti tos izmanto novērtējot piekļuves tīkla posmu. Ar šādu mērījumu nevar novērtēt tīkla kapacitāti, jo mērījumā netiek

ņemta vērā papildus lietotāja vai signalizācijas datplūsma, kas tajā brīdī tīklā tiek pārraidīta paralēli. Līdz ar to aktīvā mērījumā tiek novērtēta caurlaidspēja, kas ir sasniedzama ar atlikušo (brīvo) tīkla kapacitāti, kas vēl nav piešķirta citiem resursiem/datplūsmai, tādējādi raksturojot lietotājam pieejamo datu pārraides ātrumu. [48]

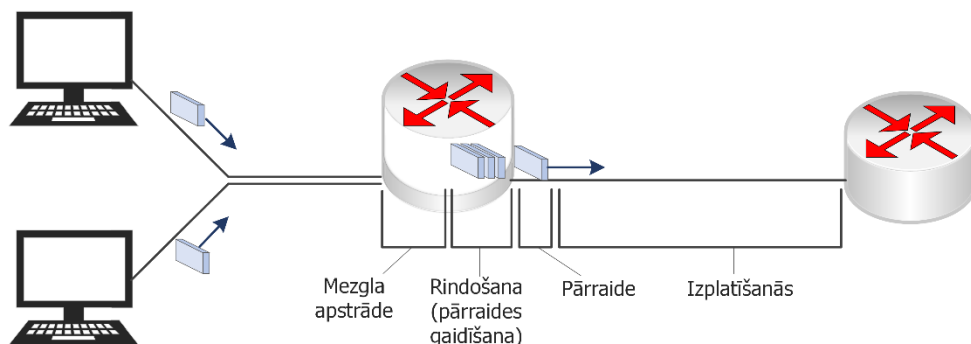
Savukārt pasīvais mērījums ietver reālās datplūsmas novērtēšanu noteiktos tīkla punktos un parasti tos izmanto, pārbaudot pamattīkla veiktspēju. Ar šādu mērījumu ir sarežģīti novērtēt pieejamo caurlaidspēju jeb lietotājam nodrošināmo datu pārraides ātrumu, jo nav iespējams secināt, vai lietotājs nevēlējās vai tehnisku iemeslu dēļ nespēja pārraidīt lielāku datplūsmas apjomu. Turklāt lietotāju uzvedība nav paredzama, bet tā tiešā veidā ietekmē aprēķināto caurlaidspēju. [48]

Lejupielādes un augšupielādes ātrums

Mobilie tīkli tiek projektēti un ierīkoti, pamatojoties uz lietotāju pieprasījumu un datplūsmas pārraides modeļiem. Tādējādi, ņemot vērā, ka datplūsmas pieprasījums lejuplīnijā ir daudz augstāks nekā augšuplīnijā, mobiliem tīkliem ir raksturīga asimetrija lejupielādes un augšupielādes caurlaidspējas rādītājos. Jo īpaši šāda pieprasījuma nevienmērība ir raksturīga vēlākiem 3G (jeb 3.5G) un 4G tehnoloģijas tīkliem, kuros tiek nodrošināti augsti pieslēguma ātruma rādītāji un līdz ar to lietotājiem ir iespēja pārraidīt liela apjoma datu saturu. Novērojumi rāda, ka datplūsmas pārraides pieprasījums lejup un augšupvirzienos ir asimetrisks, kur dominējoša ir datu lejupielāde. Ik gadu ir vērojams pārraidīto datu apjoma pieaugums, tomēr datu pārraides pieprasījuma izmaiņas atšķiras atkarībā no pārraides virziena. Augšupielādēto datu apjoms pieaug vienmērīgi, savukārt lejupielādēto – eksponenciāli. Novērtētā augšupielādēto un lejupielādēto datu apjoma attiecība ir aptuveni 1:7, kas ir iemesls asimetriskai tīkla kapacitātes plānošanai [52]. Mainoties mobilo tīklu izmantošanas tendencēm, sagaidāmas ar izmaiņas datplūsmas pārraides virziena pieprasījumā. Jau tagad pastāv pakalpojumi, piemēram P2P TV, e-pasts, P2P failu apmaiņa, kur augšupielādēto un lejupielādēto datu apjoms ir vienāds [52]. Pieaugot ar interneta starpniecību sniegto pakalpojumu dažādībai, to izplatībai un izmantošanas biežumam, piemēram mākoņu tehnoloģijām, sensoru tīkliem, ierīču-ierīču (D2D) komunikācijai u.c., paredzams, ka tiks augšupielādēts arvien lielāks datu apjoms un augšuplīnijas kapacitātei būs arvien lielāka nozīme.

Latentums jeb datu pārraides aiztures laiks

Latentums jeb datu pārraides aiztures laiks raksturo laiku starp momentu, kad pirmais bits tiek pārraidīts tīklā līdz brīdim, kad pirmais bits pa šo tīklu nokļūst līdz galapunktam [49]. Pārraidot paketi no viena mezgla punkta uz nākamo, to ietekmē dažāda veida aiztures. Būtiskākās no tām ir pārraides aizture, izplatīšanās aizture, mezgla apstrādes aizture un rindošanas aizture. Visas šīs aiztures kopā rezultējas kopējā pārraides aizturē.



2.7. att. Latentuma veidi un to rašanās vietas tīklā; Avots: [67]

Pārraides aizture (*angl. – Transmission Delay*) ir aizture, ko izraisa kanāla datu pārraides ātrums. Pieņemot, ka paketes tiek pārraidītas rindas kārtībā, kā tas ir ierasts pakešu komutācijas tīklos, konkrētā pakete var tikt pārraidīta tikai pēc visu iepriekš ienākušo pakešu nosūtīšanas [67].

Ja ir zināms datu pārraides ātrums, tad pārraides aizture ir proporcionāla datu paketes garumam un var būt aprēķināta sekojoši:

$$d_{\text{pārraides}} = \frac{\text{bitu skaits paketē}}{\text{kanāla pārraides ātrums } \left[\frac{\text{biti}}{\text{s}} \right]} \quad (2.3.)$$

Tādējādi, pārraides aizture norāda laiku, kas nepieciešams, lai pārraidītu (“ievirzītu”) visus paketes bitus kanālā. Pārsvārā pārraides aiztures laiks ir mikrosekundes līdz milisekundes ilgus [67].

Izplatīšanās aizture (*angl. – Propagation Delay*) ir laiks, kas tiek patērēts datplūsmas pārraidei no sūtītāja līdz saņēmējam. Katrs datu bits izplatās ar kanāla izplatīšanās ātrumu, kas ir atkarīgs no pārraides vides (šķiedru optika, vara kabelis u.tml.). Izplatīšanās aizturi ietekmē pārraides distance un izplatīšanās ātrums un tas var būt aprēķināts sekojoši:

$$d_{\text{izplatīšanās}} = \frac{\text{fiziskā kanāla garums [m]}}{\text{izplatīšanās ātrums kanālā } \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]} \quad (2.4.)$$

Pārsvārā izplatīšanās ātrums ir robežās no $2 \cdot 10^8$ m/s līdz $3 \cdot 10^8$ m/s un teritoriālos tīklos (WAN) izplatīšanās aiztures laiks ir mērāms milisekundēs [67].

Mezгла apstrādes aizture (*angl. - Nodal Processing Delay*) ir laiks, kas tiek patērēts datu apstrādei mezglā, piemēram, izejas kanāla izvēlei, bitu kļūdu pārbaudei. Citi procesi, kā adrešu noteikšana, kapsulācija/dekapsulācija, pakešu drošības pārbaude tiek veikti vienīgi tīkla malējās iekārtās (*angl. – edge device*). Līdz ar to malējās iekārtās apstrādes aiztures ir lielākas nekā tīkla starpmezglos. Papildus tam, laiks, kas tiek patērēts apstrādājot dažādas paketes, var nebūt konstants. Piemēram, adreses noteikšanai daudz ilgāku laiku patērēs adrešu translators (ADT), nekā vietējo adrešu kešatmiņa. Parasti mezгла apstrādes aiztures laiks ir mikrosekundes ilgus vai pat mazāks [67].

Rindošanas aizture (*angl. - Queuing Delay*) ir laiks, kas tiek patērēts paketei atrodoties rindā un gaidot tās pārraidīšanu. Rindošanas aiztures ilgums noteiktai paketei ir atkarīgs no rindā esošo pakešu skaits. Tādējādi, ja ienākošo pakešu skaits ir lielāks par izejošo pakešu skaitu, rodas rindošanas aizture. Pakešu skaits rindā ir atkarīgs no datplūsmas intensitātes un rindošanas mehānismiem. Līdz ar to rindošanas aizture var būt nevienmērīga. Praksē rindošanas aiztures laiks var būt no mikrosekundēm līdz milisekundēm ilgs.

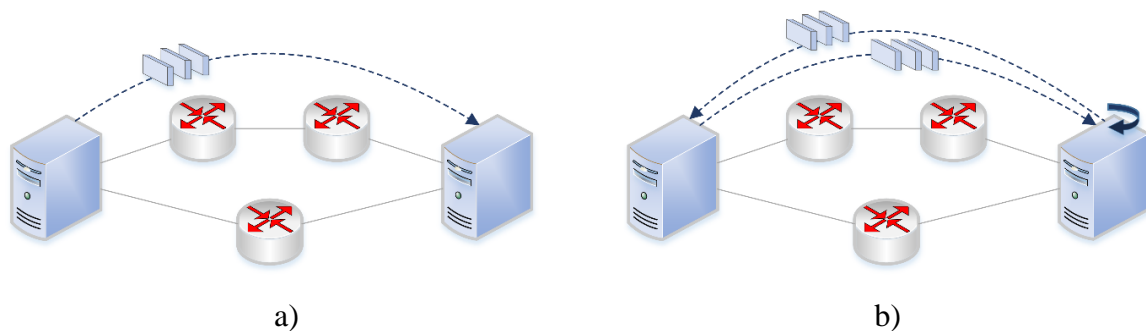
Kopējais pārraides posms var sastāvēt no daudziem starpmezgliem un pārraides kanāliem ar atšķirīgiem veiktspējas rādītājiem katrā no minētajiem aspektiem. Tādējādi, kopējā pārraides aizture jeb aizture E2E posmā ir visu iepriekš minēto aizturu summa (katrā pārraides posmā):

$$d_{kopējā} = d_{pārraides} + d_{izplatīšanās} + d_{apstrādes} + d_{rindošanas} \quad (2.5.)$$

Līdz ar to kopējā pārraides aizture ir atkarīga gan no tīkla noslodzes pārraides brīdī, gan no tīkla topoloģijas, datu pārraides kanāla veiktspējas, pārraides attāluma, gan arī maršrutēšanas nosacījumiem starp diviem galapunktiem.

Latentuma mērījumi

Aiztures laika novērtējums tiek veikts divos posmos, atkarībā no novērtēšanas mērķa. Tas ir, tiek novērtēta vienvirziena aizture (pakešu aizture) un turp-atpakaļ ceļa aizture.



2.8. att. Latentuma mērījumu attēlojums a) vienvirziena aizture un b) turp-atpakaļ ceļa aizture; Avots: [53]

Vienvirziena aizture raksturo laiku, kas nepieciešams datu paketes pārraidīšanai no sūtītāja līdz saņēmējam, šķērsojot vienu vai vairākus tranzīta mezglus. Veicot vienvirziena latentuma mērījumus ir būtiski, lai sūtītāja un saņēmēja laika rādītāji ir sinhronizēti [53].

Turp-atpakaļ ceļa aizture (*angl. – Round Trip Time, RTT*) raksturo laiku, kas nepieciešams datu paketes pārraidīšanai no sūtītāja līdz saņēmējam un atpakaļ, šķērsojot vienu vai vairākus tranzīta mezglus. Tieši turp-atpakaļ ceļa aizture jeb RTT raksturo galalietotāju lietojumprogrammu latentumu un ir noteikta kā obligāts KPI [54]. RTT var atšķirties, ja pārraidei tiek izmantoti atšķirīgs turp un atpakaļ ceļš. Visbiežākais veids, kā tiek veikti RTT mērījumi ir, izmantojot interneta vadības ziņojumu protokola (ICMP) datu pārraides ehotestēšanas pieprasījumu. [53]

Līdz ar to tīkla latentuma novērtēšanai parasti tiek mērīts turp-atpakaļ ceļa aiztures laiks jeb RTT, ko dažkārt dēvē par ehotestēšanas laiku (*angl. – ping time*) [53]. Latentums būtiski iespaido interaktīvu lietojumprogrammu veiktspēju. Reālā laika lietojumprogrammām, piemēram, VoIP zvanu, videokonferenču, tiešsaistes spēļu u.tml. lietojumprogrammām ir būtiski zemi latentuma rādītāji.

2.4. tabula

Piemērs latentuma ietekmei uz pieredzes kvalitāti, lietojot pret laika aizturēm jūtīgas lietojumprogrammas [53]

Novērtējums Lietojum- programma	Teicami	Labi/ apmierinoši	neapmierinoši
VoIP	<100 ms (vienvirziena)	100 – 150 ms (vienvirziena)	>150 ms (vienvirziena)
Tiešsaistes spēles (atkarībā no spēļu veida)	<25 ms vai < 50 ms (RTT)	~ 100 ms (RTT)	> 200 ms (RTT)

Tā kā latentumu tieši ietekmē attālums līdz pakalpojuma serverim, tad bieži vien pret aizturēm jūtīgu pakalpojumu serveri tiek izvietoti tuvāk lietotājiem, veidojot tā saucamo satura piegādes tīklu (*angl. – Content Delivery Network, CDN*). Tomēr arī starp šādu serveri un lietotāju kādā noteiktā ģeogrāfiskā vietā var būt ievērojams attālums. Līdz ar to, ņemot vērā potenciālo datu izplatīšanās aizturi, pakalpojumiem, kuriem ir svarīgi zemi latentuma rādītāji (piemēram, 25 – 50 ms), jānodrošina, ka piekļuves tīkla latentums pastāvīgi ir ap 5 – 10 ms. [53]

Latentumu aprēķina kā turp-atpakaļ ceļa aiztures laika vidējo vērtību mērījumu sesijas laikā:

$$\bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{2i} - t_{1i})}{n}, \quad (2.6.)$$

kur:

\bar{L} – vidējais latentums milisekundēs mērījuma cikla laikā;

t_{1i} – paketes nosūtīšanas laiks;

t_{2i} – paketes saņemšanas laiks;

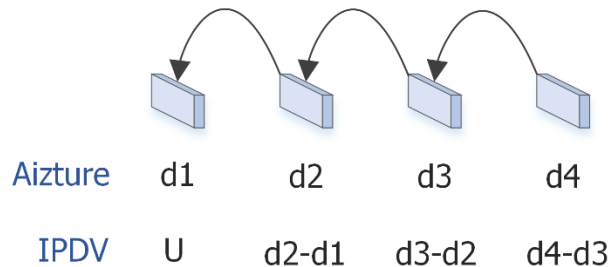
n – kopējais pārsūtīto pakešu skaits mērījuma cikla laikā.

Trīce jeb datu pārraides aiztures variācija

Trīce jeb datu pārraides aiztures variācija raksturo aiztures nevienmērību datu pakešu pārraidē. Tādējādi trīces parametrs atspoguļo tīkla spēju pārraidīt datus ar vienmērīgu aizturi. Pastāv divi atsevišķi aiztures variācijas formulējumi: starppakešu aiztures variācija (*angl. Inter-Packet Delay Variation, IPDV*) un pakešu aiztures variācija (*angl. Packet Delay Variation, PDV*).

Starppakešu aiztures variācija (angl. – *Inter-Packet Delay Variation, IPDV*)

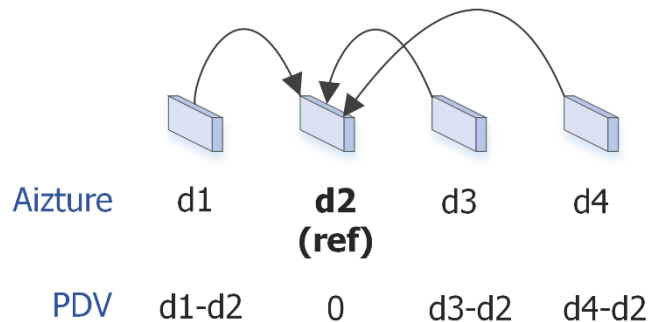
Veicot vienvirziena vai turp-atpakaļ ceļa aiztures mērījumu, secīgi tiek nosūtītas datu paketes. Starppakešu aiztures variācija (IPDV) tiek aprēķināta, pamatojoties uz šādiem secīgiem latentuma mērījumiem. Citiem vārdiem sakot, katras paketes latentuma atšķirība salīdzinājumā ar iepriekšējo paketi raksturo aiztures variāciju.



2.9. att. IPDV kalkulācijas shematisks attēlojums; Avots: [53]

Pakešu aiztures variācija (angl. – *Packet Delay Variation, PDV*)

Pakešu aiztures variācija tiek noteikta, veicot tādu pašu secīgi nosūtītu pakešu aiztures mērījumus, bet, pamatojoties uz noteiktiem kritērijiem, izvēloties vienas atsevišķas paketes aiztures vērtību kā references rādītāju. Visbiežāk par kritēriju references paketes izvēlei tiek ņemta izlases zemākā aiztures vērtība. Tāpat par references rādītāju var tikt izvēlēta vidējā aiztures vērtība. Tādējādi pakešu aiztures variācija (PVD) raksturo katras paketes latentuma atšķirību salīdzinājumā ar references vērtību. [53]



2.10. att. PDV kalkulācijas shematisks attēlojums; Avots: [53]

Nepastāv vienota nosacījuma, kā jāaprēķina trīces rādītājs. Atšķirīgas mērīšanas sistēmas piemēro gan atšķirīgus aiztures nevienmērības novērtēšanas mehānismus (IPDV vai PDV), gan atšķirīgus matemātiskus formulējumus to vērtības aprēķiniem (piemēram, novērtēto aiztures nevienmērību standartnovirzi, absolūto vidējo vērtību, maksimālo vērtību u.c.) [53]

Datu pārraides laika variācijas izkliedes vērtību, izmantojot aiztures vidējo vērtību, nosaka atbilstoši vispārinātai izteiksmei:

$$J = \sqrt{\frac{(L_i - \bar{L})^2}{n - 1}}, \quad (2.7.)$$

kur:

J – aiztures variācija jeb trīce milisekundēs;

L_i – konkrētas paketes vai mērījumu cikla aizture jeb latentums milisekundēs;

\bar{L} – aritmētiskais vidējais latentums milisekundēs mērījuma cikla laikā;

n – kopējais pārraidīto pakešu skaits mērījuma cikla laikā vai mērījumu ciklu skaits.

Ir pētījumi, kas liecina, ka tieši datu pārraides aiztures nevienmērība jeb trīce būtiski ietekmē atsevišķu pakalpojumu uztveri. Tā, piemēram, straumējot video pie vienmērīgiem latentuma rādītājiem, lietotājs neizjūt negatīvu ietekmi un viņa kvalitātes uztvere QoE netiek iespaidota. Savukārt, novērojot pat nelielu (± 4 ms) aiztures nevienmērību datu pakešu pārraidē, kvalitātes uztvere sāk pasliktināties. [55] Šī iemesla dēļ vairums reāllaika balss un video pārraides lietojumprogrammu pielieto trīces novēršanas (*angl. – de-jitter*) buferi, lai izlīdzinātu pārraides laikā novērotās aiztures nevienmērības. [53][56]

Pakešu zuduma koeficients

Pakešu zuduma koeficients raksturo zaudēto pakešu attiecību pret kopējo mērījumu ciklā nosūtīto pakešu skaitu augšupielādes vai lejupielādes virzienā. Pakešu zuduma koeficientu raksturo šāda izteiksme:

$$Z_{IP} = \frac{D_z}{n} \cdot 100 \%, \quad (2.8.)$$

kur:

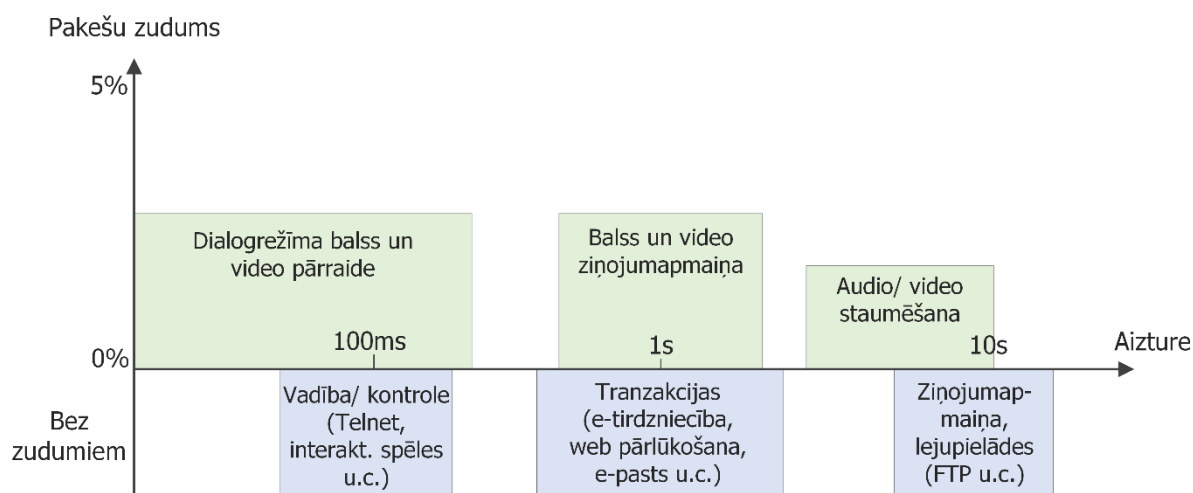
Z_{IP} – IP pakešu zuduma koeficients procentos;

D_z – zaudēto pakešu skaits;

n – kopējais mērījuma ciklā pārraidīto pakešu skaits.

Pakešu zudumi rodas tā iemesla dēļ, ka rindai, kas veidojas pirms datu pakešu nosūtīšanas kanālā, ir ierobežota ietilpība. Rindošanas kapacitāte ir lielā mērā atkarīga no maršrutētāja dizaina un veiktspējas. Tā kā rindas ietilpība ir ierobežota, gadījumā, ja buferis ir pilns, datu pakete nevar būt uzglabāta un maršrutētājs to atmet. Tādējādi pakete tiks zaudēta. Zaudēto pakešu daļa palielinās līdz ar datplūsmas intensitātes pieaugumu. Tāpēc datu pārraides posmu veiktspēju novērtē ne vien ar aiztures rādītājiem, bet arī ar pakešu zuduma varbūtību.

Pakešu zudumam ir tieša ietekme uz informācijas kvalitāti, ko saņem lietotājs, neatkarīgi no informācijas veida (balss, attēls, video vai dati) [39].



2.11.att. Lietotāj-orientēts minimālo pakešu zuduma un latentuma prasību attēlojums atkarībā no lietojumprogrammas veida; Avots: ITU [42]

Tīkla pieejamība

Tīkla pieejamība nav parametrs, kas tieši raksturo interneta pakalpojuma kvalitāti, tomēr tas raksturo vispārīgu pakalpojuma pieejamību. Šis rādītājs lietotājiem ir būtisks, izvēloties pakalpojuma sniedzēju, kurš spēs nodrošināt pakalpojumu lietotāja atrašanās vietā. Tāpat tīkla parametri var norādīt uz sagaidāmo pakalpojuma kvalitāti.

Fiksēta interneta pakalpojuma gadījumā būtiska ir tīkla operatora izvērstā infrastruktūra noteiktā ģeogrāfiskā vietā (adresē). Apliecinot infrastruktūras esamību, pakalpojuma sniedzējs var ar lielu ticamību nodrošināt deklarētos kvalitātes parametrus. Arī mobilā interneta pakalpojuma gadījumā tīkla operatora izvērstai infrastruktūrai ir būtiska nozīme. Tomēr pakalpojuma pieejamība un sagaidāmā kvalitāte noteiktā ģeogrāfiskā vietā (adresē, koordinātas punktā) šajā gadījumā ir atkarīga no daudziem citiem faktoriem.

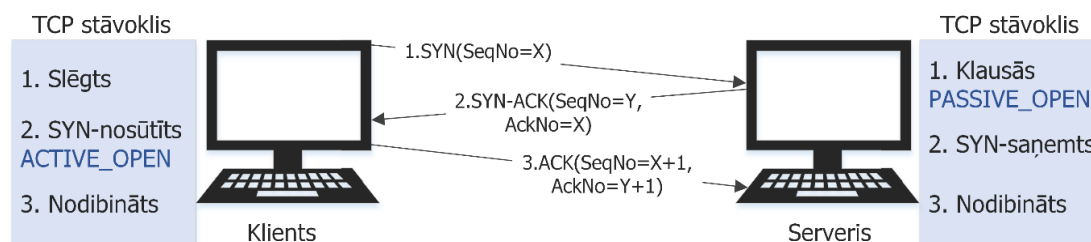
3. TCP CAURLAIDSPĒJAS MĒRĪJUMU ĪPAŠĪBU IZPĒTE

Tā kā datu pārraidē tiek iesaistīti daudz dažādu protokolu, caurlaides spējas rādītāji var tikt novērtēti katrā no OSI protokolu steka slāņiem (skat. 2.3. tabulu). Salīdzinoši precīzam lietotāju pieredzes atspoguļojumam caurlaides spējas novērtējumu vajadzētu veikt protokolu steka 4. slānī jeb transporta slānī. Kā jau iepriekš minēts, lielākā daļa interneta lietojumprogrammu datu pārraidei šajā līmenī izmanto TCP protokolu, tāpēc parasti datu pārraides ātruma novērtēšanai izmanto TCP protokolu. Ņemot vērā TCP protokola darbības principus un dažādo TCP algoritmu ietekmi uz caurlaides spējas rādītājiem, tos ir būtiski ņemt vērā, izstrādājot mērīšanas sistēmu.

3.1. TCP pārraides vadības protokola darbības princips

Kā jau tika minēts, TCP protokols ir dominējošais transporta protokols internetā. Tas nodrošina uzticamu datu pārraidi praktiski jebkurā pārraides vidē un neatkarīgi no datu pārraides ātruma, aiztures, kļūdām, dublēšanas un segmentu pārkārtošanas. [66] Pateicoties TCP protokolam un tā mehānismiem – plūsmas kontrolei un pārslodzes kontrolei – tiek nodrošināta interneta stabilitāte.

Lai nodrošinātu garantētu datu pārraidi, TCP protokols sākotnēji nodibina savienojumu, veicot trīsvirzienu rokasspiedienu. Tiek nodibinās pilns duplex savienojums, kurā abas puses sinhronizē (SYN) un apstiprina (ACK) viena otru. Klients izvēlas sākotnējo kārtas numuru “X”, kuru ietver pirmajā sinhronizācijas paketē. Serveris apstiprina segmenta ar pretējās puses kārtas numuru “X” saņemšanu, to palielinot par vienu (X+1) un nosaka sava segmenta sākotnējo kārtas numuru “Y”, kuru kopā ar apstiprinājuma numuru ietver SYN/ACK paketē. Izmantojot kārtas un apstiprinājuma numurus abas puses var konstatēt iztrūkstošos vai ārpuskārtas segmentus.



3.1. att. TCP trīsvirzienu rokasspiediena principa attēlojums [68]

Protocol	Length	Calculated window size	Info
TCP	66	64240	55404 → 443 [SYN] Seq=0 Win=64240 Len=0 MSS=1460 WS=256 SACK_PERM=1
TCP	66	29200	443 → 55404 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=29200 Len=0 MSS=1460 SACK_PERM=1 WS=128
TCP	54	131328	55404 → 443 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=131328 Len=0

3.2. att. Wireshark programmas loga ekrānšāviņš, kurā atspoguļota savienojuma izveide (trīsvirzienu rokasspiediens)

Pēc tam, kad šie trīs soļi ir veikti, starp klientu un serveri var tikt uzsākta datu saturošu segmentu pārraide. [67]

3.2. TCP algoritmi atbilstoša datu pārraides ātruma noteikšanai

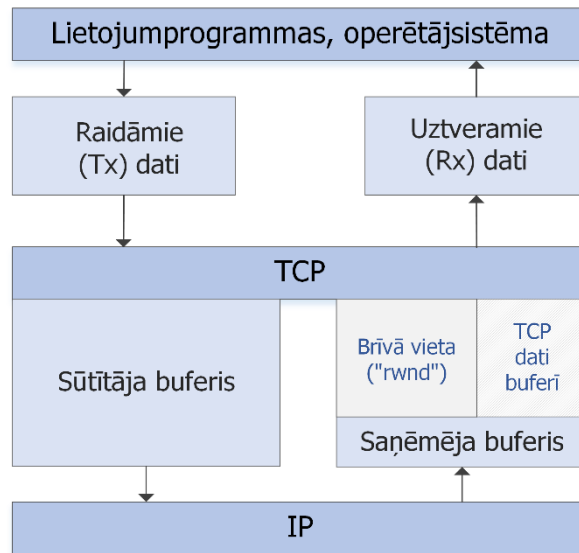
Izveidojot jaunu TCP savienojumu, parasti nav zināms, kāda tīkla kapacitāte ir pieejama datu pārsūtīšanai. Sākotnēji, veicot pakešu apmaiņu ar saņēmēja pusi, TCP noskaidro, kādu datu apjomu saņēmējs ir spējīgs saņemt. Šo procesu sauc par plūsmas kontroli. Tāpat, lai sūtītājs noskaidrotu, cik daudz datu ir spējīgs pārraidīt tīkls, tam ir nepieciešams nosūtīt pēc iespējas lielāku datu apjomu. Tomēr uzsākot datu pārraidi ar maksimālo ātrumu, var tikt traucēti citi TCP savienojumi, kas izmanto šo pašu ceļu. Tāpēc TCP pārsvarā izmanto algoritmus, kas nodrošina pakāpenisku ātruma palielināšanu un tā iespējamu uzturēšanu. Šie algoritmi veido TCP pārslogojuma kontroles mehānismu. [60][61][67][68]

TCP plūsmas kontrole nodrošina sūtāmo datu apjoma ierobežošanu, tādējādi ļaujot novērst situāciju, kad sūtītājs pārpilda saņēmēja buferi “*RcvBuffer*” (*angļu.val. – Receive Buffer*). Saņemot pārraidāmos datus, tie tiek ievietoti saņēmēja buferī. Pēc tam iesaistītais lietotumslāņa process nolasa datus no šī saņēmēja bufera, taču tas var aizņemt kādu laiku un nenotikt tūlītēji, datiem ienākot. Turklāt lietojumprogramma var būt aizņemta, pildot citu uzdevumu un uzsākt datu nolasīšanu ilgi pēc to ienākšanas buferī. Līdz ar to, ja lietojumprogramma veiktspējas vai atmiņas ierobežojumu dēļ nolasa datus salīdzinoši lēni, sūtītāja puse var ātri pārpildīt saņēmēja buferi, pārraidot datus pārāk ātri [67].

Saņēmēja bufera ietilpību raksturo mainīgs lielums – saņēmēja loga “*rwnd*” (*angļu.val. – receive window*) izmērs, kas ir tieši atkarīgs no brīvās vietas saņēmēja buferī:

$$rwnd = RcvBuffer - [Pēdējais saņemtais baits - Pēdējais nolasītais baits] \quad (3.1.)$$

Plūsmas kontroles ietvaros saņēmējs norāda sūtītājam sava saņēmēja loga *rwnd* lielumu jeb datu apjomu, kādu tas ir spējīgs saņemt. Saņēmēja norādītā *rwnd* loga lielumu sauc par izziņoto logu (*angļu.val. – advertised window*). [67][68] Tādējādi, no saņēmēja bufera izmēra būs atkarīgs, kādu datu apjomu var pārraidīt sūtītāja puse līdz apstiprinājuma saņemšanai par to, ka šie dati ir nogādāti.



3.3. att. TCP sūtīšanas un saņemšanas buferu attēlojums [68]

TCP pārslogojuma kontrole (*angļu.val. – congestion control*) balstās uz tīkla parametriem, piemēram, kopējās datplūsmas izmaiņas, maršrutētāja caurlaidspēja un kanāla fiziskiem raksturlielumiem, kas ietekmē apjomu, kādu iespējams pārraidīt [110]. TCP pārslogojuma kontroles algoritms satur 4 savstarpēji saistītas komponentes: lēnais starts (*angļu.val. – slow start*), pārslogojuma izvairīšanās (*angļu.val. – congestion avoidance*), ātrā retranslācija (*angļu.val. – fast retransmit*) un ātrā atkopšana (*angļu.val. – fast recovery*). [61][61][67] Lai datu kanāls netiktu pārsātināts, ir būtiski pārraidīt tādu datu apjomu, kādu uztverošā puse var pieņemt, kas, kā jau minēts, ir atkarīgs no saņēmēja bufera. Tāpat datu pārraides ātrums, ar kādu sūtītājs var pārraidīt datus, ir atkarīgs no pārslodzes loga *cwnd* (*angļu.val. – congestion window*) lieluma, kas tāpat kā saņēmēja logs *rwnd* ir mainīgs lielums un ir atkarīgs no pārslodzes tīklā. Nosūtīto, bet neapstiprināto datu apjoms nedrīkst pārsniegt minimālo *cwnd* vai *rwnd* vērtību, līdz ar to minimālā *cwnd* un *rwnd* vērtība ir tā, kas nosaka datu pārraides pārvaldību [61][67]:

$$\begin{aligned}
 & \text{Pēdējais nosūtītais baits} - \\
 & -\text{Pēdējais apstiprinātais baits} \leq \min \{cwnd, rwnd\}.
 \end{aligned}
 \tag{3.2.}$$

Lēnā starta un pārslogojuma izvairīšanās algoritmi ir tie, kurus pielieto TCP sūtītājs, lai kontrolētu datu apjomu, kāds tiek pārraidīts tīklā. Lai to īstenotu, abi algoritmi izmanto jau iepriekš minētos mainīgos lielumus *cwnd* un *rwnd*, kas tiek piešķirti katrā TCP savienojuma stāvoklī. [61] Uzsākot datu pārraidi tīklā, par apstākļiem kurā nav informācijas, ir būtiski noskaidrot tā pieejamo kapacitāti, lēnām un pakāpeniski palielinot pārraidāmo datu apjomu, tādējādi izvairoties radīt tīkla pārslogojumu, pārsūtot neatbilstoši lielu datu apjomu. [61] Šis process tiek saukts par lēno startu. Lēnais starts tiek piemērots, izmantojot divus mainīgus lielumus: pārslodzes logs *cwnd* un lēnā starta sliekšņa vērtība *ssthresh* (*angļu.val. – slow start threshold*).

Pārslodzes logs (cwnd)

Uzsākot TCP savienojumu, parasti tiek inicializēts mazs pārslodzes loga lielums [67]. Sākotnējais pārslodzes loga lielums var būt no 1 līdz 4 maksimāliem segmenta lielumiem MSS (*angl. – Maximum Segment Size*) vai pat 10 MSS (aptuveni 15 kB) [61][62][70][71]. MSS jeb maksimālais lietotāja datu apjoms paketē, ir atkarīgs no maksimālās pārraides vienības MTU (*angl. – Maximum Transmission Unit*), tas ir, no tā datu apjoma, kādu var saturēt viena pakete, pārraidot to noteiktas tīkla topoloģijas tīklos, lai posmā no avota līdz galamērķim netiktu veikta šīs paketes fragmentēšana. Tādējādi $MSS \leq MTU - TCP\ galvene (20\ B) - IP\ galvene (20\ B - IPv4; 40\ B - IPv6)$.

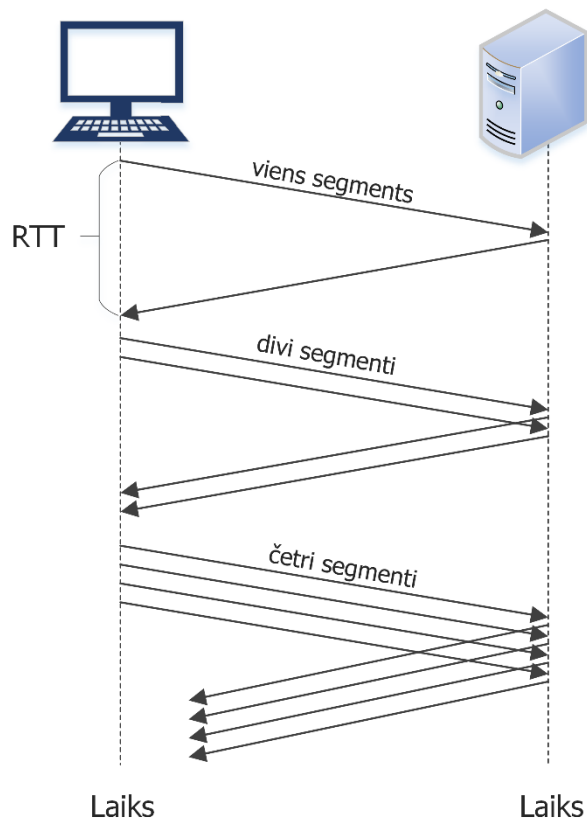
Kopējā ceļa MTU ir vienāds ar minimālo savienojuma MTU kādā šī ceļa posmā. Gadījumos, kad ir iespējotas IP vai TCP opcijas un to galveņu izmēri ir lielāki, MSS tiek atbilstoši samazināts, lai kopējais datu apjoms paketē nepārsniegtu ceļa MTU vērtību. [63] Visiem tīkla resursdatoriem ir jābūt spējīgiem pieņemt vismaz 576 B lielas paketes [65].

3.1. tabula

MTU lielums atkarībā no tīkla topoloģijas. Avots:[111]

Tīkla topoloģija	MTU (B)
WLAN ar A-MSDU atbalstu	7951
Token Ring (IEEE 802.5)	4464
FDDI	4352
Ethernet	1500
X.25	576

Tādējādi, pie TCP pārraides uzsākšanas, sākotnējais datu pārraides ātrums ir MSS/RTT [67]. Piemēram, ja sākotnējais *cwnd* ir 1 MSS (1460 B) un RTT ir 50 ms, tad rezultējošai sākotnējais ātrums ir vien 233,6 kbiti/s. Lēnais starts paredz *cwnd* izmēra pakāpenisku palielināšanu, t.i., nosūtot datu segmentu un saņemot apstiprinājumu ACK par tā saņemšanu, sūtītājs palielina *cwnd* izmēru par 1 MSS katram apstiprinātajam segmentam [67].

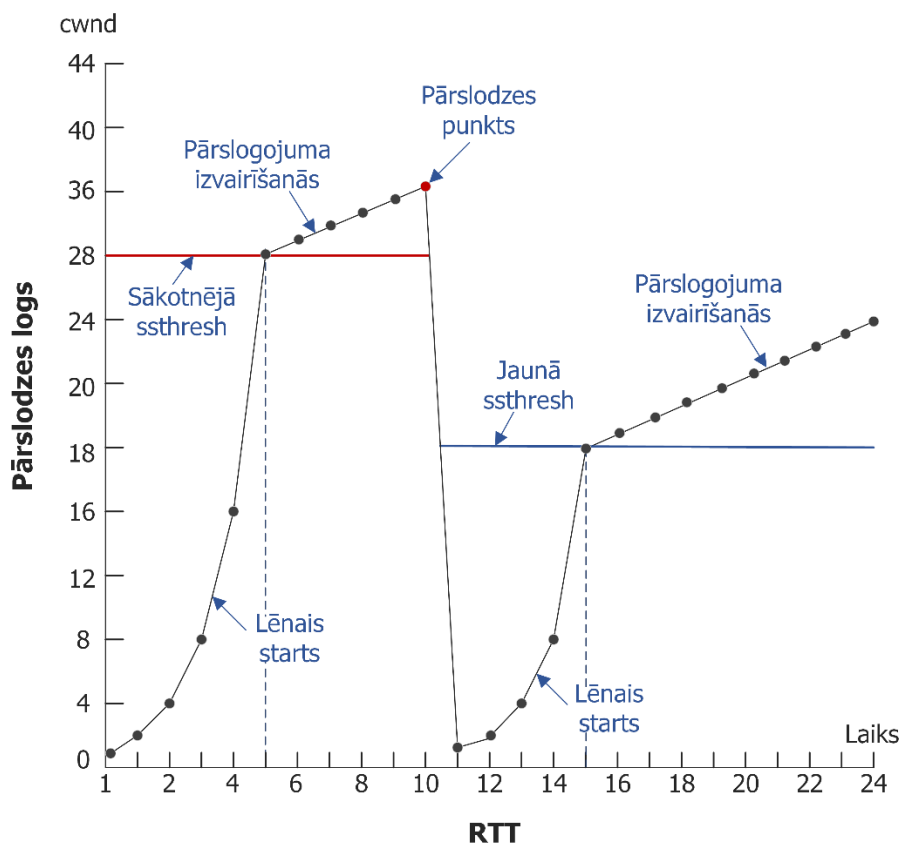


3.4. att. TCP lēnā starta vizuāls attēlojums; Avots: [67]

Tādējādi pēc katra RTT perioda $cwnd$ izmērs tiek dubultots ($jaunais\ cwnd = iepriekšējais\ cwnd \cdot 2$), veicinot eksponenciālu MSS segmentu pieaugumu, kas tiek pārraidīti tīklā. Šis process tiek pastāvīgi atkārtots līdz brīdim, kad ir sasniegts izmērs, kas atbilst pilnam saņēmēja izziņotā loga $rwnd$ lielumam vai arī, līdz tiek novērota tīkla pārslodze – atkarībā no tā, kas notiek ātrāk. [72]

Lēnā starta sliekšņa vērtība ($ssthresh$):

Mainīgais $ssthresh$ ir sliekšņa vērtība, pie kuras TCP izbeidz lēnā starta procesu. [72] Sākotnējā $ssthresh$ vērtība tiek iestatīta patvaļīgi augsta (piemēram, atbilstoši lielākajam iespējamam izziņotajam logam $rwnd$), taču, konstatējot pārslodzi tīklā, $ssthresh$ vērtība tiek samazināta (skat. 3.5. attēlu). Iestatot pēc iespējas augstāku sākotnējo $ssthresh$ vērtību, tiek nodrošināts, ka datu pārraides ātrums ir atkarīgs tieši no tīkla veikspējas, nevis kāda atsevišķa resursdatora ierobežojumiem. Sasniedzot $ssthresh$ vērtību, TCP pārraide pāriet pārslogojuma izvairšanās stadijā. Tādējādi lēnā starta algoritms tiek piemērots, kad $cwnd < ssthresh$, bet pārslogojuma izvairšanās algoritms – kad $cwnd > ssthresh$. [61]

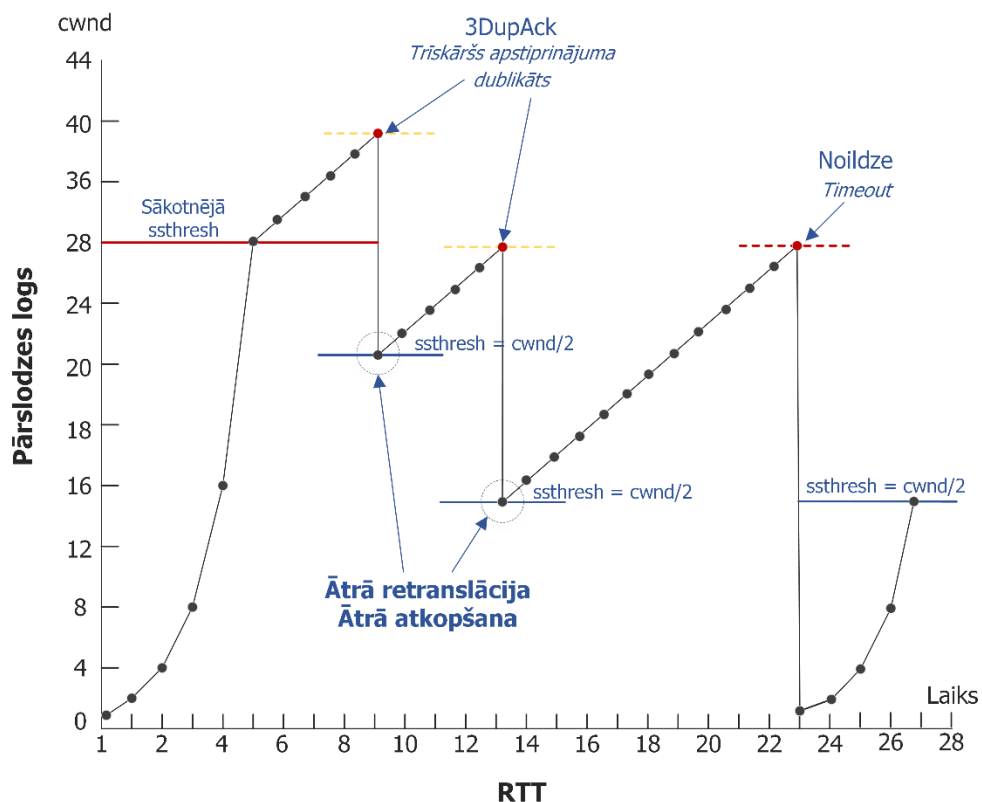


3.5. att. Lēnā starta un pārslogojuma izvairīšanās algoritmu darbības attēlojums; Avots: [72]

Pārslogojuma izvairīšanās stadijā TCP pāriet no eksponenciāla pārslodzes loga palielinājuma uz lineāru. Tajā brīdī, kad TCP pārraides ātrums pārsniedz savienojuma kapacitāti, notiek pakešu zudums, kuru TCP nekavējoties konstatē. Par pakešu zudumu liecina divi notikumi – savienojuma noildze (*angļu. val. – timeout*) vai trīskāršs apstiprinājuma dublikāts (*angļu. val. – triple duplicate acknowledgment*). Savienojuma noildze skaidri liecina, ka pārraides posmā ir novērota pārslodze, noteiktā laika sprīdī sūtītājam nesaņemot apstiprinājumu. Trīskāršs apstiprinājuma dublikāts liecina, ka kāds no sūtāmajiem segmentiem nav bijis saņemts un to ir nepieciešams atkārtoti pārsūtīt. Atkarībā no konstatētā pakešu zudumu notikumu veida, TCP nosaka turpmāko pārraides metodi. Tādējādi, ja tiek novērota savienojuma noildze, TCP iestata *cwnd* vērtību uz 1MSS un atsāk lēnā starta posmu, papildus tam samazinot *ssthresh* vērtību uz pusi no tās *cwnd* vērtības, kāda bija noteikta pirms konstatētā pakešu zuduma [67][72]. Savukārt, trīskārša apstiprinājuma dublikāta saņemšana, kas liecina par noteiktā datu segmenta nesaņemšanu, ierosina ātrās atkārtotās pārraides algoritmu. Turklāt tiek samazināts datu pārraides ātrums. Vecākas TCP protokola versijas (piemēram, Tahoe) gan pēc savienojuma noilguma, gan pēc trīs atkārtoto ACK saņemšanas iestatīja *cwnd* vērtību uz sākotnējo, tas ir, uz 1 MSS segmentu, tādējādi pēc katra pakešu zuduma uzsākot lēnā starta procesu. Šādas pieejas rezultātā savienojums var nepilnvērtīgi izmantot pieejamo joslas platumu, prasot ilgu laiku, lai sasniegtu maksimālās datu pārraides ātruma vērtības. [68] Tāpēc jaunākās TCP versijās (piemēram, Reno) tika iestrādāts ātrās atkopšanas mehānisms, kas

nodrošina, ka datu pārraides ātrums tiek samazināts uz pusi no tā, kāds tika novērots pirms pakešu zuduma, kā rezultātā tiek izlaists lēnā starta posms. [67][68][72]

Ātrā retrāslācija un ātrā atkopšana ir algoritmi, kas nodrošina paātrinātu savienojuma atgūšanu. Kā minēts iepriekš, saņemot trīskāršu apstiprinājuma dublikātu, sūtītājs saprot, ka noteiktais datu segments ir zudis. Pēc šī notikuma konstatēšanas, tiek iedarbināts ātrās retrāslācijas algoritms, kas veic zudušo datu segmentu retrāslāciju. [61] Tādā veidā, šis mehānisms ļauj izvairīties no noildzes taimera beigu termiņa gaidīšanas katram zaudētajam segmentam, līdz ar to nodrošinot ātru savienojuma atkopšanos [61][72]. Pēc tam, kad ātrās retrāslācijas algoritms ir nosūtījis zudušo datu segmentu, tiek uzsākta ātrās atkopšanas algoritma darbība, kas pārvalda jaunu datu pārraidi līdz brīdim, kad tiek saņemts nedublēts apstiprinājums. [61] Savukārt pēc apstiprinājuma saņemšanas par zaudētā segmenta atkāroto piegādi, TCP pāriet pārslogojuma izvairīšanās mehānisma darbības stadijā, jau ar samazinātu *cwnd* vērtību [67].



3.6. att. Ātrās atkopšanas mehānisma darbības attēlojums [61][67][72]

TCP	66	1057024	[TCP Dup ACK 17884#1]	55406 → 443	[ACK]	Seq=2166	Ack=4437982	Win=1057024	Len=0	SLE=4490542	SRE=4509522
TCP	54	2116864	55405 → 443	[ACK]	Seq=2258	Ack=9063551	Win=2116864	Len=0			
TCP	1514	31360	443 → 55406	[ACK]	Seq=4509522	Ack=2166	Win=31360	Len=1460	[TCP segment of a reassembled PDU]		
TCP	1514	31360	443 → 55406	[ACK]	Seq=4510982	Ack=2166	Win=31360	Len=1460	[TCP segment of a reassembled PDU]		
TCP	1514	31360	443 → 55406	[ACK]	Seq=4512442	Ack=2166	Win=31360	Len=1460	[TCP segment of a reassembled PDU]		
TCP	66	1057024	[TCP Dup ACK 17884#2]	55406 → 443	[ACK]	Seq=2166	Ack=4437982	Win=1057024	Len=0	SLE=4490542	SRE=4513902
TCP	1514	31360	443 → 55406	[ACK]	Seq=4513902	Ack=2166	Win=31360	Len=1460	[TCP segment of a reassembled PDU]		
TCP	1514	31360	443 → 55406	[ACK]	Seq=4515362	Ack=2166	Win=31360	Len=1460	[TCP segment of a reassembled PDU]		
TCP	66	1057024	[TCP Dup ACK 17884#3]	55406 → 443	[ACK]	Seq=2166	Ack=4437982	Win=1057024	Len=0	SLE=4490542	SRE=4516822
TCP	54	2116864	55405 → 443	[ACK]	Seq=2258	Ack=9075231	Win=2116864	Len=0			
TCP	1514	31360	443 → 55406	[ACK]	Seq=4516822	Ack=2166	Win=31360	Len=1460	[TCP segment of a reassembled PDU]		
TCP	1514	31360	443 → 55406	[ACK]	Seq=4518282	Ack=2166	Win=31360	Len=1460	[TCP segment of a reassembled PDU]		
TCP	66	1057024	[TCP Dup ACK 17884#4]	55406 → 443	[ACK]	Seq=2166	Ack=4437982	Win=1057024	Len=0	SLE=4490542	SRE=4519742
TCP	54	2116864	55405 → 443	[ACK]	Seq=2258	Ack=9079611	Win=2116864	Len=0			
TCP	1514	31360	443 → 55405	[ACK]	Seq=9081071	Ack=2258	Win=31360	Len=1460	[TCP segment of a reassembled PDU]		
TCP	1514	31360	443 → 55406	[ACK]	Seq=4519742	Ack=2166	Win=31360	Len=1460	[TCP segment of a reassembled PDU]		
TCP	1514	31360	[TCP Fast Retransmission]	443 → 55406	[ACK]	Seq=4437982	Ack=2166	Win=31360	Len=1460	[TCP segment of a reassembled PDU]	

3.7. att. Wireshark programmas loga ekrānšāviņš, kurā atspoguļoti saņēmēja izsūtītie dublētie apstiprinājumi un zaudēto datu retranslācija.

3.3. TCP caurlaidspēju ietekmējošo faktoru analīze

Vairāki faktori var ietekmēt TCP caurlaidspēju un tās mērījumu rezultātus. Ir faktori, kas rodas neatkarīgi no TCP darbības principiem un tā iestatījumiem, piemēram, šķērsplūsmas (UDP vai TCP), konkurējošo TCP savienojumu skaits, pārslodze pārraides ceļā, kā arī maršrutētāju buferu izmērs un katra kanāla kapacitāte un slodze. Šie faktori var pastāvēt arī lietotājam lietojot interneta pakalpojumu, līdz ar to kopumā tas neietekmē rezultātu objektivitāti, un šo apstākļu ietekme uz mērījumu rezultātiem var tikt minimizēta, veicot mērījumus atbilstošā laikā, daudzumā un vietā.

Savukārt pastāv faktori, kas ir tieši atkarīgi no TCP darbības īpatnībām un kuriem jābūt ņemtiem vērā, izstrādājot pašu mērīšanas sistēmu, kā arī veicot TCP iestatījumus. Tā, piemēram, TCP caurlaidspēju var ietekmēt tādi faktori kā TCP buferu izmēri gan sūtītāja, gan saņēmēja pusē, pārraidāmo datu apjoms, atšķirības TCP specifikācijās (piemēram, Tahoe, Reno, NewReno), sākotnējā loga izmēra izvēle un vairāki citi parametri. [75] Piemēram, novērtējot caurlaidspēju, veicot maza izmēra datu pārraidi, tā galvenokārt būs atkarīga no sākotnējā pārslodzes loga *cwnd*, turp un atpakaļ ceļa laika un lēnā starta mehānisma, nevis no ceļa pieejamā joslas platuma. Savukārt liela datu apjoma pārraides gadījumā, TCP caurlaidspēja noteiktā ceļa posmā var ievērojami atšķirties, izmantojot dažādas TCP versijas arī tad, ja pieejamais joslas platums ir vienāds. [75]

Tāpat, bieži iemesls pārslodzei, kas nav atkarīgs no pakalpojuma sniedzēja, ir saņēmēja logs izmērs *rwnd* [74]. Kopumā TCP veiktspēju nosaka joslas platuma un turp-atpakaļ aiztures laika reizinājuma BDP (*angl. Bandwidth Delay Product*). BDP norāda datu apjomu, kuru pārraidot, iespējams pilnībā piepildīt datu kanālu. Tādējādi, aprēķinot BDP, tiek noskaidrots bufera izmērs, kāds nepieciešams, lai sasniegtu optimālus caurlaidspējas rādītājus. [61] Ja bufera izmērs ir pārāk mazs, TCP pārslodzes logs *cwnd* nespēs pilnībā atvērties un caurlaidspēja nerasniegs maksimālos iespējamus rādītājus. Savukārt, ja saņēmēja buferis ir pārāk liels, sūtītājs pārraida vairāk datu, nekā saņēmējs spēj apstrādāt, datu pārraide ātrums tuvinās datu kanāla kapacitātes rādītājiem, kā rezultātā tiek novērotas augstas rindošanas aizkaves, rodas

tīkla pārslodze, pakešu zudumi un nepieciešamība zaudētos datus atkārtoti pārraidīt, līdz ar to tiek nelietderīgi izmantota tīkla kapacitāte [67][109][110].

Atbilstoši TCP iestatījumi

Ir novērots, ka biežākais datu pārraides ātrumu ietekmējošais faktors, kas nav atkarīgs no interneta pakalpojuma sniedzēja, ir saņēmēja loga *rwnd* lielums [74]. Kā iepriekš minēts, saņēmēja logs norāda, cik daudz brīvas vietas ir saņēmēja buferī, lai uzglabātu ienākošos datus. Teorētiski maksimālo pieslēguma ātrumu var aprēķināt pēc formulas:

$$\min(rwnd, cwnd) / RTT \quad (3.3.)$$

Līdz ar to, ja *rwnd* loga lielums ir neatbilstoši mazs, *cwnd* izmērs nerasniegs savu maksimumu, TCP veikspēja būs ierobežota, tīkla caurlaidspēja netiks lietderīgi izmantota un datu pārraides ātrums būs zemāks, nekā faktiski pieejamais.

Tāpēc ir būtiski, lai TCP sūtīšanas bufera un saņēmēja loga *rwnd* izmēri tiek iestatīti lielāki nekā BDP. Galvenokārt šie iestatījumi ir vai nu noteikti lietojumprogrammas kodā, vai arī konfigurēti operētājsistēmas ietvaros [73][74]. Minimālais nepieciešamais *rwnd* izmērs ir atkarīgs no turp-atpakaļ aiztures laika reizinājuma BDP:

$$BDP (biti) = RTT(s) \cdot caurlaidspēja \left(\frac{biti}{s}\right) \quad (3.4.)$$

Minimālais nepieciešamais *rwnd* izmērs var būt aprēķināts pēc formulas [73]:

$$TCP \ rwnd \ (baiti) = \frac{BDP}{8} \quad (3.5.)$$

Piemēram, lai optimāli izmantotu TCP caurlaidspēju, 100 Mbit/s pieslēgumam ar 20 ms RTT, minimālajam *rwnd* ir jābūt ne mazākam kā 250kB, savukārt 1 Gbit/s pieslēgumam ar 10 ms RTT – minimālais nepieciešamais *rwnd* ir 1,25MB. Līdz ar to, ja, veicot mērījumus, iestatītais *rwnd* izmērs ir mazāks par to, kas nepieciešams optimālas TCP caurlaidspējas sasniegšanai, arī mērījuma rezultāti neatspoguļos faktisko tīkla veikspēju.

3.2. tabula

Minimālais nepieciešamais TCP saņēmēja loga lielums pie attiecīgiem kvalitātes parametru rādījumiem [73]

Pieslēguma ātrums (Mbit/s)	RTT (ms)	BDP (biti)	Minimālais nepieciešamais TCP <i>rwnd</i> izmērs (kB)
100	20	2000000	250
1000	10	10000000	1250

TCP *rwnd* loga izmērs tiek kontrolēts ar loga lieluma parametru TCP galvenē, kas ir 16 bitu garš. Tādējādi, šis izmērs ierobežo sūtītāja *rwnd* loga lielumu līdz 65536 jeb 2^{16} . Tā kā šāds loga lielums ievērojami ierobežo caurlaidspēju, tika ieviesta loga mērogošanas opcija [65], kas

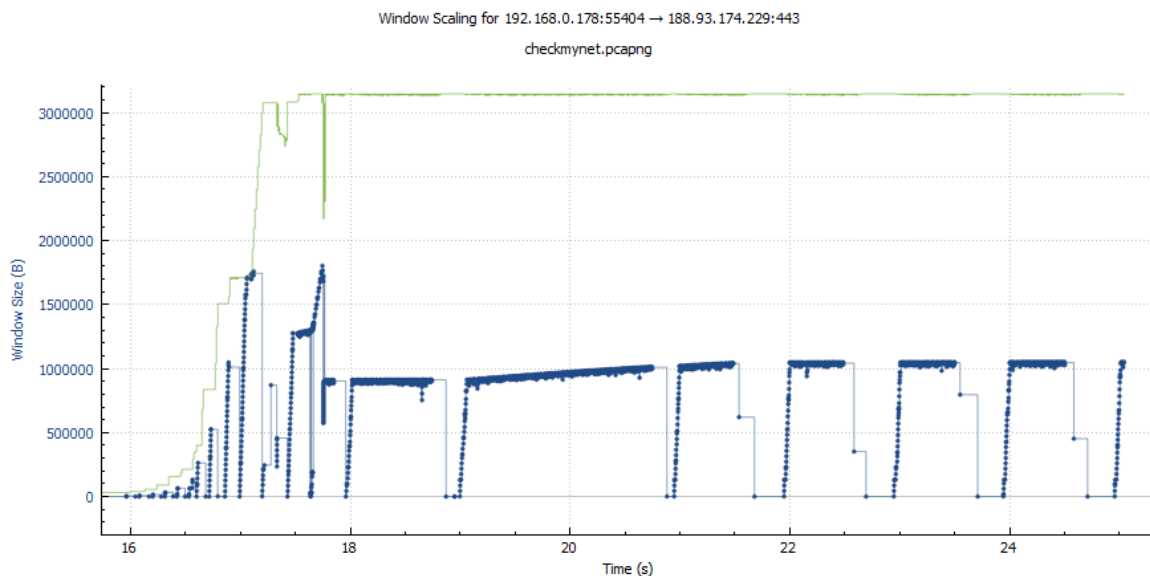
pieļauj maksimālo *rwnd* loga izmēru līdz 2^{30} jeb aptuveni 1GB. Mūsdienu operētājsistēmās parasti TCP loga mērogošanas funkcija ir iespējota pēc noklusējuma.

Lai novērtētu *rwnd* loga izmēra mērogošanu, tika veikts lejupielādes un augšupielādes ātruma mērījums ar interneta mērīšanas sistēmu, kas pieejama izmantojot interneta pārlūku, un ar Wireshark programmatūras palīdzību novērota trafika plūsma.

```
Flags: 0x012 (SYN, ACK)
Window: 29200
[Calculated window size: 29200]
Checksum: 0x70a5 [unverified]
[Checksum Status: Unverified]
Urgent Pointer: 0
Options: (12 bytes), Maximum segment size, No-Operation (NOP), No-Operation (NOP), SACK permitted, No-Operation (NOP), Window scale
> TCP Option - Maximum segment size: 1460 bytes
> TCP Option - No-Operation (NOP)
> TCP Option - No-Operation (NOP)
> TCP Option - SACK permitted
> TCP Option - No-Operation (NOP)
> TCP Option - Window scale: 7 (multiply by 128)
```

3.8. att. Wireshark programmas loga ekrānšāviņš ar informāciju par izziņoto *rwnd* loga lielumu un tā mērogošanas faktoru

3.8. attēls atspoguļo mērījumu servera sākotnējo izziņoto *rwnd* loga izmēru un tā mērogošanas faktoru. Loga mērogošanas opcija ļauj saņēmējam pēc nepieciešamības palielināt loga lielumu un pieņemt lielāku datu apjomu no sūtītāja.

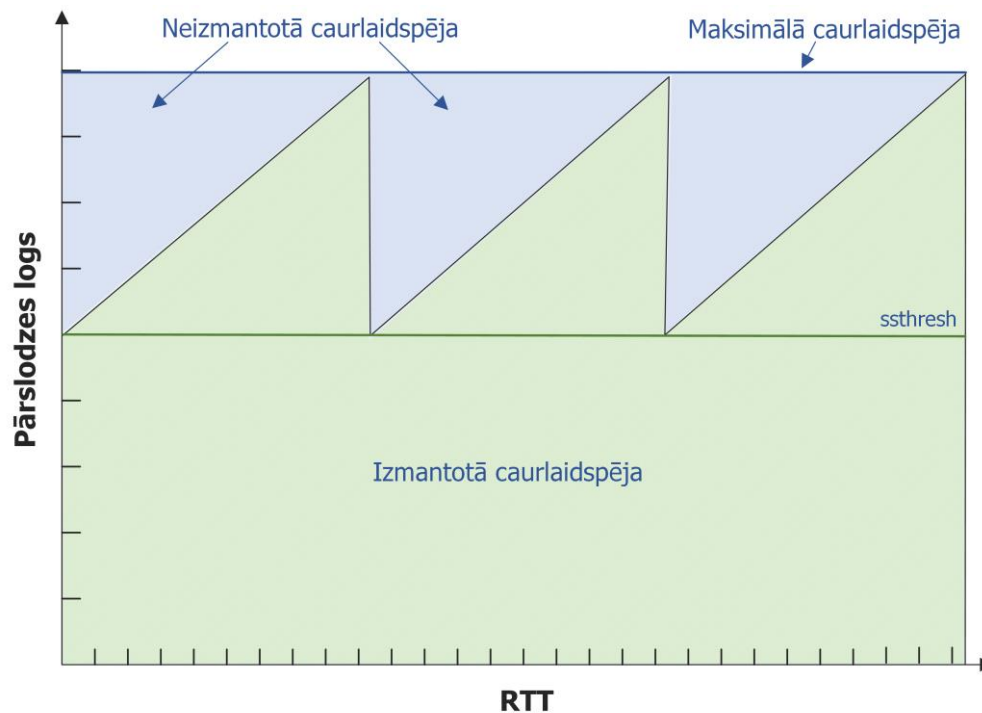


3.9. att. Wireshark programmas loga ekrānšāviņš, kurš atspoguļo *rwnd* loga (zaļā krāsā) izmēra palielināšanos atkarībā no izsūtītajiem, bet neapstiprinātajiem datiem (bytes in flight – zilā krāsā)

3.9. attēls atspoguļo datu plūsmu virzienā no klienta (lietotāja galiekārta) uz serveri, veicot augšupielādes ātruma novērtējumu.

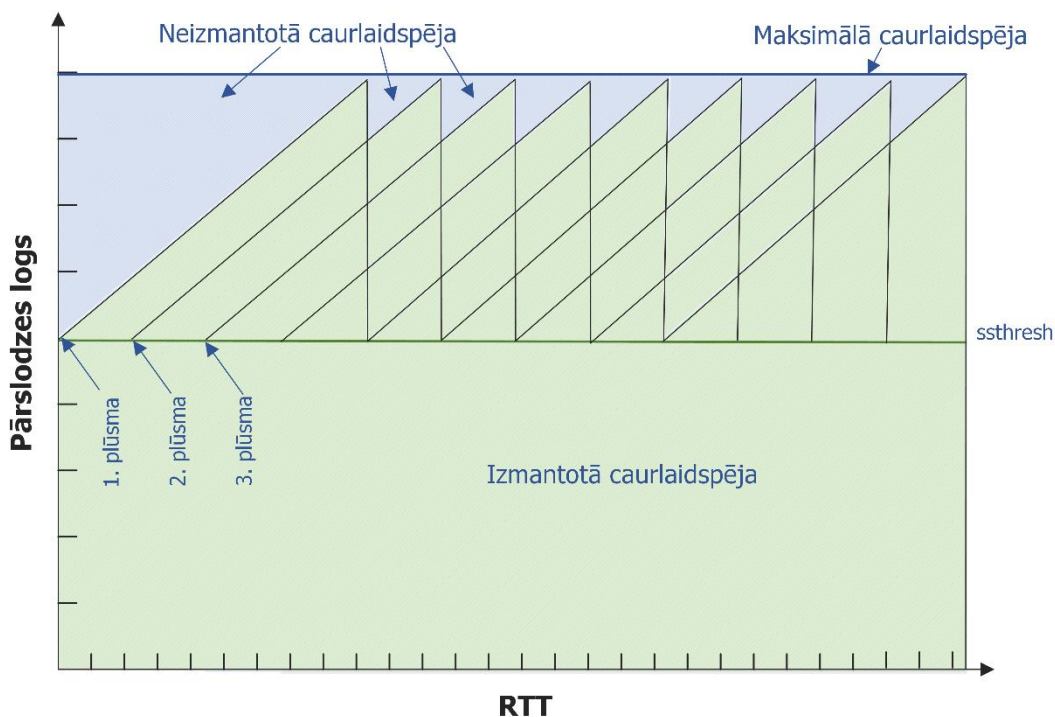
Paralēlie TCP savienojumi

Korektai TCP caurlaidspējas novērtēšanai ir būtiski, lai mērīšanas sistēma, veicot mērījumu, izveido vairākus vienlaicīgus TCP savienojumus. Viens TCP savienojums nevar piesātināt pārraides ceļu, līdz ar to pieejamā tīkla caurlaidspēja netiek lietderīgi izmantota [31][74]. Atbilstoši TCP darbības algoritmam, konstatējot noildzi, *cwnd* loga izmērs tiek samazināts. Tādā veidā tiek ietekmēta kopējā savienojuma caurlaidspēja, jo ir nepieciešams ilgs laiks, līdz *cwnd* loga izmērs atkal sasniedz savu maksimumu [76]. It īpaši aktuāla šī problēma ir augstas kapacitātes tīklos.



3.10. att. Pārslogojuma loga lielums vienas TCP plūsmas savienojumam; Avots: [76]

Izveidojot vairākas paralēlas TCP plūsmas, tiek nodrošināta stabilāka caurlaidspēja. Tas ir, novērojot noildzi vienam savienojumam, tiks samazināts tieši šī konkrētā savienojuma *cwnd* logs un samazinās tikai viena savienojuma datu pārraides ātrums. Tajā laikā, kad pārējie paralēlie savienojumi lietderīgi izmanto pieejamo caurlaidspēju. [76]



3.11. att. Pārslogojuma loga lielums savienojumam ar vairākām paralēlām TCP plūsmām;
Avots: [76]

Vairāku paralēlo TCP plūsmu izmantošana, ļauj izvairīties arī no iespējamiem *rwnd* loga izmēra radītiem caurlaidspējas ierobežojumiem [74].

Papildus tam šāda pieeja atbilst vairumam mūsdienu lietojumprogrammu darbībai internetā. Piemēram, visas mūsdienu pārlūkprogrammas, izveido līdz sešiem vienlaicīgiem TCP savienojumiem līdz vienam noteiktam domēnam [74][108]. Tādā veidā lietotājiem tiek nodrošināta ātrāka datu pārraide, kā arī lietderīga pieejamās tīkla kapacitātes izmantošana.

Ņemot vērā visu iepriekš minēto, ir būtiski, lai mērīšanas sistēma, veicot mērījumus, izveido vairākus paralēlus TCP savienojumus. Pretējā gadījumā mērījumu rezultāti var neatspoguļot reālo, lietotājam pieejamo pieslēguma ātrumu.

Lēnā starta algoritms

TCP darbības algoritmi iekļauj periodus, kad tas pakāpeniski palielina pārraides ātrumu, lai izvairītos no tīkla pārslodzes. Šajos momentos datu pārraides ātrums neatbilst tīkla caurlaidspējai. Līdz ar to, iekļaujot šos mērījumus kopējā pieslēguma ātruma novērtējumā, tā rādītāji tiek nepamatoti pazemināti. Tāpēc, izstrādājot mērīšanas sistēmu, vai arī definējot mērījuma rezultātu aprēķinu, šo faktoru ir jāņem vērā.

BEREC metodoloģijā ir noteikts, ka izstrādājot mērīšanas sistēmu, ir jānodrošina, ka pieslēguma ātruma mērījums tiek uzsākts pēc tam, kad visi paralēlie TCP savienojumi ir pabeiguši lēnā starta posmu, tādējādi nodrošinot pēc iespējas precīzāku faktisko ātruma rādītāju atspoguļojumu. [31]

Pastāv mērīšanas sistēmas, kuru metodoloģija paredz novērtēt nomērīto pieslēguma ātrumu kā vidējo vērtību noteiktam mērījumu izlases apjomam (piemēram, 95 %), neiekļaujot noteiktu daļu lēnāko un ātrāko mērījumiem. Ir sistēmas, kurās vidējā vērtība tiek aprēķināta 60 % mērījumu izlases, neiekļaujot 30 % lēnāko un 10 % ātrāko mērījumu rezultātu [74]. Taču, izmantojot šādu pieeju, var būt neiekļauti arī tie mērījumi, kas norāda uz caurlaidspējas samazinājumu no tīkla atkarīgu iemeslu dēļ.

Mērījumu ilgums un testa datu apjoms

Korektam mērījumam ir būtiski izvēlēties atbilstošu testa ilgumu. Ja mērījuma ilgums ir īss un pārsūtāmo datu apjoms ir neatbilstoši mazs, TCP nevar paspēt sasniegt pārraides ātrumu, lai pilnībā izmantotu pieejamo tīkla kapacitāti. [74] Tādējādi, tiek uzskatīts, ka 10 sekunžu testa periods ir pietiekams, lai nodrošinātu faktiski nodrošināmas tīkla kapacitātes sasniegšanu [77].

Tāpat ir rekomendēts, ka HTTP pārraide tiek veikta, izmantojot dalītās pārraides kodēšanu (*angl. - chunked transfer encoding*), kas ļauj sūtītāja pusei pārsūtīt patvaļīga izmēra datgrupas un pārtraukt sūtīšanu piemērotā laikā. Piemēram, sūtītājs var sūtīt mērījumu datus fiksētos 1 MB gabalos vai arī var tikt izstrādāts scenārijs, kad sūtītājs, pamatojoties uz atlikušo testa laiku un novēroto pārraides ātrumu, nosaka mainīgu datgrupas izmēru. Ir būtiski, lai katra datgrupa tiek apkalpota nekavējoties, bez aizkavēm, kā arī jānodrošina, ka jebkāds papildus pārsūtītais datu apjoms (kas rodas kodēšanas rezultātā) tiek iekļauts pieslēguma ātruma aprēķinos. [31]

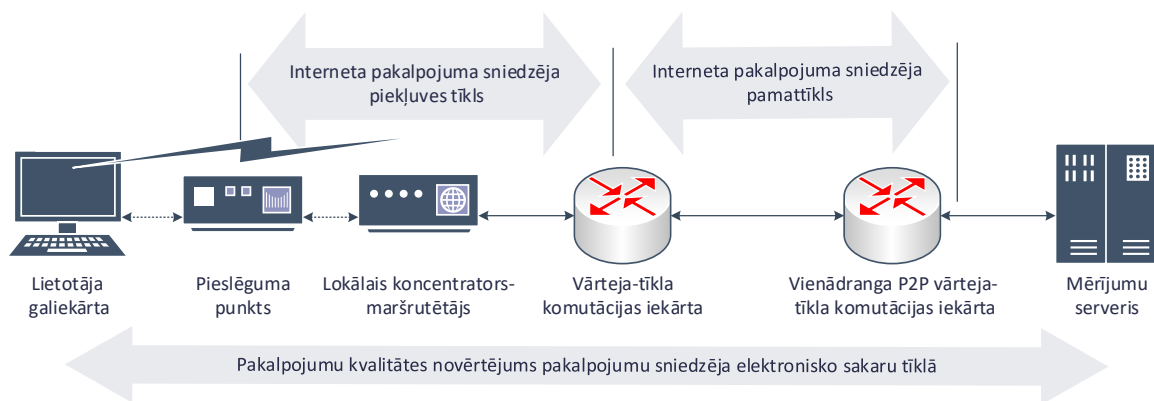
References serveris

Lai nodrošinātu precizitāti, veicot interneta pakalpojuma pieslēguma ātruma mērījumus, liela nozīme ir references servera izvietojumam un tā pieslēguma kapacitātei [80][81].

No mērījumu references servera pieslēguma vietas, ir atkarīgs novērtējamais tīkla posms.

- Pakalpojumu kvalitātes novērtēšana pakalpojuma sniedzēja tīkla ietvaros

Mērot interneta pakalpojuma kvalitāti no pakalpojuma pieslēguma punkta līdz konkrētai komutācijas iekārtai pieslēgtam mērījumu serverim, tiek noteikti tikai konkrētā pakalpojuma sniedzēja tīkla veiktspēja, kas raksturo šī pakalpojuma tiešu ietekmi mērāmajā posmā. Šāds nedod priekšstatu par lietotājam pieejamo interneta pakalpojuma kvalitāti, veidojot savienojumu ar publisko internetu.



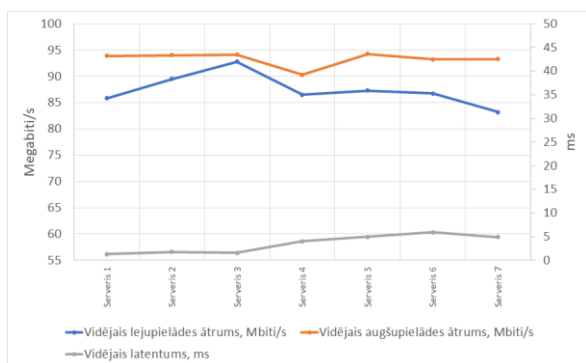
3.12. att. Pakalpojumu kvalitātes novērtēšanas references punkti interneta pakalpojuma sniedzēja tīkla robežās. Avots: [50]

Šāds risinājums nodrošina kvalitātes rādītāju novērtējumu atsevišķa elektronisko sakaru tīkla robežās un sniedz informāciju par šajā tīklā nodrošināto pakalpojumu kvalitāti (attiecināms, piemēram uz IPTV) konkrētā operatora lietotājiem. Taču lielākoties internetā izmantojamie pakalpojumi (satura pakalpojumi) ir pieejami ārpus konkrētā operatora tīkla. Līdz ar to, lai iegūtu salīdzināmus kvalitātes mērījumu rezultātus, mērījumā ir nepieciešams ietvert publiskā interneta pieslēguma posmu. [50]

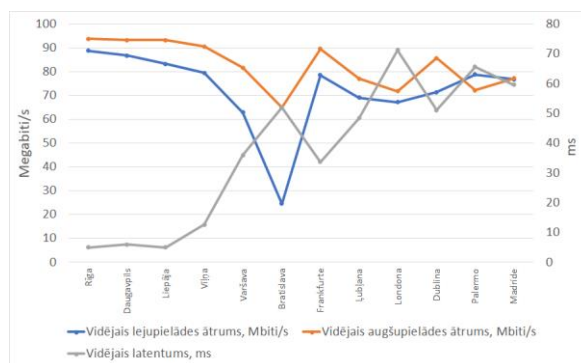
- Pakalpojumu kvalitātes novērtēšana attiecībā pret izklaidētiem references punktiem

Lietotājam pieejamā interneta pakalpojuma kvalitāte ir atkarīga gan no pakalpojuma sniedzēja tīkla veiktspējas, gan arī no tā, kāds pieslēgums tiek izmantots, lai piekļūtu publiskā interneta resursiem. Tāpēc mērījumam ir jānotiek tīkla posmā, kas ietver pieslēgumu publiskam internetam. Mērot interneta pakalpojuma kvalitāti posmā, kur savienojums tiek veidots, izmantojot dažādu operatoru tīklus un tā ceļš nav nosakāms, nav iespējams apgalvot, ka šāds novērtējums atspoguļo pakalpojuma sniedzēja nodrošināto interneta pakalpojuma kvalitāti. Novērtētais caurlaidspējas rādītājs atbildīs mazākai šī ceļa posmā pieejamai caurlaidspējai, un tas var būt kāda cita operatora tīkla, caur kuru tika izveidots savienojums, rādītāju dēļ. Respektīvi, šāda tipa mērījuma rezultāti var atspoguļot vienīgi savienojuma kvalitātes rādītājus līdz noteiktam serverim, nevis interneta pakalpojuma sniedzēja nodrošināto kvalitātes līmeni.

Lai novērtētu references servera ietekmi uz mērījumu rezultātiem, tika veikts pētījums [81]. Pētījuma laikā tika veikti mērījumi fiksētā un mobilā elektronisko sakaru tīklā līdz dažādiem mērījumu serveriem Latvijas valsts ietvaros un Eiropas mērogā. Pētījuma gaitā tika novērots, ka, veicot mērījumus vienādos apstākļos, ar vienu un to pašu pieslēgumu, izvēloties vienādu (pietiekami lielu) mērījumu skaitu, līdz dažādiem mērījumu serveriem, mērījumu rezultāti atšķiras plašās robežās.



a)



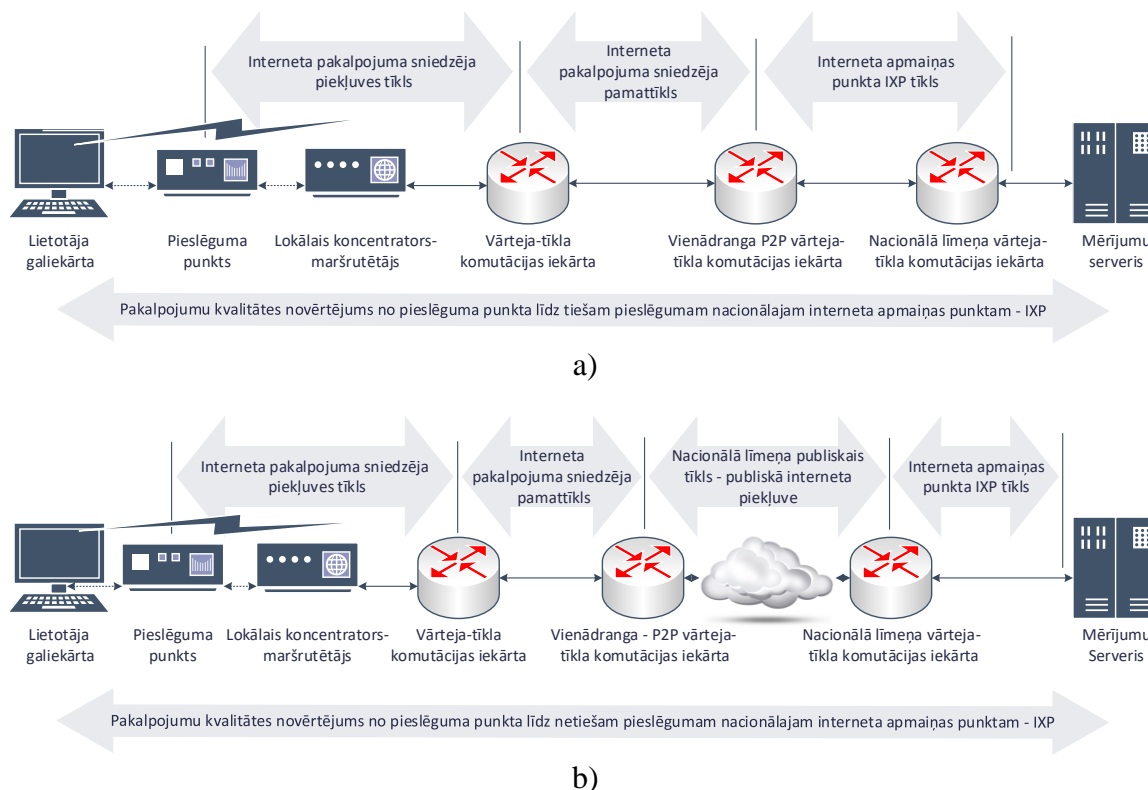
b)

3.13. att. Vidējo pieslēguma ātrumu un aizture laiku atšķirība, veicot mērījumus fiksētā FTTH 100 Mbiti/s pieslēguma tīklā līdz dažādiem mērījumu serveriem Latvijas mērogā (a) un Eiropas mērogā (b)

Kā redzams 3.13. attēlā (a), veicot mērījumus pret dažādiem mērījumu serveriem, kas izvietoti relatīvi netālu viens no otra (Rīgas pilsētas ietvaros), mērījumu rezultātu atšķirība sasniedz 8 %. Savukārt, veicot mērījumus pret dažādiem Eiropas mērogā izvietotiem serveriem (3.13. att. (b)), mērījumu rezultāti var atšķirties pat vairāk nekā par 70 %. Tādējādi ir secināms, ka, lai novērtētu noteiktā valstī pieejamos kvalitātes rādītājus, mērījumus ir nepieciešams veikt nacionālā līmenī. Kā piemērotākais risinājums ir uzskatāms mērīšanas servera pieslēgums pie nacionālā vai reģionālā interneta apmaiņas punkta komutācijas iekārtas. Šāds references punkta izvietojums nodrošina objektīvu informāciju par lietotājam pieejamiem pieslēguma kvalitātes rādītājiem. Līdz ar to, lai iegūtu salīdzināmus mērījumu rezultātus, ir nepieciešams izvietot vienotu references serveri, turklāt nodrošinot atbilstošus šī servera veiktspējas rādītājus, kā arī pietiekamu pieslēguma kapacitāti un vienlīdzīgus mērīšanas apstākļus visiem pakalpojumu sniedzējiem. [50][81]

- Pakalpojumu kvalitātes novērtēšana pieslēgumam pie nacionālā līmeņa interneta apmaiņas punkta

Interneta pakalpojuma sniedzējiem var būt tiešs vai netiešs pieslēgums pie nacionālā vai reģionālā līmeņa interneta apmaiņas punkta komutācijas iekārtas. Netieša pieslēguma gadījumā datplūsmas ceļš un komutācijas mezglu skaits līdz mērījumu serverim atšķirsies. Operatori, sniedzot lietotājiem interneta piekļuves pakalpojumu, plāno nepieciešamo pieslēgumu kapacitāti, ņemot vērā paredzamo noslodzes intensitāti, un atbilstoši tam iegādājas attiecīgas kapacitātes pieslēgumus vairumtirdzniecībā [50]. Līdz ar to nacionālā mērogā nav sagaidāma datplūsmas pārraide pa neprognozējamiem maršrutēšanas ceļiem, kas ietvertu posmus ar ievērojamu ietekmi uz pieslēguma kapacitātes rādītājiem un tādējādi ietekmētu mērījumu rezultātu objektivitāti. Taču šāds modelis ietver faktiskos, lietotājam nodrošināmos kvalitātes rādītājus un sniedz objektīvus un salīdzināmus mērījumu rezultātus.

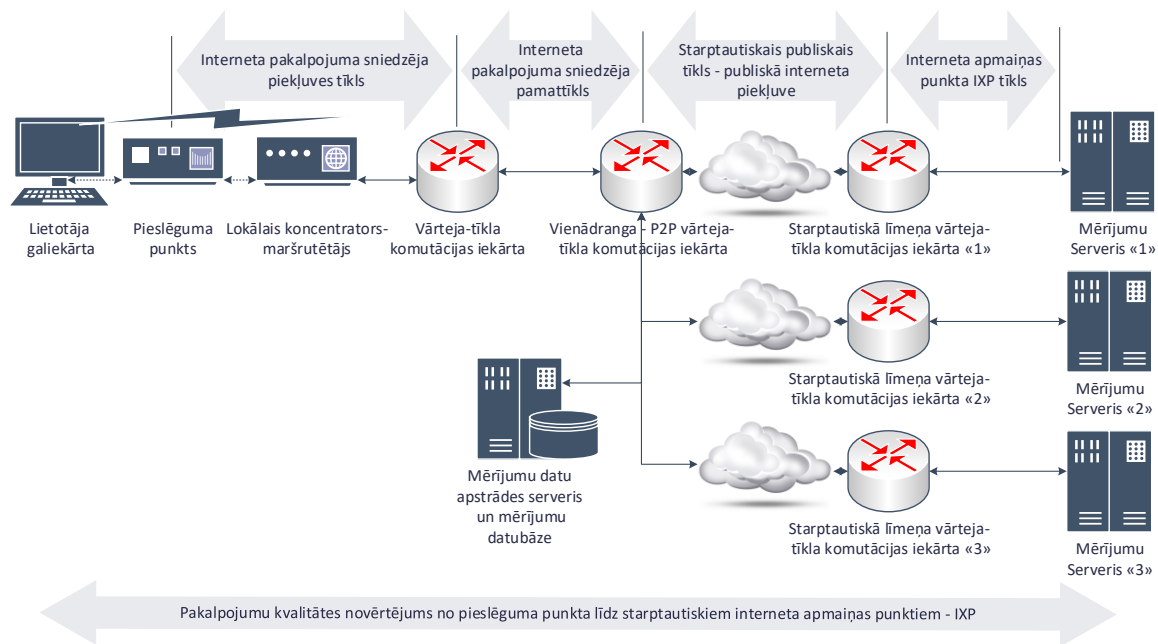


3.14. att. Pakalpojumu kvalitātes novērtēšanas references punkti no tīkla pieslēguma punkta līdz nacionālā līmeņa interneta apmaiņas punktam tieša (a) un netieša (b) savienojuma risinājumam. Avots: [50]

- **Pakalpojumu kvalitātes novērtēšana pieslēgumam pie reģionālā vai starptautiskā līmeņa interneta apmaiņas punkta**

Tā kā mērījumu rezultātus ietekmē arī attālums no tīkla pieslēguma punkta līdz mērījumu serverim jeb references punktam, tad, veicot mērījumus plašos mērogos, piemēram, plašas teritorijas valsts vai Eiropas mērogā, mērīšanas sistēmai ir jābūt nodrošināti reģionāli references punkti, nodrošinot līdzvērtīgus serveru un pieslēgumu veiktspējas rādītājus. Tāpat jānodrošina, ka mērījumi attiecībā pret noteiktiem mērījumu serveriem tiek veikti pēc iepriekš definēta teritoriāla sadalījuma, t.i., piemēram, lai attālums no tīkla pieslēguma punkta līdz references punktam nepārsniedz noteiktu attālumu. Tādējādi, mērījumu serveris tiks izvēlēts atbilstoši mērāmā pieslēguma atrašanās vietai.

Šāds risinājums ļauj novērtēt un salīdzināt interneta pakalpojuma kvalitātes rādītājus plašā teritoriālā mērogā, kas, savukārt, sniedz informāciju par to, kā Eiropas stratēģiskie mērķi ir īstenoti visas Eiropas līmenī. Tomēr, lai nodrošinātu, ka informācija ir objektīva un salīdzināma, jānodrošina ne vien vienota mērīšanas sistēmas darbības metodoloģija un references punktu parametri, bet arī līdzvērtīga mērīšanas pieeja un mērījumu rezultātu analītika.



3.15. att. Pakalpojumu kvalitātes novērtēšanas references punkti no tīkla pieslēguma punkta līdz starptautiskā līmeņa interneta apmaiņas punktiem vai reģionālā līmeņa interneta apmaiņas valstīs ar plašu teritoriju. Avots: [50]

4. INTERNETA PAKALPOJUMA KVALITĀTES NOVĒRTĒŠANAS METODIKAS DEFINĒŠANA

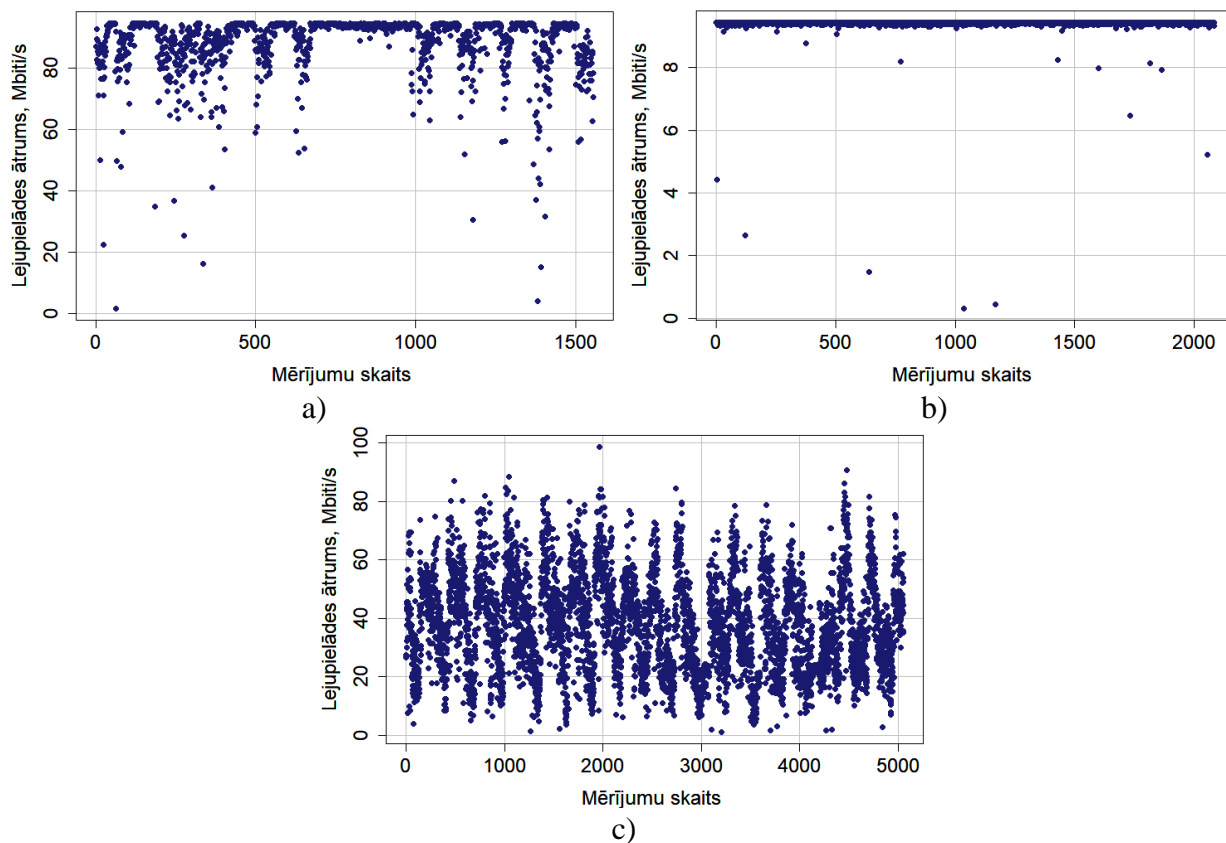
Interneta pakalpojuma kvalitātes rādītājus, it īpaši datu pārraides ātruma vērtības, ievērojami ietekmē gan mērīšanas sistēmas metodoloģija, gan mērījumu metodika. Mērīšanas sistēmas metodoloģija tiek definēta un izstrādāta, pamatojoties uz datu pārraides principiem, kas nodrošina, ka mērījums atspoguļo reāli sasniedzamos rādītājus. Tomēr, lai novērtētās parametra vērtības ir objektīvas un kopumā atspoguļo faktisko pakalpojuma kvalitāti, ir būtiski ievērot arī noteiktu pieeju mērījumu veikšanā. Lai definētu atbilstošu un pamatotu mērīšanas metodiku, tika veikta mērījumu rezultātu analītika.

Interneta pakalpojuma kvalitātes novērtēšanas metodikas definēšanai tika veikta matemātiska mērījumu datu analīze. Eksperimentālajiem mērījumiem izmantota Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas (SPRK) Interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes kontroles sistēma ITEST, kas veidota izmantojot Visualware Inc. programmatūru. Analizētie dati aptver mobilā interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumu rezultātus par dažādiem laika periodiem, kas veikti posmā starp Latvijas interneta apmaiņas punktu un tīkla pieslēguma punktu (mobilā tīkla modems ar 4G pieslēguma tehnoloģiju) trīs dažādu Latvijas mobilo operatoru tīklos). Mērījumu dati ietver ilgstošus sērijveida mērījumu rezultātus, kur katrā mērījumu vietā mērījumi veikti vismaz vienas nedēļas periodā un kur mērījumi ir veikti secīgi katra operatora tīklā, diennakts laikā atkārtojot 4 mērījumu sēriju ik pēc 5 minūtēm. Kā arī mērījumu dati ietver izlases veida mērījumu rezultātus, kur dažādās mērījumu vietās Latvijā veikta noteikta mērījumu atkārtojumu sērija. Atsevišķu pētījumu ietvaros ilgstoši sērijveida mērījumi veikti fiksētā elektronisko sakaru tīklā.

4.1. Datu pārraides ātruma mērījumu rezultātu analītika

Pieslēguma ātruma rādītāji ir viens no noteicošajiem pakalpojuma kvalitātes parametriem, kas saprotamā un uzskatāmā veidā raksturo sagaidāmo lietotāja pieredzi, izmantojot pakalpojumu. Pieslēguma ātrums ir arī mērs, kas tiek izmantots par atskaites rādītāju Eiropā pieejamā platjoslas interneta kvalitātes novērtēšanā. Līdz ar to ir būtiski noteikt šī rādītāja aprēķina metodiku, lai pēc iespējas precīzi un jēgpilni atspoguļotu tā vērtības.

Lai novērtētu lejupielādes ātruma rādītāju izmaiņu dinamiku dažādu tehnoloģiju interneta pieslēgumiem, tika veikts pētījums, kura ietvaros diennakts laikā nedēļas periodā tika veikti vairāki tūkstoši mērījumi fiksētajā (FTTH 100 Mbit/s pieslēgums un ADSL pieslēgums) un mobilajā (4G pieslēgums) tīklā.



4.1. att. Lejupielādes ātruma vērtību izkliede mērījumu laika periodā a) fiksētajā FTTH 100 Megabiti/s pieslēguma tīklā; b) fiksētajā ADSL pieslēguma tīklā; c) mobilajā 4G pieslēguma tīklā

Analizējot lejupielādes ātruma izmaiņu dinamiku diennakts laikā fiksētajā tīklā, ir vērojams, ka gan ADSL pieslēguma, gan optiskās šķiedras tīklos tiek nodrošinātas salīdzinoši stabilas pieslēguma ātruma vērtības neatkarīgi no diennakts laika.

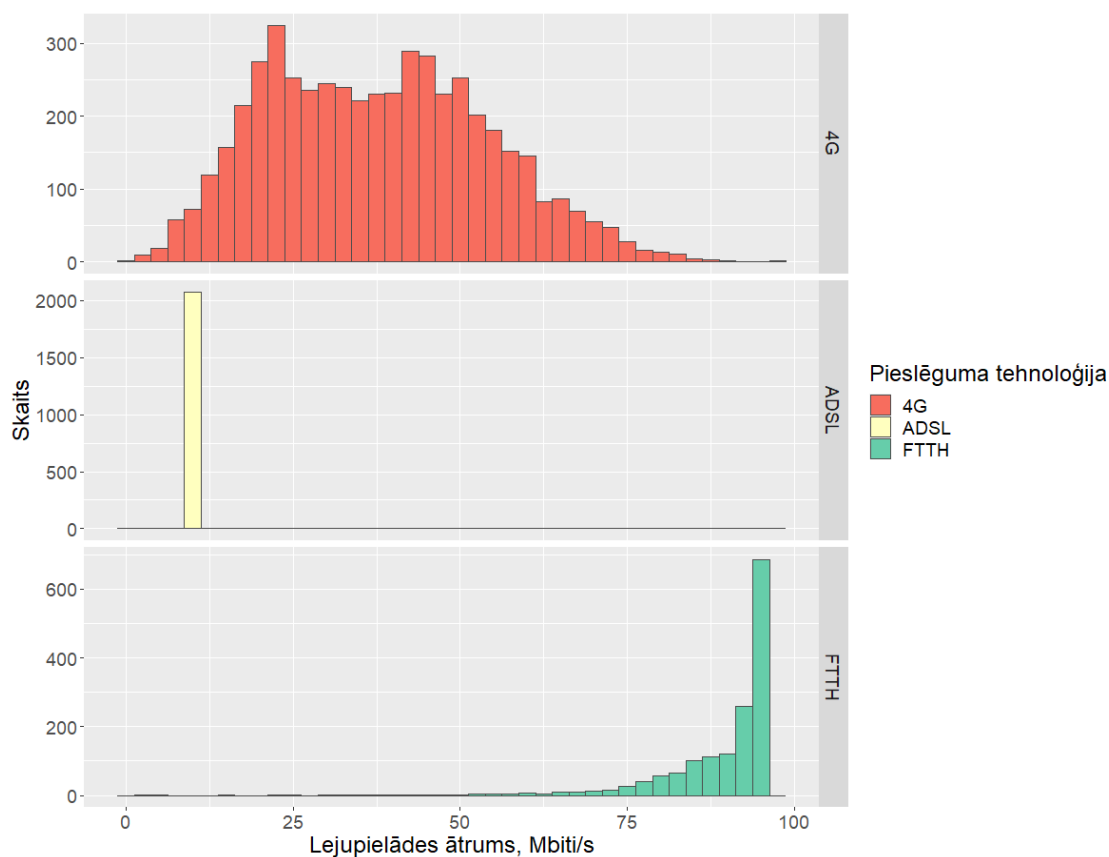
Mērījumos FTTH pieslēguma fiksētajā tīklā, kurā pēc līguma nosacījumiem maksimālais pieslēguma ātrums tiek nodrošināts 100 Mbit/s, tika novērots, ka mērījumu izlases 2,5 procentīle ir 63,95 Mbit/s, respektīvi 97,5 % mērījumos pieslēguma ātrums nav bijis zemāks par šo vērtību. Tāpat novērots, ka vairumā gadījumu (75 %) pieslēguma ātruma samazinājums nav bijis lielāks kā 15 % no maksimālās līgumā norādītās vērtības. Savukārt pusē no mērījumiem lejupielādes ātruma vērtības ir bijušas tuvu maksimālajai vērtībai. Līdz ar to secināms, ka optiskās šķiedras tīklā tiek nodrošināti satbīli lejupielādes ātruma rādītāji, kā arī to kritumi vairumā gadījumu nav būtiski.

Analizējot mērījumus, kas veikti fiksētā ADSL pieslēguma tīklā, secināms, ka 97,7 % mērījumu ir tuvu maksimālajai novērotai vērtībai – atšķirības ir mērāmas kilobitos, kas liecina par ievērojamu nodrošinātā lejupielādes ātruma stabilitāti. (skat. 4.1. att. un 4.1.tabulu)

Fiksētajā FTTH 100 Megabiti/s pieslēguma tīklā, fiksētajā ADSL pieslēguma tīklā un mobilajā 4G pieslēguma tīklā novērotā lejupielādes ātruma raksturlielumi

	Min	2,5 procentīle	1. kvartile	Mediāna	Vidējā vērtība	3. kvartile	97,5 procentīle	Max
FTTH	1,625	63,950	86,505	93,417	88,914	94,301	94,640	94,683
ADSL	0,313	9,345	9,421	9,436	9,400	9,441	9,445	9,447
4G	1,171	10,612	23,846	37,155	37,689	49,481	70,956	98,657

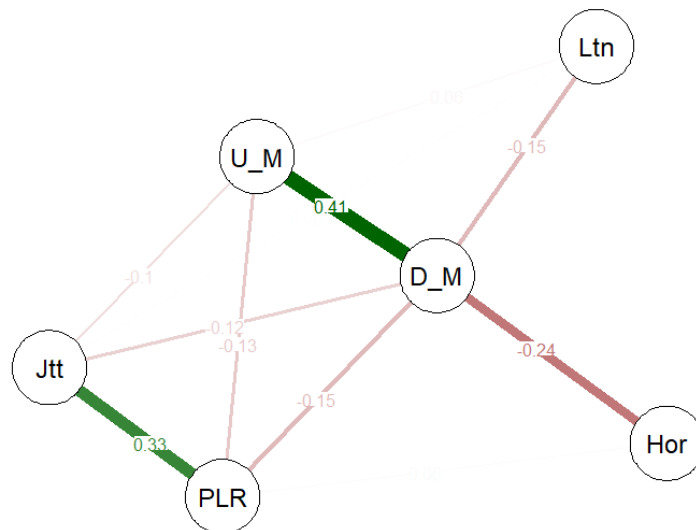
Izvērtējot mērījumu rezultātus, kas iegūti, veicot mērījumus mobilā elektronisko sakaru tīklā, secināms, ka lejupielādes ātruma vērtības diennakts laikā mainās plašā vērtību diapazonā. Ceturtdaļa mērījumu atrodas diapazonā līdz 24 Mbiti/s, savukārt otra ceturtdaļa – diapazonā virs 50 Mbiti/s (skat. 4.1. tabulu). Ņemot vērā ievērojamo vērtību izkliedi (skat. 4.2. att.), secināms, ka mērīšanas metodika, kas nodrošina faktiskai situācijai atbilstošu rādītāju noteikšanu, ir īpaši būtiska, veicot interneta pakalpojuma parametru rādītāju novērtējumu mobilā tīklā [86].



4.2. att. Mērījumos novērtēto lejupielādes ātruma vērtību sadalījums fiksētajā FTTH 100 Megabiti/s pieslēguma tīklā, fiksētajā ADSL pieslēguma tīklā un mobilajā 4G pieslēguma tīklā

Lai novērtētu diennakts laika ietekmi uz mērījumu rezultātiem un izstrādātu mērīšanas metodiku, ievērojot šo ietekmi, tika veikts pētījums, kura ietvaros tika novērtēts, vai pastāv

korelācija starp mērījumu laiku un kvalitātes parametru vērtībām, kā arī starp dažādiem kvalitātes parametriem. Lai novērtētu korelāciju starp diennakts laiku un dažādu kvalitātes parametru vērtībām, tika izmantota R programmatūra. Sākotnēji tika veikts mērījumu vērtību grafisks novērtējums, veicot savstarpējās korelācijas pārbaudi visiem kvalitātes parametriem un diennakts laikam, kurā veikts mērījums. Korelācijas novērtējumā kopumā analizēti vairāk nekā 530 tūkst. mērījumu rezultātu, kas iegūti, veicot ilgstošus sērijveida mērījumus 45 dažādās vietās Latvijā 2019. un 2020. gadā.



4.3. att. Pīrsona korelācijas koeficients pie nozīmības līmeņa $\alpha \leq 0,05$ starp dažādiem interneta kvalitātes parametriem un diennakts laiku grafisks attēlojums.

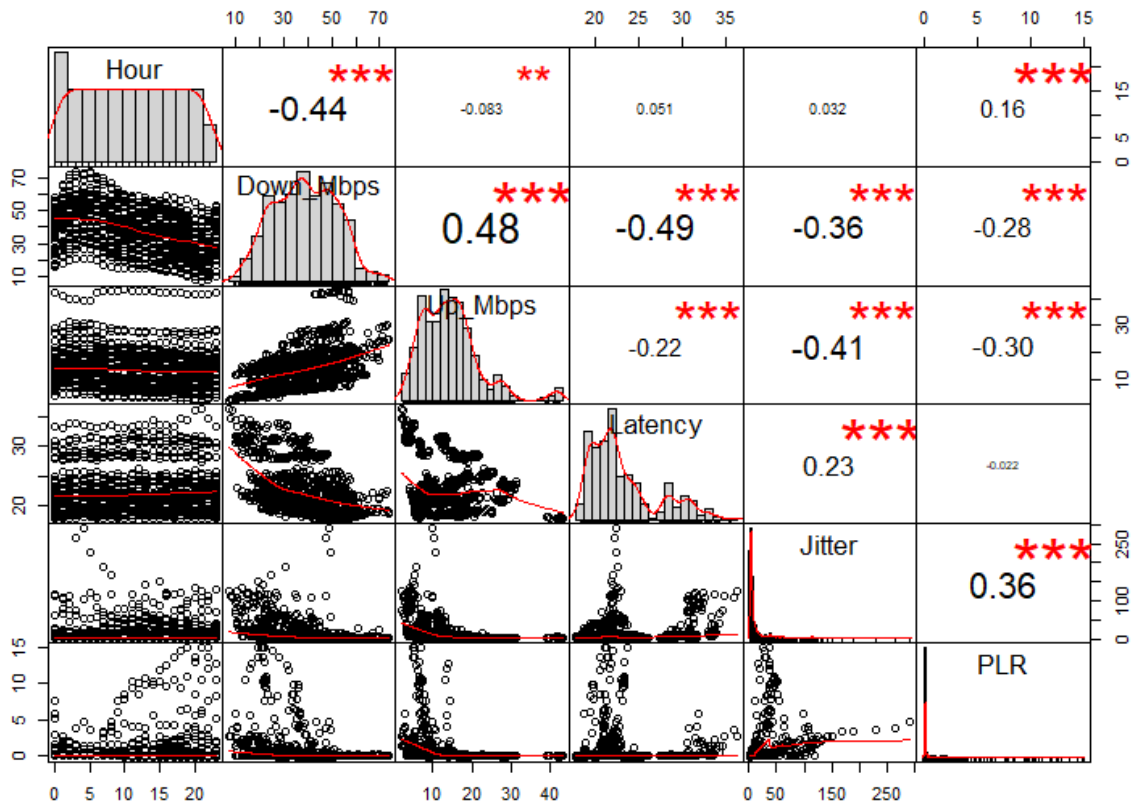
Kā redzams kopumā pastāv negatīva korelācija starp diennakts laiku un lejupielādes ātrumu. Vērojama arī pozitīva korelācija starp lejupielādes ātrumu un augšupielādes ātrumu un starp trīces un pakešu zuduma koeficienta vērtībām. Zināma sakarība vērojama arī starp lejupielādes ātrumu, trīces un pakešu zuduma koeficienta rādītājiem, kā arī starp augšupielādes ātruma, latentuma, trīces un pakešu zuduma koeficienta rādītājiem. Tomēr skaitliski šī sakarība ir vāji izteikta un precīzākiem secinājumiem nepieciešams veikt papildus analīzi.

Tādējādi atbilstoši diagrammai (4.3. att.) vienīgi lejupielādes ātruma vērtībām ir nozīmīga saistība ar diennakts laiku.

Lai detalizētāk izvērtētu dažādu kvalitātes parametru un diennakts laika iespējamās savstarpējās sakarības, tika veikts papildus tests. Mērījumu dati tika apkopoti, nosakot vidējās kvalitātes parametru vērtības pa diennakts stundām katrā atsevišķā mērījumu vietā, un šie vidējie rezultāti ar R programmas palīdzību tika atspoguļoti korelācijas diagrammas veidā.

Ņemot vērā, ka novērotā lejupielādes ātruma saistība ar diennakts laiku ir monotona, bet nav lineāra, tad korelācijas novērtēšanai tika izmantots neparametriskais Spīrmena rangu korelācijas koeficients, kas tiek aprēķināts pēc sekojošas formulas [90]:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N d_i^2}{N^3 - N} \quad (4.1.)$$



4.4. att. Kvalitātes parametru stundas vidējo vērtību un diennakts laika korelācijas diagramma

Kā redzams 4.4. attēlā, statistiski nozīmīga negatīva korelācija ar diennakts laiku ir vērojama lejupielādes ātruma rādītājiem. Savukārt augšupielādes ātruma, latentuma, trīces un pakešu zuduma koeficienta vērtības pēc korelācijas koeficienta vērtībām ir vērojama vāja saistība ar diennakts laika vērtību. Izvērtējot detalizētāk korelāciju starp dažādiem kvalitātes parametriem, vērojams, ka pastāv statistiski nozīmīga saistība starp dažādu parametru vērtībām. Piemēram, pastāv statistiski nozīmīga pozitīva sakarība starp lejupielādes un augšupielādes ātruma vērtībām, kas norāda, ka pie augstākām lejupielādes ātruma vērtībām vērojamas arī augstākas augšupielādes ātruma vērtības, tomēr augšupielādes ātruma vērtību pieauguma apjoms nav tieši proporcionāls lejupielādes ātruma pieaugumam. Tāpat ir vērojama statistiski nozīmīga negatīva sakarība starp datu pārraides ātrumu un pārējo kvalitātes parametru vērtībām, kas norāda, ka augsti latentuma, trīces un pakešu zuduma rādītāji parasti ir vērojami pie zema datu pārraides ātruma. Tāpat nozīmīga pozitīva sakarība pastāv starp trīces un pakešu zuduma rādītājiem. Tādējādi secināms, ka ar diennakts laiku nozīmīgi korelē vienīgi lejupielādes ātruma vērtības.

4.4. attēlā atspoguļotais korelācijas koeficients tika aprēķināts kopējai datu kopai, t.i., novērojumiem visu operatoru tīklos un visās mērījumu vietās kopā. Līdz ar to paredzams, ka veicot aprēķinus katrā konkrētā mērījumu vietā un katra operatora tīklā, sakarība starp diennakts laiku un lejupielādes ātruma vērtībām palielināsies. Tāpēc tika veikti papildus aprēķini, lai pārbaudītu vai katrā atsevišķā mērījumu vietā un katra atsevišķa operatora tīklā pastāv korelācija starp kvalitātes parametriem un diennakts laiku.

Izvērtējot aprēķinātos kvalitātes parametru un diennakts laika korelācijas koeficientus katrā mērījumu vietā un katra mobilā operatora tīklā atsevišķi (skat. 4.2. tabulu), secināms, ka vairumā gadījumu starp diennakts laiku un lejupielādes ātrumu pastāv cieša negatīva sakarība un korelācijas koeficients ir statistiski nozīmīgs (pie nozīmības līmeņa $\alpha = 0,05$). Tādējādi secināms, ka vidēji, jo vēlāk tiek veikts mērījums, jo zemāks lejupielādes ātrums tiek novērots.

4.2. tabula

Spīrmena korelācijas koeficients un p-vērtība lejupielādes ātruma un diennakts laika novērtējumā dažādās mērījumu vietās Latvijas teritorijā

Mērījumu vieta	Operators 1		Operators 2		Operators 3	
	R	p-vērtība	R	p-vērtība	R	p-vērtība
Vieta Nr.1	0.31	<<0.05	-0.53	<<0.05	-0.11	<<0.05
Vieta Nr.2	-0.41	<<0.05	-0.69	<<0.05	-0.68	<<0.05
Vieta Nr.3	0.11	<<0.05	-0.62	<<0.05	-0.58	<<0.05
Vieta Nr.4	-0.56	<<0.05	-0.68	<<0.05	-0.65	<<0.05
Vieta Nr.5	-0.51	<<0.05	-0.58	<<0.05	-0.73	<<0.05
Vieta Nr.6	-0.06	0.27	-0.68	<<0.05	-0.48	<<0.05
Vieta Nr.7	-0.58	<<0.05	-0.17	<<0.05	-0.65	<<0.05
Vieta Nr.8	-0.65	<<0.05	-0.53	<<0.05	-0.68	<<0.05
Vieta Nr.9	0.14	<<0.05	-0.73	<<0.05	-0.40	<<0.05
Vieta Nr.10	-0.32	<<0.05	-0.76	<<0.05	-0.39	<<0.05
Vieta Nr.11	-0.31	<<0.05	-0.56	<<0.05	-0.61	<<0.05
Vieta Nr.12	-0.39	<<0.05	-0.64	<<0.05	-0.42	<<0.05
Vieta Nr.13	-0.53	<<0.05	-0.61	<<0.05	-0.63	<<0.05
Vieta Nr.14	-0.03	0.14	-0.50	<<0.05	-0.04	0.13
Vieta Nr.15	0.32	<<0.05	-0.71	<<0.05	-0.51	<<0.05
Vieta Nr.16	-0.68	<<0.05	-0.67	<<0.05	-0.76	<<0.05
Vieta Nr.17	0.02	<<0.05	-0.38	<<0.05	-0.45	<<0.05
Vieta Nr.18	-0.59	<<0.05	-0.69	<<0.05	-0.66	<<0.05
Vieta Nr.19	-0.11	<<0.05	-0.76	<<0.05	-0.67	<<0.05
Vieta Nr.20	-0.29	<<0.05	-0.65	<<0.05	-0.63	<<0.05
Vieta Nr.21	-0.43	<<0.05	-0.69	<<0.05	-0.73	<<0.05
Vieta Nr.22	-0.65	<<0.05	-0.78	<<0.05	-0.59	<<0.05
Vieta Nr.23	-0.59	<<0.05	-0.50	<<0.05	-0.26	<<0.05
Vieta Nr.24	-0.39	<<0.05	-0.65	<<0.05	-0.06	0.0004
Vieta Nr.25	-0.40	<<0.05	-0.44	<<0.05	-0.25	<<0.05

Mērījumu vieta	Operators 1		Operators 2		Operators 3	
	R	p-vērtība	R	p-vērtība	R	p-vērtība
Vieta Nr.26	-0.19	<<0.05	-0.69	<<0.05	-0.53	<<0.05
Vieta Nr.27	-0.66	<<0.05	-0.30	<<0.05	-0.67	<<0.05
Vieta Nr.28	-0.50	<<0.05	-0.55	<<0.05	-0.43	<<0.05
Vieta Nr.29	-0.46	<<0.05	-0.30	<<0.05	-0.53	<<0.05
Vieta Nr.30	-0.30	<<0.05	-0.74	<<0.05	-0.73	<<0.05
Vieta Nr.31	-0.20	<<0.05	-0.72	<<0.05	-0.40	<<0.05
Vieta Nr.32	-0.17	<<0.05	-0.55	<<0.05	-0.47	<<0.05
Vieta Nr.33	-0.25	<<0.05	-0.71	<<0.05	-0.64	<<0.05
Vieta Nr.34	-0.60	<<0.05	-0.63	<<0.05	-0.71	<<0.05
Vieta Nr.35	0.01	<<0.05	-0.75	<<0.05	-0.51	<<0.05
Vieta Nr.36	-0.02	0.54	-0.48	<<0.05	-0.79	<<0.05
Vieta Nr.37	-0.61	<<0.05	-0.39	<<0.05	-0.64	<<0.05
Vieta Nr.38	-0.33	<<0.05	-0.42	<<0.05	-0.58	<<0.05
Vieta Nr.39	-0.39	<<0.05	-0.71	<<0.05	-0.64	<<0.05
Vieta Nr.40	0.02	0.54	-0.77	<<0.05	-0.60	<<0.05
Vieta Nr.41	-0.47	<<0.05	-0.53	<<0.05	-0.62	<<0.05
Vieta Nr.42	-0.03	<<0.05	-0.42	<<0.05	-0.39	<<0.05
Vieta Nr.43	-0.10	<<0.05	-0.77	<<0.05	-0.61	<<0.05
Vieta Nr.44	0.09	0.003	-0.77	<<0.05	-0.72	<<0.05
Vieta Nr.45	-0.62	<<0.05	-0.71	<<0.05	-0.64	<<0.05

Vairākās mērījumu vietās saistība vērojama arī augšupielādes ātruma un diennakts laika vērtībās, tomēr vairumā vietu šī sakarība ir vāja. Par iemeslu var būt atšķirības datu lejupielādes un augšupielādes tendencēs. Piemēram, ja noteiktā vietā lietotāji neveic datu augšupielādi tādos apjomos, kas radītu palielinātu tīkla noslodzi, augšuplīnijas kapacitāte var būt nodrošināta stabila visā diennakts laikā, arī stundās, kad internetu lieto liels lietotāju skaits. Savukārt, vietās, kur dati tiek pietiekami intensīvi augšupielādēti, pieejamā kapacitāte var būt ievērojami atkarīga no lietotāju aktivitātes un līdz ar to – no diennakts laika. Latentuma, trīces un pakešu zuduma koeficienta vērtības nav atkarīgas no diennakts laika.

Tā kā statistiski nozīmīga saistība ar diennakts laiku vairumā mērījumu vietu tika novērota vien lejupielādes ātruma vērtībām, kā arī, ņemot vērā interneta izmantošanas tendences datu lejupielādē un augšupielādē, tad pamatojoties tieši uz lejupielādes ātruma parametra mērījumu rādītājiem tika veikta analīze un definētas prasības mērījumu gaitai. Palielinoties datu augšupielādes pieprasījumam, augšupielādes ātruma atkarība no diennakts laika varētu kļūt līdzvērtīga lejupielādes ātruma rādītājiem, līdz ar to novērtētās sakarības un mērījumiem būtu definētie principi būtu attiecīgi nozīmīgi arī augšupielādes ātruma mērījumos.

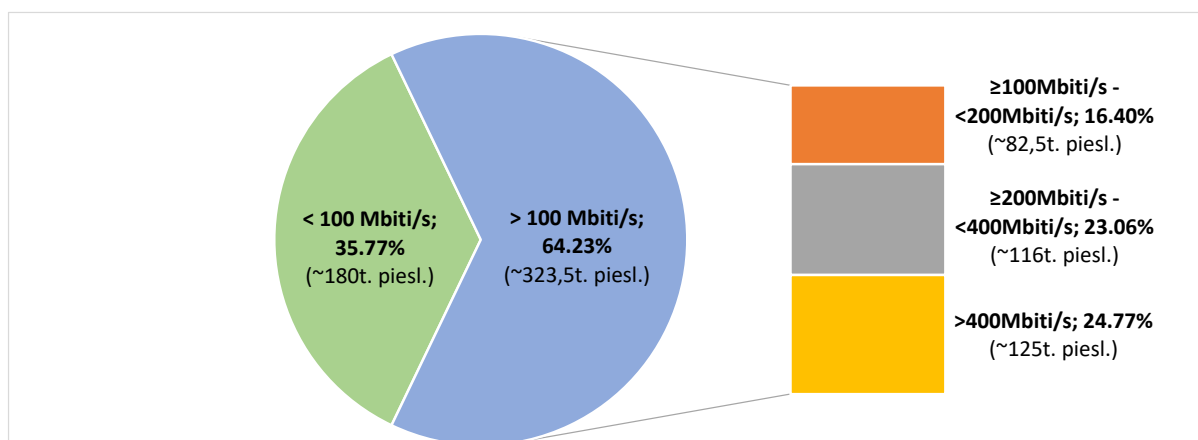
4.2. Piemērotākā izlases kopas raksturlieluma noteikšana kvalitātes parametru vērtību atspoguļošanai

Tā kā platjoslas izplatības un attīstības novērtēšanai plašā teritoriālā mērogā ir nepieciešams veikt lielu mērījumu skaitu, tad novērtēt interneta pakalpojuma kvalitātes rādītājus ilgstošā laika periodā prasītu nesamērīgi lielu resursu ieguldījumu. Tāpēc, nepieciešams novērtēt, kāds rādītājs ļautu visoptimālāk atspoguļot pieejamo interneta pakalpojuma kvalitāti. Pastāv dažādi statistiskie rādītāji, kurus ir iespējams pielietot kvalitātes parametra atspoguļošanai. Visuzskatāmāk ir aprakstīt kvalitātes parametrus, izmantojot atšķirīgus raksturlielumus, kas dod pilnīgu informāciju par to, kāda kvalitāte ir sagaidāma. Tomēr tā kā Eiropas stratēģiskie mērķi paredz konkrētu pieslēguma ātruma vērtību, kādām jābūt pieejamām galalietotājiem, tad ir būtiski izvēlēties tādu statistisko rādītāju, kas raksturo šo vērtību jēgpilni un nodrošina atskaites punktu komersantiem kvalitātes nodrošināšanā un atbildīgajām iestādēm atbilstības uzraudzībā. Izvēlētajam rādītājam ir jānodrošina, ka informācija ir atspoguļota uzskatāma, tā nozīme ir skaidra un viegli interpretējama, kā arī atspoguļo faktisko situāciju. Tāpat, interpretējot minēto rādītāju un uz tā pamata ieviešot prasības atbilstoši Eiropas stratēģiskiem mērķiem, ir jānodrošina, ka šādas pasības ir izpildāmas un adekvātas.

Raksturlieluma “minimālā vērtība” piemērošana pieslēguma ātruma rādītāju atspoguļošanā

Minimālā vērtība var tikt izmantots kā raksturlielums, lai atspoguļotu nodrošināmo kvalitātes līmeni. Vienlaicīgi tas ir arī vissaprotamākais un visvieglāk uzraugamais rādītājs. Tādējādi, pieņemot, ka Eiropas stratēģijā definētās pieslēguma ātruma vērtības jāinterpretē kā minimālais ātrums, kāds jānodrošina lietotājam, tad ir skaidrs, ka zemāk par šo sliekšni pieslēguma ātrums nevar pazemināties. Kā jau iepriekšējās nodaļās minēts, Eiropas stratēģija paredz, ka līdz 2020. gadam – visiem eiropiešiem jābūt piekļuvei internetam ar ātrumu virs 30 Mbit/s un līdz 2025. gadam visām Eiropas māsājniecībām gan laukos, gan pilsētās jābūt pieejamam interneta pieslēgumam ar vismaz 100 Mbit/s lejupielādes ātrumu [21]. Lai izvērtētu šī brīža atbilstību minētajām prasībām Latvijā, tika analizēti nodrošināto interneta pieslēgumu pieslēguma ātrumi. Latvijas elektronisko sakaru komersanti iesniedz Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijai informāciju par viņu tīklā nodrošināto interneta pieslēgumu skaitu un to maksimālajiem līgumā norādītajiem ātruma rādītājiem. Šī informācija tiek apkopota un publicēta ikgadējā pārskatā par elektronisko sakaru nozares rādītājiem [113]. Ņemot vērā, ka Latvijas likumdošana paredz, ka fiksētajā tīklā sniegta interneta minimālajam pieslēguma ātrumam ir jābūt ne zemākam kā 20 % no maksimālā pieslēguma ātruma, kas norādīts līgumā [29], tad pamantojoties uz šo prasību arī tika analizēti, cik daudz no nodrošinātajiem pieslēgumiem atbilst Eiropas stratēģijā iekļautajai prasībai. Tādējādi, lietotājam garantēti tiks nodrošināts interneta pieslēguma ātrums 30 Mbit/s, ja elektronisko sakaru pakalpojuma līgumā norādītais maksimālais pieslēguma ātrums ir 150 Mbit/s.

Informācijas apkopošana par nodrošinātajiem pieslēgumu ātrumiem tiek veikta saskaņā ar Eiropas platjoslas pieslēguma ātruma diapazonu iedalījumu⁹, līdz ar to atsevišķi diapazons pieslēgumiem ar ātrumu virs 150 Mbiti/s netiek izdalīts.



4.5. att. Fiksētā interneta pieslēgumu procentuālais sadalījums 2020.gadā pa pieslēguma ātruma diapazoniem. Datu avots: SPRK

Kā redzams 4.5. attēlā, gandrīz 36 % no visiem pieslēgumiem (~180 tūkst. lietotāju) nodrošinātais (maksimālais jeb tarifu plānā norādītais) pieslēguma ātrums ir zemāks par 100 Mbiti/s, 26 % no kuriem (~132,5 tūkst. lietotāju) – zemāks par 30 Mbiti/s. Savukārt pieslēgumi ar maksimālo jeb tarifu plānā norādīto ātrumu virs 100 Mbiti/s tiek nodrošināti ~323,5 tūkst. lietotāju, tādējādi garantējot, ka šiem lietotājiem tiek nodrošināts interneta pieslēguma ātrums vismaz 20 Mbiti/s. Tomēr šie dati nesniedz vispārīgu priekšstatu par to, kāds ātrums ir pieejams Latvijas iedzīvotājiem ģeogrāfiskā mērogā, jo daļā gadījumu komersants spēj nodrošināt arī augstākus pieslēguma ātrumus, tomēr lietotāji var to neizvēlēties dažādu iemeslu dēļ, tajā skaitā arī tādēļ, ka augstāks ātrums tiem var nebūt nepieciešams. Tāpat no šiem datiem nevar secināt par to, cik daudziem Latvijas iedzīvotājiem nav piekļuves fiksētajam interneta pieslēgumam nemaz. Šādam novērtējumam ir nepieciešams veikt fiksēto pieslēgumu pieejamības apsekojumu katrā Latvijas mājsaimniecībā, kā to paredz Eiropas Elektronisko sakaru kodekss [23].

Tā kā mobilā tīklā sniegtam interneta pakalpojumam noteiktās minimālās kvalitātes prasības attiecībā uz ātruma rādītājiem ir citādas, t.i., minimālais pieslēguma ātrums nedrīkst būt zemāks par 256 kbiti/s [29], līdz ar to nav iespējams novērtēt, cik daudziem pieslēgumiem teorētiski varētu būt nodrošināts ātrums ne zemāks par 30 Mbiti/s. Lai novērtētu, cik daudzās vietās, kurās 2020. gadā ilgstošā laika periodā tika mērīts interneta kvalitātes rādītāji, lejupielādes ātrums nepazeminājās zem 30 Mbiti/s, tika veikta mērījumu rezultātu analīze. Šim nolūkam tika izvērtēti, cik daudzos mērījumos procentuāli lejupielādes ātrums katrā mērījumā

⁹ ≥2 Mbiti/s līdz <10 Mbiti/s; ≥10 Mbiti/s līdz <30 Mbiti/s; ≥30 Mbiti/s līdz <100 Mbiti/s; ≥100 Mbiti/s līdz <300 Mbiti/s; ≥300 Mbiti/s līdz <1 Gbiti/s; ≥1 Gbiti/s.

vietā un katra mobilā operatora tīklā nepazeminājās zemāk par 30 Mbit/s. Rezultāti liecina, ka nav novērota neviena vieta, kurā lejupielādes ātrums nepazeminātos zem 30 Mbit/s. Kopumā vismaz 30 % no visām mērījumu vietām¹⁰ (no 14 % līdz pat 47 % mērījumu vietu atkarībā no mobilā operatora) lejupielādes ātrums augstāks par 30 Mbit/s tika nodrošināts 90 % no mērījumu laika. Jāņem vērā, ka ilgstoši interneta kvalitātes mērījumi tika veikti Latvijas pilsētās¹¹, savukārt lauku apvidos un vietās ar nelielu iedzīvotāju skaitu situācija var ievērojami atšķirties. Analizējot augšupielādes ātruma rādītājus, secināms, ka kopumā tikai 6 % mērījumu vietu augšupielādes ātrums augstāks par 30 Mbit/s tika nodrošināts 90 % no mērījumu laika. Pretēji tam vairumā mērījumu vietu (75 %) visi mērījumu rezultāti ir bijuši zemāki par 30 Mbit/s. Turklāt ir vietas, kurās joprojām mobilā interneta pieslēgums nav pieejams nemaz [85].

Lai izvērtētu, vai šo Eiropas mērķi, nodrošināt ikvienam iedzīvotājam 30 Mbit/s pieslēguma ātrumu, ir adekvāti interpretēt kā minimālo prasību, tika analizēts, kādi pieslēguma ātruma rādītāji ir nepieciešami, veicot dažādas aktivitātes internetā (skat. 4.3. tabulu).

4.3. tabula

Tipiskām aktivitātēm internetā nepieciešamais pieslēguma ātrums vienam lietotājam [114]

Lietojumprogramma	Minimālais pieslēguma ātrums	Rekomendētais pieslēguma ātrums
E-pasts	1 Mbit/s	1 Mbit/s
Tīmekļa vietņu pārlūkošana	3 Mbit/s	5 Mbit/s
Sociālie mediji	3 Mbit/s	10 Mbit/s
Video straumēšana:		
Standarta izšķirtspējas (SD) video straumēšana	3 Mbit/s	5 Mbit/s
Augstas izšķirtspējas (HD) video straumēšana	5 Mbit/s	10 Mbit/s
Ļoti augstas izšķirtspējas (UHD/4K) video straumēšana	25 Mbit/s	35 Mbit/s
Tiešsaistes spēles	3-6 Mbit/s	25 Mbit/s
Mūzikas straumēšana	1 Mbit/s	1 Mbit/s
Videozvani	1 Mbit/s	5 Mbit/s
Videokonferences	2 Mbit/s	10 Mbit/s

Tādējādi var novērot, ka lielākai daļai pakalpojumu, kas šobrīd lietojami internetā, minimālais nepieciešamais ātrums ir zemāks par 30 Mbit/s, tomēr tā kā Eiropas stratēģijas prasība attiecas uz mājsaimniecībām, un mājsaimniecības vidēji sastāv no vismaz diviem

¹⁰ 21 mērījumu vieta. Kopumā veikti 288,5 tūkst. mērījumu trīs dažādu mobilo operatoru tīklos.

¹¹ Deviņas republikas pilsētas un 67 novada pilsētas saskaņā ar Administratīvo teritoriju un apdzīvoto vietu likumu

cilvēkiem, tad, vienlaicīgi pakalpojumu lietojot visiem mājsaimniecības dalībniekiem, minimālais nepieciešamais pieslēguma ātrums attiecīgi paaugstinās.

Ņemot vērā pašlaik Latvijas iedzīvotājiem nodrošināto pieslēguma ātrumu, kā arī šī brīža mobilo tīklu tehnoloģisko attīstību, uzskatāms, ka Eiropas stratēģijā ietvertais mērķis nodrošināt ikvienam iedzīvotājam piekļuvi internetam ar pieslēguma ātrumu virs 30 Mbiti/s, nav attiecināms uz minimāli nodrošināmo kvalitātes rādītāju.

Tomēr interneta pakalpojuma lietotājiem ir ļoti būtiski apzināties minimālās kvalitātes vērtības, kādas viņiem var tikt nodrošinātas. Tāpat arī Eiropas Elektronisko sakaru kodekss noteic, ka dalībvalstīm ir jādefinē atbilstīga piekļuve platjoslas internetam, ievērojot valstu nosacījumus un minimālo joslas platumu, ko dalībvalsts teritorijā izmanto lielākā daļa patērētāju, lai nodrošinātu pienācīgu sociālās iekļaušanas līmeni un dalību digitālajā ekonomikā un sabiedrībā to teritorijā [23]. BEREC vadlīnijas par tīklu ģeogrāfisko apsekojumu nosaka, ka piekļuve atbilstīgam internetam ir uzskatāma par nodrošinātu, ja savienojuma datu pārraides ātrums ir vismaz 2 Mbiti/s [26]. No 4.3. tabulā apkopotajiem datiem redzams, ka atsevišķiem pakalpojumiem 2 Mbiti/s pieslēguma ātrums var nebūt pietiekošs, it īpaši mājsaimniecības ietvaros. Ņemot vērā kopējo lejupielādējamo datu attiecību pret augšupielādējamiem datiem, secināms, ka minimālajam lejupielādes ātrumam ir jābūt nodrošinātam augstākam nekā 2 Mbiti/s.

Pamatojoties uz Eiropas stratēģisko mērķi 2020. gadam par pieslēguma ātruma rādītājiem un Latvijas normatīvajos aktos noteiktajām prasībām par minimālā pieslēguma ātruma vērtības noteikšanu proporcionāli maksimālai pieslēguma ātruma vērtībai, kā arī izvērtējot pašlaik nodrošināto pieslēguma ātruma vērtību procentuālo sadalījumu, ir piedāvāts noteikt, ka minimālajam lejupielādes ātrumam ikvienā mājsaimniecībā ir jābūt vismaz 6 Mbiti/s jeb 20 % no 30 Mbiti/s. Prasība būtu piemērojama fiksētā tīklā sniegtam interneta pakalpojumam, kā arī uz mobilā tīklā sniegtam interneta pakalpojumam, kas nodrošināts fiksētā pieslēguma vietā.

Atbilstoši fiksētā interneta pieslēgumu procentuālajam sadalījumam (4.5. attēls) secināms, ka prasība ir samērīga un atbilst kvalitātes līmenim, kāds dalībvalsts teritorijā pieejams lielākajai daļa patērētāju. Savukārt, lai novērtētu šādas prasības samērīgumu piemērošanai mobilajos tīklos sniegtam interneta pakalpojumam, tika analizēti faktisko mērījumu rezultāti.

Izvērtējot 2018., 2019. un 2020. gadā veikto kvalitātes mērījumu rezultātus, vērojams, ka vietās, kur mērījumu laikā mobilais interneta pakalpojums bija pieejams, lejupielādes ātruma vērtības zem 6 Mbiti/s tika novērotas vien 3,56 % mērījumu, savukārt augšupielādes ātruma vērtības – 18,06 % mērījumu. Apkopojot vidējās lejupielādes ātruma vērtības atbilstoši mērījumu vietai un mobilā tīkla operatoram, secināts, ka vidējās lejupielādes ātruma vērtības bija zemākas par 6 Mbiti/s vien 2,69 % mērījumu vietu, bet vidējās augšupielādes ātruma vērtības – 17,42 % mērījumu vietu. Tādējādi secināms, ka prasība nodrošināt minimālo lejupielādes ātrumu 6 Mbiti/s fiksētā tīklā sniegtam interneta pakalpojumam un mobilā tīklā sniegtam interneta pakalpojumam, kas nodrošināts fiksētā pieslēguma vietā, ir vērtējama kā samērīga. Attiecīgi minimālā augšupielādes ātruma vērtība būtu nosakāma atbilstoši BEREC

vadlīnijās par tīklu ģeogrāfisko apsekojumu iekļautajam dalījumam, t.i., nodrošinot vismaz 2 Mbit/s ātruma vērtību. Izvērtējot mērījumu rezultātus secināms, ka trīs gadu periodā augšupielādes ātrums zemāks par 2 Mbit/s ir novērots 6,26 % mērījumu, savukārt vidējās augšupielādes ātruma vērtības atbilstoši mērījumu vietai un mobilā tīkla operatoram – 5,71 % mērījumu vietu. Tādējādi vērtējams, ka šāda prasība ir samērīga un nodrošināma.

Pieslēguma ātruma raksturojums ar rādītāju “maksimālā vērtība”

Maksimālā kvalitātes parametra vērtība kopā ar minimālo vērtību, norāda sagaidāmo kvalitātes rādītāju izkliedes diapazonu, līdz ar to sniedzot priekšstatu lietotājiem par to, kāda pakalpojuma kvalitāte kopumā viņiem tiks nodrošināta. Tomēr, raksturojot Eiropas stratēģijā noteikto pieslēguma ātrumu ar maksimālās vērtības rādītāju un neiekļaujot papildus prasības minimālām vērtībām, kā arī procentuālajam šādas vērtības nodrošinājumam, piemēram, diennakts laikā, minētajai prasībai zūd jēga. Līdz ar to arī maksimālais rādītājs nav uzskatāms par piemērotu Eiropas stratēģijā definēto mērķu attiecināšanai.

Gan minimālā gan maksimālā ātruma rādītāji ir būtiski pilnvērtīgam sagaidāmās kvalitātes izkliedes diapazona raksturojumam, tomēr tie nav piemēroti vispārīgam pakalpojuma kvalitātes līmeņa atspoguļojumam un uzraudzībai. Lai atspoguļotu patiesu minimālo un maksimālo sasniedzamo kvalitātes vērtību, jāveic apjomīgs mērījumu skaits vismaz diennakts periodā. Tāpēc šie rādītāji ir vērtējami lietotāja tiesību aizsardzības ietvaros, ieviešot arī atbilstošu regulējumu, kas nosaka skaidras prasības sasniedzamiem kvalitātes rādītājiem.

Pieslēguma ātruma raksturojums ar rādītāju “vidējā aritmētiskā vērtība”

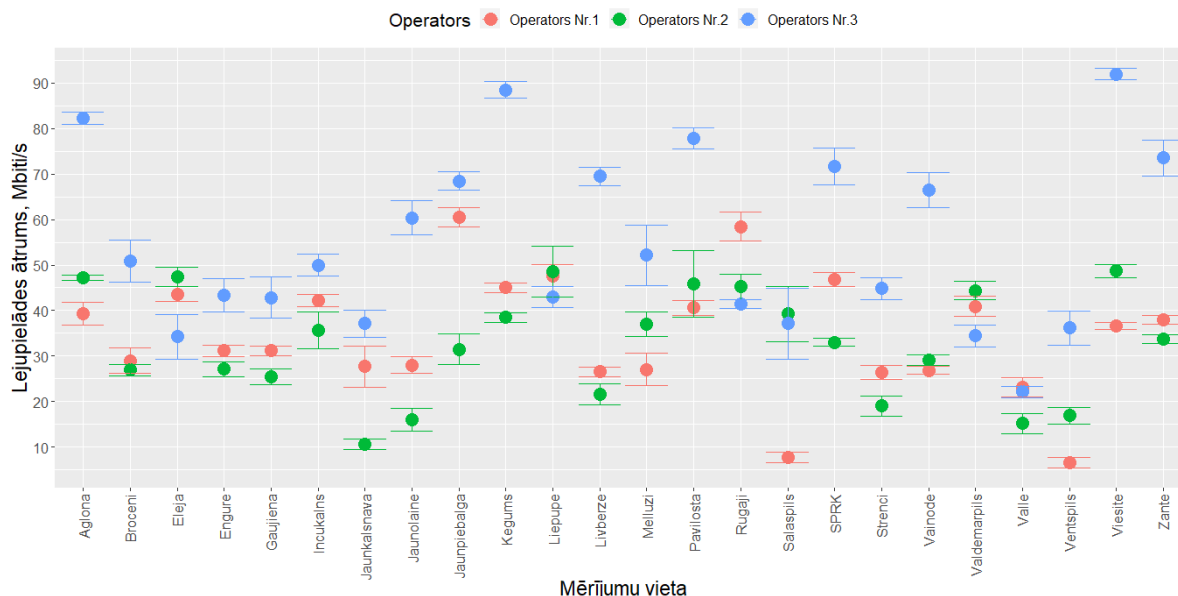
Viens no iespējamiem aprakstošās statistikas kvantitatīviem raksturlielumiem, kas dotu iespēju raksturot mērījumu izlasi, ir izlases vidējā aritmētiskā vērtība. Vidējā vērtība viens no biežākajiem centrālās tendences rādītājiem, kas ir arī salīdzinoši viegli uztverams dažādu iedzīvotāju grupu vidū. Simetriska sadalījuma gadījumā vidējā vērtība atspoguļo visvarbūtiskāko vērtību un raksturo šī sadalījuma vidu. Tomēr vidējā vērtība nesniedz informāciju par variācijas amplitūdu, līdz ar to nav zināms, cik liela novirze no šīs vidējās vērtības ir iespējama. Tāpēc vidējās vērtības raksturlieluma pielietošana plašā ģeogrāfiskā mērogā ir iespējama tikai ka vispārīgs pakalpojuma attīstības rādītājs. Ja kvalitātes rādītāja variācijas amplitūda ir liela, tad vidējā vērtība nesniedz jēgpilnu informāciju par sagaidāmo kvalitātes līmeni pakalpojuma izmantošanas vietā.

Lai pārbaudītu vidējās vērtības raksturlieluma piemērošanas atbilstību pieslēguma ātruma atspoguļošanā, tika veikti aprēķini. Tā kā mobilā tīklā lejupielādes ātrums diennakts laikā var mainīties plašās robežās, kā arī šo izmaiņu dinamika dažādās mērījumu vietās var būt atšķirīga, tad ir nepieciešams novērtēt kāda ir ticamība tam, ka vidējā lejupielādes ātruma vērtība būs līdzvērtīga, veicot mērījumus dažādās dienās konkrētā vietā. Šim nolūkam tika aprēķinātas vidējās lejupielādes ātruma vērtības katrā mērījumu vietā katra mobilā operatora mobilā tīklā atšķirīgās nedēļas dienās. Pēc tam ar R programmatūras palīdzību tika novērtēts vidējo

lejupielādes ātruma vērtību 95 % ticamības intervāls katrā mērījumu vietā un katram mobilā tīkla operatoram, kas aprēķināts pēc sekojošas formulas:

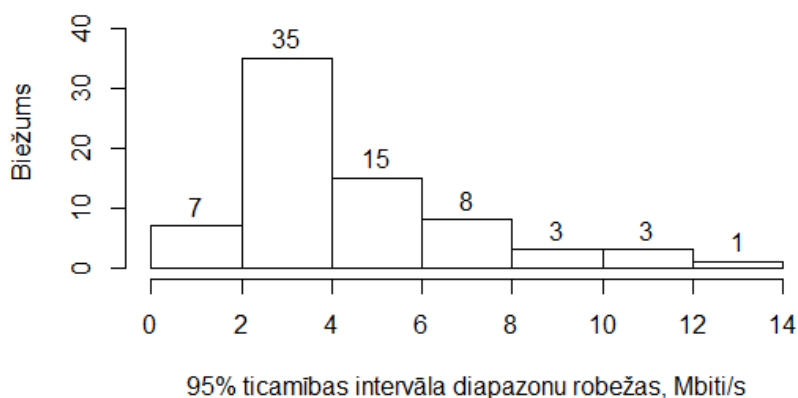
$$CI = \bar{X} \pm Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{(n)}}, \text{ pie } \alpha = 0,05. \quad (4.2.)$$

Tādējādi tika aprēķināts intervāls, kādā ar 95 % ticamību ietilps vidējā lejupielādes ātruma vērtība konkrētā mērījumu vietā, mērot to ilgstoši kādā no nedēļas dienām. 4.6. attēlā ir atspoguļotas katra mobilā operatora tīklā, katrā mērījumu vietā novērtētais vidējais lejupielādes ātrums un tā 95 % ticamības intervāla robežas.



4.6. att. Vidējo lejupielādes ātruma vērtību dažādās nedēļas dienās atšķirīgās mērījumu vietās 95 % ticamības intervāls

Novērtējot izkliedi, kas konstatēta starp 95 % ticamības intervālu augšējām un apakšējām robežām, secināts, ka šo diapazonu platums var būt līdz 14 Mbit/s (skat. 4.7. att.). Tas nozīmē, ka veicot mērījumus dažādās dienās, novērtētais vidējais lejupielādes ātrums var būt ar nobīdi līdz pat 14 Mbit/s robežās (pie ticamības pakāpes 0,95). Tomēr aprēķini liecina, ka vairumā gadījumu (~70 %) vidējās vērtības 95 % ticamības intervāls ir diapazonā 2 līdz 6 Mbit/s, tādējādi secināms, ka, veicot ilgstošus mērījumus dažādās nedēļas dienās, novērtētās vidējās lejupielādes ātruma vērtības būs līdzvērtīgas.

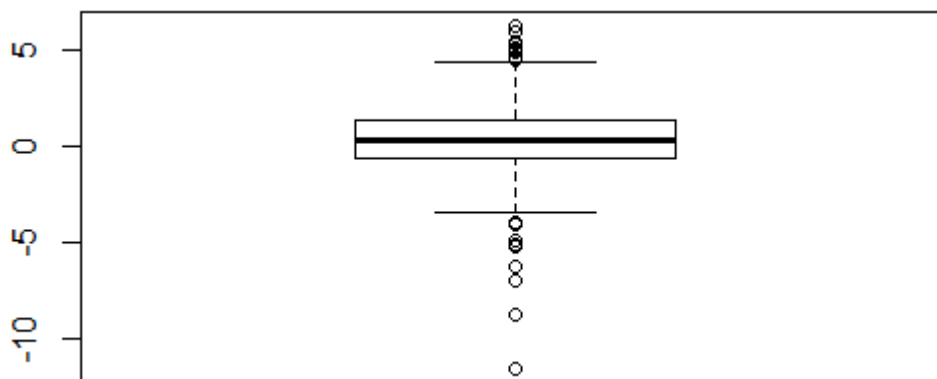


4.7. att. Biežāk novērotie 95 % ticamības intervāli vidējām lejupielādes ātruma vērtībām dažādās nedēļas dienās atšķirīgās mērījumu vietās

Pieslēguma ātruma raksturojums ar rādītāju “mediāna”

Gadījumā, ja lejupielādes ātruma mērījumu rezultātu sadalījums ir asimetrisks (t.i., neatbilst normālam sadalījumam), tad vidējās vērtības, kā izlasi raksturojošās statistikas piemērošana nav korekta. Tāpat mērījumos var tikt novērotas retas un netipiskas izlēcējvērtības, kas dažkārt var ievērojami ietekmēt izlases vidējo vērtību un neprecīzi atspoguļot sagaidāmo rezultātu. Tādos gadījumos sadalījuma centrālās tendences raksturošanai korektāk ir izvēlēties mediānu jeb sadalījuma 50. procentīli.

Vairumā pētīto gadījumu, mobilā tīklā veikto pieslēguma ātruma mērījumu rezultāti atbilst normālam sadalījumam. Lai izvērtētu, vai šāds novērojums atbilst visām mērījumu vietām, katrā mērījumu vietā katra mobilā operatora mobilā tīklā atšķirīgās nedēļas dienās tika novērtēta arī izlases mediāna un salīdzināts, cik lielā mērā tā atšķiras no aprēķinātās vidējās vērtības. Iegūtās vērtības tika salīdzinātas ar vidējām vērtībām un tika secināts, ka, veicot pietiekami lielu mērījumu skaitu izlases vidējā vērtība ir līdzvērtīga mediānas vērtībai, vairumā gadījumu atšķirībai nepārsniedzot 5 Mbit/s (skat. 4.8. att.). Analizējot izlēcējvērtības, ir konstatēts, ka lielāka atšķirība starp izlases vidējo vērtību un mediānu ir vērojamas nedēļas nogalēs.

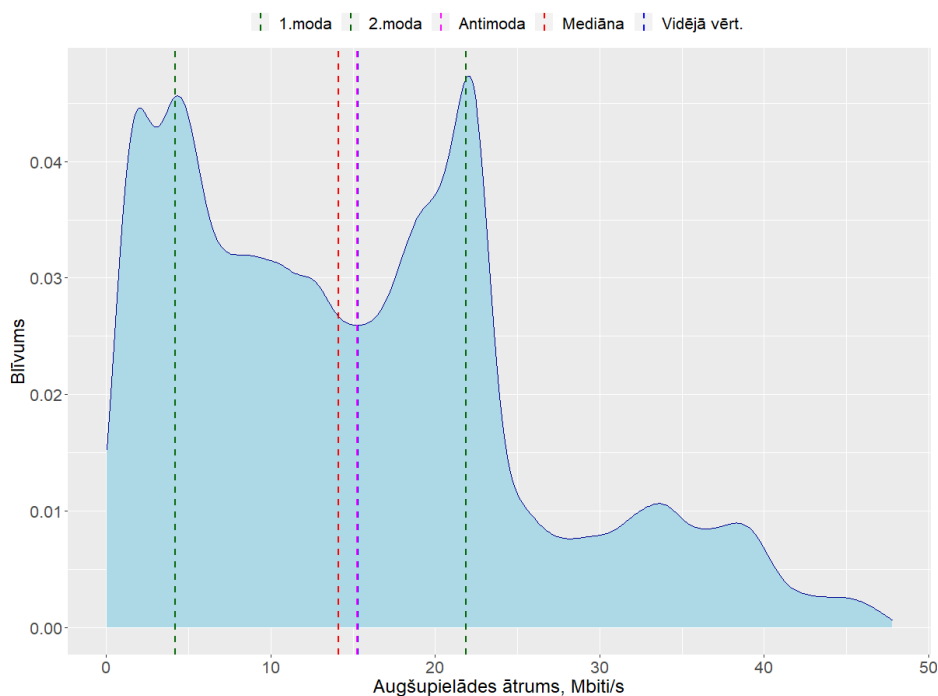


4.8. att. Katrā mērījumu vietā un katra mobilā operatora tīklā novērtētās lejupielādes ātruma mediānas vērtības un vidējās vērtības skaitliskas atšķirības grafisks atspoguļojums

Pieslēguma ātruma raksturojums ar rādītāju “moda”

Tāpat kā vidējā vērtība un mediāna, moda ir viens no centrālās tendences mēriem. Moda ir sadalījuma rindā visbiežāk sastopamās variantes vērtība. Moda atspoguļo vērtību vislielāko absolūto vai relatīvo biežumu. [88] Normāla sadalījuma gadījumā modas rādītājs sakrīt vai ir tuvu mediānai un vidējai vērtībai, bet gadījumos, kad vērojama sadalījuma asimetrija (piemēram, kopējo lejupielādes ātruma rezultātu gadījumā sadalījums ir asimetrisks uz labo pusi), tad mediāna un vidējā vērtība var samērā būtiski atšķirties no modas vērtības. Ņemot vērā kvalitātes parametru vērtību raksturu, ir secināms, ka pakalpojuma kvalitāti labāk apraksta nevis modālā parametra vērtība, kas norāda biežāko novēroto vērtību, bet gan citi centrālās tendences mēri. Ir būtiski, lai apkopotais parametra rādītājs atspoguļotu kopējo kvalitātes līmeni, nevis tikai biežāk sastopamo vērtību.

Savukārt binomiāla sadalījuma gadījumā, kāds novērojams, piemēram, kopējo augšupielādes ātruma rezultātu gadījumā (skat. 4.9. attēlu), vidējā vērtība un mediāna neatspoguļo vērtības, kādas visbiežāk var novērot lietotājs. Tādā gadījumā pakalpojuma kvalitātes izvērtējumā ir būtiski ņemt vērā modas rādītājus. 4.9. attēlā atspoguļotajā gadījumā vidējā vērtība sakrīt ar antimodas vērtību, t.i., ar visretāk novēroto vērtību starp divām modām. Tomēr, lielākoties šāds sadalījums ir raksturīgs kopējiem mērījumu datiem, nevis atsevišķā mērījumu vietā pieejamajām augšupielādes ātruma vērtībām.



4.9. att. Kopējais mērījumos novērtēto augšupielādes ātruma vērtību sadalījums

Ņemot vērā lejupielādes ātruma kvaziperiodiskumu, un tā monotoni dilstošo izmaiņu raksturu diennakts laikā mobilā tīklā, uzskatāms, ka vidējais ātrums ir rādītājs, kas nodrošina objektīvu un lietotājam saprotamu vispārīgu kvalitātes atspoguļojumu noteiktā ģeogrāfiskā

lokācijā. Analizējot datus plašākā ģeogrāfiskā mērogā, jāpārlicinās, vai datiem nav raksturīgs bimodāls sadalījums (šāds datu sadalījums novērots vienīgi augšupielādes ātruma kopējiem mērījumu rezultātiem), kā arī jānovērtē izlēcējvērtības, kas var nelabvēlīgi ietekmēt rezultātus un to precizitāti. Šādas izlēcējvērtības bieži vērojamas latentuma, trīces un pakešu zuduma koeficienta parametra rādītājiem. Šīs izlēcējvērtības var daudzkārt atšķirties no tipiskām vērtībām, un tādējādi ievērojami iespaidot vidējos parametra rādītājus, kaut ir novērotas vien retos gadījumos.

4.3. Mērījumu metodikas noteikšana objektīva kvalitātes parametru novērtējuma iegūšanai

Pamatojoties uz iepriekš veiktajiem aprēķiniem, kuri norāda, ka no visiem mēramamjiem pakalpojumu kvalitātes parametriem, vienīgi lejupielādes ātruma vērtībām ir cieša saistība ar diennakts laiku, tika veikts padziļināts pētījums par lejupielādes ātruma mērījumu rezultātu atkarību no mērījuma laika un definēta mērīšanas pieeja objektīvu mērījumu rezultātu iegūšanai.

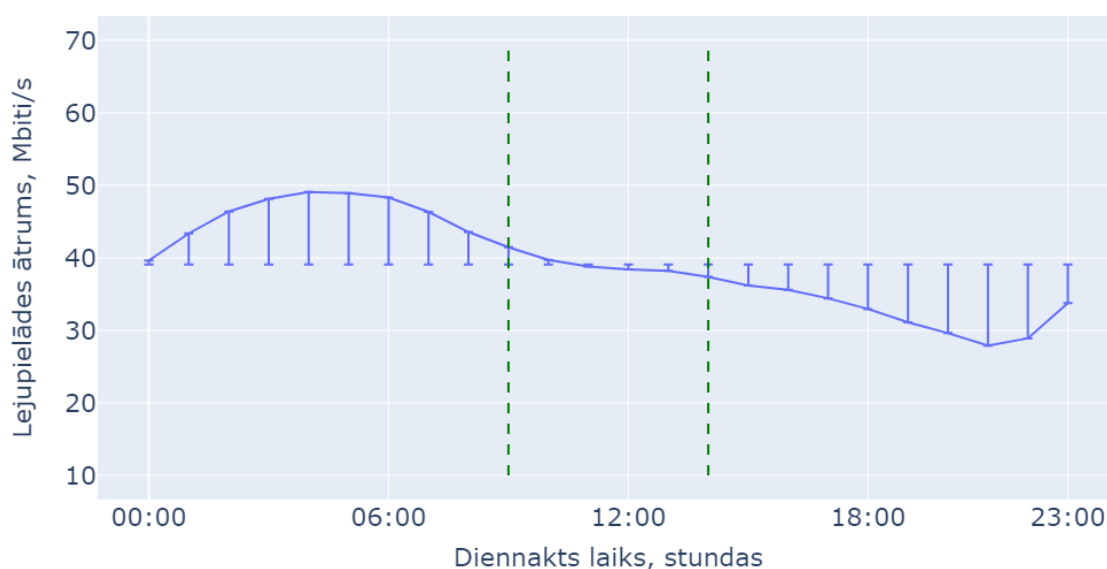
Kā noskaidrots iepriekš, normāla datu sadalījuma gadījumā, kas ir raksturīgs lejupielādes ātruma vērtībām mobilā tīklā, vispiemērotākais rādītājs mērījumu rezultātu atspoguļošanai ir parametra vidējā vērtība. Tāpat noskaidrots, ka vienā un tajā pašā vietā, mērot dažādās dienās, diennakts vidējā lejupielādes ātruma vērtība ir līdzvērtīga. Tas nozīmē, ka tipiskos apstākļos, t.i., nenovērojot šai vietai neraksturīgu lietotāju aktivitāti, vai citus apstākļus, kas var ietekmēt interneta pakalpojuma kvalitātes rādītājus, sagaidāmais diennakts vidējais lejupielādes ātrums konkrētā vietā būtiski neatšķiras. Līdz ar to, diennakts vidējā lejupielādes ātruma vērtība ir uzskatāma par pamatotu un objektīvu parametra rādītāja atspoguļojumu.

Ņemot vērā Eiropas Elektronisko sakaru kodeksā noteikto prasību par ģeogrāfiskā apsekojuma veikšanu [23], kā arī BEREC vadlīnijās noteikto apsekojuma rezultātu atspoguļošanas ģeogrāfisko mērogu [26] (skat. 1.3. tabulu), secināms, ka praktisku mērījumu veikšana visas diennakts laikā, pārklājot šāda mēroga teritoriju nav iespējama. Izbraukuma mērījumi parasti tiek veikti vai nu kustībā, vai kādā noteiktā vietā veicot mērījumu sēriju, tādējādi, mērījums noteiktā ģeogrāfiskā lokācijā tiek veikts nepārsniedzot vienas stundas periodu. Zināms, ka diennakts laikā lejupielādes ātruma rādītāji mainās plašās robežās, līdz ar to, veicot vienu vai vairākus mērījumus īsākā laika periodā (neaptverot visu diennakti), mērījumu rezultāti var nedot objektīvu un salīdzināmu atspoguļojumu. Lai definētu mērījumu veikšanas kārtību, kas nodrošinātu objektīvus un salīdzināmus mērījumu rezultātus, tika veikti aprēķini pamatojoties uz faktiskiem mobilā interneta kvalitātes mērījumu datiem.

Datu matemātiskā analīze mērījumu metodikas definēšanai

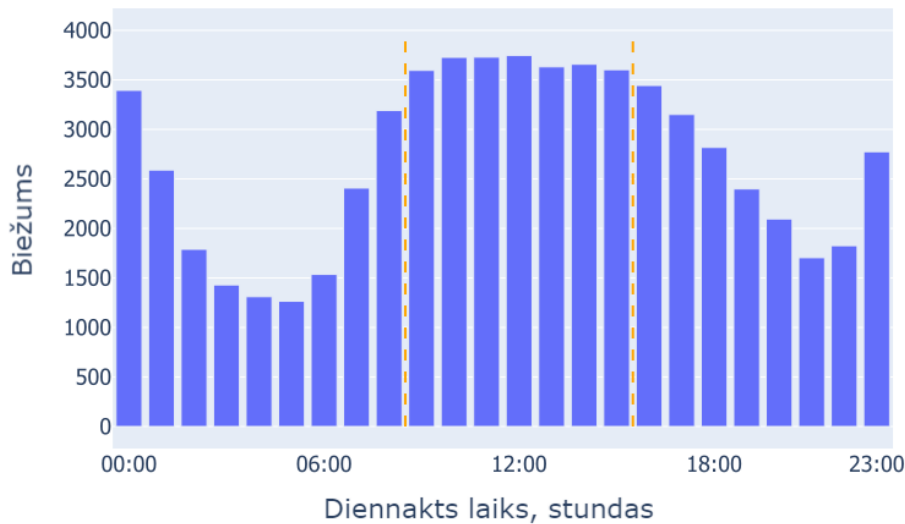
Analizētie dati aptver mobilā interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumu rezultātus par 2018. un 2019. gadu, kas veikti trīs dažādu mobilo operatoru tīklos 44 dažādās mērījumu vietās Latvijā, kopumā veicot vairāk nekā 427 tūkst. mērījumu.

Tika pieņemts, ka mērījumus jāveic tādā laika posmā, kas nodrošina mērījumu rezultātu vērtību skaitlisku līdzvērtību diennakts vidējai vērtībai. Lai pārbaudītu šo pieņēmumu, tika veikti aprēķini, salīdzinot katras stundas vidējo lejupielādes ātruma vērtību ar diennakts vidējo lejupielādes ātruma vērtību (skat. 4.10. att.). [87]



4.10. att. Stundas vidējā lejupielādes ātruma vērtību atšķirība no diennakts vidējās lejupielādes ātruma vērtības

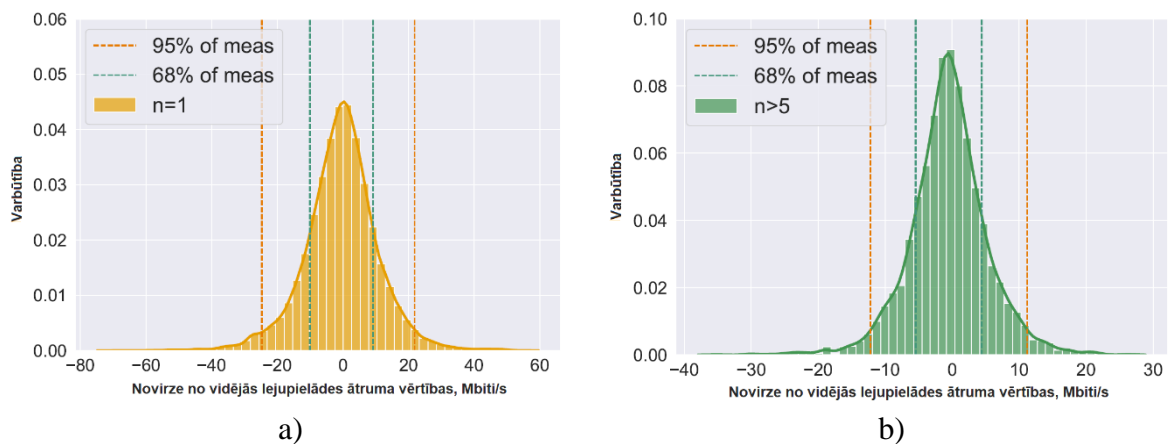
Kā redzams 4.10. attēlā, vismazākās svārstības starp parametra faktiskā vērtību un diennakts vidējo rādītāju ir vērojamas dienas vidū. Lai precīzāk novērtētu diennakts laiku ar mazāko faktiskā lejupielādes ātruma novirzi no diennakts vidējās vērtības, tika apkopots mērījumu skaits, kuru novirze no vidējās vērtības nepārsniedz 2,5 Mbit/s. Secināms, ka laika posmā no 9:00 līdz 15:00 ir visbiežāk ir novēroti mērījumi, kuru lejupielādes ātruma faktiskās vērtības atšķirība no diennakts vidējās vērtības nepārsniedz 2,5 Mbit/s (skat. 4.11. att.).



4.11. att. Mērījumu skaits, kuros lejupielādes ātruma vērtības atšķirība no diennakts vidējās ātruma vērtības nepārsniedza 2,5 Mbit/s, attiecībā pret mērījumu veikšanas laiku

Papildus tam, mērījumu rezultāti tika izvērtēti atkarībā no nedēļas dienas, pieņemot, ka interneta lietošanas paradumi brīvdienās varētu atšķirties. Tomēr netika novērota nozīmīga atšķirība starp darba dienu un brīvdienu mērījumu rezultātiem.

Izvērtējot katra atsevišķa mērījuma novirzi no diennakts vidējās vērtības, tika secināts, ka arī laika periodos, kuros visbiežāk faktiskā ātruma novirze no diennakts vidējās vērtības ir neliela, ir vērojams, ka katra konkrētā mērījuma lejupielādes ātrums var atšķirties no diennakts vidējās vērtības plašās robežās. Tas norāda uz to, ka, lai iegūtu precīzus mērījumu rezultātus un atspoguļotu lejupielādes ātrumu, kas pēc iespējas objektīvāk raksturo diennaktī sagaidāmo vidējo parametra vērtību, ir nepieciešams veikt vairākus mērījumus vienā atrašanās vietā.



4.12. att. Lejupielādes ātruma mērījumos, kas veikti laika periodā ar mazāko novēroto lejupielādes ātruma vērtību novirzi no vidējām diennakts vērtībām, iegūto vērtību sadalījums un izkliedes diapazons, noteiktā mērījumu vietā veicot a) vienu mērījumu un b) vairāk nekā 5 mērījumus

Kā redzams 4.12. attēlā, veicot vairākus mērījumus vienas stundas periodā, varbūtība iegūt precīzākus (skaitliskā ziņā līdzvērtīgus diennakts vidējai vērtībai) mērījumu rezultātus dubultojas. Joprojām, pastāv iespēja novērot tādus rezultātus, kas neatspoguļo korekti vidējo vērtību konkrētā mērījumu vietā, tomēr 95 % lejupielādes ātruma mērījumu rezultātu novērotā novirze no vidējā ātruma ir 10 Mbit/s robežās, savukārt 68 % mērījumu rezultātu – 5 Mbit/s robežās.

Lai novērtētu izlases mērījumu rezultātu novirzi no diennakts vidējās vērtības dažādos laikos un, veicot atšķirīgu skaitu mērījumu vienā lokācijā, tika veikta simulācija. Tika uzrakstīts programmas kods ar Python programmēšanas valodas palīdzību (skat. 4.4. tabulu), kas pamatojoties uz esošiem mērījumu datiem simulēja mērījumu veikšanu ar atšķirīgiem iestatījumiem, tādiem kā, mērījumu laiks (vienas diennakts stundas ietvaros, iestatot laika diapazonu) un mērījumu skaits vienā vietā jeb atlasāmo mērījumu rezultātu skaits noteiktā vietā un noteiktā diennakts stundā, kas tika definēts programmas kodā. Programma pēc nejaušības principa izvēlējās vienu no diennakts stundām, vienā gadījumā iestatot laika periodu no 9:00 līdz 15:00, otrā – ārpus šī laika perioda. Mērījumi ar attiecīgajiem iestatījumiem tika atkārtoti vairākas reizes (atbilstoši iestatītajam atkārtojumu skaitam), lai nodrošinātu rezultātu precizitāti. Līdz ar to programma nejaušības kārtā no esošiem mērījumu datiem atlasīja attiecīgu skaitu mērījumu rezultātu attiecīgajā diennakts stundā, tādējādi imitējot mērījumu gaitu dažādās mērījumu vietās un dažādos laikos. Simulācijas gaitā tika aprēķināti uzdotie parametri, tādējādi tika novērtēts, kādas ir simulācijas gaitā aprēķinātā vidējā lejupielādes ātruma novirzes no diennakts vidējā lejupielādes ātruma diapazons, kā arī, cik daudz mērījumiem procentuāli šī novirze ir bijusi mazāka par 5 Mbit/s (skat. 4.5. un 4.6. tabulu).

4.4. tabula

Python programmas kods mērījumu simulēšanai vienas stundas ietvaros noteiktā mērījumu vietā, pamatojoties uz faktiskiem mērījumu datiem

```

### df - existing measurement dataframe; h1, h2 - day times assessed; rep - number of repetitions
def Simulate_meas(df, h1, h2, rep):
    for n in range(1,20,3):
        for t in range(rep):
            results = []
            import random
            hr = random.randrange(h1, (h2+1))
            dfn = df[df['Hour'] == hr]
            dfn = dfn.groupby(['M_place', 'Operator',
                             'W_day']).filter(lambda x: len(x) > n)
            dfn = dfn.groupby(['M_place', 'Operator',
                             'W_day']).apply(lambda x: x.sample(n=n, replace=False)).drop(['M_place', 'Operator', 'W_day'],
                                                axis='columns').reset_index()
            dfn = pd.DataFrame(dfn.groupby(['M_place', 'Operator', 'W_day',
                                           'D_avg', 'Hour'])['Dwnld_Mbps'].mean()).reset_index()
            dfn['diff'] = dfn['D_avg'] - dfn['Dwnld_Mbps']
            # calculate statistics
            stats = dfn['diff'].agg(['mean', 'count', 'std'])
            prob = ((dfn['diff']).abs() < 5).value_counts()/dfn['diff'].count()

```

```

stats['95_meas_hi'] = np.percentile(dfn["diff"], 97.5)
stats['95_meas_lo'] = np.percentile(dfn["diff"], 2.5)
stats['P<5'] = round(prob[1],2)
stats['P>5'] = round(prob[0],2)
stats['Time'] = hr
stats['M_number'] = n
results.append(dict(stats))
df_res = pd.DataFrame(results)
# Save results
import os
if not os.path.isfile('Res'+str(rep)+'.csv'):
    df_res.to_csv('Res'+str(rep)+'.csv', index = False, header=True)
else:
    df_res.to_csv('Res'+str(rep)+'.csv', mode='a', index = False, header=False)

```

4.5. tabula

Lejupielādes ātruma mērījumu rezultātu novirze no diennakts vidējās lejupielādes ātruma vērtības atkarībā no mērījumu atkārtojumu skaita, veicot mērījumus laika periodā no 9:00 – 15:00

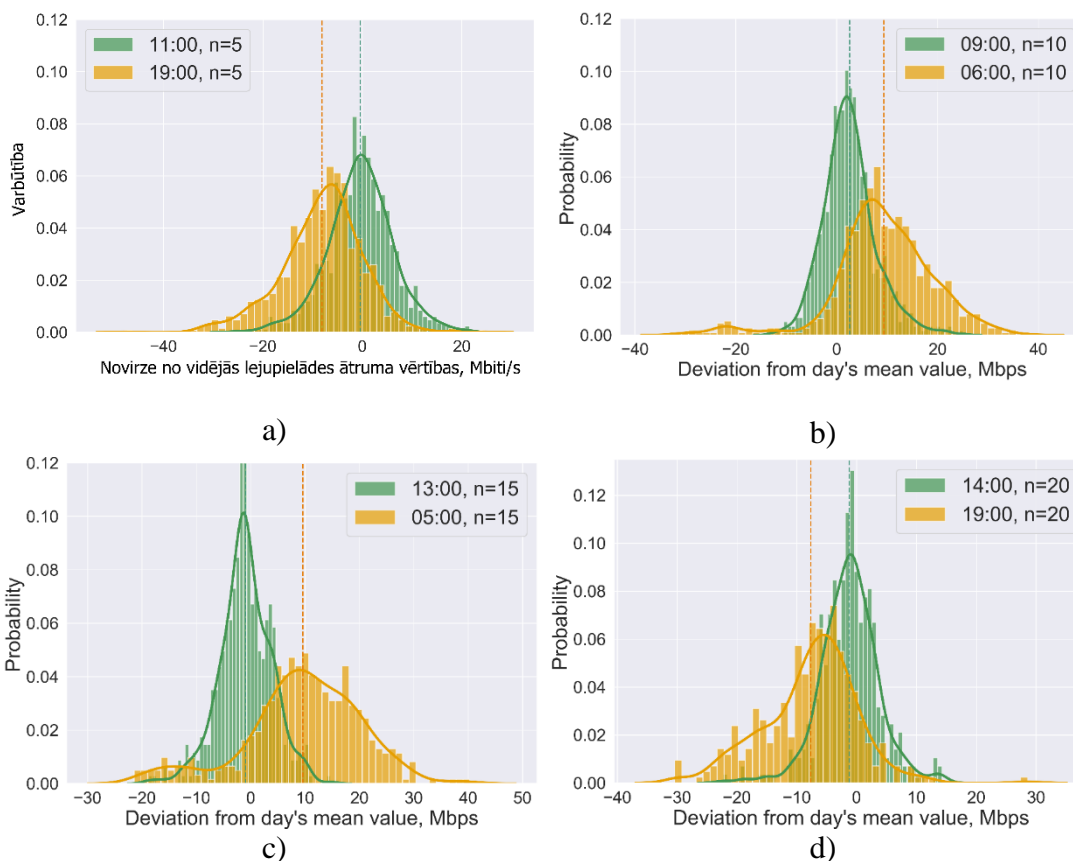
Mērījumu skaits	Novirzes diapazons 95 % mērījumu (Mbiti/s)	Novirze <5 Mbiti/s
1	+/- 22.835	41.03 %
3	+/- 15.813	54.78 %
4	+/- 14.405	58.02 %
7	+/- 12.585	63.44 %
10	+/- 11.642	66.41 %
13	+/- 10.806	69.10 %
16	+/- 10.133	70.60 %
19	+/- 9.674	72.46 %

4.6. tabula

Lejupielādes ātruma mērījumu rezultātu novirze no diennakts vidējās lejupielādes ātruma vērtības atkarībā no mērījumu atkārtojumu skaita, veicot mērījumus ārpus laika perioda no 9:00 – 15:00

Mērījumu skaits	Novirzes diapazons 95 % mērījumu (Mbiti/s)	Novirze <5 Mbiti/s
1	+/- 27.114	27.25 %
3	+/- 20.662	31.08 %
4	+/- 19.897	32.09 %
7	+/- 17.788	36.38 %
10	+/- 17.953	34.44 %
13	+/- 16.485	36.43 %
16	+/- 16.115	36.16 %
19	+/- 16.629	33.79 %

Lai uzskatāmāk atspoguļotu konkrētā diennakts stundā veikto mērījumu vidējā lejupielādes ātruma vērtības novirzi no tajā pašā vietā novērotās diennakts vidējās vērtības, mērījumu rezultāti tika atspoguļoti varbūtību sadalījuma diagrammās (skat. 4.13. attēlu).



4.13. att. Lejupielādes ātruma mērījumu rezultātu novirze no diennakts vidējās lejupielādes ātruma vērtības dažādos diennakts laikos un veicot atšķirīgu mērījumu atkārtojumu skaitu

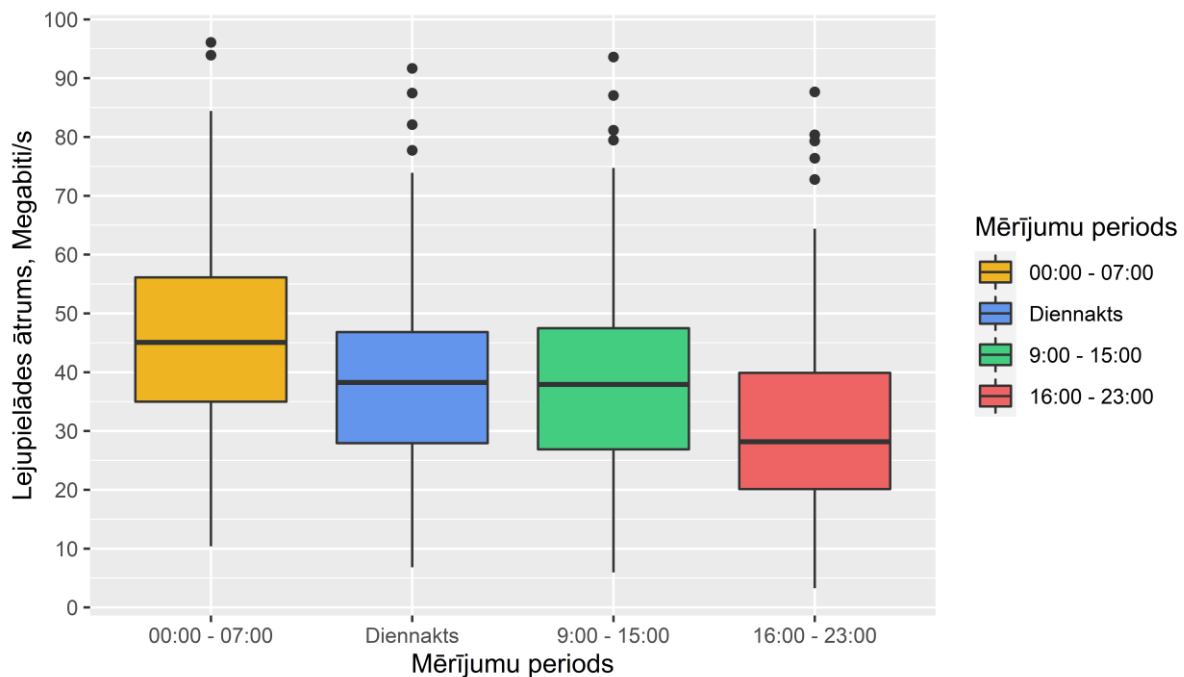
Līdz ar to ir secināms, ka noteiktā ģeogrāfiskā vietā novērtotās vidējās lejupielādes ātruma vērtības, kas iegūtas, veicot vairāku mērījumu sēriju laika posmā no 9:00 – 15:00, ir līdzvērtīgas šai vietai raksturīgajām diennakts vidējām lejupielādes ātruma vērtībām. Tomēr, lai izvērtētu abu vidējo vērtību salīdzināmību, tika veikti papildus aprēķini.

Vidējo lejupielādes ātruma vērtību dispersijas analīze

Iepriekšējās nodaļās tika noskaidrots, ka par atskaites punktu pakalpojuma kvalitātes parametru, it īpaši lejupielādes ātruma, vērtību atspoguļojumam, ir pamatoti izmantot diennaktī novēroto vidējo parametra vērtību. Līdz ar to, veicot īslaicīgu interneta kvalitātes uzraudzību, novērtētajām parametru vērtībām ir jābūt līdzvērtīgām diennakts vidējām vērtībām. Tika noteikts, ka, veicot lejupielādes ātruma mērījumus, būtiska nozīme ir mērījumu veikšanas laikam, t.i., veicot mērījumus konkrētā diennakts laika periodā, varbūtība, ka iegūtie rezultāti būs līdzvērtīgi diennakts rādītājiem ir daudzārt augstāka, savukārt iespējamā novirze – mazāka. Pamatojoties uz šiem novērojumiem tika izvirzīta nulles hipotēze $H_0: \mu_0 = \mu$, pret $H_1: \mu_0 \neq \mu$ par to, ka lejupielādes ātruma vidējā vērtība mērījumiem, kas veikti laika posmā no 9:00-15:00 (μ) ir vienāda ar lejupielādes ātruma vidējo vērtību mērījumiem, kas veikti visas diennakts periodā (μ_0).

Sākotnēji mērījumu dati tika sagrupēti atkarībā no mērījumu veikšanas laika, tādējādi tika aprēķināti vidējie lejupielādes ātruma rādītāji katrā vietā, katra mobilā operatora tīklā. Diennakts vidējās vērtības aptver visu diennaktī veikto mērījumu apjomu, savukārt pārējos periodos tika aprēķinātas vidējās vērtības katrā stundā. Līdz ar to tika savā starpā salīdzinātas diennakts vidējās vērtības ar stundas vidējo vērtību atšķirīgos diennakts periodos.

4.14. attēlā ir atspoguļoti lejupielādes ātruma vidējo vērtību sadalījums. Attēlā redzams, ka rīta (no 00:00 – 08:00) un vakara (16:00 – 23:00) rezultātu sadalījums atšķiras no diennakts vērtību sadalījuma. Savukārt dienas (no 9:00 – 15:00) vizuāli izskatās līdzvērtīgi.



4.14. att. Mērījumos novērtēto lejupielādes ātruma vērtību izkliede dažādos diennakts laika intervālos

Grafiski ir redzams, ka vidējās vērtības rīta (no 00:00 – 08:00) un vakara (16:00 – 23:00) stundās atšķiras no diennakts vidējām, taču, lai noraidītu hipotēzi par to vienādību, ir nepieciešami papildus aprēķini. Lai salīdzinātu lejupielādes ātruma vidējās vērtības visu četru atlasīto diennakts periodu starpā ir nepieciešams veikt dispersijas analīzes testu. Lai pārbaudītu, kādu testu ir korekti pielietot – parametrisko vai neparametrisko, nepieciešams pārbaudīt divus galvenos pieņēmumus - normalitāti un dispersijas homogenitāti [89]. Lai pārbaudītu datu atbilstību normālajam sadalījumam, jāpārbauda vai $X \sim N(\mu, \sigma^2)$. Lai neveiktu normalitātes pārbaudi katras atsevišķas grupas datu sadalījumam, tika ņemtas vērā normāla sadalījuma īpašības, t.i., ja mainīgā lieluma vērtības katrā grupā ir normāli sadalītas, tad arī pārpalikumu (*angl. – residuals*) vērtības būs normāli sadalītas [115]. Pieņēmuma par datu normalitāti pārbaudei visbiežāk tiek izmantots Kolmogorova - Smirnova tests ar Lilifora korekciju un Šapiro - Vilka tests. Tomēr abu testu lielākais mīnuss ir tāds, ka pie lieliem izlašu apjomiem ir

ļoti liela iespējamībā konstatēt minimālas novirzes no normalitātes, kas parādīsies kā būtiskas, tāpēc šādos gadījumos ir vēlams normalitāti pārbaudīt arī grafiski. [89]

Datu normalitāte tika pārbaudīta, izmantojot R programmu.

4.7. tabula

Datu normalitātes pārbaude ar Kolmogorova - Smirnova testu ar Lilifora korekciju, izmantojot R programmatūru

```
library(nortest)
lillie.test(res.aov$residuals)

##      Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normality test

## data:  res.aov$residuals
## D = 0.099141, p-value = 3.291e-07
```

4.8. tabula

Datu normalitātes pārbaude ar Šapiro - Vilka testu, izmantojot R programmatūru

```
shapiro.test(res.aov$residuals)

##      Shapiro-Wilk normality test

## data:  res.aov$residuals
## W = 0.95221, p-value = 4.355e-08
```

Kā redzams, abi testi uzrādīja p-vērtību mazāku par 0,05, kas liecina par to, ka normalitāte ir noraidāma. Lai pārbaudītu dispersijas homogenitāti, izmantojot R valodu, tika veikts Levena tests:

4.9. tabula

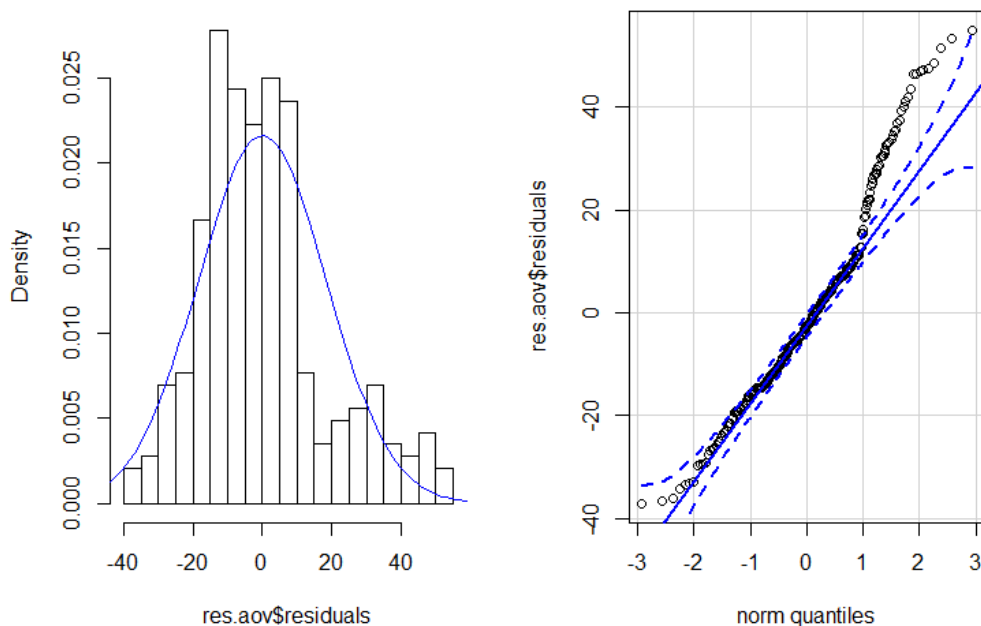
Dispersijas homogenitātes pārbaude ar Levena testu, izmantojot R programmatūru

```
library(car)
leveneTest(y = dati$Down_Mbps, group = dati$M_period, center = mean)

## Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = mean)
##      Df F value Pr(>F)
## group  3  0.0888 0.9662
##      284
```

Kā redzams, Levena tests uzrāda, ka dispersijas ir homogēnas (p-vērtība ir 0,966).

Papildus tika veikta arī grafiska normalitātes pārbaude, veicot datu atspoguļojumu histogrammas un kvantiļu-kvantiļu grafika veidā (skat. 4.15. att.).



4.15. att. Pārpalikumu sadalījuma atspoguļojums histogrammas un kvantiļu-kvantiļu grafika veidā

No 4.15. attēlā atspoguļotajiem grafikiem redzams, ka sadalījumam piemīt pozitīva asimetrija. Lai arī F tests jeb vienfaktora dispersiju analīzi (ANOVA) nav īpaši jūtīgs pie mērenām novirzēm no normalitātes, tomēr, lai izvairītos no kļūdaini pozitīva rezultāta, vidējo vērtību vienādības noteikšanai tika izmantots neparametriskais Kruskala - Vallisa tests. Tā kā Kruskala - Vallisa testa efektivitāte tiecas uz 95,5 % gadījumos, kad ir korekti pielietot arī F testu, to var uzskatīt par ļoti labu alternatīvu parametriskajai metodei [89]. Kruskala - Vallisa testa statistika aprēķināma pēc formulas:

$$KW = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^k n_j (\bar{R}_j - \bar{R})^2, \quad (4.3.)$$

kur n_j ir novērojumu skaits j -tajā izlasē, R_j ir rangū summa j -tajā izlasē un $\bar{R} = \frac{N+1}{2}$ ir vidējā ranga vērtība, ņemot visus datus kopā [89].

4.10. tabula

Vidējo vērtību vienādības pārbaude ar Kruskala - Vallisa testu, izmantojot R programmatūru

```
kruskal.test(Down_Mbps ~ M_period, data = dati)
## data: Down_Mbps by M_period
## kruskal-wallis chi-squared = 28.203, df = 3, p-value = 3.293e-06
```

Iegūtais rezultāts (p – vērtība = $3,29 \cdot 10^{-6}$) liecina, ka hipotēze par datu vienādību ir noraidāma, tātad vidējie lejupielādes ātrumi dažādās grupās nav vienādi. Lai pārbaudītu, kuras

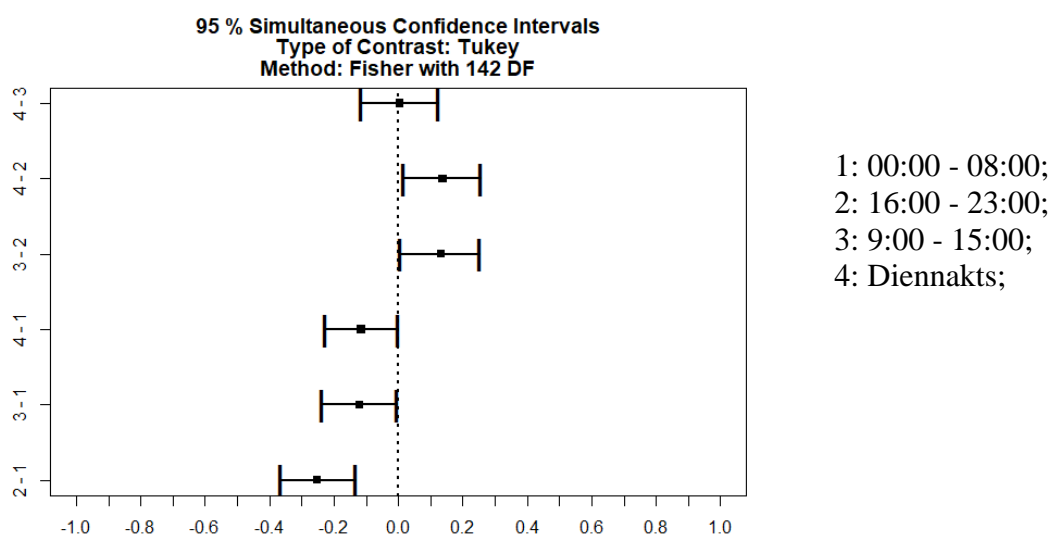
divas grupas ir līdzīgas un kuras atšķiras savā starpā, nepieciešams veikt tā saukto post-hoc testu. Šādi testi ļauj veikt vairākkārtējus salīdzinājumus divu dažādu grupu vidējām vērtībām, tādējādi novērtējot, kuru grupu vidējās vērtības statistiski nozīmīgi atšķiras savā starpā.

4.11. tabula

Vidējo vērtību vienādības pārbaude starp dažādām grupām ar post-hoc testu, izmantojot R programmatūru

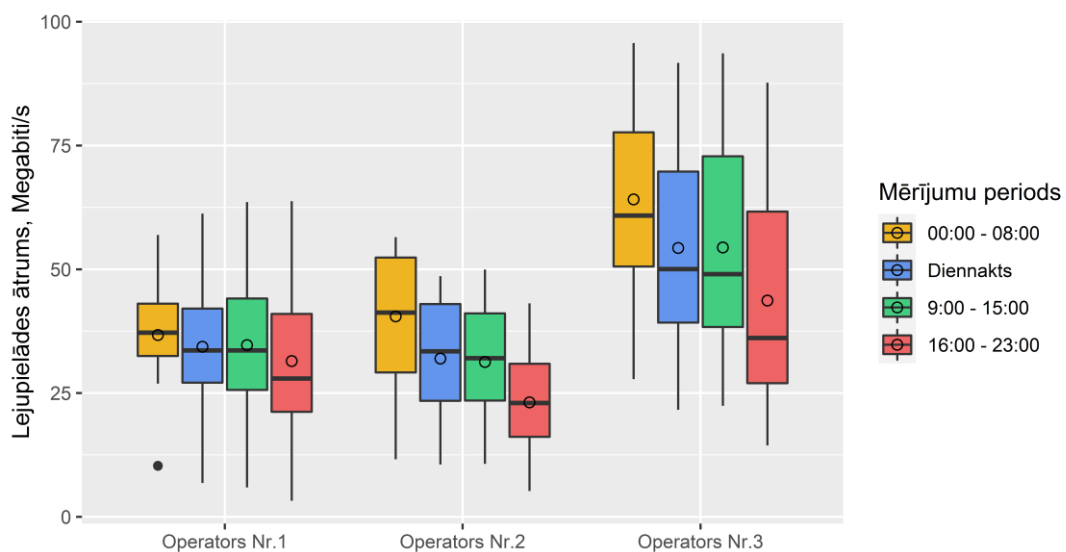
require(PMCMRplus)			
posthoc.kruskal.nemenyi.test(x=dati\$Down_Mbps, g=dati\$M_period, dist="Tukey")			
	00:00 - 08:00	16:00 - 23:00	9:00 - 15:00
16:00 - 23:00	9.2e-07	-	-
9:00 - 15:00	0.059	0.031	-
Diennakts	0.078	0.023	1.000

Tā kā par pamatu lejujupielādes ātruma atspoguļošanai tiek pieņemta diennakts vidējā vērtība, tad īpaši svarīgs ir salīdzinājums starp dažādos diennakts laikos veikto mērījumu stundas vidējo vērtību attiecībā pret diennakts vidējo vērtību (treknrakstā). Aprēķinu dati uzrāda, ka pie nozīmības līmeņa $\alpha=0,05$ tiek noraidīta diennakts un vakara (16:00-23:00) mērījumu vidējo vērtību vienādība (p -vērtība $< 0,05$). Salīdzinot diennakts un rīta (00:00 – 08:00) vidējās vērtības, secināms, ka pie nozīmības līmeņa $\alpha=0,05$ vienādība nevar tikt noraidīta. Tomēr, ņemot vērā aprēķināto p -vērtību (0,078) ir secināms, ka šī divu grupu vidējās vērtības vienādība nevar tikt uzskatīta par statistiski nozīmīgu. Iespējams, atsevišķās stundās šajā laika posmā ir iespējams novērot diennakts vidējām vērtībām līdzvērtīgus rādītājus, tomēr varbūtība ir pārāk maza un iespējamā deviācija – liela, lai to praktiski pielietotu. Savukārt novērtējot diennakts vidējās vērtības pret dienas (09:00-15:00) vidējām vērtībām, ir vērojama statistiski ļoti nozīmīga vidējo vērtību vienādība starp šīm grupām (p -vērtība ir 0,999536).



4.16. att. Dažādu grupu vidējo vērtību atšķirību 95 % ticamības intervāli

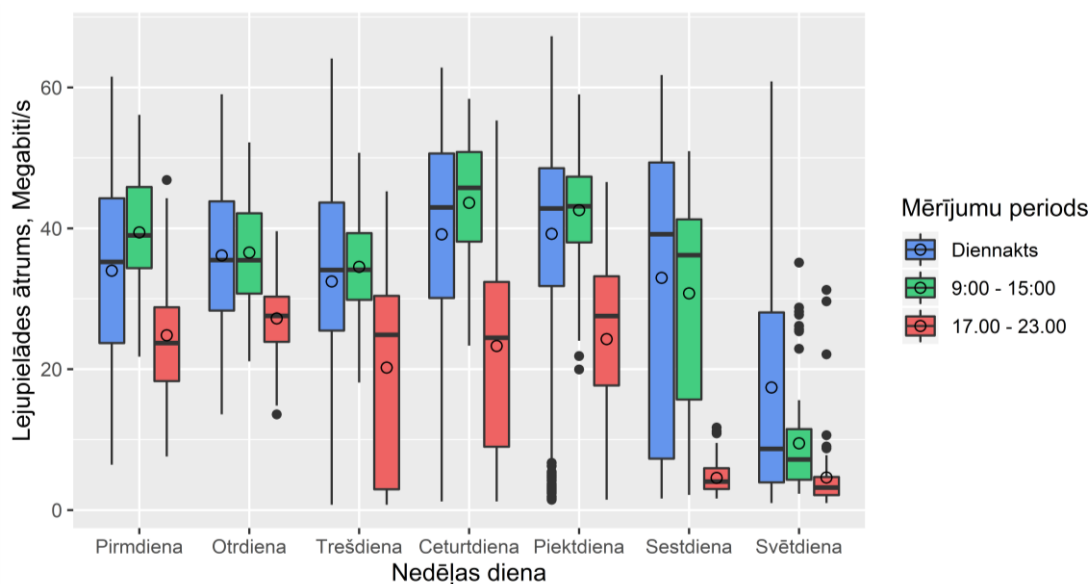
Lai uzskatāmāk atspoguļotu post hoc testa rezultātus, tika aprēķināti 95 % ticamības intervāli atšķirībām starp dažādu grupu vidējām vērtībām. Nulles vērtība norāda, ka grupu vidējās vērtības ir vienādas. Ja ticamības intervāls neietver nulles vērtību, tad atšķirība starp grupu vidējām vērtībām ir statistiski nozīmīga. [116] Aplūkojot 4.16. attēlu un 4.11. tabulu, var secināt, ka pie nozīmības līmeņa $\alpha=0,05$ vidējās lejupielādes ātruma vērtības kas iegūtas, veicot mērījumus laika periodā no 9:00 līdz 15:00 ir vienādas ar tajā pašā ģeogrāfiskā vietā veikto mērījumu diennakts vidējām lejupielādes ātruma vērtībām, līdz ar to tiek pieņemta hipotēze $H_0: \mu_0 = \mu$ par diennakts un stundas (laika periodā no 9:00-15:00) vidējo lejupielādes ātruma vērtību vienādību.



4.17. att. Mērījumos novērtēto lejupielādes ātruma vērtību izkliede dažādos diennakts laika intervālos dažādu mobilo operatoru tīklos

4.17. attēls parāda mērījumu rezultātu sadalījumu dažādos diennakts laikos veikto mērījumu vidējām vērtībām dažādu mobilo operatoru tīklos. Uzskatāmi redzams, ka diennakts vidējo vērtību sakritība ar laika posmā no 9:00-15:00 veikto mērījumu stundas vidējām vērtībām vērojama visu mobilo operatoru tīklos. Tāpat kā atšķirība ar pārējos laika periodos veikto mērījumu vidējām vērtībām.

Vēl jo vairāk šī tendence ir vērojama analizējot datus konkrētā mērījumu vietā, kur vidējās lejupielādes vērtības, kas veiktas vakara stundās var ievērojami atšķirties no diennakts vidējām vērtībām.



4.18. att. Mērījumos novērtēto lejupielādes ātruma vērtību izkliede dažādos diennakts laika intervālos vienā mērījumu vietā viena mobilā operatora tīkla dažādās nedēļas dienās

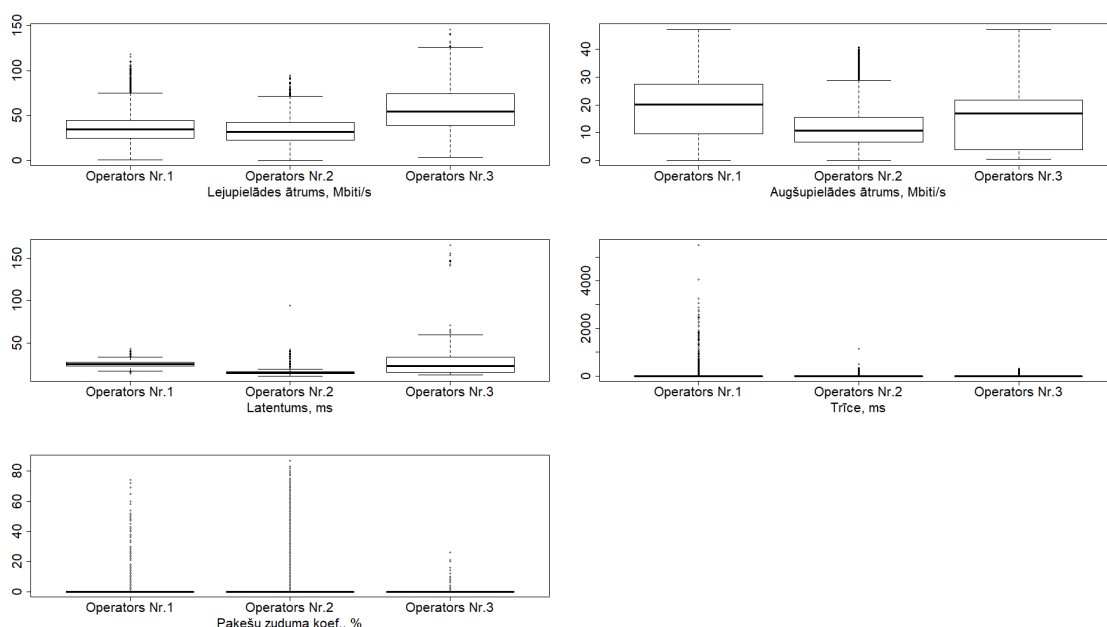
4.4. Nepieciešamā mērījumu apjoma noteikšana

Kā jau iepriekš minēts, iespējamo novirzi no diennakts vidējās vērtības lielā mērā ietekmē veikto mērījumu atkārtojumu skaits. Tāpēc nepieciešams noteikt minimālo nepieciešamo mērījumu skaitu vienā vietā, kas nodrošinātu vidējās vērtības noteikšanu ar noteiktu ticamības līmeni un kļūdas robežu. Lai novērtētu nepieciešamo mērījumu skaitu, ir nepieciešams aprēķināt variāciju kvalitātes parametru vērtībās. Tā kā mērījumi tiek veikti vienlaicīgi visiem parametriem, tad nepieciešams izvērtēt visus mērāmos parametrus. Atkarībā no tā tiks noteikts optimālais mērījumu vienā vietā, kas ļaus novērtēt interneta pakalpojuma kvalitātes parametru rādījumus ar uzdoto precizitāti.

Atsevišķu parametru, piemēram, trīces un pakešu zuduma koeficienta mērījumos atsevišķos brīžos ir vērojamas netipiskas izlēcējvērtības. Šādi rādītāji, kas ievērojami pārsniedz vērtības, kādas novērotas lielākajā daļā mērījumu, atsevišķos laika momentos var negatīvi ietekmēt saņemto pakalpojuma kvalitāti, tomēr tās neraksturo vispārējo kvalitātes līmeni noteiktā vietā. Tāpat atsevišķas augstas vērtības ievērojami ietekmē vērtību variāciju, kā dēļ var būt nekorekti aprēķināts optimālais mērījumu vietu skaits. Lai izvairītos no iespējami maldīgiem secinājumiem, tika veikti papildus pakalpojuma kvalitātes vērtību analīze. Šim nolūkam katrā mērījumu vietā un katra mobilā operatora tīklā tika analizēts kvalitātes parametru vērtību sadalījums. Secināts, ka trīces un pakešu zuduma koeficienta rādītājiem vairumā gadījumu 97,5 % mērījumu ievērojami atšķiras no maksimāli novērotām vērtībām. Turklāt 75 % mērījumu praktiski visās mērījumu vietās šo parametru rādītāji ir līdzvērtīgi (skat. 4.19. attēlu). Kā var novērot 4.19. attēlā, retos gadījumos, atsevišķās vietās trīces un pakešu zuduma koeficienta mērījumos var tikt novērotas izlēcējvērtības, kas var sasniegt ārkārtīgi augstas vērtības. Šādi kvalitātes rādītāji nevar būt ņemti vērā aprēķinos, ja tiek novēroti vien atsevišķos

mērījumos, jo tie neraksturo kopējo pakalpojuma kvalitātes līmeni. Tāpat dažkārt šādu rādītāju iemesls var būt mērīšanas sistēmas kļūme vai citi no mobilā tīkla veikspējas neatkarīgi apstākļi.

Pie tik augstiem kvalitātes parametru rādītājiem interneta pakalpojuma lietošana būtu ievērojami apgrūtināta vai pat neiespējama. Gadījumos, kad tas raksturo faktisku un ilglaicīgu situāciju, līdzvērtīgi rādītāji konkrētā mērījumu tiek novēroti atkārtoti. No visām analizētajām mērījumu vietām, šāda situācija novērota vienā gadījumā. Tāpēc, optimāla mērījumu atkārtojumu skaita aprēķinam vienā vietā, šie rādītāji netika ņemti vērā. Analizējot pārējo kvalitātes parametru (pieslēguma ātrums un latentums) vērtību sadalījumu, vērojams, ka tās ir vienmērīgi sadalītas un nepastāv ievērojama atšķirība starp maksimālo vērtību un 97,5 procentīles vērtību. Līdz ar to mērījumos novērotās maksimālās vērtības nevar tikt uzskatītas par izlēcējvērtībām un tās ir jāņem vērā, veicot turpmākos aprēķinus.



4.19. att. Mērījumos novēroto interneta pakalpojuma kvalitātes parametru vērtību sadalījums

Papildus tam, ņemot vērā trīces un pakešu zuduma koeficienta mērījumu rādītāju sadalījumu, secināms, ka to uzraudzībai ir nepieciešama atšķirīga pieeja. Šo parametru novērtējums īslaicīgā laika periodā, konkrētā mērījumu vietā veicot atsevišķu mērījumu sēriju, nevar tikt atspoguļots kā šai konkrētai vietai raksturīgs rādījums, jo tādā gadījumā ir iespēja gūt maldīgu priekšstatu par šo parametru vispārējo kvalitātes līmeni. Tomēr ir būtiski veikt šo parametru uzraudzību un, vairākkārtīgi novērojot augstus šo parametru rādījumus, veikt papildus mērījumus ilgstošākā laika posmā, lai noskaidrotu to ietekmi uz vispārējo kvalitātes līmeni un lietotāju pieredzi lietojot interneta pakalpojumu.

Lai noteiktu, kāds ir minimāli nepieciešamais mērījumu skaits vienā mērījumu vietā, lai ar uzdotu ticamības līmeni noteiktu hipotētiskās kopas vidējo vērtību, tika veikti aprēķini, pamatojoties uz datu izlasi mērījumiem, kas veikti laika posmā no 9:00-15:00. Katra mobilā operatora tīklā un katrā mērījumu vietā atsevišķi tika aprēķināta kvalitātes parametru vērtību

variācija. Ņemot vērā trīces un pakešu zuduma vērtību sadalījuma nevienmērību, šo parametru rādījumi netika ņemti vērā optimāla mērījumu skaita aprēķinos.

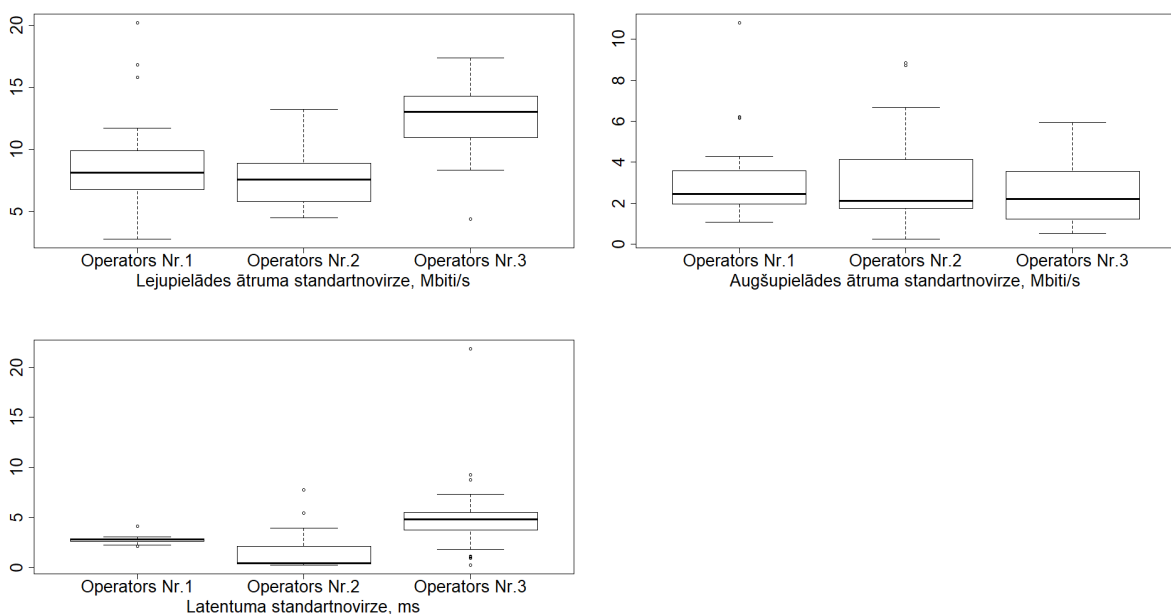
Nepieciešamā mērījumu skaita jeb paraugkopas apjoma aprēķinam tiek izmantota sekojoša formula [91]:

$$n = \frac{z_{\alpha/2}^2 \cdot \sigma^2}{e^2}, \quad (4.4.)$$

kur $z_{\alpha/2}$ atbilst vēlamajam ticamības līmenim;

σ – izlases standartnovirze;

e – maksimālā pieļaujamā kļūdas robeža (*angl. - margin of error*).



4.20. att. Lejupielādes un augšupielādes ātruma un latentuma vērtību standartnoviržu sadalījums dažādu mobilo operatoru tīklos

Aprēķini tika veikti atsevišķi pieslēguma ātruma rādītājiem un latentuma rādītājiem.

Pieslēguma ātrums

Lielākā standartnovirze pieslēguma ātruma vērtībās, kāda tika novērota starp visām mērījumu vietām bija $\sigma = 20,22$. Pieļaujamā kļūdas robeža tika noteikta kā ± 5 Mbit/s un ± 10 Mbit/s. Uzdotā precizitāte, ar kuru izlases vidējā vērtība iekļausies norādītajās kļūdas robežās ir 95 % jeb $\alpha=0,05$. Aprēķinātais mērījumu skaits vienā vietā:

1. Pieļaujamā kļūdas robeža ± 5 Mbit/s:

$$n = \frac{1,96^2 \cdot 20,22^2}{5^2} = 62,81 \quad (4.5.)$$

2. Pieļaujamā kļūdas robeža ± 10 Mbit/s:

$$n = \frac{1,96^2 \cdot 20,22^2}{10^2} = 15,7 \quad (4.6.)$$

Tātad jāveic vismaz 63 mērījumi vienā vietā, lai nodrošinātu, ka ar 95 % ticamību izlases vidējā vērtība iekļausies ± 5 Mbit/s robežās no hipotētiskās kopas (jeb diennakts) vidējās vērtības un vismaz 16 mērījumi, lai nodrošinātu, ka tā iekļausies ± 10 Mbit/s robežās.

Latentums

Lielākā standartnovirze latentuma vērtībās, kāda tika novērota visās mērījumu vietās bija $\sigma = 21.87$. Šāda variācija tika novērota tikai viena mobilā operatora tīklā un tikai vienā mērījumu vietā, tāpēc par aprēķinu pamatu tika ņemta lielākā vērtība, kāda tipiski novērota kāda operatora tīklā, vai arī, ja tāda ir novērota visu operatoru tīklos. Analizējot standartnovirzi pieslēguma ātruma rādītājiem, secināms, ka lielākā tipiskā pieslēguma ātruma standartnovirze bija $\sigma = 9,25$, tāpēc tieši šī vērtība tika izmantota aprēķinos. Pieļaujamā kļūdas robeža tika noteikta kā $\pm 2,5$ ms un ± 5 ms. Uzdotā precizitāte, ar kuru izlases vidējā vērtība iekļausies norādītajās kļūdas robežās ir 95 % jeb $\alpha=0,05$.

Aprēķinātais mērījumu skaits vienā vietā:

1. Pieļaujamā kļūdas robeža $\pm 2,5$ ms:

$$n = \frac{1,96^2 \cdot 9,25^2}{2,5^2} = 52,55 \quad (4.7.)$$

2. Pieļaujamā kļūdas robeža ± 5 ms:

$$n = \frac{1,96^2 \cdot 9,25^2}{5^2} = 13,14 \quad (4.8.)$$

Līdz ar to, lai nodrošinātu, ka ar 95 % ticamību izlases vidējā vērtība iekļausies $\pm 2,5$ ms robežās no hipotētiskās kopas vidējās vērtības, ir jāveic vismaz 53 mērījumi vienā vietā, un lai nodrošinātu, ka ar 95 % ticamību izlases vidējā vērtība iekļausies ± 5 ms robežās – vismaz 14 mērījumi.

Tā kā interneta pakalpojuma kvalitātes parametri tiek novērtēti vienlaicīgi, tad lai nodrošinātu, ka, veicot mērījumus laika posmā no 9:00-15:00, katrā mērījumu vietā novērtētā lejupielādes un augšupielādes ātruma vidējā vērtība ar 95 % ticamību iekļaujas ± 5 Mbit/s robežās un latentuma vidējā vērtība ar 95 % ticamību iekļaujas $\pm 2,5$ ms robežās ir jāveic **vismaz 63 mērījumi** katrā vietā. Savukārt, lai nodrošinātu, ka pie tiem pašiem nosacījumiem lejupielādes un augšupielādes ātruma vidējā vērtība ar 95 % ticamību iekļaujas ± 10 Mbit/s robežās un latentuma vidējā vērtība ar 95 % ticamību iekļaujas ± 5 ms robežās ir jāveic **vismaz 16 mērījumi** katrā vietā.

Apskatot 4.5. tabulā atspoguļotos simulācijas rezultātus, var redzēt, ka, veicot 16 mērījumu atkārtojumus vienā mērījumu vietā, 95 % mērījumu rezultātu (t.i., šīs mērījumu izlases vidējo

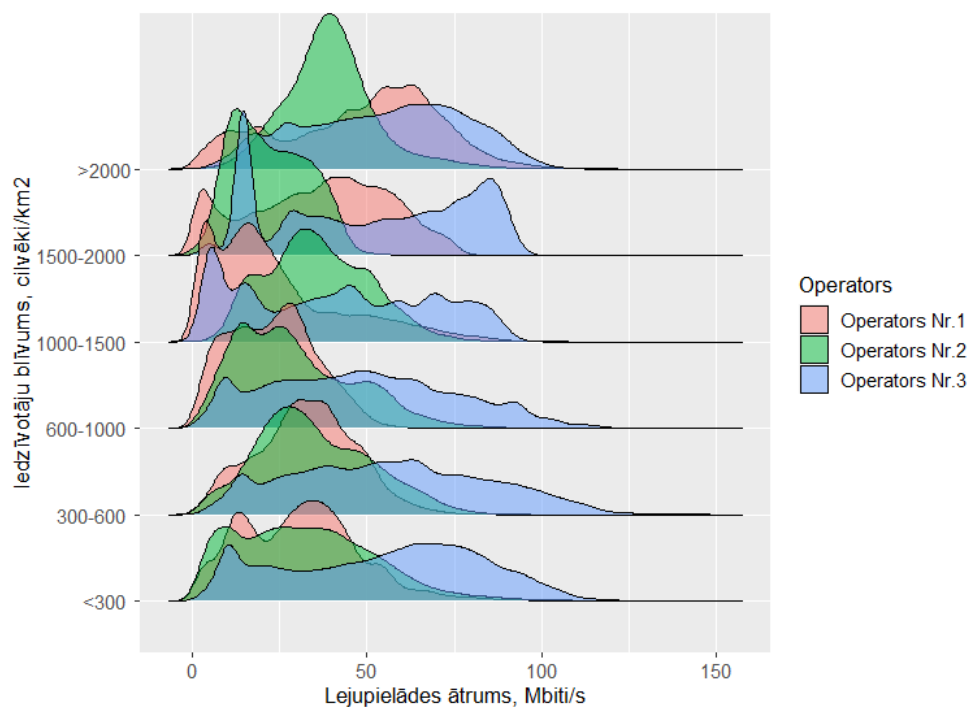
lejupielādes ātruma vērtību) novirze no diennakts vidējās vērtības ir ± 10 Mbiti/s. Turklāt vismaz 70 % mērījumu rezultātu novirze no diennakts vidējās vērtības nepārsniedz ± 5 Mbiti/s. Tāpat secināts, ka, jāveic vismaz 13 mērījumu atkārtojumi vienā vietā, lai nodrošinātu, ka pieslēguma ātruma vidējā vērtība ar 95 % ticamību iekļaujas ± 11 Mbiti/s un vismaz 69 % mērījumu rezultātu novirze no diennakts vidējās vērtības nepārsniedz ± 5 Mbiti/s. Tādējādi, par optimālu ir uzskatāms vismaz 16 mērījumu atkārtojumu skaits vienā vietā, bet par minimāli nepieciešamo – 13 mērījumu atkārtojumu skaits.

4.5. Mērījumu vietu apjoma un izvēles principu noteikšana

Tā kā interneta kvalitātes parametru, it īpaši lejupielādes ātruma, vērtības dažādās vietās var atšķirties ļoti plašās robežās, kā arī, ņemot vērā, ka fiziski nav iespējams veikt mērījumu ikvienā teritoriālajā vienībā (piemēram, katrā $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ režģa poligonā valsts teritorijā), tad, lai atspoguļotu kopējos vidējos parametru rādījumus valstī, jābūt nodrošinātam, ka mērījumos ir vienmērīgi aptverta visa valsts teritorija, kā arī izvēlēts pietiekams mērījumu vietu skaits. Vidējām kvalitātes vērtībām ir jāatspoguļo parametru rādītāji, kādi pieejami lietotājiem, izmantojot interneta pakalpojumu, līdz ar to mērījumiem ir jābūt nodrošinātiem vietās, kur pakalpojums tiek izmantots, t.i., apdzīvotās vietās vai vietās, kur interneta pakalpojuma izmantošana var būt potenciāli nozīmīga (piemēram, uz autoceļiem). Neapdzīvotās vai ļoti reti apdzīvotās vietās pakalpojuma kvalitātes uzraudzība ir būtiska, lai novērtētu mobilā tīkla pārklājumu un tā veiktspēju. Tomēr šādās teritorijās novērtētie kvalitātes rādītāji nebūtu jāietver vidējās kvalitātes vērtībās. Vai arī šādu mērījumu vietu skaitam būtu jābūt nodrošinātam proporcionāli tīkla pārklājumam valstī, lai vidējās kvalitātes parametru vērtības netiktu nepamatoti pazeminātas.

Lai arī kopumā vidējais interneta pakalpojuma kvalitātes novērtējums valstī nesniedz informāciju par konkrētam lietotājam pieejamo kvalitātes līmeni, tas tomēr ir būtisks mērs, kas ļauj objektīvi novērtēt kopējo mobilo tīklu veiktspējas attīstību, kā arī salīdzināt to starp dažādiem operatoriem un citās valstīs nodrošinātajiem rādītājiem. Līdz ar to ir būtiski, ka mērījumi tiek veikti pēc pamatotiem un vienotiem principiem, izvēloties mērījumu vietas un to skaitu.

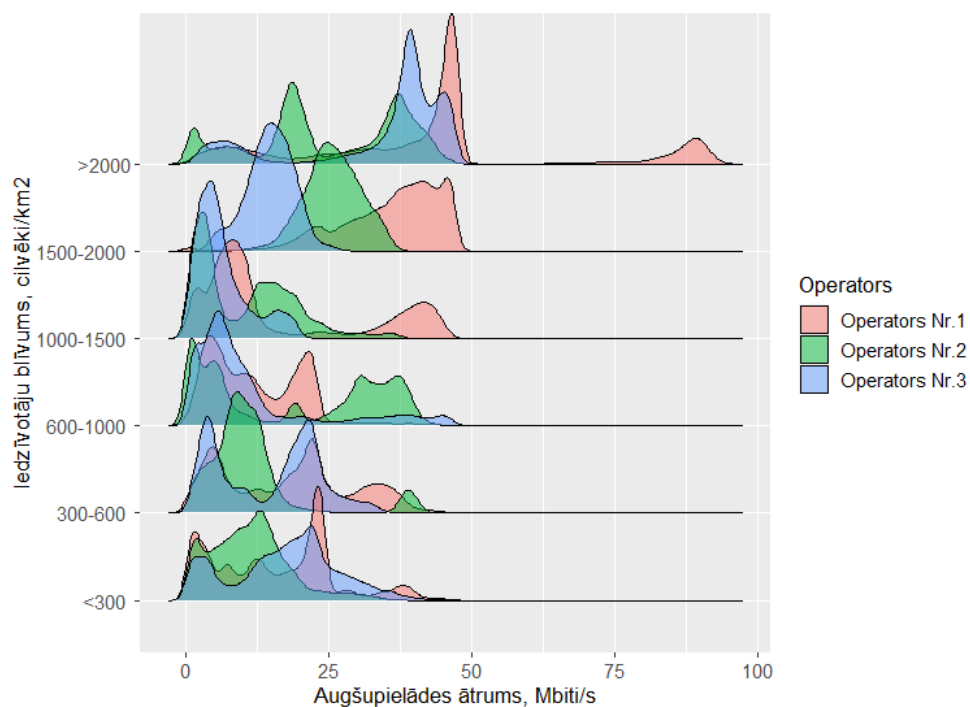
Lai novērtētu, vai pastāv korelācija starp interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumu vērtībām un iedzīvotāju skaitu vai blīvumu konkrētā mērījumu vietā, tika veikta ilgstoši veiktu interneta mērījumu rezultātu analīze. Analizētie interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumu dati aptver laika posmu no 2018. līdz 2020. gadam, kopumā ietverot vairāk nekā 865 tūkst. mērījumu trīs dažādu operatoru mobilajos tīklos un 58 dažādās vietās Latvijas teritorijā. Dati par iedzīvotāju skaitu un blīvumu ir iegūti no Centrālās statistikas pārvaldes datubāzes un atspoguļo informāciju par 2020. gadu [106].



4.21. att. Lejupielādes ātruma mērījumu rezultātu sadalījums atkarībā no iedzīvotāju blīvuma apdzīvotās vietas teritorijā, kur veikts mērījums

Kā redzams 4.21. attēlā, dažu operatoru tīklos augstāka lejupielādes ātruma novērojumu biežums pieaug mērījumu vietās ar lielāku iedzīvotāju blīvumu. Tāpat vērojams, ka vietās ar vidēju iedzīvotāju blīvumu biežāk var būt novērots zemāks lejupielādes ātrums nekā vietās ar izteikti zemu iedzīvotāju blīvumu. Par iemeslu tam var būt iedzīvotāju aktivitāte internetā, kā arī pietiekamas tīkla kapacitātes nodrošināšana attiecībā pret iedzīvotāju blīvumu. Papildus tam ar vietās vidēju iedzīvotāju blīvumu ir vērojams bimodāls lejupielādes ātruma mērījumu rezultātu sadalījums, kas var liecināt par ievērojamu lejupielādes ātruma samazinājumu palielinoties lietotāju aktivitātei (piemēram, lielākās noslodzes stundās), kā arī par nevienlīdzīgas kvalitātes pakalpojuma nodrošināšanu atšķirīgās vietās. Atsevišķa situācija ir vērojama Rīgā, kura ir vienīgā Latvijas pilsēta ar iedzīvotāju blīvumu virs 2000 cilvēkiem/km², kur visu operatoru tīklos biežāk ir vērojamas augstākas lejupielādes ātruma vērtības.

Analizējot augšupielādes ātruma mērījumu rezultātus, ir novērots, ka vietās ar vidēju iedzīvotāju blīvumu augšupielādes ātruma vērtības ir izteikti zemākas, nekā vietās ar zemu iedzīvotāju blīvumu vai otrādi – blīvi apdzīvotās vietās. Vērojams arī, ka augstāki augšupielādes ātruma rādītāji (virs 25 Mbit/s) vairumā gadījumu ir nodrošināti vienīgi blīvi apdzīvotās vietās, kas var liecināt par tīkla kapacitātes atbilstošu plānošanu, ņemot vērā datu augšupielādes tendences un iedzīvotāju potenciālo aktivitāti. Tāpat augšupielādes ātruma vērtībām ir raksturīgs bimodāls sadalījums, kam par iemeslu, visticamāk, ir nevienlīdzīgu kvalitātes rādītāju nodrošināšana atšķirīgās vietās, ņemot vērā, ka izpētes laikā secināts, ka augšupielādes ātruma vērtības vāji korelē ar diennakts laiku, līdz ar to norādot, ka šobrīd lietotāju aktivitāte nerada jūtamu iespaidu uz augšupielādes ātruma parametra vērtībām.



4.22. att. Augšupielādes ātruma mērījumu rezultātu sadalījums atkarībā no iedzīvotāju blīvuma apdzīvotās vietas teritorijā, kur veikts mērījums

Lai pārbaudītu, vai starp pieslēguma ātruma vērtībām un iedzīvotāju blīvumu ir vērojama saistība, ar R programmatūras palīdzību tika aprēķināts korelācijas koeficients (pie nozīmības līmeņa $\alpha=0,05$).

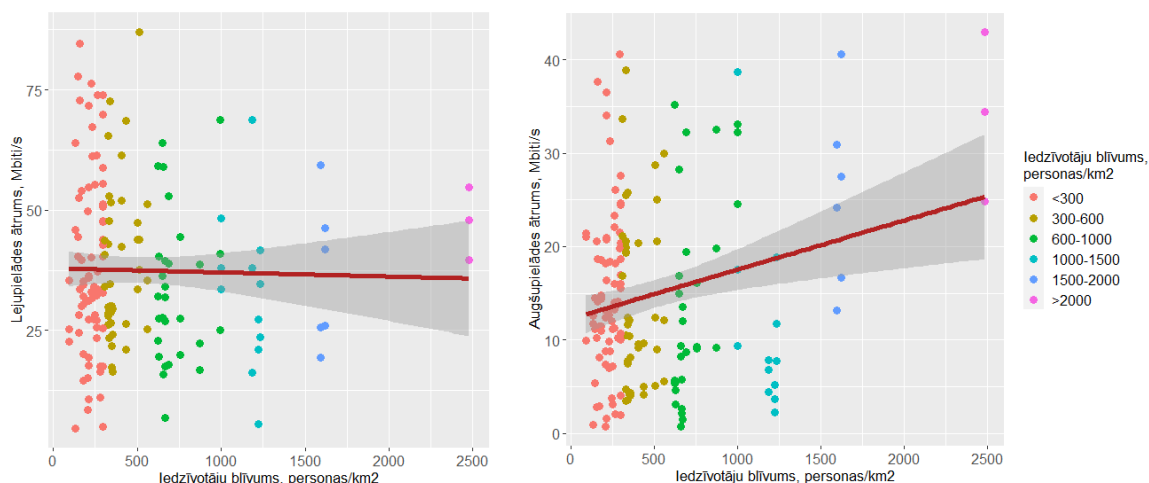
4.12. tabula

Pieslēguma ātruma mērījumu rezultātu un iedzīvotāju blīvuma mērījumu vietās korelācijas koeficients

Operators	Korelācijas koeficients starp lejupielādes ātrumu un iedzīvotāju blīvumu	Korelācijas koeficients starp lejupielādes ātrumu un iedzīvotāju skaitu	Korelācijas koeficients starp augšupielādes ātrumu un iedzīvotāju blīvumu	Korelācijas koeficients starp augšupielādes ātrumu un iedzīvotāju skaitu
Operators Nr.1	0,16	0,21	0,37	0,38
Operators Nr.2	0,16	0,11	0,34	0,35
Operators Nr.3	0,02	-0,01	0,27	0,18

Var secināt, ka nav vērojama lejupielādes ātruma vērtību saistība ar iedzīvotāju blīvumu mērījumu vietās. Augšupielādes ātruma vērtībām ir vērojama vāja saistība ar iedzīvotāju blīvumu.

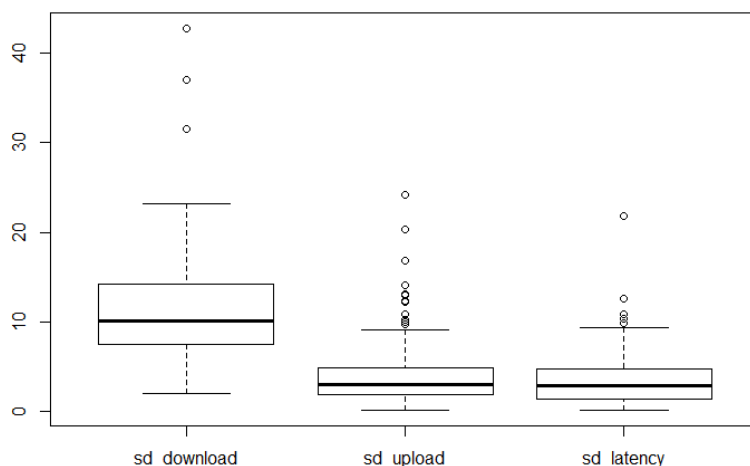
Analizējot vidējos pieslēguma ātruma rādītājus dažāda apdzīvotības blīvuma mērījumu vietās, ir vērojama mērījumu rezultātu izkliede plašā diapazonā. Blīvi apdzīvotās vietās retāk ir novērotas zemas vidējās pieslēguma ātruma (it īpaši augšupielādes) vērtības.



4.23. att. Vidējā pieslēguma ātruma atkarība no iedzīvotāju blīvuma noteiktā mērījumu vietā

Tā kā nav vērojama tieša lejupielādes ātruma rādītāju saistība ar iedzīvotāju blīvumu mērījumu vietā, tad kopējais mērījumu vietu skaits, kāds nepieciešams, lai ar 95 % ticamību novērtētu vidējo pieslēguma ātruma vērtību, tika aprēķināts visai valsts teritorijai kopā.

Tā kā iepriekš novērtēts, ka, lai mērījumu rezultāti konkrētā mērījumu vietā maksimāli objektīvi atspoguļotu diennakts vidējo vērtību, kādā šajā vietā nodrošināta lietotājam, mērījumu jāveic laika posmā no 9:00 – 15:00. Tāpēc, mērījumu rezultātu standartnovirze tika novērtēta mērījumu datiem, kas iegūti darba dienās laikā no 9:00 – 15:00.



4.24. att. Lejupielādes un augšupielādes ātruma un latentuma vērtību standartnoviržu sadalījums

Ņemot vērā, ka visu parametru mērījumi notiek vienlaicīgi, tad mērījumu vietu skaita apjoma noteikšanai, jāizmanto visu parametru lielākā novērotā standartnovirze. Veicot novērtējumu, standartnovirze tika aprēķināta katrā mērījumu vietā atsevišķi, tādējādi, noskaidrojot maksimālo iespējamo mērījumu rezultātu variāciju, kas tika novērota lejupielādes ātruma vērtībām: $\sigma = 42,75$. Jāņem vērā, ka vairumā (97,5 %) gadījumu tomēr mērījumu izlases variācija bija ievērojami mazāka – $\sigma = 29,99$.

Tā kā konkrētā vietā novērtētais vidējais lejupielādes ātrums satur kļūdu noteiktās robežās, tad nosakot mērījumu vietu izlases apjomu kļūdas robežai ir jābūt nodrošinātai pēc iespējas mazākai. Līdz ar to pieļaujamā kļūdas robeža tika noteikta kā: $\pm 1,5$ Mbiti/s un ± 2 Mbiti/s. Uzdotā precizitāte, ar kuru izlases vidējā vērtība iekļausies norādītajās kļūdas robežās ir 95 % jeb $\alpha=0,05$. Aprēķinātais mērījumu skaits vienā vietā:

1. Pieļaujamā kļūdas robeža $\pm 1,5$ Mbiti/s:

$$n = \frac{1,96^2 \cdot 42,75^2}{1,5^2} = 3120,34 \quad (4.9.)$$

2. Pieļaujamā kļūdas robeža ± 2 Mbiti/s:

$$n = \frac{1,96^2 \cdot 42,75^2}{2^2} = 1755,19 \quad (4.10.)$$

Tādējādi valsts teritorijā ir nepieciešams veikt mērījumus vismaz 1756 dažādās mērījumu vietās, lai nodrošinātu, ka ar 95 % ticamību izlases vidējā lejupielādes ātruma vērtība iekļausies ± 2 Mbiti/s robežās no hipotētiskās kopas vidējās vērtības. Augšupielādes ātruma vidējā vērtība tādā gadījumā ar 95 % ticamību iekļausies $\pm 0,5$ Mbiti/s robežās no hipotētiskās kopas vidējās vērtības (maksimālā iespējamā mērījumu rezultātu variācija, kas tika novērota augšupielādes ātruma vērtībām: $\sigma = 10.82$):

$$e = \sqrt{\frac{1,96^2 \cdot 10.82^2}{1756}} = 0,5 \text{ Mbiti/s} \quad (4.11.)$$

Savukārt latentuma vidējā vērtība ar 95 % ticamību iekļausies ± 1 ms robežās no hipotētiskās kopas vidējās vērtības (maksimālā iespējamā mērījumu rezultātu variācija, kas tika novērota latentuma vērtībām: $\sigma = 21,87$):

$$e = \sqrt{\frac{1,96^2 \cdot 21.87^2}{1756}} = 1,023 \text{ ms} \quad (4.12.)$$

Tomēr, ņemot vērā, ka pieslēguma ātruma vērtību sadalījumam ir vērojama tendence atšķirties vidēji blīvi un blīvi apdzīvotās vietās, lai atspoguļotu vidējās ātruma vērtības, kādas ir pieejamas vairumam valsts iedzīvotāju, kopējais mērījumu vietu skaits, kāds nepieciešams, lai nodrošinātu, ka ar 95 % ticamību izlases vidējā vērtība iekļausies uzdotajās kļūdas robežās no hipotētiskās kopas (jeb diennakts) vidējās vērtības, ir jāsadala proporcionāli iedzīvotāju skaitam. Tādējādi blīvi apdzīvotās vietās kopējais mērījumu vietu skaits būs lielāks, nekā pārējā valsts teritorijā. Lai mērījumu vietu skaitu vienmērīgi sadalītu attiecībā pret iedzīvotāju skaitu var tikt izmantots atbilstošs administratīvās teritorijas iedalījums, piemēram, NUTS-3 līmeņa teritoriālās vienības, atsevišķi nosakot nepieciešamo mērījumu vietu skaitu visvairāk apdzīvotās pilsētās valstīs. Tādā veidā atsevišķi var tikt aprēķināts nepieciešamais mērījumu vietu skaits katrā konkrētā visvairāk apdzīvotā pilsētā un reģionā kopumā. Pilsētas un reģiona

(ārpus šīm pilsētām) ietvaros mērījumu vietas var tikt brīvi izvēlētas, nodrošinot to vienmērīgu pārklājumu apdzīvotu teritoriju mērogā.

Līdz ar to sākotnēji mērījumu vietu skaits tiek sadalīts proporcionāli iedzīvotāju skaitam reģionos atbilstoši NUTS-3 līmeņa teritoriālajam iedalījumam:

$$n_{NUTS-3 \text{ reģionā}} = \frac{\text{Iedz. skaits}_{NUTS-3 \text{ reģionā}}}{\text{Kopējais iedz. skaits}} \cdot N, \text{ kur} \quad (4.13.)$$

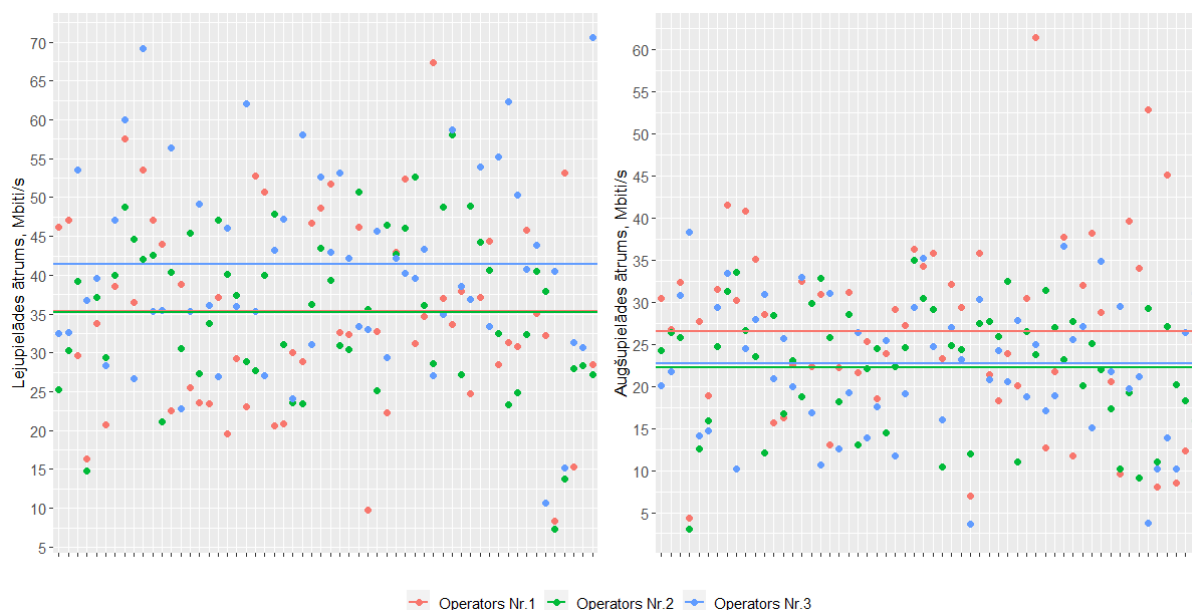
- N – kopējais nepieciešamais mērījumu vietu skaits, lai nodrošinātu, ka ar 95 % ticamību izlases vidējā vērtība iekļausies uzdotajās kļūdas robežās no hipotētiskās kopas vidējās vērtības;
- $n_{NUTS-3 \text{ reģionā}}$ – mērījumu vietu skaits attiecīgajā NUTS-3 reģionā.

4.13. tabula

Aprēķinātais mērījumu vietu skaits katrā Latvijas NUTS-3 reģionā no kopējā mērījumu vietu skaita, kāds nepieciešams, lai nodrošinātu, ka ar 95 % ticamību izlases vidējā vērtība iekļausies ± 2 Mbit/s kļūdas robežās no hipotētiskās kopas vidējās vērtības

Reģions	Iedzīvotāju skaits reģionā	Iedzīvotāju skaits reģionā proporcionāli kopējam Latvijas iedzīvotāju skaitam	Atbilstošais mērījumu vietu skaits reģionā
Rīgas reģions	627529	33 %	578
Pierīgas reģions	374369	20 %	345
Vidzemes reģions	183802	10 %	169
Kurzemes reģions	237250	12 %	218
Zemgales reģions	228365	12 %	210
Latgales reģions	255766	13 %	236
KOPĀ	1907081	100 %	1756

Viena reģiona ietvaros iedzīvotāju blīvums dažādās vietās ievērojami atšķiras un jo lielāka ir apdzīvotas vietas platība un iedzīvotāju skaits, jo plašākā diapazonā var atšķirties novērtētie pakalpojuma kvalitātes rādītāji, kas attiecīgi skar lielāku potenciālo lietotāju loku. Līdz ar to, objektīvam kopējo vidējo mērījumu rezultātu atspoguļojumam, jānodrošina, ka šādu apdzīvotu vietu teritorijās ir izvēlēts pietiekams mērījumu vietu skaits, tas ir, apdzīvotākajās reģionu pilsētās mērījumu vietu skaitam jābūt lielākam, nekā pārējā teritorijā.



4.25. att. Vidējā lejupielādes ātruma izkliede dažādos Rīgas mikrorajonos dažādu operatoru mobilajos tīklos 2020.gadā. Ar taisni apzīmēts kopējais vidējais pieslēguma ātrums Rīgas teritorijā.

Līdzīgā veidā var būt noteikts nepieciešamais mērījumu vietu skaits konkrētajā pilsētā, nosakot pilsētas iedzīvotāju skaita attiecību pret konkrētā NUTS-3 reģiona (kurā atrodas pilsēta) iedzīvotāju skaitu un, ņemot vērā kopējo nepieciešamo mērījumu vietu skaitu attiecīgajā NUTS-3 reģionā:

$$n_{pilsētā} = \frac{iedz.skait_{pilsētā}}{iedz.skait_{NUTS-3\ reģionā}} \cdot n_{NUTS-3\ reģionā} \quad (4.14.)$$

4.14. tabulā atspoguļots aprēķinātais mērījumu vietu skaits lielākajās Latvijas pilsētās.

4.14. tabula

Aprēķinātais mērījumu vietu skaits lielākajās Latvijas pilsētās, no kopējā mērījumu vietu skaita, kāds nepieciešams, lai nodrošinātu, ka ar 95 % ticamību izlases vidējā vērtība iekļausies ± 2 Mbit/s kļūdas robežās no hipotētiskās kopas vidējās vērtības

Pilsēta	Iedzīvotāju skaits pilsētā	Iedzīvotāju skaits pilsētā proporcionāli kopējam reģiona iedzīvotāju skaitam	Atbilstošais mērījumu vietu skaits pilsētā
Rīga	627529	100 %	578
Daugavpils	82061	32 %	76
Liepāja	68548	29 %	63
Jelgava	56146	25 %	52
Jūrmala	49662	13 %	46
Ventspils	33885	14 %	31
Rēzekne	27613	11 %	25
Valmiera	23042	13 %	21
Ogre	23150	6 %	21
Jēkabpils	21919	10 %	20

Pilsēta	Iedzīvotāju skaits pilsētā	Iedzīvotāju skaits pilsētā proporcionāli kopējam reģiona iedzīvotāju skaitam	Atbilstošais mērījumu vietu skaits pilsētā
Salaspils	17943	5 %	17
Tukums	16297	4 %	15
Cēsis	14885	8 %	14
Sigulda	14300	4 %	13
Olaine	13522	4 %	12
Kuldīga	11691	5 %	11
Bauska	11683	5 %	11
Saldus	11190	5 %	10
Dobele	9336	4 %	9
Talsi	9533	4 %	9
Kopā			1053

Attiecīgi atlikušais mērījumu vietu skaits reģionos var tikt vienmērīgi sadalīts reģiona teritorijas ietvaros, izvēloties piemērotu mērījumu vietu skaitu katrā teritoriālajā vienībā (piemēram, novadā) atbilstoši tā apdzīvotībai. Tā kā nav novērota korelācija starp iedzīvotāju blīvumu un skaitu un kvalitātes parametru mērījumu rezultātiem, tad mērījumu vietu sadalījums būtiski neietekmēs kopējās vidējās parametru vērtības.

4.15. tabula

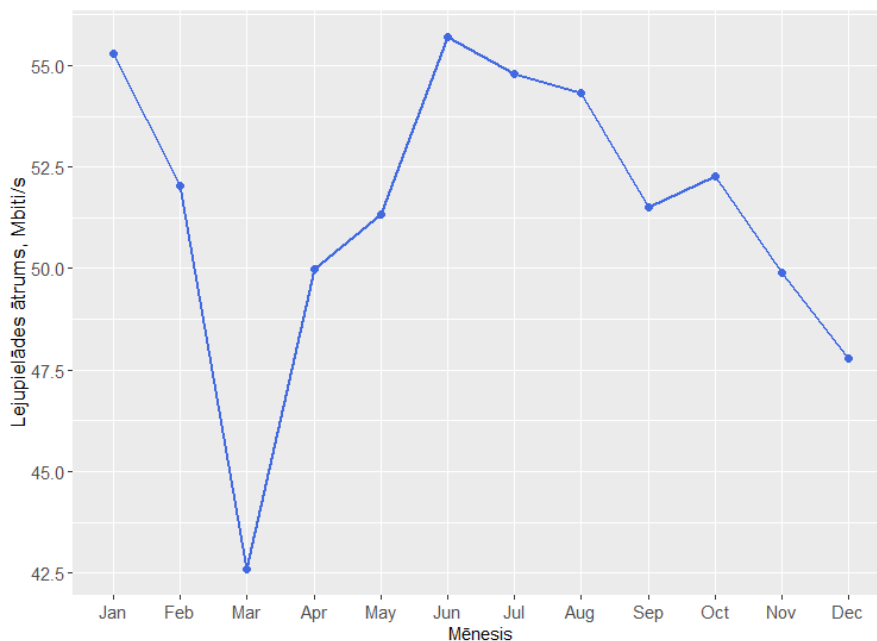
Aprēķinātais atlikušo mērījumu vietu skaits katrā Latvijas NUTS-3 reģionā un to procentuālais sadalījums attiecībā pret kopējo mērījumu skaitu reģionā

Reģions	Atlikušais mērījumu skaits reģionā	% no kopējā mērījumu skaita reģionā
Rīgas reģions	0	0 %
Pierīgas reģions	221	64 %
Vidzemes reģions	134	79 %
Kurzemes reģions	94	43 %
Zemgales reģions	119	57 %
Latgales reģions	135	57 %
KOPĀ	703	40 %

4.6. Mērījumu cikla atkārtojuma biežuma novērtējums

Lai novērtētu, cik bieži jāatkārto mērījumi, lai nodrošinātu, ka tie ir aktuāli un atspoguļo faktisko, nevis vēsturisko situāciju, tika izvērtēti vienā mērījumu vietā Rīgā 2020. gada laikā veikto ilgstošo diennakts mērījumu rezultāti, kas aptver vairāk nekā 21 tūkst. mērījumu, un Latvijas teritorijā veikto izlases mērījumu rezultāti, kas aptver laika periodu no 2015. līdz 2020. gadam, kurā kopumā veikti vairāk nekā 77 tūkst. mērījumu 5406 dažādās mērījumu vietās, tostarp 1028 vietās Rīgā. Tika izvērtēti ilgstošos mērījumos novērotā katra mēneša vidējā lejupielādes ātruma izmaiņu dinamika Rīgā, kā arī izlases mērījumu rezultātu sadalījums atsevišķi Rīgā un pārējā Latvijas teritorijā.

Izvērtējot vienā mērījumu vietā gada laikā veikto lejupielādes ātruma mērījumu rezultātus, secināms, ka kopumā gada periodā nav vērojamas būtiskas parametra rādītāju izmaiņas. Neskaitot gadījumus, kad vērojama netipiska interneta pakalpojuma izmantošana, kā piemēram, pieaugums interneta pakalpojuma pieprasījumā 2020. gada martā izsludinātās ārkārtas situācijas dēļ, kas rezultējās arī ievērojamā lejupielādes ātruma kritumā, salīdzinot ar pārējos mēnešos novērotiem rādītājiem (skat. 4.26. attēlu). Līdz ar to var secināt, ka kopumā gada laikā vienā teritoriālā vienībā novērtētie pakalpojuma kvalitātes rādītāji ir līdzvērtīgi, tāpēc noteikto mērījumu vietu skaitu ir nepieciešams aptvert vismaz viena gada periodā.

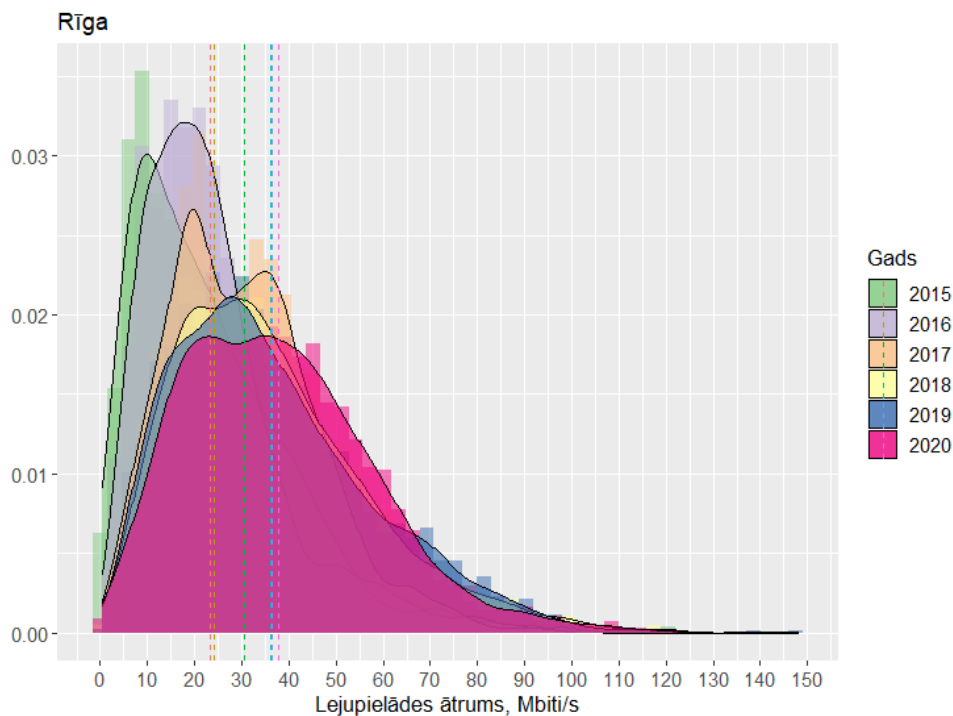


4.26. att. Vienā mērījumu vietā Rīgā novērtētā lejupielādes ātruma vidējās vērtības 2020. gada mēnešos

Tomēr jāņem vērā, ka mērījumu vietās, kur pakalpojuma kvalitātes rādītāji ir bijuši zemi, iespējama situācija, kad arī viena gada ietvaros situācija var mainīties mobilo operatoru veikto tīkla uzlabojumu dēļ. Šādas vietas ir jāizvērtē atsevišķi, tajā skaitā komunicējot ar mobilo operatoru, un gadījumā, ja ir konstatēts tīkla uzlabojumu veikšanas fakts, mērījumus nepieciešams atkārtot.

Lai novērtētu izmaiņu dinamiku vairāku gadu periodā, tika analizēti un salīdzināti mērījumu rezultāti sešu gadu periodā. Varbūtību blīvuma sadalījuma diagrammā atspoguļotie rezultāti liecina, ka Rīgā sešu gadu periodā lejupielādes ātruma vērtības ir paaugstinājušās mazāk strauji, nekā pārējā Latvijas teritorijā. Vidējais lejupielādes ātrums Rīgā ir paaugstinājies no 23,4 Mbit/s – 2015. gadā līdz 37,8 Mbit/s – 2020. gadā. Savukārt pārējā Latvijas teritorijā ir vērojams straujāks vidējo lejupielādes ātruma vērtību palielinājums: no 10 Mbit/s – 2015. gadā līdz 38,6 Mbit/s – 2020. gadā. Tādējādi var secināt, ka lielākās pilsētās ar lielāku iedzīvotāju skaitu, mobilās tehnoloģijas tiek izvērstas ātrāk un plašākā mērogā. Savukārt tad, kad plašā

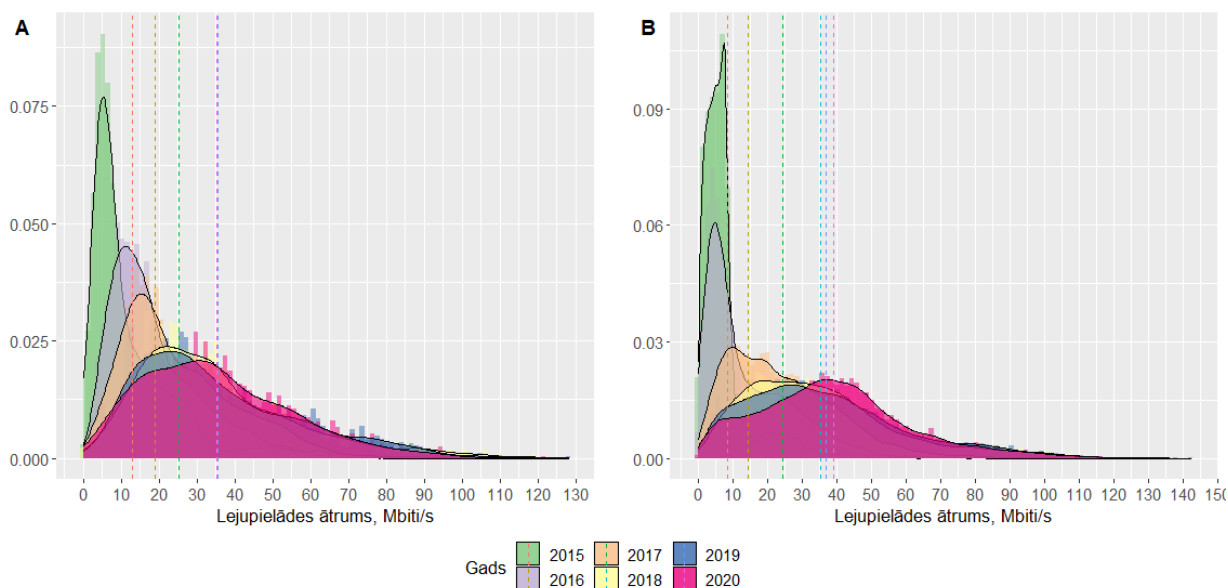
mērogā ir izvēsta jaunākā pieejamā tehnoloģija, pakalpojuma kvalitātes rādītāji tiek nodrošināti stabilā līmenī.



4.27. att. Lejupielādes ātruma mērījumu rezultātu sadalījuma blīvums un vidējās vērtības 2015. - 2020. gados Rīgas teritorijā

Rīgā pēdējo trīs gadu periodā vidējais lejupielādes ātrums ir nodrošināts praktiski vienāds, kā arī vērojams līdzvērtīgs lejupielādes ātruma sadalījums. Kopumā sešu gadu periodā vidējais lejupielādes ātrums Rīgā ir pieaudzis par aptuveni 60 %.

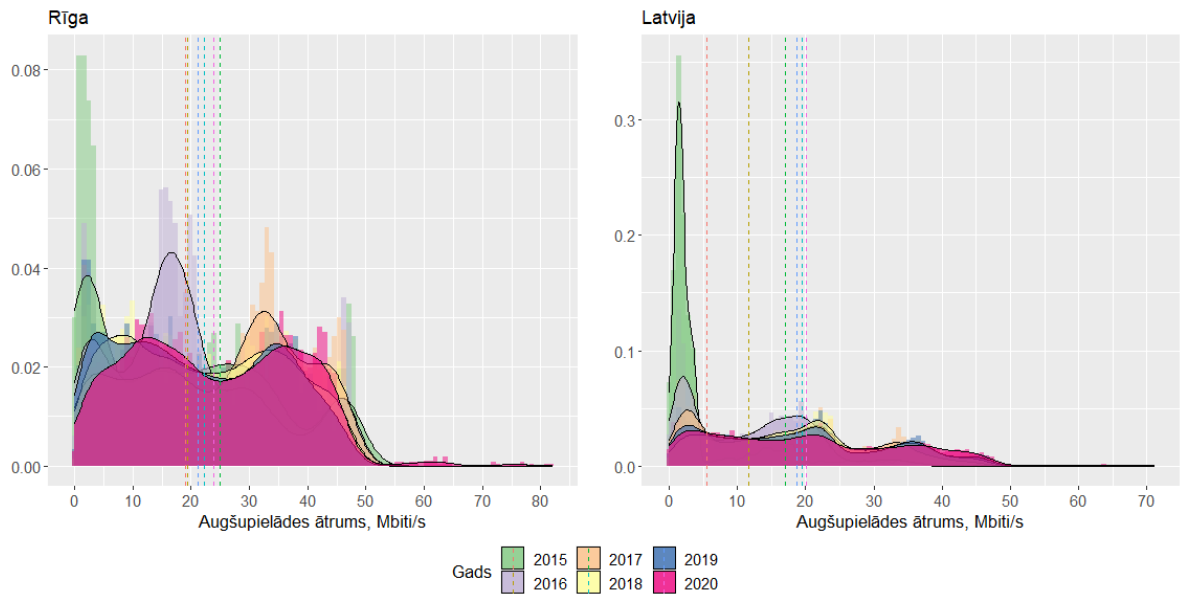
Analizējot mērījumu rezultātus pārējā Latvijas teritorijā, secināms, ka gan pārējās lielākajās Latvijas pilsētās, gan teritorijās ārpus šīm pilsētām, lejupielādes ātruma izmaiņu tendences sešu gadu periodā ir līdzvērtīgas. Vidējais lejupielādes ātruma šajās vietās kopumā ir pieaudzis par vairāk nekā 300 %, ka arī mērījumu rezultātu sadalījumā ir vērojamas izteiktas izmaiņas, kas norāda, ka sākot ar 2017. gadu arvien biežāk ir nodrošinātas lejupielādes ātruma vērtības, kas uzskatāmas par atbilstošām mūsdienu pakalpojumu lietošanas vajadzībām. Tādējādi, secināms, ka gan lielākajās Latvijas pilsētās (izņemot Rīgu), gan ārpus šīm pilsētām, mobilo tehnoloģiju izplatība notiek pakāpeniski un vairāku gadu periodā vērojamas krasas atšķirības nodrošinātajos lejupielādes ātruma rādītājos.



4.28. att. Lejupielādes ātruma mērījumu rezultātu sadalījuma blīvums un vidējās vērtības 2015. - 2020. gados (A) – Latvijas lielākajās pilsētās, izņemot Rīgu (vietās ar iedzīvotāju skaitu > 9000 cilvēki) un (B) pārējā Latvijas teritorijā (vietās ar iedzīvotāju skaitu < 9000 cilvēki)

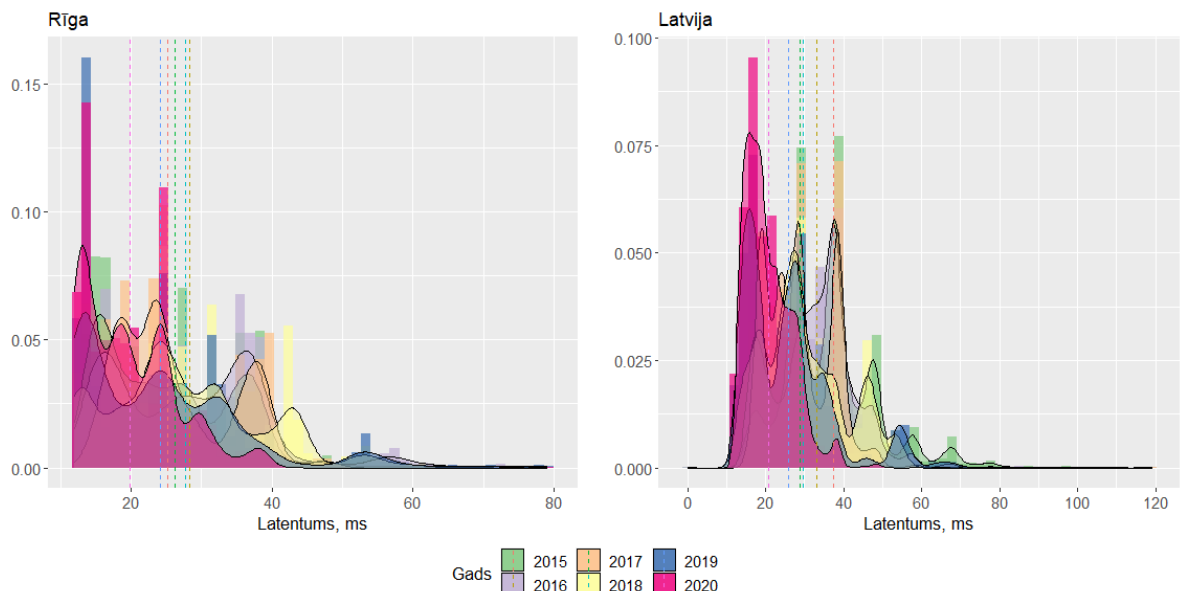
Līdz ar to secināms, ka valsts teritorijas ietvaros par optimālu ir uzskatāms atkārtot mērījumu ciklu reizi gadā. Galvaspilsētā un līdzvērtīga mēroga apdzīvotās vietās, kur tiek nodrošināta strauja un apjomīga mobilo tehnoloģiju izvēršana, mērījumu cikla atkārtojumu, kas ietver mērījumu vietu skaitu, kāds nepieciešams, lai nodrošinātu, ka ar 95 % ticamību izlases vidējā vērtība iekļausies uzdotās kļūdas robežās no hipotētiskās kopas vidējās vērtības, un to sadalījumu, nav nepieciešams atkārtot biežāk kā vienu reizi gadā. Tāpat ir iespējams samazināt mērījumu vietu skaita apjomu, piemērojot šajā vietā veikto mērījumu rezultātiem koeficientu, kas noteikts atbilstoši iedzīvotāju skaitam pilsētā, veicot kopējās vidējās lejupielādes ātruma vērtības valstī aprēķinu. Tomēr, ir nepieciešama papildus datu analīze, lai novērtētu šāda principa piemērotību un noteiktu atbilstošu koeficientu. Mazāk apdzīvotās teritorijās mērījumu ciklu nepieciešams atkārtot vismaz ik pēc gada, savukārt jaunas mobilās tehnoloģijas izvēršanas stadijā mērījumu cikls var būt atkārtots biežāk.

Augšupielādes ātruma vērtību sadalījums Rīgā kopumā sešu gadu periodā ir nodrošināts līdzvērtīgs, ar vidējo vērtību ap 20 Mbiti/s. Pārējā Latvijas teritorijā ir vērojams, ka kopš 2016. gada kopumā arvien retāk ir novērotas zemas augšupielādes ātruma rādītāju vērtības un kopš 2017. gada vidējais augšupielādes ātrums ir nodrošināts stabilā līmenī – ap 20 Mbiti/s.



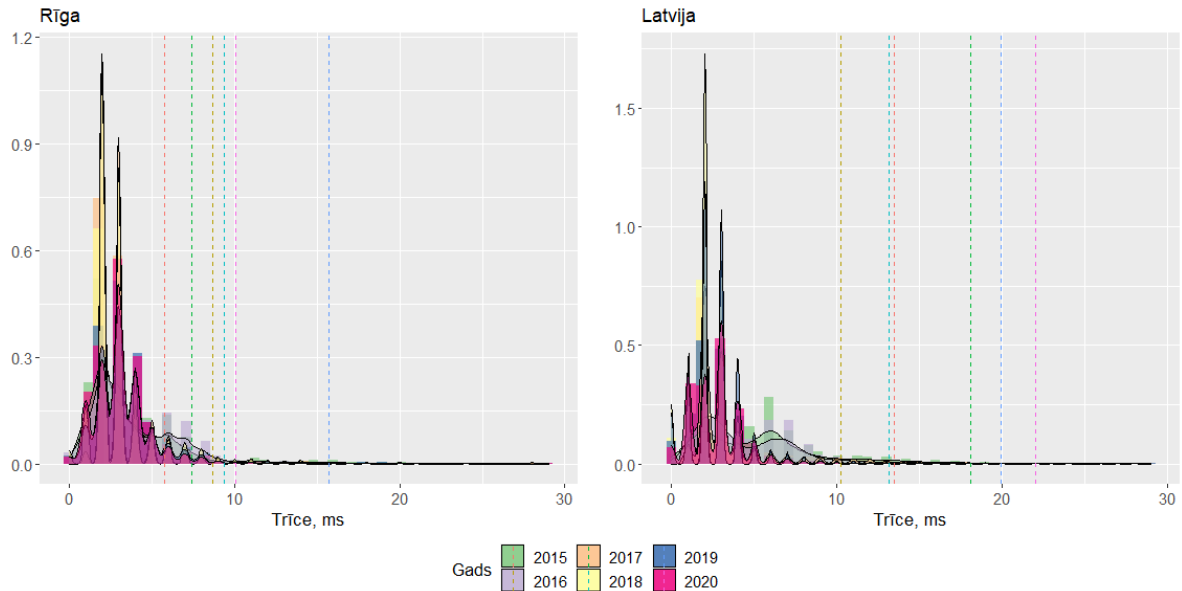
4.29. att. Augšupielādes ātruma mērījumu rezultātu sadalījuma blīvums un vidējās vērtības 2015. - 2020.gados (A) – Rīgā un (B) pārējā Latvijas teritorijā

Kopumā arī latentuma rādītāju vērtībās nav vērojamas krāsas izmaiņas. Ik gadu tiek nodrošināta arvien mazāka datu pārraides aizture. Īpaši tas vērojams salīdzinot rādījumus Rīgā un pārējā Latvijas teritorijā, kur iepriekšējos gados vidējās vērtība atšķīrās no rādītājiem Rīgā par līdz pat 12 ms (2015. gadā), bet ar katru gadu, rādītāji ir uzlabojušies un 2020. gadā atšķirība ir mazāka nekā 1 ms. Ņemot vērā, ka interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumu sistēmas serveris atrodas Rīgā, latentuma rādītāji Rīgas teritorijā ir bijuši zemāki.

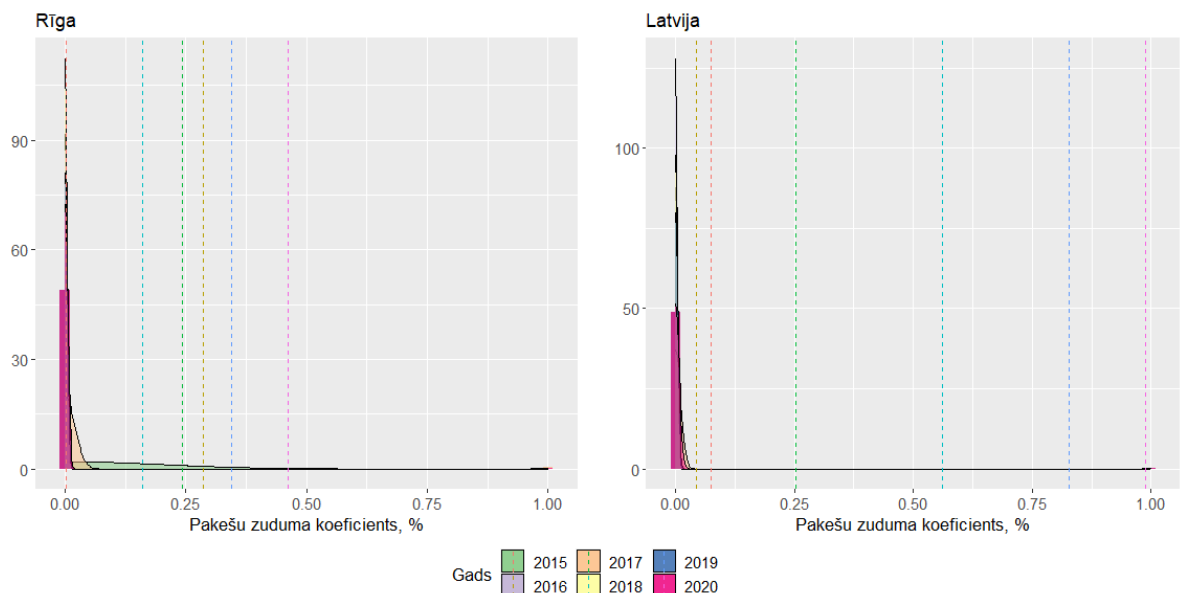


4.30. att. Latentuma mērījumu rezultātu sadalījuma blīvums un vidējās vērtības 2015. - 2020.gados (A) – Rīgā un (B) pārējā Latvijas teritorijā

Kā redzams no sadalījuma diagrammām, trīces un pakešu zuduma vērtībās sešu gadu periodā nav vērojamas krāsas izmaiņas. Tāpat ir uzskatāmi atspoguļots, cik lielā mērā dažas netipiskas izlēcējvērtības var ietekmēt vidējos rādītājus. Tāpēc, analizējot šo parametru mērījumu rezultātus, ir būtiski izslēgt no aprēķiniem izlēcējvērtības.



4.31. att. Trīces mērījumu rezultātu sadalījuma blīvums un vidējās vērtības 2015. - 2020.gados (A) – Rīgā un (B) pārējā Latvijas teritorijā



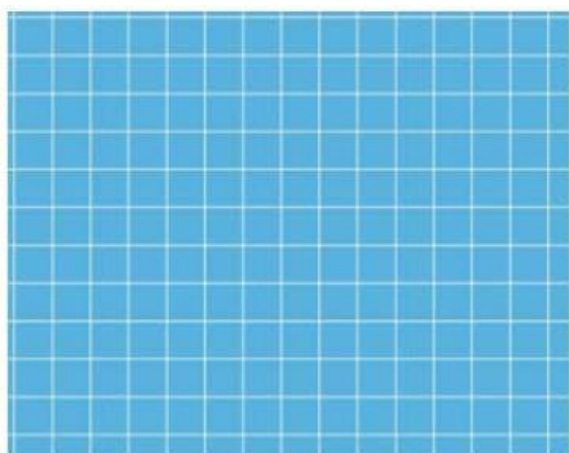
4.32. att. Pakešu zuduma koeficienta mērījumu rezultātu sadalījuma blīvums un vidējās vērtības 2015. - 2020.gados (A) – Rīgā un (B) pārējā Latvijas teritorijā

Līdz ar to, izvērtējot iegūtos rezultātus, secināms, ka augšupielādes ātruma, latentuma, trīces un pakešu zuduma koeficienta parametru mērījumiem ir piemērojamas lejupielādes ātruma mērījumiem definētās metodes.

Šāda principa piemērošana nodrošina to, ka mērījumu rezultāti atspoguļo vairumam iedzīvotāju pieejamos kvalitātes rādītājus, kā arī nodrošina blīvu faktisko interneta pakalpojuma kvalitātes rādītāju atspoguļojumu teritorijās ar vislielāko iedzīvotāju skaitu. Tomēr šāda pieeja nav piemērojama, novērtējot tīklu izplatību un to veiktspēju reti apdzīvotās vietās, tāpēc šīm vajadzībām ir nepieciešams nodrošināt papildu mērījumus, kuros mērījumu vietas jāizvēlas atbilstoši ģeogrāfiskā apsekojumā konstatētajām nepietiekama platjoslas pārklājuma teritorijām, kā arī teritorijām, kurās platjoslas pieejamība ir būtiska sabiedrības vai uzņēmējdarbības vajadzībām.

4.7. Teritoriju ar nepietiekamas platjoslas interneta pārklājumu identificēšana

Kā jau minēts platjoslas interneta pakalpojuma pieejamība ir kartējama dažādos veidos atkarībā no tīkla veida. Fiksētā platjoslas pakalpojuma kartēšana ir paredzēta atbilstoši konkrētos adrešu punktos nodrošināmam pakalpojumam, savukārt mobilās platjoslas kartēšana paredzēta, nodrošinot informāciju par pakalpojuma pieejamību 100 m × 100 m režģa dalījumā. Tā kā ģeogrāfiskā apsekojuma informācija ir izmantojama dažādiem nolūkiem un paredzēta atšķirīgam lietotāju lokam, tad šādā mērogā apkopotu datus ir uzskatāma par pietiekami informatīviem.



Režģa mērogs



Adrešu punkti

4.33. att. Ģeogrāfiskā apsekojuma rezultātu kartēšanai paredzētais teritoriālais dalījums;
Avots: BEREC [26]

Viens no ģeogrāfiskā apsekojuma svarīgākajiem iemesliem ir plānot tīklu turpmāku attīstību un veikt atbilstošus ieguldījumus, kas tostarp ir būtiski universālā pakalpojuma pieejamības veicināšanai. Īpaši nozīmīgi tas ir, piemērojot valsts atbalsta programmas. Līdz ar to, lai nodrošinātu, ka platjoslas attīstībai novirzītais finansējums tiek lietderīgi izlietots, nepieciešams identificēt tās teritorijas, kurās platjoslas internets nav izvērsts pietiekamā apmērā.

Ievērojot Eiropas stratēģijās noteikto, par pamatu atbilstīgas platjoslas identificēšanai ir izvirzītas nodrošināmās pieslēguma ātruma vērtības, kā arī tīkla veiktspējas atbilstība ļoti augstas kapacitātes tīklu (VHCN) prasībām. Ņemot vērā Eiropas stratēģisko mērķi, ka līdz 2025. gadam visām Eiropas mājsaimniecībām gan laukos, gan pilsētās jābūt pieejamam interneta pieslēgumam ar vismaz 100 Mbiti/s lejupielādes ātrumu, ko var uzlabot līdz gigabitu ātrumam, ir izvēlēti atbilstoši pieslēguma ātruma kritēriji. Pamatojoties uz šiem apsvērumiem ir izstrādāts vispārīgs algoritmu nepietiekama platjoslas pārklājuma teritoriju noteikšanai.

Papildus ģeogrāfiskā apsekojuma nodrošināšanai Eiropas Elektronisko sakaru kodekss paredz prasību izveidot salīdzināšanas rīku, kurā galalietotājiem būs pieejama informācija par sniegto pakalojumu tehniskajiem parametriem un tarifiem. Tā kā līdzvērtīga informācija ir izmantojama gan ģeogrāfiskā apsekojuma, gan salīdzināmības rīka vajadzībām, kā arī šādas informācijas ievākšana paredz ievērojamu komersanta resursu novirzīšanu tās sagatavošanai, datu ievākšanas kampaņu būtu nepieciešams veikt vienoti, vai arī paredzot iespēju informācijas klāstu papildināt, bez strukturālām datu iesniegšanas izmaiņām. Līdz ar to īstenojot minēto prasību ieviešanas modeli jāņem vērā daži aspekti, lai ievāktie dati būtu izmantojami noteiktajos šķērsgriezumos:

- 1) Ģeogrāfiskā apsekojuma rezultātu un salīdzināmas informācijas par sniegtajiem pakalpojumiem atspoguļošana aptver līdzvērtīgu informācijas klāstu, bet ir paredzēta dažādiem mērķiem, tāpēc ir atspoguļojama atsevišķi. Tomēr, lai optimāli izmantotu resursus, kā arī, lai nodrošinātu pilnīgu informāciju investīciju plānošanai, šādai informācijai ir jābūt nodrošinātai vienas sistēmas ietvaros.
- 2) Tehnoloģiskā ziņā identisks pakalpojums var tikt piedāvāts atšķirīgu tarifu plānu ietvaros, līdz ar to vienā ģeogrāfiskā punktā atkarībā no lietotāju pieprasījuma tiek nodrošināts plašs pakalpojuma tarifu klāsts. Ģeogrāfiskā apsekojuma mērķis ir nodrošināt platjoslas attīstības un izplatības līmeņa novērtējumu, tādējādi tam ir jāsaturs informāciju par katra interneta pakalpojuma sniedzēja iespējamā pieslēguma maksimāliem raksturlielumiem konkrētā vietā. Savukārt salīdzināšanas rīka mērķis ir sniegt salīdzināmu informāciju par visdažādākajiem pieejamiem pakalpojumiem (gan par interneta piekļuves pakalpojumu, gan strappersonu saziņas pakalpojumu) un to tarifiem konkrētā vietā. Līdz ar to ģeogrāfiskā apsekojuma un salīdzināšanas rīka informācija ir publicējama atšķirīgos modeļa līmeņos.
- 3) Ģeogrāfiskā apsekojuma ietvaros ir noteikts informācijas līmenis, kas minimāli ir jāievāc, piemēram, pieslēguma tehnoloģija, pieslēguma ātrums u.c. Turklāt fiksētā pieslēguma gadījumā atsevišķi norādāms maksimālais ātrums un sagaidāmais ātrums lielākajās noslodzes stundās. Tā kā ģeogrāfiskā apsekojuma informācija satur lielu datu apjomu, to atspoguļošana ir jāveic pārskatāmā un viegli salīdzināmā formātā, piemēram, kartes veidā, kurā adrešu punkti tiek iekrāsoti atkarībā no izvēlētās metrikas. Visuzskatāmāk platjoslas attīstību var atspoguļot ar konkrētā adresē pieejamā pieslēguma ātruma diapazonu dažādu tehnoloģiju pieslēgumiem. Līdz ar to ir jāizvērtē,

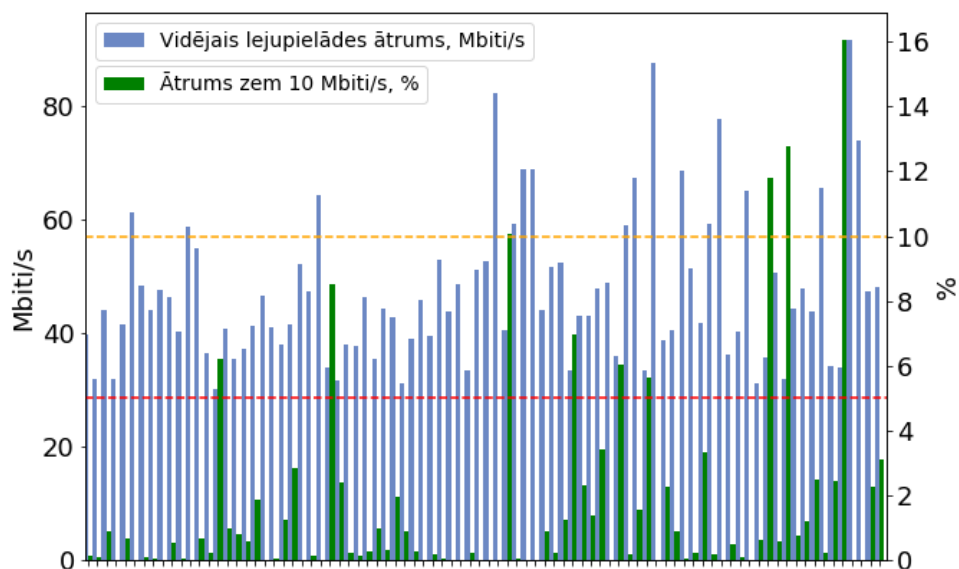
kurš ātrums (maksimālais vai lielākajās noslodzes stundās sagaidāmais) tiks izmantots šim atspoguļojumam. Ņemot vērā, ka lielākajās noslodzes stundās sagaidāmais ātrums var būt atkarīgs tostarp no komersanta lietotāju skaita, komerciāliem nosacījumiem u.c. apstākļiem, šāda griezuma dati var neatspoguļot pilnīgu un salīdzināmu informāciju par platjoslas attīstību. Tāpēc secināms, ka platjoslas attīstības informācijas sniegšanai ir lietderīgāk izmantot maksimālo ātruma diapazonu, kāds ir pieejams konkrētā adreses punktā. Savukārt normatīvajos aktos ir jāparedz lielākajās noslodzes stundās pieejamā pieslēguma ātruma maksimālā procentuālā novirze no maksimālā ātruma.

- 4) Paredzēts, ka sākotnēji ģeogrāfiskā apsekojuma ietvaros ievāktie dati atspoguļo QoS-1 jeb teorētisko informāciju par pakalpojumu kvalitāti. Fiksēto pieslēgumu gadījumos tas nerada grūtības, jo pie definētām prasībām attiecībā uz minimālo kvalitātes līmeni (piemēram, ātruma maksimālā iespējamā novirze no maksimālā norādītā ātruma), kā arī, ņemot vērā fiksētā interneta pieslēguma ātruma salīdzinošo stabilitāti, arī teorētiskā informācija nodrošina pietiekami uzskatāmu un skaidru informāciju par pieejamo kvalitātes līmeni. Mobilo pieslēgumu gadījumos informācija par sasniedzamajām pieslēguma ātruma vērtībām atspoguļo teorētiskās aplēses un neraksturo faktisko pakalpojuma kvalitātes līmeni. Tomēr šāda informācija ir būtiska, gan novērtējot platjoslas tīklu izplatību un veiktspēju, gan sniedzot lietotājiem jēgpilnu un saprotamu potenciālā pakalpojuma kvalitātes atspoguļojumu. Līdz ar to mobilā interneta pakalpojuma atspoguļošanu gan ģeogrāfiskā apsekojuma, gan pakalpojumu salīdzināšanas iespējas nodrošināšanas ietvaros jāveic arī QoS-2 līmenī.

Tādējādi paredzams, ka katrs komersants sniedz informāciju par visiem noteiktā teritoriālā vienībā nodrošināmā interneta pakalpojuma veidiem. Tas ir, katrs komersants norāda visas tehnoloģijas, kādas ir nodrošinātas konkrētajā teritoriālās vienības punktā, kā arī visus nodrošināmos pieslēguma ātruma diapazonus. Līdz ar to, izstrādājot salīdzināšanas rīku, arī vēlākā posmā komersantu tarifu informāciju būs iespējams attiecināt pret pakalpojuma tehniskiem parametriem. Līdz ar to komersantu iesniegtās informācijas klāsts ietvertu datus par konkrētā teritoriālās vienības punktā (adresē vai 100 m × 100 m poligonā) ļoti augstas kapacitātes tīkla pārklājumu, nodrošināmo tehnoloģiju, kā arī maksimālā pieslēguma ātruma diapazonu (skat. 1.3. tabulu 35. lpp.).

Lai novērtētu nepietiekama platjoslas pārklājuma teritorijas, ir nepieciešams izveidot datu slāni, kurš saturēs informāciju ar augstākiem iespējamiem rādītājiem par katru teritoriālās vienības punktu. No lietotāju viedokļa tehnoloģiskajam platjoslas interneta nodrošinājumam ir nozīmē, jo fiksētā tīklā interneta pakalpojuma rādītāji tiek nodrošināti stabilāki un ar garantētām vērtībām. Tomēr no tīkla attīstības nepieciešamības un investīciju plānošanas viedokļa, vietās, kur ir stabils mobilā tīkla pārklājums un interneta pakalpojuma kvalitātes rādītāji var būt novērtēti, kā atbilstoši dažādām pakalpojuma lietošanas vajadzībām, nav nepieciešamības ieguldīt fiksēto tīklu izvēršanā. Tāpat, vietās ar zemu iedzīvotāju blīvumu, lietderīgāk ir plānot mobilo tīklu attīstību.

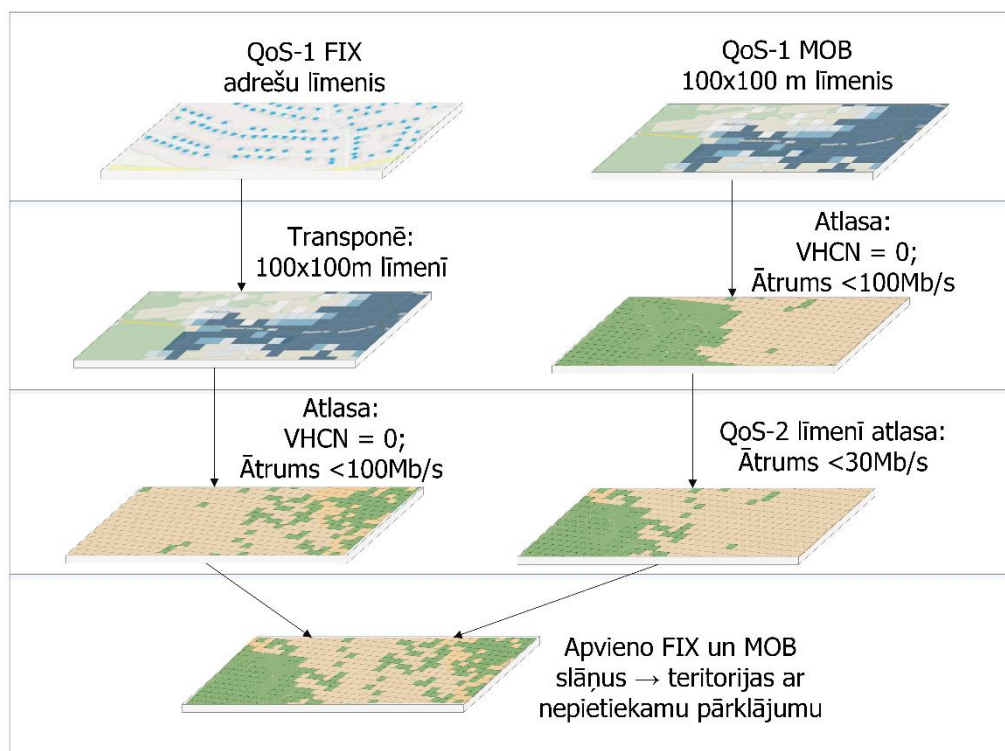
Tomēr, tā kā mobilajos tīklos interneta pakalpojuma stabilitāte un kvalitātes parametru vērtības nevar būt garantētas, tad papildus komersantu sniegtajai informācijai ir nepieciešams izvērtēt arī faktisko tīkla veiktspēju. Veicot pētījumus, tika novērots, ka līdz 10 % mērījumu vietu faktiskais tīkla pārklājums neatbilda komersantu pārklājuma kartēs norādītajai informācijai. Turklāt iespēja, ka teorētiskie kvalitātes parametru rādītāji atšķirsies no reālajiem ir vēl lielāka. Līdz ar to, veicot mobilā platjoslas interneta pieejamību, jāņem vērā ne tikai komersantu iesniegtie dati, bet jāveic papildus eksperimentālie mērījumi, kurus nepieciešams atspoguļot atsevišķā ģeogrāfiskā apsekojuma rīka slānī un izvērtēt, nosakot teritorijas ar nepietiekamu platjoslas pārklājumu. Lai noteiktu kritērijus QoS-2 līmenī novērotiem pieslēguma ātruma rādītājiem, tika veikta mērījumu datu analītika. Tika izvērtēti pieslēguma ātruma mērījumu rezultāti, kas iegūti, veicot ilgstošus mērījumus (diennakts laikā vismaz vienas nedēļas periodā) 43 dažādās vietās Latvijas teritorijā, trīs Latvijas mobilo operatoru 4G pieslēguma tehnoloģijas tīklos, kopumā veicot vairāk nekā 394 tūkst. mērījumu. Izvērtējot mērījumu rezultātus secināts, ka 67 % mērījumu vietu vidējais lejupielādes ātrums bija virs 30 Mbit/s. Tika novērtēts, cik bieži vietās, kur vidējais lejupielādes ātrums pārsniedz 30 Mbit/s, ir novērots lejupielādes ātruma samazinājums zem 10 Mbit/s. Secināts, ka vien 7 % no tām vietām, kur vidējais lejupielādes ātrums ir bijis 30 Mbit/s, tā pazeminājums zem 10 Mbit/s ir vērojams biežāk nekā 5 % no visiem mērījumiem. Turklāt vairumā gadījumu lejupielādes ātruma vērtības zem 10 Mbit/s tika novērotas ne vairāk kā 10 % no visiem mērījumiem.



4.34. att. Vidējā lejupielādes ātruma virs 30 Mbit/s salīdzinājums ar mērījumu procentuālo skaitu ar lejupielādes ātruma vērtībām zem 10 Mbit/s katrā mērījumu vietā katra mobilo operatora tīklā

Līdz ar to, izvērtējot mērījumu rezultātus, par QoS-2 līmeņa kritēriju platjoslas pārklājuma esamībai var būt pieņemta vidējā pieslēguma ātruma vērtība ne mazāka kā 30 Mbit/s, kas novērtēta, veicot praktiskus mērījumus noteiktā teritoriālā vienībā.

Tādējādi, izvērtējot platjoslas pārklājuma nodrošinājumu mobilajā tīklā, papildus komersantu norādītajam, ka teritorija atbilst ļoti augstas kapacitātes tīklu (VHCN) veiktspējai, kā arī, ka teritorijā tiek nodrošināts pieslēguma ātrums virs 100 Mbit/s, dati ir jāsalīdzina ar praktiski veiktajiem mobilā interneta mērījumiem, un gadījumā, ja mērījumos novērtētais vidējais pieslēguma ātrums tiek nodrošināts zemāks par 30 Mbit/s, ir jāveic padziļināts interneta pakalpojuma kvalitātes novērtējums šajā teritorijā.



4.35. att. Algoritms teritoriju ar nepietiekamu platjoslas pārklājumu noteikšanai, pamatojoties uz ģeogrāfiskā apsekojuma datiem

Pamatojoties uz 4.35. attēlā atspoguļoto algoritmu, tiek atlasītas teritorijas, kurās nav izvērstas pietiekamas kvalitātes platjoslas internets. Lai tālāk identificētu teritorijas, kurās ir nepieciešams veikt platjoslas tīklu izbūvi vai uzlabojumus, pēc šo datu atlasīšanas ir nepieciešams veikt padziļinātu analītiku. Tas ietver, pirmkārt, nepieciešamību definēt finansiālo ieguldījumu apmēru, kuri uzskatāmi par samērīgiem pakalpojuma ierīkošanai vietās, kur tas pašlaik nav pieejams (tā saukto saprātīgo cenu, piemēram, lietotājam pieprasot šo pakalpojumu ierīkot tam nepieciešamajā vietā). Otrkārt, ir jānovērtē, cik lielā attālumā no esošās tīkla infrastruktūras ir iespējams ierīkot pakalpojumu par definēto saprātīgo cenu. Treškārt, jāizvērtē, kurās no tām vietām, kur pašlaik pakalpojums nav nodrošināts un kur to nav iespējams ierīkot par definēto saprātīgo cenu, potenciāli ir vislietderīgāk izvērst platjoslas tīklu

infrastruktūru. Attiecīgi no tā var tikt izvirzīta teritoriālā prioritāte tīklu izvēršanai, kā arī tehnoloģijas, kuras tiks izmantotas platjoslas tīklu nodrošināšanai (piemēram, vietas, kuras identificētas, kā sabiedrībai nozīmīgas, vai kurās ir apliecināta nepieciešamība pēc garantētas kvalitātes pieslēguma). Ceturtkārt, ir jāveic izpēte par vietām, kur komersanti plāno vai ir uzsākuši tīklu attīstību.

Papildus valsts atbalsta programmu piemērošanai platjoslas tīklu izvēršanai, šāda apkopota informācija ir noderīga arī komersantiem, plānojot tīklu attīstību, un uzņēmējdarbībai, ieviešot jaunu digitālus pakalpojumus. Lietotājiem šādā griezumā informācija pamatā nav saistoša, tāpēc lietotāju vajadzībām, nepieciešams apkopot informāciju citā rīka slāni, norādot par katrā adresē vai teritoriālā vienībā pieejamā interneta pakalpojuma tehnoloģijām, kvalitātes rādītājiem un cenām. Respektīvi, šādā griezumā sniegta informācija nodrošinātu salīdzināšanas rīkam noteikto prasību izpildi, ļaujot lietotājam izvēlēties piemērotāko un izdevīgāko no viņam pieejamajiem pakalpojumiem.

5. ALTERNATĪVU FAKTISKO INTERNETA PAKALPOJUMA KVALITĀTES RĀDĪTĀJU NOVĒRTĒŠANAS IESPĒJU NOVĒRTĒJUMS

Aktīvie interneta pakalpojuma mērījumi, kas veikti, ievērojot mērījumiem definēto metodiku, nodrošina objektīvu informāciju par lietotājiem pieejamo faktisko datu pārraides ātrumu un ļauj apstiprināt teorētisko kvalitātes novērtējumu patiesumu. Tomēr ņemot vērā, ka aktīvo mērījumu veikšanai ir nepieciešams finansiālais un cilvēku resurss, tad, lai nodrošinātu faktisko kvalitātes parametru novērtējumu plašā mērogā (ik pēc 100x100 metriem), it īpaši mazāk apdzīvotās vietās, var tikt izmantotas pasīvās testēšanas metodes. Ņemot vērā aptveramo teritorijas platību, šādiem testiem ir jānotiek bez papildu iekārtu iestatīšanas lietotāja pusē, kā arī neprasot lietotājam veikt darbības testēšanas uzsākšanai. Šāda funkcionalitāte ir paredzēta 3GPPP specifikācijā 37.320, kas paredz radio parametru mērījumu apkopošanu lauka mērījumu minimizēšanai (*angl. – Minimization of Drive Test, MDT*) [92].

MDT paredz mobiliem operatoriem iespēju ielasīt radio parametru mērījumus, izmantojot lietotāja galiekārtu, piemēram, viedtālruni, un mērījumu rezultāti tiek ielasīti kopā ar GPS atrašanās vietas koordinātām. [94][95][96] MDT nodrošina to, ka lietotāja galiekārta periodiski vai arī pēc pieprasījuma signalizācijas fāzes laikā augšupielādē mērījumu atskaites, tādējādi nav nepieciešama papildu programmatūras instalēšana galalietotāju ierīcē, kā arī viņiem netiek radītas papildu izmaksas. [92][93][96][97] Lietotāju galiekārtu un radio piekļuves tīkla (RAN) ziņotie MDT dati var tikt izmantoti, lai uzraudzītu un atklātu tīkla pārklājuma problēmas, kā arī, lai pārbaudītu pakalpojuma kvalitātes QoS rādītājus, novērtētu lietotāju pieredzi no radio piekļuves tīkla RAN viedokļa un palīdzētu tīkla kapacitātes palielināšanā [92]. Attiecībā uz pakalpojumu kvalitāti QoS, MDT paredz funkcionalitāti, kas, izmantojot lietotāja galiekārtu, ļauj novērtēt šī lietotāja pieredzēto pakalpojumu kvalitāti (t.i., caurlaidspēju, latentumu, pakešu zudumu) un analizēt to ģeogrāfiskā mērogā, iegūstot mērījumu rezultātus kopā ar lietotāja galiekārtas atrašanās vietu [92]. Tādējādi var tikt apkopota informācija par faktisko lietotājam pieejamās caurlaidspējas un savienojamības aspektiem [94]. Tāpat MDT paredz drošības aspektus, kurus ir jāievēro mobilajiem operatoriem. Lai darbinātu MDT un izmantotu lietotāja galiekārtu mērījumu datu ievākšanai, mobiliem operatoriem ir jāsaņem lietotāja piekrišana [92][94][95]. Turklāt ir jāizvēlas atbilstošs mērījumu skaits un KPI kopums, lai tīkla resursi un lietotāja iekārtas baterija netiktu nelietderīgi izmantoti [99]. Tāpat ir paredzēta MDT datu anonimizācija [94].

Kā priekšrocību var novērtēt to, ka MDT izmanto reālo datplūsmu, ko ģenerē lietotāji, tādējādi neradot papildu slodzi tīklam, salīdzinot ar aktīvajiem testiem, kur tīklā tiek ievadīta papildu datplūsma. Tomēr šīs metodes trūkums, kā jau pasīvajiem testiem raksturīgs, ir tas, ka nevar viennozīmīgi apgalvot, vai pārraidītās datplūsmas apjoms ir atkarīgs no savienojuma kapacitātes vai no lietotāja izvēles.

5.1. Vispārīgs MDT darbības principa apskats

No tīkla signalizācijas perspektīvas pastāv divi MDT veidi, atkarībā no kuriem tiek veikti mērījumi: signalizācijas balstīts MDT (*Signaling-based MDT*) un vadības/apgabala balstīts MDT (*Management/area-based MDT*). Signalizācijas balstīts MDT tiek izmantots, lai ievāktu mērījumus no konkrētas lietotāja galiekārtas, ko nodrošina OAM, izvēloties lietotāju galiekārtas ar unikālu identifikatoru. Šajā gadījumā OAM nosūta MDT iestatījumu parametrus uz HSS, kurš izvērtē, vai MDT aktivācija izvēlētajā lietotāja galiekārtā ir atļauta. HSS nosūta MDT konfigurāciju caur CN un RAN mezglu uz lietotāja galiekārtu. Vadības/apgabala balstīts MDT tiek izmantots, lai ievāktu mērījumu rezultātus no nejaušā kārtā izvēlētajām lietotāju galiekārtām vai galiekārtu grupām, kas atrodas noteiktā ģeogrāfiskā apgabalā. Aplūkojamais ģeogrāfiskais apgabals tiek attiecīgi definēts kā šūnu saraksts vai kā izsekošanas/maršrutēšanas/atrašānās vietas apgabalu saraksts. Šāda izmantošanas veida gadījumā MDT aktivācija tiek tieši pārsūtīta no OAM uz RAN mezglu, kurš atlasa lietotāju galiekārtas noteiktajā apgabalā. [95][98]

No radio iestatījumu perspektīvas, pastāv divi MDT mērījumu veikšanas režīmi: reģistrētais MDT (*angl. – Logged MDT*) un tūlītējs MDT (*angl. – Immediate MDT*). Reģistrētā MDT režīms tiek izmantots mērījumiem, kad lietotāja galiekārta atrodas dīkstāves stāvoklī (lietotāja galiekārtai nav iestatīts savienojums ar RAN mezglu). Šajā gadījumā lietotāja galiekārta noteiktā laika periodā ievāc datus un vēlāk tos ziņo tīklam. Reģistrētā MDT režīmā veiktie mērījumi ir būtiski, piemēram, lai konstatētu pārklājuma neesamību un tīkla nepieejamību, kad lietotāja galiekārtai nav savienojuma ar tīklu. Tūlītējā MDT režīma gadījumā mērījumi ir atļauti tikai esoša savienojuma stāvoklī un mērījumu rezultāti tiek nekavējoties ziņoti tīklam. Tomēr reģistrētā MDT režīms ir opcionāla iespēja, tajā laikā kad tūlītējā MDT režīms ir obligāti atbalstāms lietotāja galiekārtā. [94][95][98][100]

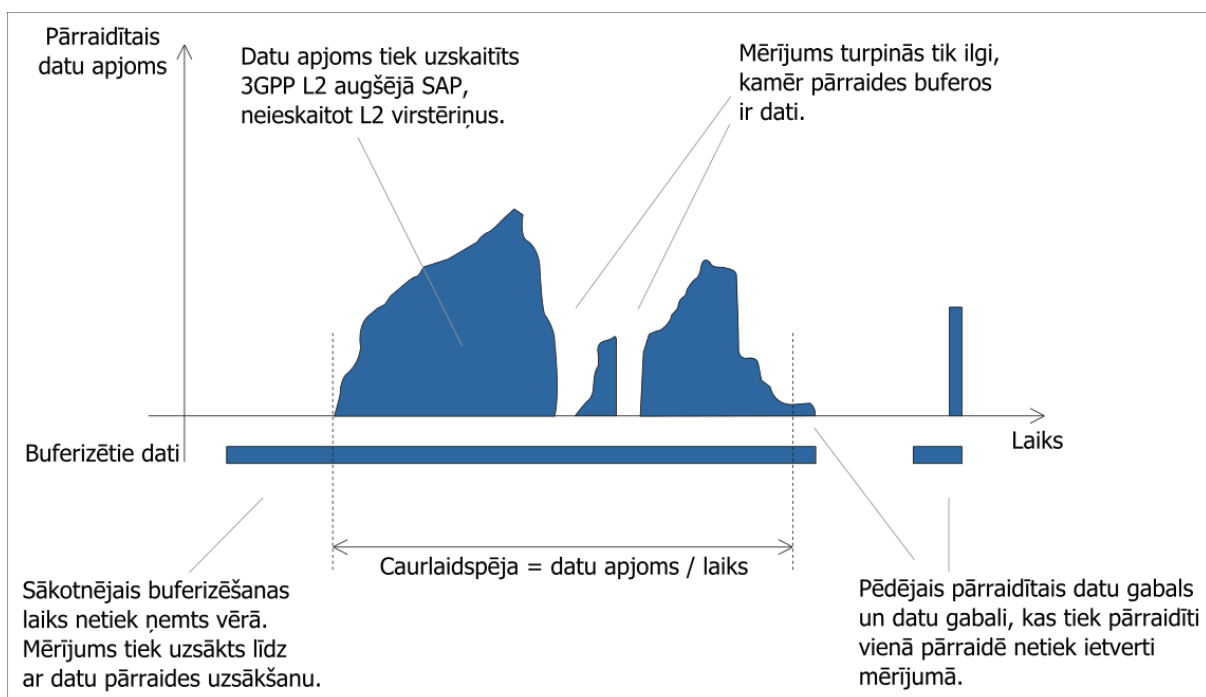
Standarts atļauj jebkādas kombinācijas starp iepriekš minētajiem MDT režīmiem [95][98]. MDT konfigurāciju parametru apakškopa ir sekojoša [93][98]:

- Mērījumu saraksts, kas nosaka, kādiem mērījumiem ir jābūt ievāktiem (piemēram, datu apjoms, caurlaidspēja, RSCP, RSRP u.c.);
- Ziņošanas trigeris, kas nosaka, vai mērījumu atskaitei ir jābūt veidotai periodiski vai, pamatojoties uz noteiktu notikumu;
- Ziņojumu intervāls, kas nosaka intervālu periodiskai ziņošanai no 120ms līdz 1h.
- Ziņojumu skaits, kas nosaka, cik daudz mērījumu atskaitēm ir jābūt izveidotām;
- Notikuma priekšnoteikums, kas nosaka priekšnoteikumu uz notikumu balstītai ziņošanai;
- Reģistrēšanas intervāls, kas nosaka reģistrēšanas periodiskumu reģistrētam MDT;
- Reģistrēšanas ilgums, kas nosaka, cik ilgu laiku MDT iestatījumi ir spēkā;
- Apgabala aptvere, kas nosaka, kurā ģeogrāfiskā apgabalā jāīsteno MDT;
- TCE ID, kas ir identifikators, kurš RAN mezglā var būt pārveidots par TCE IP adresi;

- MDT datu anonimizācija, kas nosaka, vai mērījumu rezultāti tiek saglabāti kopā ar IMEI-TAC (norāda mobilās ierīces modeli) vai neietverot lietotāja informāciju;
- Pozicionēšanas metode, kas norāda, vai galiekārtas pozicionēšanai jābūt izmantotai GNSS vai E-Cell ID.

5.2. MDT caurlaidspējas mērījumu novērtējums

Lielākā atšķirība starp tradicionāliem aktīviem mērījumiem un MDT ir tāda, ka tradicionālajos mērījumos tiek izmantotas kontrolējamās lietojumprogrammas ar zināmām datplūsmas raksturīpašībām, savukārt MDT izmanto parasto lietotāja datplūsmu, kuras raksturīpašības lielā mērā nav zināmas. MDT caurlaidspējas mērījums ir paredzēts, lai nodrošinātu rezultātus, kas ir salīdzināmi ar lauka mērījumu iegūtajiem rezultātiem, mērot IP caurlaidspēju ar pastāvīgi piepildītu pārraides buferi [94]. Mērot lietojumprogrammu līmenī, caurlaidspējas mērījumu rezultāti var atšķirties, atkarībā no pārraidīto datu izmēra. Maza un vidēja izmēra datu pārraides gadījumā caurlaidspējas mērījumu var ievērojami ietekmēt sākotnējais buferizācijas laiks, turpretī lielu datu bloku pārraides gadījumā mērījuma rezultāts ir atkarīgs no pārraides vides ierobežojumiem. Tādējādi, neieskaitot MDT caurlaidspējas mērījumā sākotnējo buferizācijas laiku, tiek samazināta pārsūtāmo datu lieluma ietekme uz mērījumu rezultātu [94].



5.1. att. MDT caurlaidspējas mērījumu atspoguļojums; Avots: [94]

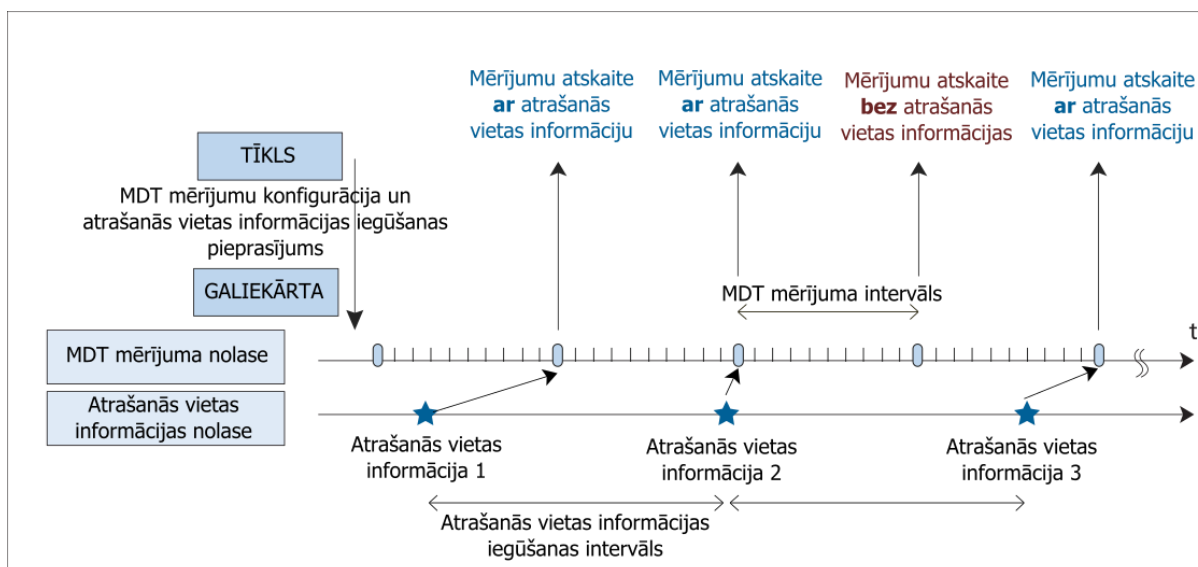
Tāpat, lietojumprogrammām ir raksturīgi tukšgaitas periodi jeb brīži, kad dati netiek pārraidīti. Piemēram, interaktīvā datplūsma ir dīka, kad lietotājs lasa, savukārt HTTP video straumēšanas datplūsma ir periodiska, jo notiek gabalveida video datu lejupielāde ar dīkiem

brīžiem starp šo gabalu pārraidi. Līdz ar to, neiekļaujot mērījuma rezultātos šos dīkos periodus, tiek atspoguļots patiesais caurlaidspējas rādītājs, kāds pieejams lietotājam vai lietojumprogrammai. [94]

MDT augšupielādes un lejupielādes caurlaidspējas mērījums ir balstīts uz noteiktā laika periodā pārraidīto datu (neieskaitot mērījumā tukšgaitas periodus) vidējā svērtā aprēķinu, kur svars ir proporcionāls katra datu “zibšņa” pārraides laikam. Mērījuma perioda garums ir iestatāms un var būt pietiekami īss (piemēram, 1 sekunde), lai precīzi korelētu ar atrašanās vietas informāciju ātri pārvietojošām lietotāju galiekārtām.

Lai aktivētu MDT, OAM nosūta MDT mērījuma parametrus, iekļaujot arī mērījuma perioda ilgumu, uz RAN mezgla punktu. RAN mezgla punkts tālāk nosūta saņemtos MDT konfigurācijas parametrus uz lietotāja galiekārtu, tādējādi aktivējot MDT funkcionalitāti šajā lietotāja galiekārtā. Pamatojoties uz MDT konfigurācijas parametriem, lietotāja galiekārta veic atbilstošos mērījumus un paziņo mērījumu rezultātus RAN mezglam, kurš savukārt nosūta tos uz MDT serveri vai TCE kopā ar atrašanās vietas informāciju. [94][95]

Lai izmantotu MDT funkcionalitāti caurlaidspējas rādītāju novērtējumam ģeogrāfiskās lokācijas ietvaros, lietotāja galiekārtas atrašanās vietas informācijai ir jābūt paziņotai kopā ar GPS laikspiedolu. Tā kā ziņošanas intervāls nevar garantēt atrašanās vietas informācijas derīgumu [95] un noteiktais ģeogrāfiskais mērogs kvalitātes informācijas atspoguļošanai ir pietiekami mazs (100 m × 100 m poligons), novērtējumā būtu jāiekļauj mērījumu rezultāti, kas iegūti aptuveni vienlaicīgi ar atrašanās vietas informāciju.

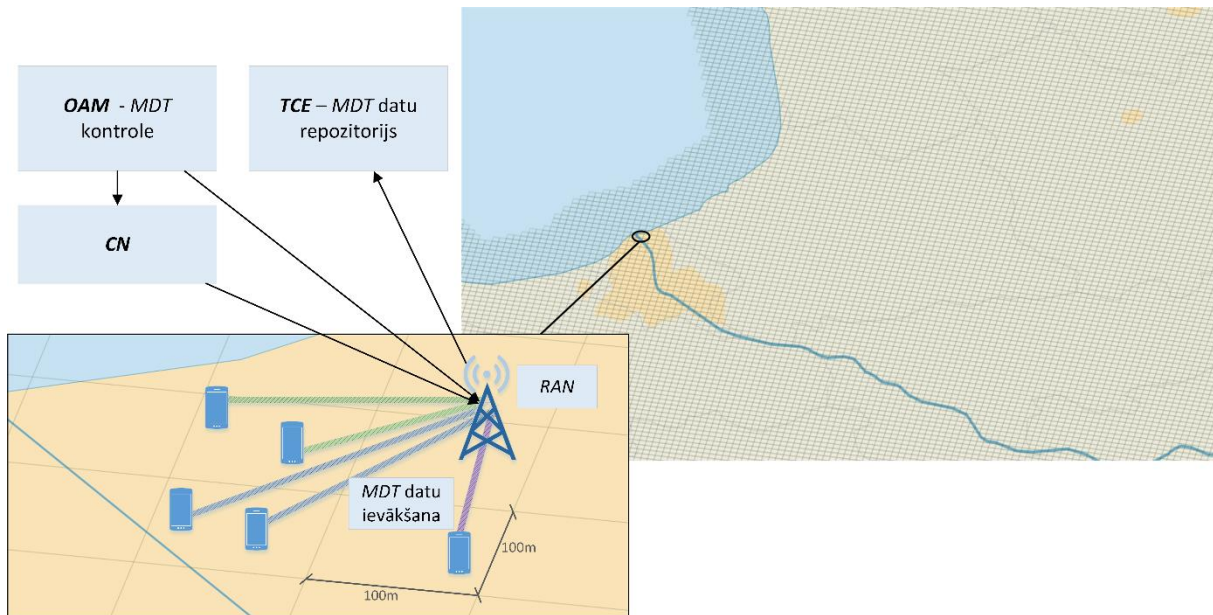


5.2. att. MDT mērījumiem nepieciešamās atrašanās vietas informācijas ievākšana; Avots: [94]

5.3. MDT funkcionalitātes izmantošana ģeogrāfiskā apsekojuma nolūkos

MDT funkcionalitāte ļauj ievākt mobilā tīkla kvalitātes parametrus plašā ģeogrāfiskā mērogā, ko nav iespējams nodrošināt, veicot aktīvos lauka mērījumus. Iegūstot mērījumu

rezultātus kopā ar iekārtas atrašanās vietas informāciju, šos datus var apkopot un kartēt nepieciešamajā mērogā.



5.3. att. Konceptuāls attēlojums MDT mērījumu veikšanai un mērījumu rezultātu kartēšanai 100 m × 100 m režģa mērogā

Ielasot mērījumu rezultātus no visām iespējamām lietotāju galiekārtām noteiktā ģeogrāfiskā teritorijā, nepieciešams veikt datu apkopošanu. Lai aprēķinātu caurlaidspējas rādītājus katrā 100 m × 100 m režģa šūnā, mērījumu rezultātus ir nepieciešams sagrupēt pēc šo šūnu koordinātām, pamatojoties uz lietotāja galiekārtas atrašanās vietas informāciju. Tā kā vienas šūnas ietvaros var būt ievākti dati no vairākām lietotāju galiekārtām, ir jādefinē datu apkopošanas principi, lai objektīvi atspoguļotu pieejamo pieslēguma ātrumu.

Tā kā MDT mērījumu rezultāti paredz apjomīgu datu izlasi, mērījumu rezultātu analītikai un apkopošanai ir nepieciešams izmantot lielo datu analītikas rīkus. Pieejamā datu pārraides novērtēšanai ir nepieciešams izmantot Vadības/apgabala balstītu MDT veidu un tūlītēju MDT režīmu, kas iniciē mērījumu izpildi uz vairākām lietotāju galiekārtām, tādējādi nodrošinot lielāku varbūtību, ka mērījumu rezultāti atspoguļo faktisko caurlaidspējas novērtējumu.

Ņemot vērā, ka novērtēto caurlaidspēju var ietekmēt dažādi faktori, tajā skaitā lietotāja galiekārta, tad atspoguļojot pieejamo datu pārraides ātrumu noteiktā šūnā, tas ir jāņem vērā. No otras puses arī 100 m × 100 m robežās pieejamā pakalpojuma kvalitāte var būt atšķirīga. Līdz ar to, pieejamā datu pārraides atspoguļošanā ir jānodrošina, ka mērījumu rezultāti nesatur nepamatoti zemas rādījumus, kas radušies no tīkla veiktspējas neatkarīgu ietekmju rezultātā, bet arī netiek izslēgti tie mērījumu rezultāti, kas var atspoguļot kvalitātes rādītājus, kas pieejami atšķirīgās analizējamās teritorijas daļās. Vēl viens faktors, kas jāņem vērā, ir tas, ka, novērtējot pieejamos caurlaidspējas rādītājus, pamatojoties uz reālo datplūsmu, šie mērījumi ir jāveic laikā, kad lietotāji izmanto pakalpojumu. Tomēr lielākās noslodzes stundās novērtētais pieejamais datu pārraides ātrums var atšķirties no tā, kāds pieejams lietotājam vidēji diennaktis

laikā. Tāpēc mērījumi būtu jāveic periodiski diennakts laikā, iestatot attiecīgu ziņošanas intervālu (piemēram, vienu stundu), kā arī šajā intervālā ir jābūt veiktam atbilstošam mērījumu skaitam, iestatot attiecīgu ziņojumu skaitu. Lai novērtētu, kāds ziņošanas intervāls un ziņojumu skaits ir minimāli nepieciešams, jāveic papildu pētījumi.

Tādējādi, noteiktā ģeogrāfiskā apgabalā var tikt iegūti caurlaidspējas mērījumu rezultāti, kas ir saistīti ar mērījumā iesaistītās lietotāja galiekārtas ģeogrāfiskās atrašanās koordinātēm.

Lai novērtētu mērījumu rezultātus 100 m × 100 m režģa mērogā, mērījumiem piesaistītās GPS koordinātes ir nepieciešams pārvērst uz atbilstošām EPSG:3035 - ETRS89-LAEA Eiropas sauszemes atskaites koordināšu sistēmas 100 m × 100 m režģa koordinātēm, tādējādi nodrošinot, ka mērījumu rezultāti ir piesaistīti attiecīgajām 100 m × 100 m režģa šūnām, kuru mērogā tiks veikta mērījumu datu analītika un apkopošana. Šim nolūkam TCE datubāzes ierakstus (mērījumu rezultātus) nepieciešams apvienot ar 100 m × 100 m režģa koordināšu datubāzes ierakstiem, piesaistot GPS koordinātām attiecīgo 100 m × 100 m poligonu koordinātas.

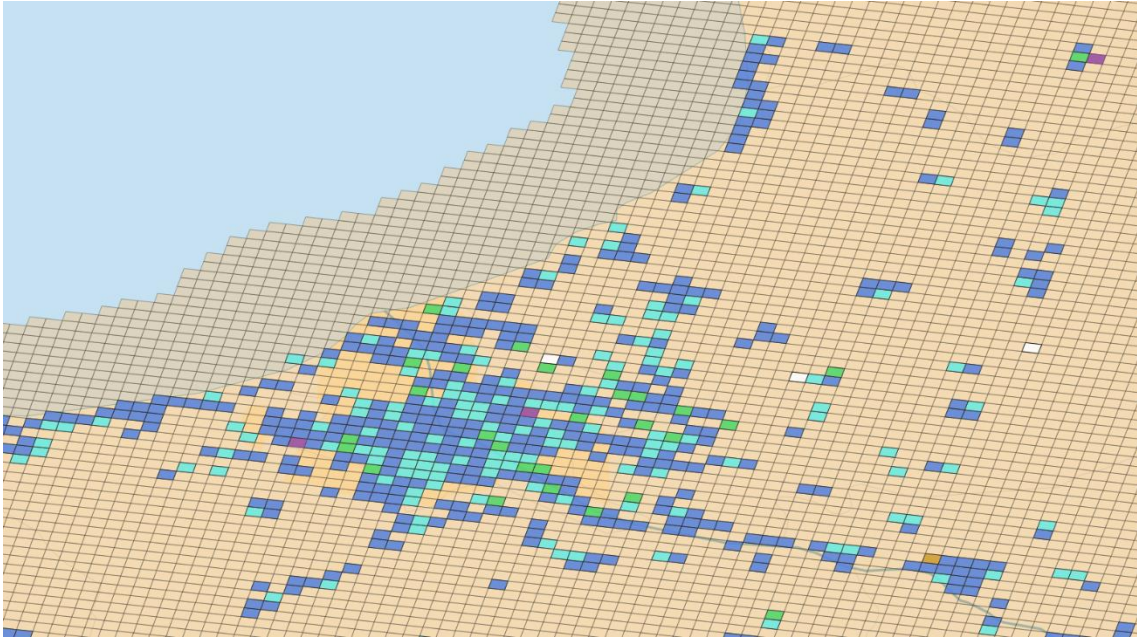
No mērījumu rezultātu apkopojuma būtu jāizslēdz mērījumu dati, kuru atrašanās vietas mērījuma laikspiedols ievērojami atšķiras no MDT mērījumu rezultātu laikspiedola, vai, ja tāds nav piešķirts.

Tādējādi katras 100 m × 100 m režģa šūnas ietvaros var būt novērtēts iegūtā datu pārraides ātruma mērījumu rezultātu sadalījums, kas var būt sadalīts atbilstoši Eiropas platjoslas pieslēguma ātruma diapazonu vērtībām:

- a. ≥ 1 Gbits/s;
- b. ≥ 300 Mbit/s < 1 Gbits/s;
- c. ≥ 100 Mbit/s < 300 Mbit/s;
- d. ≥ 30 Mbit/s < 100 Mbit/s;
- e. ≥ 10 Mbit/s < 30 Mbit/s;
- f. ≥ 2 Mbit/s < 10 Mbit/s.

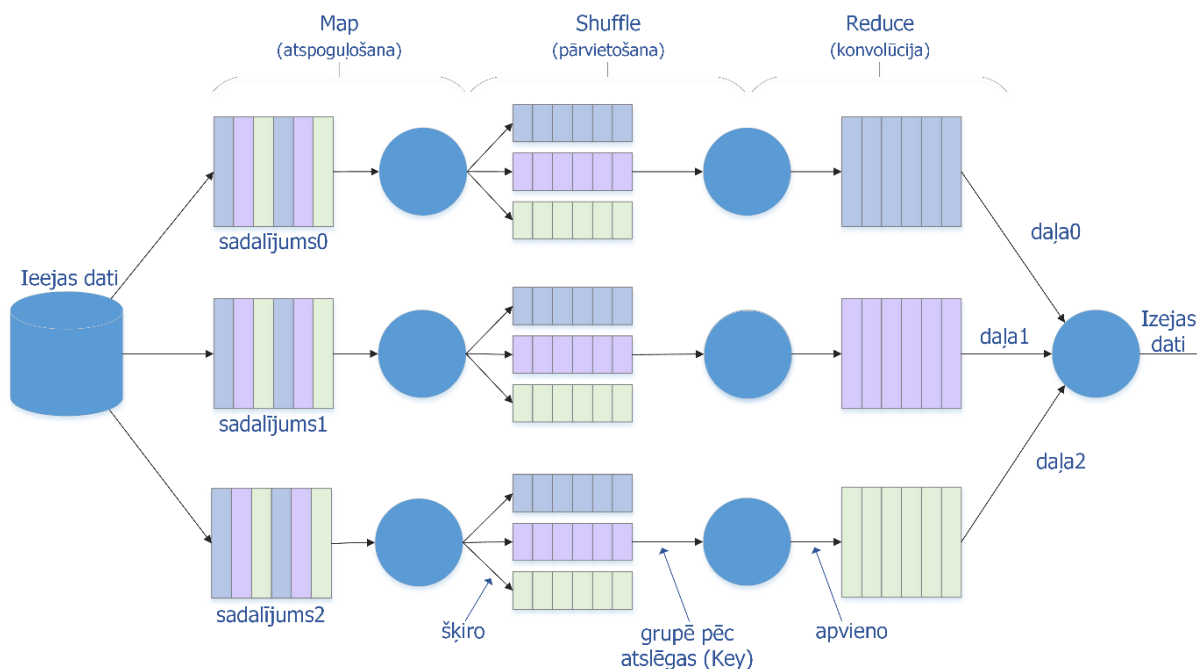
Attiecīgā šūnā pieejamais datu pārraides ātrums var būt raksturots ar pieslēguma ātruma diapazonu, kurā procentuāli visbiežāk novēroti MDT caurlaidspējas mērījumu rezultāti.

5.4. attēlā atspoguļots ar QGIS programmatūru veiktais faktisko mērījumu rezultātu kartējums 1km režģa dalījumā. Paredzams, ka izmantojot MDT mērījumus, kvalitātes rādītāju atspoguļojumu būs iespējams veikt, aptverot plašāku teritoriju un nodrošinot lielāku mērījumu skaitu un līdz ar to iespēju veikt kartēšanu smalkākā teritoriālā dalījumā (t.i., 100 m × 100 m režģa mērogā).



5.4. att. Piemērs mērījumu rezultātu atspoguļošanai, pamatojoties uz biežāk novēroto lejupielādes ātruma diapazonu noteikta mēroga režģa šūnā (piemērā atspoguļoti faktisko mērījumu rezultāti, kas apkopoti 1km režģa dalījumā, izmantojot QGIS programmatūru)

Tā kā mērījumu rezultāti paredz ļoti lielu datu apjomu, tad to apkopošanai ir nepieciešams izmantot lielo datu analītikas rīkus, piemēram, MapReduce algoritmu. Vispārīgais MapReduce algoritma modelis paredz ievades datu sadalīšanu vērtību kopās $v_1 \dots v_n$, kur katra no tām satur vairākas vērtības. Katra v_i kopa tiek piešķirta kartēšanas (map) procesam citā virtuālajā apstrādes mezglā. Kartēšanas (map) process katrai vērtību kopas vērtībai piešķir atslēgu un izvada sarakstu ar rezultējošiem atslēgas-vērtību pāriem ($Key_1, Value_1, \dots, Key_m, Value_m$). Izvades kopa tiek veidota katram kartēšanas solim procesā. Tālāk MapReduce apstrāde nodrošina vērtību sarakstu ar vienādu atslēgu, kas tiek izmantots reducēšanas (reduce) etapā dažādos virtuālajos apstrādes mezglos. Reducēšanas etapā visas vērtības tiek apstrādātas, nodrošinot “reducēto” rezultātu. [102]



5.5. att. Vienkāršots MapReduce algoritma shematisks attēlojums; Avots: [107]

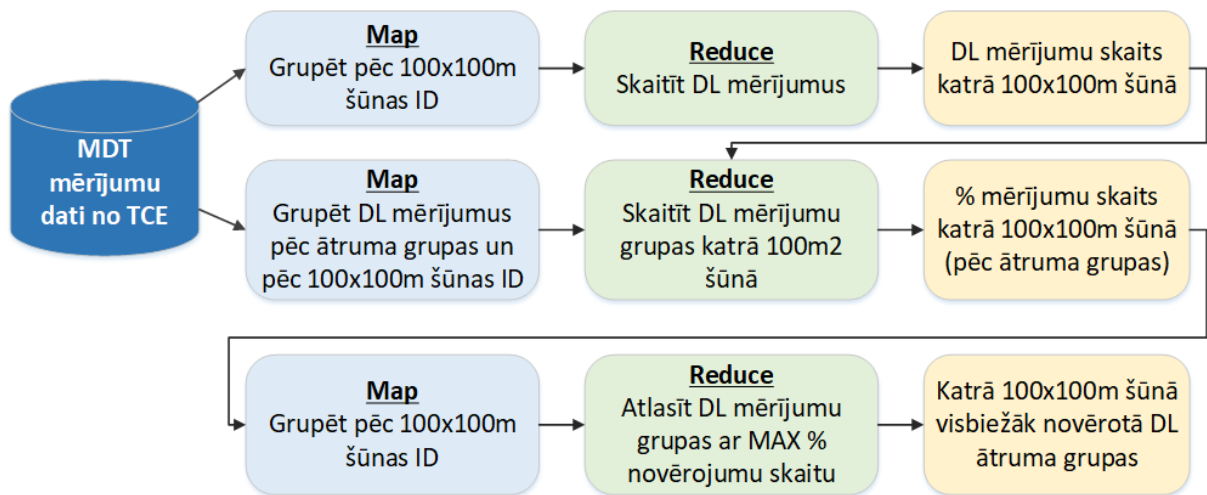
Tādējādi MapReduce funkcija var būt aprakstīta kā [102]:

$$\begin{aligned} \forall(n, m): \text{map}(k_n, v_n) &\rightarrow \text{list}(k_m, v_m) \\ \text{reduce}(k_m, \text{list}(v_m)) &\rightarrow \text{list}(v_m) \end{aligned} \quad (5.1.)$$

(5.1.) vienādojums apraksta viena map-reduce pāra izmantošanas formu. Lai atspoguļotu pieejamos datu pārraides ātrumus katrā $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ šūnā, datu apstrādi nepieciešams sadalīt vairākos etapos, izpildot MapReduce soļu ķēdes, kas var būt aprakstīts sekojoši [102]:

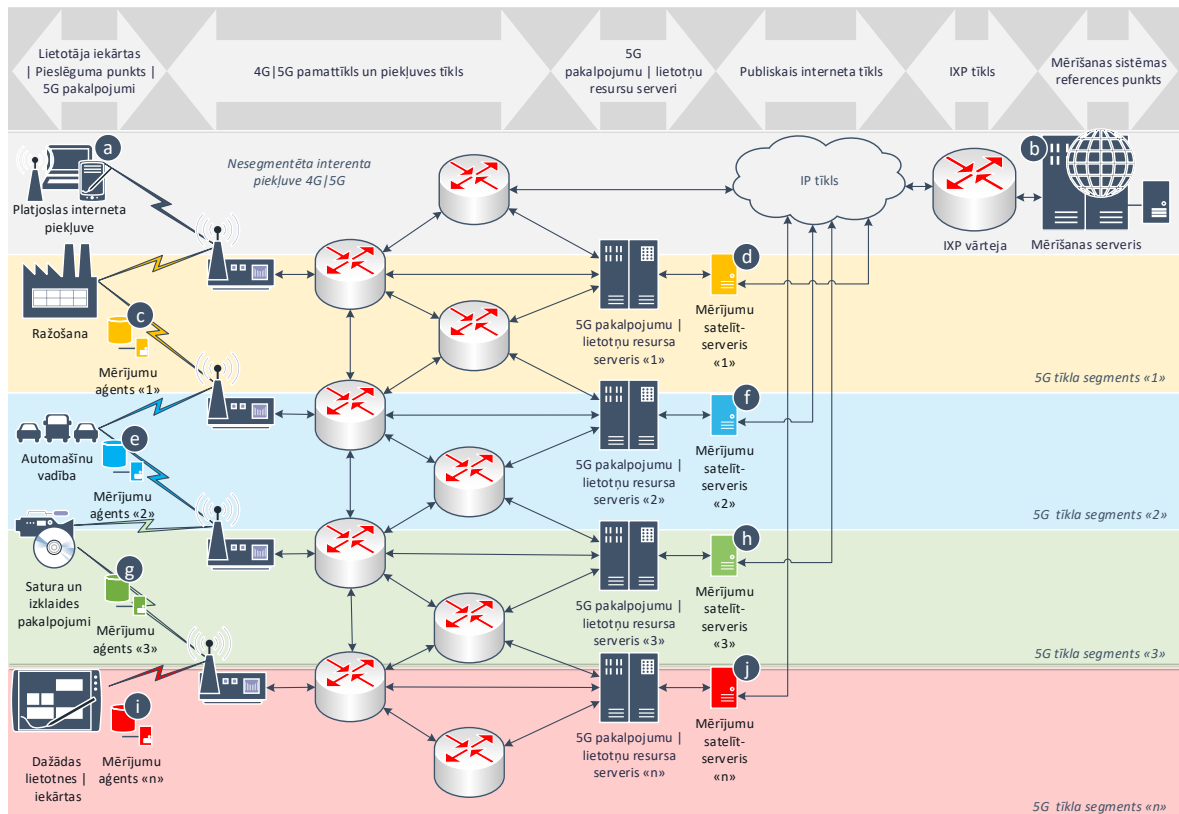
$$\begin{aligned} \forall(n, m, s): f(k_n, v_n) &\rightarrow \text{list}(v_s) \\ \text{map}_1(k_n, v_n) &\rightarrow \text{list}(k_{m_1}, v_{m_1}) \\ \text{reduce}_1(k_{m_1}, \text{list}(v_{m_1})) &\rightarrow \text{list}(v_{m_1}) \\ &\vdots \\ \text{map}_s(k_{n_s}, v_{m_{s-1}}) &\rightarrow \text{list}(k_{m_s}, v_{m_s}) \\ \text{reduce}_s(k_{m_s}, \text{list}(v_{m_s})) &\rightarrow \text{list}(v_s) \end{aligned} \quad (5.2)$$

Tādējādi datu apkopošana ar MapReduce algoritmu tiek sadalīta vairākos etapos un katra kvalitātes parametra aprēķinam ir nepieciešams veikt atsevišķu kalkulāciju.



5.6. att. MapReduce īstenošanas piemērs visbiežāk novērotā lejupielādes ātruma grupas aprēķinam katrā 100 m × 100 m apgabala šūnā

Rezultātā plašā mērogā ar smalku teritoriālo sadalījumu (100 m × 100 m režģī) var novērtēt un atspoguļot faktiskos datu pārraides ātruma rādītājus, ko neatspoguļo teorētiskais pakalpojuma kvalitātes rādītāju novērtējums un ko ir praktiski neiespējami nodrošināt, veicot aktīvos mērījumus. Īpaši nozīmīga šāda pieeja būtu 5G tehnoloģijas tīklos, novērtējot kvalitātes rādītājus atšķirīgos tīkla segmentos, kur pakalpojuma serveri tiek uzstādīti tuvāk tīkla malai, nodrošinot tā saucamo “perifērijas skaitļošanu” (*angl. – edge computing - EC*), kas sniedz ātrākas datu apstrādes un uzglabāšanas iespējas. Līdz ar to šādos gadījumos, veicot mērījumus līdz mērījumu serverim, kas uzstādīts pie interneta apmaiņas punkta, mērījumu rezultāti neatspoguļotu faktiskos kvalitātes rādītājus [103].



5.7. att. Kvalitātes mērījumu posmu konceptuāls atspoguļojums vispārējai platjoslas interneta kvalitātes novērtēšanai (a-b) un specializēto pakalpojumu kvalitātes novērtēšanai (c-d; e-f; g-h; i-j) [103]

5.4. MDT risinājuma izmantošanas problēmaspekti

MDT mērījumi tiek veikti konkrēta operatora tīklā, līdz ar to sniedzot informāciju par kvalitātes rādītājiem pakalpojuma sniedzēja tīkla ietvaros, līdz ar to nenodrošinot vienādu mērījumu rezultātu šķērsgrizumu ar aktīvos mērījumos iegūtajiem rezultātiem. Tomēr MDT mērījumu rezultāti sniedz informāciju par lietotāja pieredzētajiem pakalpojuma kvalitātes rādītājiem, ko neatspoguļo teorētiskais mobilā tīkla pārklājuma aprēķins. Tāpēc MDT risinājums būtu papildinājums operatoru sniegtajai teorētiskajai informācijai, nodrošinot faktiskos tīkla un kvalitātes parametru rādījumus. Tomēr aktīvie testi joprojām būtu aktuāli, it īpaši vietās, kur nav iespējams iegūt MDT mērījumu rezultātus.

Papildus tam MDT mērījumi atspoguļo caurlaidspējas rādītājus OSI protokolu steka 2. slānī jeb datu pārraides kanāla slānī, kas attiecināms uz tīkla veiktspējas rādītājiem, nevis pakalpojuma kvalitātes vērtībām, kādas pieejamas lietotājam.

Tāpat jāņem vērā, ka mērījumu rezultāti veido lielu datu apjomu, kuru analīzei nepieciešamajā šķērsgrizumā ir jāpiesaista personāls ar attiecīgajām zināšanām datu analītikas rīku pielietošanā. Tā kā MDT mērījumu rezultāti satur plašu informāciju par mobilā operatora tīkla veiktspēju un lietojumu, mobilie operatori varētu nevēlēties nodot neapstrādātus datus trešajām pusēm (tajā skaitā valsts pārvaldes institūcijām). Nodrošinot datu analītiķu mobilā

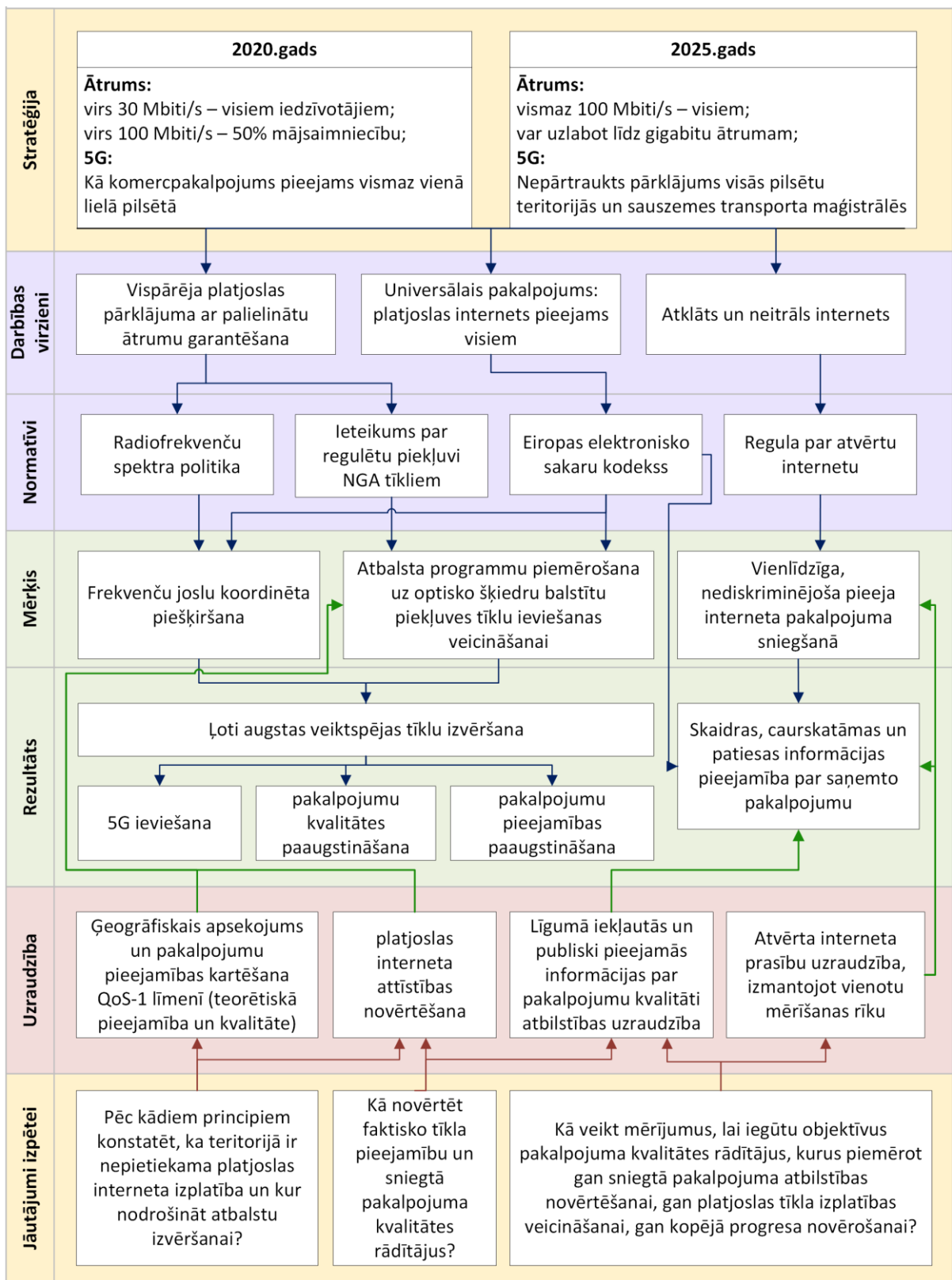
operatora pusē paliek aktuāls jautājums par norādīto vērtību patiesumu un izmantotās mērīšanas pieejas atbilstību. Līdz ar to tik un tā ir nepieciešama neatkarīgu iestāžu veikta kvalitātes rādītāju verificēšana.

6. KOPSAVILKUMS UN SECINĀJUMI

Platjoslas interneta pakalpojuma nozīme turpina pieaugt, ievērojami ietekmējot iedzīvotāju sociālo un ekonomisko līdzdalību sabiedrībā, sekmējot novatorisku uzņēmējdarbības modeļu ieviešanu un veicinot kopēju Eiropas ekonomisko attīstību. Tā kā internetā pieejamo pakalpojumu daudzveidība kļūst arvien plašāka, to saturs arvien apjomīgāks un izmantošana – biežāka, ik gadu paaugstinās internetā pārraidītais datplūsmas apjoms. Turklāt, attīstoties mobilām tehnoloģijām, arvien pieprasītāki kļūst bezvadu interneta pieslēgumi. Paredzams, ka līdz 2026. gadam pārraidītais mobilo datu apjoms palielināsies pieckārtīgi, salīdzinot ar 2020. gadu. To veicinās arī 5G tehnoloģijas attīstība un izplatība, kas sekmēs jaunas paaudzes lietojumprogrammu, pakalpojumu un uzņēmējdarbības iespēju izveidi, ar stingri noteiktiem šo pakalpojumu nodrošināšanai nepieciešamām minimālām pakalpojumu kvalitātes parametru vērtībām, un rezultēsies apjomīgā savienoto ierīču skaitā. Līdz ar to platjoslas tīklu attīstība ir ļoti būtiska, lai nodrošinātu gan interneta pakalpojuma vispārīgu pieejamību, gan tā izmantošanas iespēju atbilstoši mūsdienu pakalpojuma lietošanas tendencēm, nodrošinot atbilstošus tā kvalitātes rādītājus.

Ņemot vērā platjoslas interneta pakalpojuma nozīmi, Eiropas Komisija izstrādāja stratēģiju digitālās izaugsmes veicināšanai Eiropā, kas paredz skaidrus mērķus interneta ātruma un izplatības skaitliskiem rādītājiem, kādi jāasniedz paredzamā nākotnē. Atbilstoši stratēģijā definētiem mērķiem tika izstrādāti Eiropas normatīvie akti, kas paredz konsekventu prasību noteikšanu un uzraudzības principu izveidi, pārņemot attiecīgās prasības valsts likumdošanā, tādējādi veicinot stratēģijas mērķu sasniegšanu. Stratēģijas mērķi un to sasniegšanai izvirzītie darbības virzieni, izstrādātie Eiropas līmeņa normatīvie akti, kā arī paredzamie rezultāti ir aprakstīti 1.3. nodaļā un atspoguļoti 6.1. attēlā.

Lai novērtētu stratēģijās definēto mērķu sasniegšanas līmeni, kā arī piemērotu valsts atbalsta programmas platjoslas tīklu attīstībai un sekmētu lietotāju informētību par interneta pakalpojuma pieejamību un tā kvalitātes rādītājiem, Eiropas mērogā ir paredzēts izveidot uzraudzības mehānismu, kas ietver interneta pakalpojuma attīstības un izplatības rādītāju kartēšanu, nodrošinot ģeogrāfisko apsekojumu. Tādējādi ir paredzēts veids, kā atspoguļot platjoslas interneta attīstības rādītājus, tostarp nosakot vairākus pakalpojuma kvalitātes atainošanas līmeņus, kas raksturo atšķirīgu rādītāju interpretāciju un novērtēto pakalpojuma sniegšanas posmu (skat. 1.5. nodaļu). Tomēr, lai atspoguļotā informācija ir jēgpilna, atbilstoša faktiskajai situācijai un salīdzināma, gan pakalpojumu sniedzēju starpā vienas valsts mērogā, gan arī dažādu valstu starpā, ir nepieciešams vienots kvalitātes uzraudzības mehānisms, kurā ir ietvertas skaidras un pamatotas metodes kvalitātes rādītāju novērtēšanai.



6.1. att. No Eiropas stratēģiskiem mērķiem izrietošo darbības virzienu, normatīvo aktu, to mērķu un paredzamo rezultātu, kā arī nepieciešamo uzraudzības pasākumu un konstatēto nepilnību shematisks apkopojums

Promocijas darba pirmajā nodaļā ir apskatīts platjoslas interneta pakalpojuma rādītāju un tā pieejamības novērtējums, ko veic starptautiskas organizācijas, piemēram OECD, Eiropas Komisijas, Eiropas Elektronisko sakaru regulatoru iestādes (BEREC), un Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijā (SPRK) Latvijā, kā arī prognozes attiecībā uz interneta lietošanas tendencēm un apjomiem, novērtējot starptautisko kompāniju, piemēram, Ericsson, GSMA, Cisco Systems, Inc. sniegto informāciju. Tāpat sniegta 5G tehnoloģijai definēto lietošanas gadījumu, tiem atbilstošo kvalitātes rādītāju, kā arī tehnoloģijas attīstības pamatnosacījumu apskats, atbilstoši Starptautiskās telekomunikāciju savienības (ITU) rekomendācijās ietvertajam.

Tāpat ir izvērtētas Eiropas Komisijas izstrādātās ES stratēģijas, kā arī Eiropas Parlamenta un Padomes direktīvas un regulas, kurās definētas prasības stratēģijās noteikto mērķu sasniegšanai. Ir apkopota prasību pārņemšana Latvijas likumdošanā ieviešot attiecīgos noteikumus un nosakot nosacījumus lietotāju interešu aizsardzībai.

Vienlaikus ir analizēts Eiropas platjoslas kartēšanas projektā ieviestais platjoslas interneta pieejamības atspoguļošanas ietvars, kura mērķis ir nodrošināt informāciju par platjoslas interneta rādītājiem dažādu teritoriālo vienību mērogā. Tāpat ir aplūkoti platjoslas datu atspoguļošanai definētie līmeņi (QoS-1, QoS-2 un QoS-3), kas klasificē atspoguļojamos datus atkarībā no to iegūšanas veida (teorētiskie aprēķini vai mērījumi), kā arī atkarībā no novērtējamā pakalpojuma sniegšanas posma (skat. 2.1. att.). Papildus ir analizēti teorētisko aprēķinu piemērojamība platjoslas interneta kvalitātes rādītāju novērtēšanā, kā arī praktisko mērījumu rezultātu atšķirības un to cēloņu iemesli.

Līdz ar to ir secināts, ka atbilstoši interneta izmantošanas tendencēm un prognozējamiem apmēriem, Eiropas Komisijas stratēģiskie mērķi attiecībā uz platjoslas interneta pieejamības veicināšanu ir aktuāli un būtiski dažādu sociālo un ekonomisko aspektu atbalstīšanā. Savukārt šo mērķu sasniegšanai un lietotāju informētības veicināšanai ir būtiski nodrošināt vispārpieejamu, jēgpilnu un objektīvu informāciju par platjoslas interneta pieejamību un nodrošināmo kvalitātes līmeni. Tomēr ir secināts, ka, lai arī esošie normatīvie akti iezīmē darbības virzienus un uzraudzības aspektus, tie nenosaka skaidras un vienotas prasības uzraudzības metodēm. Līdz ar to nevar pārliecinoši garantēt, ka sniegtie uzraudzības rezultāti atspoguļo faktisko situāciju, tādējādi ietekmējot gan sabiedrības informētību, gan lēmumu pamatotību dažādu valsts atbalsta programmu piemērošanā.

Promocijas darba otrajā nodaļā ir analizēti dažādi interneta pakalpojuma kvalitāti raksturojošie parametri, to interpretācija atkarībā no novērtējamā pakalpojuma pieslēguma posma un no atšķirīgiem pakalpojuma sniegšanas vai izmantošanas aspektiem. Ir novērtēti lietotājam saistošie tehniskie pakalpojuma kvalitātes rādītāji, kas raksturo lietotāja pieredzi lietojot internetu, kā arī šos rādītājus ietekmējošie kvalitātes parametri. Tāpat ir apkopoti būtiskākie parametri, kā datu pārraides ātrums, datu pārraides aiztures laiks un aiztures laika nevienmērība un pakešu zudumi, kuru novērtējums ļauj secināt par kopējo sniegto kvalitātes

līmeni un prognozēt lietotāju apmierinātību. Ir analizēts, kādā OSI protokolu steka līmenī ir nepieciešams veikt novērtējumu, lai tas raksturotu lietotājam pieejamo kvalitātes līmeni.

Promocijas darba trešajā nodaļā ir analizēti TCP pārraides vadības protokola darbības principi un algoritmi un to ievērošanas nepieciešamība, izstrādājot un iestatot mērīšanas sistēmu, lai iegūtu objektīvu un faktiskai situācijai atbilstošu caurlaidspējas novērtējumu. Ir apskatīti citi ar interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumiem saistītie aspekti, kas var ietekmēt mērījumu rezultātus, kā arī definēti kritēriji mērīšanas sistēmas references punkta izvietojumam, lai nodrošinātu salīdzināmus un objektīvus mērījumu rezultātus.

Promocijas darba ceturtajā nodaļā, pamatojoties uz faktiskiem interneta kvalitātes mērījumu rezultātiem, ir novērtēti dažādu tehnoloģiju (ADSL, FTTH un 4G) interneta pieslēguma kvalitātes rādītāji un tos ietekmējošie faktori. Ir identificēti gadījumi, kad objektīvu kvalitātes rādītāju iegūšanai, ir būtiski ņemt vērā noteiktu mērīšanas pieeju, t.i., ievērojama variācija kvalitātes rādītāju vērtībās ir novērota mobiliem interneta pieslēgumiem. Tāpat, izvērtējot vairāku gadu garumā veiktos mērījumu rezultātus, ir novērtēta kvalitātes parametru vērtību korelācijas ar mērījuma veikšanas laiku. Rezultātā ir secināts, ka pastāv būtiska saistība starp lejupielādes ātruma mērījumu rezultātiem un diennakts laiku, kad veikts mērījums. Ir novērtēts diennakts laiks, kurā vērojama vismazākā atšķirība starp konkrētā diennakts stundā veiktajiem mērījumiem un kopējiem diennakts rādītājiem. Ir izvirzīta un pieņemta hipotēze par to, ka noteiktās diennakts stundās veikto lejupielādes ātruma mērījumu vidējās vērtības ir vienādas ar visā diennakts periodā novērtētā lejupielādes ātruma vidējām vērtībām. Līdz ar to mērījumu veikšanai ir rekomendēts konkrēts diennakts laiks.

Ir aprēķināts konkrētā mērījumu vietā nepieciešamais mērījumu atkārtojumu skaits, lai nodrošinātu, ka novērtētās pakalpojuma kvalitātes parametru vidējās vērtības ar 95 % ticamību iekļaujas uzdotajās robežās no hipotētiskās kopas vidējās vērtības.

Tāpat ir novērtēts minimālais mērījumu vietu skaits, kāds nepieciešams, lai vispārīgās valsts mēroga vidējās kvalitātes parametru vērtības ar 95 % ticamību iekļaujas uzdotajās robežās no hipotētiskās kopas vidējās vērtības. Lai arī kopumā vidējais interneta pakalpojuma kvalitātes novērtējums valstī nesniedz informāciju par konkrētam lietotājam pieejamo kvalitātes līmeni, tas tomēr ir būtisks mērs, kas ļauj objektīvi novērtēt kopējo mobilo tīklu veiktspējas attīstību, kā arī salīdzināt to starp dažādiem operatoriem un citās valstīs nodrošinātajiem rādītājiem. Papildus ir izvērtēts kvalitātes parametru mērījumu rezultātu sadalījums atkarībā no iedzīvotāju skaita un blīvuma un uz tā pamata ir definēts princips mērījumu vietu skaita izvēlei atšķirīgās teritorijās. Ņemot vērā minimālo mērījumu vietu skaitu, kas nepieciešams, lai nodrošinātu, ka parametru vidējās vērtības ar 95 % ticamību iekļaujas uzdotajās robežās no hipotētiskās kopas vidējās vērtības, un pamatojoties uz definēto mērījumu vietu skaita sadalījuma principa, ir aprēķināts atbilstošais mērījumu vietu skaits un sadalījums Latvijas teritorijas ietvaros.

Tāpat, novērtējot sešu gadu periodā veikto mērījumu rezultātus, ir novērtēts, cik bieži ir nepieciešams atkārtot mērījumu ciklu, lai nodrošinātu, ka atspoguļotās kvalitātes parametru vērtības raksturo aktuālo platjoslas tīklu veiktspēju.

Papildus tam ir definēts iespējamais mehānisms nepietiekama platjoslas interneta pārklājuma teritoriju novērtēšanai, pamatojoties uz ģeogrāfiskā apsekojumā iegūto informāciju. Ir novērtēti teorētiskie rādītāji un praktiskajos mērījumos iegūtās pieslēguma ātruma vērtības, kas varētu liecināt, ka attiecīgajā teritorijā platjoslas interneta kvalitāte nav nodrošināta atbilstošajā līmenī. Tādējādi ir nodrošināma pirmējs nepietiekamas platjoslas teritoriju izvilks. Tāpat ir noteikti pamatprincipi padziļinātai identificēto teritoriju analīzei, kurus nepieciešams izvērtēt, lai turpmāk plānotu investīcijas platjoslas tīklu attīstībā šajās teritorijās. Šāda padziļināta analīze un detalizētāku principu noteikšana var būt **turpmākais pētījuma virziens**.

Promocijas darba piektajā nodaļā ir piedāvāta metode faktisko interneta pakalpojuma kvalitātes rādītāju novērtēšanai, izmantojot MDT tehnoloģiju un tādējādi nodrošinot kvalitātes rādītāju atspoguļošanu QoS-2 līmenī 100 m × 100 m režģa dalījumā plašā teritorijā. Ņemot vērā, ka aktīvos lauka mērījumus praktiski nav iespējams veikt tik blīvā teritoriālā dalījumā visas valsts mērogā, tad būtu izmantojama šāda alternatīva metode. Ir piedāvāts mērījumu rezultātu apkopošanas mehānisms, izmantojot lielo datu analītikas algoritmu MapReduce, kā arī rezultātu atspoguļošanas veids 100 m × 100 m mērogā. Ir identificēti arī šādas metodes izmantošanas problēmaspekti. Šādas metodes pielietojamība interneta pakalpojuma kvalitātes rādītāju novērtēšanā un atspoguļošanā var būt **turpmāko pētījumu virziens**.

Veicot promocijas darbā definēto uzdevumu izpildi iegūti šādi **galvenie promocijas darba rezultāti un secinājumi**:

1. Teorētiskais mobilā tīkla pārklājuma un veiktspējas novērtējums negarantē šādu rādītāju nodrošināšanu realitātē, neraksturo lietotāju pieredzi un var būt maldinoši. Faktiskais pārklājums un minēto parametru vērtības var būtiski atšķirties no teorētiskiem aprēķiniem. Līdz ar to teorētiskā mobilā pārklājuma informācijas ticamību ir nepieciešams pārbaudīt, veicot praktiskus mērījumus.
2. Atkarībā no praktiskajos mērījumos izmantotās mērīšanas metodoloģijas, ierīču veiktspējas un sistēmas iestatījumiem, kā arī vērtējamā tīkla posma un OSI protokolu steka līmeņa, pieslēguma ātruma rādītāji var atšķirties pat trīskārt. Neesot vienotai mērīšanas metodoloģijai, mērījumu rezultāti nav savā starpā salīdzināmi. Tāpat bez attiecīgiem metadatiem šādi daudzveidīgi mērījumu rezultāti nav interpretējami. Turklāt nenodrošinot, ka mērījumos tiek izmantoti tie pārraides principi, kas raksturīgi lietotājam lietojot interneta pakalpojumu, iegūtie rezultāti no lietotāju viedokļa nav informatīvi un jēgpilni.
3. Ar pieciem būtiskākiem interneta pakalpojuma kvalitātes parametriem var veicināt plašas sabiedrības izpratni par sagaidāmo pakalpojuma kvalitāti, lietojot dažādus internetā nodrošināmos pakalpojumus, un paredzēt aptuveno pieredzes kvalitāti QoE.
4. Lejupielādes ātrums ir viens no pamata kvalitātes parametriem, kurš ietekmē lietotāja kvalitātes uztveri un kura vērtību izkliede mobilā tīklā ir vērojama visplašākās robežās. Tāpat ir vērojama statistiski nozīmīga saistība starp lejupielādes ātruma vērtībām un

mērījuma diennakts laiku, līdz ar to, veicot mērījumus laika posmā no 9:00 līdz 15:00 un nodrošinot vismaz 16 mērījumu atkārtojumu vienā vietā, var nodrošinātu, ka novērtētā vidējā lejupielādes ātruma vērtība ar 95 % ticamību iekļausies ± 10 Mbiti/s robežās no diennakts vidējās vērtības šajā vietā. Tāpat secināts, ka, jāveic vismaz 13 mērījumu atkārtojumi vienā vietā, lai nodrošinātu, ka pieslēguma ātruma vidējā vērtība ar 95 % ticamību iekļaujas ± 11 Mbiti/s un vismaz 69 % mērījumu rezultātu novirze no diennakts vidējās vērtības nepārsniedz ± 5 Mbiti/s. Tādējādi, par optimālu ir uzskatāms vismaz 16 mērījumu atkārtojumu skaits vienā vietā, bet par minimāli nepieciešamo – 13 mērījumu atkārtojumu skaits.

5. Pamatojoties uz teorētiskiem interneta pakalpojuma kvalitātes rādītājiem kopā ar praktiskajos mērījumos iegūto informāciju, ir iespējams izstrādāt mehānismu nepietiekamas platjoslas pārklājuma teritoriju identificēšanai, tādējādi veicinot pamatotu finansiālo ieguldījumu veikšanu un atbalsta mehānismu piemērošanu.
6. Kā alternatīvu praktiskiem mērījumiem, izvērtējot kvalitātes rādītājus $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ teritoriālā režģa dalījumā valsts mērogā, ir iespējams izmantot MDT tehnoloģiju, kas paredz mērījumu datu ievākšanu no lietotāju ierīcēm, un mērījumu rezultātu analīzei pielietot MapReduce algoritmu, apkopojot pieslēguma ātruma rādītājus atbilstošā ātruma grupu dalījumā un katrā $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ poligonā atspoguļojot ātruma grupu, kurā visbiežāk novēroti mērījumu rezultāti.

Nobeigumā jāuzsver, ka izvirzītais promocijas darba mērķis – novērtēt un sniegt priekšlikumus platjoslas attīstības uzraudzības mehānisma piemērošanā un matemātiski pamatotas interneta kvalitātes rādītāju novērtēšanas metodoloģijas izstrādē ir veiksmīgi sasniegts.

Promocijas darbā iegūtie rezultāti tiks piedāvāti izstrādājot Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas (SPRK) mērīšanas metodiku un veicot interneta pakalpojuma kvalitātes uzraudzību. Tāpat darbā iekļautie principi var tikt izmantoti, veicot ģeogrāfiskā apsekojuma rezultātu atspoguļošanu, tam nepieciešamā kartēšanas rīka izstrādi, kā arī nepietiekamas platjoslas pārklājuma teritoriju novērtēšanu. Definētie principi ir piemērojami gan Latvijas, gan Eiropas mērogā.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- [1] Ericsson, "Ericsson Mobility Report", 2021 // <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports/june-2021> - pp. 4-14, 20-24.
- [2] OECD, "Broadband policy and technology developments", OECD Digital Economy Papers, No. 317, OECD Publishing, Paris, 2021 // <https://doi.org/10.1787/e273ff77-en> - pp.50-51
- [3] Eiropas Komisija; "Digitālās ekonomikas un sabiedrības indekss", 2021 // <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi-connectivity> - 4-17.lpp.
- [4] GSM asociācija – GSMA; "The Mobile Economy 2021" // <https://www.gsma.com/mobileeconomy>; GSMA Intelligence 2021 – pp. 2-11, 19-33.
- [5] Starptautiskā telekomunikāciju savienība (ITU), Starptautisko mobilo telekomunikāciju (IMT) attīstības mērķu vadlīnijas, Rekomendācija ITU-R M.2083 "IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond"//2015 – pp. 4-19.
- [6] Starptautiskā telekomunikāciju savienība (ITU), Pārskats ITU-R M.2410-0 "Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)" // 2017 – pp. 1-9.
- [7] Starptautiskā telekomunikāciju savienība (ITU), Pārskats ITU-R M.2320-0 "Future technology trends of terrestrial IMT systems"//2014 – pp. 3-26.
- [8] S. E. E. Ayoubi, S. Jeux, F. Marache, F. Pujol, M. Fallgren, P. Spapis, C. Yang, A. Widaa, J. Markendahl, A. Ghanbari, R. Ruismäki and M. A. Uusi, "Refined scenarios and requirements, consolidated use cases, and qualitative technoeconomic feasibility assessment," Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society-II, 2016 – pp. 15-24, 66-121.
- [9] GSMA Intelligence, "Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements", 2014 – pp. 5-13.
- [10] DotEcon Ltd, Axon Partners Group, "Study on Implications of 5G Deployment on Future Business Models", BoR (18) 23, 2018 – pp. 11-53, 69-76, 97-100.
- [11] Satiksmes Ministrija, "Ceļvedis piektās paaudzes (5G) publisko mobilo elektronisko sakaru tīklu ieviešanai Latvijā", Informatīvais ziņojums, 2019. – 2.-7.lpp.
- [12] Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva 2002/21/EK par kopējiem reglamentējošiem noteikumiem attiecībā uz elektronisko komunikāciju tīkliem un pakalpojumiem (pamatdirektīva), 2002.
- [13] Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva 2002/22/EK par universālo pakalpojumu un lietotāju tiesībām attiecībā uz elektronisko sakaru tīkliem un pakalpojumiem (universālā pakalpojuma direktīva), 2002.

- [14] Komisijas Paziņojums “EIROPA 2020. Stratēģija gudrai, ilgtspējīgai un integrējošai izaugsmei” (Briselē, 3.3.2010 COM(2010), 2020), // https://ec.europa.eu/eu2020/pdf/1_LV_ACT_part1_v1.pdf
- [15] Komisijas paziņojums Eiropas Parlamentam, Padomei, Eiropas Ekonomikas un sociālo lietu komitejai un Reģionu komitejai, “Digitālā programma Eiropai” (Briselē, 19.5.2010 COM(2010)245)
- [16] Eiropas Parlamenta un Padomes Lēmums Nr. 243/2012/ES (2012. gada 14. marts), ar ko izveido radiofrekvenču spektra daudzgadu politikas programmu
- [17] Komisijas Ieteikums par regulētu piekļuvi nākamās paaudzes piekļuves (NGA) tīkliem, (2010. gada 20. septembris) // <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/TXT/HTML/?uri=CELEX:32010H0572&from=EN>
- [18] Eiropas Parlamenta un Padomes Regula (ES) 2015/2120 (2015. gada 25. novembris), ar ko nosaka pasākumus sakarā ar piekļuvi atvērtam internetam un groza Direktīvu 2002/22/EK par universālo pakalpojumu un lietotāju tiesībām attiecībā uz elektronisko sakaru tīkliem un pakalpojumiem un Regulu (ES) Nr. 531/2012 par viesabonēšanu publiskajos mobilo sakaru tīklos Savienībā
- [19] Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC) Guidelines on the Implementation of the Open Internet Regulation, BoR (20) 112, 2020 // https://bereg.europa.eu/eng/document_register/subject_matter/bereg/regulatory_best_practices/guidelines/9277-bereg-guidelines-on-the-implementation-of-the-open-internet-regulation
- [20] Komisijas paziņojums Eiropas Parlamentam, Padomei, Eiropas Ekonomikas un sociālo lietu komitejai un Reģionu komitejai, “Digitālā vienotā tirgus stratēģija Eiropai”, (Briselē, 6.5.2015. COM(2015) 192) // <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/TXT/?uri=celex%3A52015DC0192>
- [21] Komisijas paziņojums Eiropas Parlamentam, Padomei, Eiropas Ekonomikas un sociālo lietu komitejai un Reģionu komitejai, “Konkurētspējīga digitālā vienotā tirgus savienojamība. Virzība uz Eiropas Gigabitu sabiedrību”, COM(2016)587, 2016. // <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/TXT/?uri=CELEX%3A52016DC0587>
- [22] Komisijas paziņojums Eiropas Parlamentam, Padomei, Eiropas Ekonomikas un sociālo lietu komitejai un Reģionu komitejai, “5G Eiropai. Rīcības plāns” COM(2016)588, 2016. // <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/TXT/?uri=CELEX%3A52016DC0588>
- [23] Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva (ES) 2018/1972 par Eiropas Elektronisko sakaru kodeksa izveidi (2018. gada 11. decembris) // <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L1972&from=de>
- [24] Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC) Guidelines detailing Quality of Service Parameters, BoR (20) 53, 2020 – pp. 2-39.

- [25] Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC) Guidelines on Very High Capacity Networks, BoR (20) 165, 2020 – pp. 3-18.
- [26] Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC) Guidelines on Geographical surveys of network deployments, BoR (20) 42, 2020 – pp. 7-50.
- [27] Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC) Common Position on information to consumers on mobile coverage, BoR (18) 237, 2018 – pp. 2-13.
- [28] SAM Informatīvais ziņojums “Ceļvedis piektās paaudzes (5G) publisko mobilo elektronisko sakaru tīklu ieviešanai Latvijā”, pieejams: <http://tap.mk.gov.lv/lv/mk/tap/?pid=40471250>
- [29] Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas 2018. gada 20. decembra lēmuma Nr. 1/35 "Vispārējās atļaujas noteikumi elektronisko sakaru nozarē" III daļa, pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/303972>
- [30] Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC) “A first assessment based on stakeholder inputs - Report on the impact of 5G on regulation and the role of regulation in enabling the 5G ecosystem”, BoR (19) 245, 2019 – pp. 4-35.
- [31] Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC) Net Neutrality Regulatory Assessment Methodology, BoR (17) 178, 2017 – pp. 4-23.
- [32] Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC) Net neutrality measurement tool specification, BoR (17) 179 5 October 2017 – pp. 5-43.
- [33] Eiropas Elektronisko sakaru regulatoru iestādes (BEREC) atvērtā koda interneta mērīšanas sistēmas programmatūras kods, pieejams: <https://github.com/net-neutrality-tools/nntool>
- [34] Komisijas paziņojums Eiropas Parlamentam, Padomei, Eiropas Ekonomikas un sociālo lietu komitejai un Reģionu komitejai, “Eiropas digitalizācijas programma – digitalizācijas virzīta Eiropas izaugsme”, (Briselē, 18.12.2012 COM(2012) 784) – 3.-16.lpp.
- [35] European Commission project “Mapping of Fixed and Mobile Broadband Services in Europe (SMART 2014/0016)” <https://www.broadband-mapping.eu>
- [36] Lipenbergs, E., StafECKa, A., Ivanovs, Ģ., **Smirnova (Vagale), I.**, “Quality of Service Measurements and Service Mapping for the Mobile Internet Access”// Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium PIERS 2017, Saint Petersburg, RU, 2017 pp. 2526.-2532.
- [37] Mohammed M. Alani, “Guide to OSI and TCP/IP Models”// Springer Publishing Company, Incorporated, ISBN 978-3-319-05151-2, 2014, pp. 5-50.
- [38] Eiropas Telekomunikāciju standartu institūts “Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); User related QoS parameter definitions and measurements; Part 1: General” (202 057-1 V1.3.1 (2008-07)), 2008 – pp. 10-34.

- [39] Eiropas Telekomunikāciju standartu institūts “Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); User related QoS parameter definitions and measurements; Part 4: Internet access” (202 057-4 V1.2.1 (2008-07)), 2008 – pp. 10-32.
- [40] Starptautiskā Telekomunikāciju Savienība (ITU), Rekomendācija ITU-T E.800 “Definitions of terms related to quality of service”, 2008 – pp. 1-21.
- [41] Starptautiskā Telekomunikāciju Savienība (ITU), Rekomendācija ITU-T G.1000 “Communications quality of service: A framework and definitions”, 2001 – pp. 1-7.
- [42] Starptautiskā Telekomunikāciju Savienība (ITU), Rekomendācija ITU-T G.1010 “End-user multimedia QoS categories”, 2001 – pp. 1-10.
- [43] Eiropas Telekomunikāciju standartu institūts “User Group; Quality of telecom services; Part 1: Methodology for identification of indicators relevant to the Users” (ETSI EG 202 009-1 V1.3.1), 2014 – pp. 17-47.
- [44] Eiropas Telekomunikāciju standartu institūts “User Group; Quality of telecom services; Part 2: User related indicators on a service specific basis” (ETSI EG 202 009-2 V1.3.0), 2014 – pp. 11-62.
- [45] Eiropas Telekomunikāciju standartu institūts “Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 1: Assessment of Quality of Service” (ETSI TS 102 250-1 V2.2.1), 2011 – pp.12-26.
- [46] Eiropas Telekomunikāciju standartu institūts “Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 2: Definition of Quality of Service parameters and their computation” (ETSI TS 102 250-2 V2.4.1), 2015 – pp.32-220.
- [47] Eiropas Telekomunikāciju standartu institūts “Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 3: Typical procedures for Quality of Service measurement equipment” (ETSI TS 102 250-3 V2.3.2), 2015. pp.27-43
- [48] Eiropas Telekomunikāciju standartu institūts “Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); Throughput Measurement Guidelines” (ETSI EG 203 165 V1.1.1), 2012 – pp.8-28.
- [49] Starptautiskā Telekomunikāciju Savienība (ITU), Rekomendācija ITU-T Y.2617 “Quality of service guaranteed mechanisms and performance model for public packet telecommunication data networks”, 2016 – pp.3-7.
- [50] Lipenbergs E., “Ilglaiēcīgi piemērojama novērtēšanas ietvara izstrāde platjoslas interneta pakalpojuma kvalitātes uzraudzībai”, Rīgas Tehniskā universitāte Elektronikas un Telekomunikāciju fakultāte, Promocijas darbs, Rīga, 2019 – 39., 91.-96.lpp.
- [51] M. Mathis, M. Allman, “A Framework for Defining Empirical Bulk Transfer Capacity Metrics”, Internet Engineering Task Force IETF, RFC 3148, July 2001.

- [52] Oueis, J., Strinati, E., “Uplink Traffic in Future Mobile Networks: Pulling the Alarm.”, International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks, 2016., pp. 583-593.
- [53] Sundaresan K., White G., Glennon S., “Latency Measurement: What is latency and how do we measure it?” Society Of Cable Telecommunications Engineers (SCTE), International Society of Broadband Experts (ISBE), CableLabs, NCTA, Fall Technical Forum, October 2020. – pp.4-24.
- [54] Starptautiskā Telekomunikāciju Savienība (ITU), Rekomendācija ITU-T Y.1540 “Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance parameters”, 2019 – pp.74.
- [55] Vasanthi Dwaraka Bhamidipati, Swetha Kilari “Effect of Delay/ Delay Variation on QoE in Video Streaming”, Master Thesis, School of Computing at Blekinge Institute of Technology, Sweden, 2010. – pp.8-25.
- [56] Eiropas Telekomunikāciju standartu institūts “Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); Procedures for the identification and selection of common modes of de-jitter buffers and echo cancellers” (ETSI TS 102 929 V2.3.1), 2018 – p.11.
- [57] GSMA “4G/5G Network Experience Evaluation Guideline”, February, 2020, pp.15-16, 26.
- [58] Feamster N., Livingood J., “Measuring Internet Speed: Current Challenges and Future Recommendations” Communications of the ACM, Vol. 63 No. 12, December 2020 – pp. 72-80.
- [59] Alcock, S., Nelson R. “An Analysis of TCP Maximum Segment Sizes”, University of Waikato, Hamilton, New Zealand, 2010 – pp.1-6.
- [60] Stevens W., “TCP Slow Start, Congestion Avoidance, Fast Retransmit, and Fast Recovery Algorithms”, Internet Engineering Task Force IETF, RFC 2001, January 1997 – pp.4-13.
- [61] Allman M., Paxson V., Blanton E., “TCP Congestion Control” Internet Engineering Task Force IETF, RFC 5681, September 2009 – pp.4-13.
- [62] Allman M., Floyd S., and Partridge C., “Increasing TCP’s initial window” Internet Engineering Task Force IETF, RFC 3390, October 2002 – pp.4-16.
- [63] Borman D., “TCP Options and Maximum Segment Size (MSS)” Internet Engineering Task Force IETF, RFC 6691, July 2012 – pp.2-5.
- [64] Mogul J., Deering S., “Path MTU Discovery” Internet Engineering Task Force IETF, RFC 1191, November 1990 – pp.3-18.
- [65] Postel, J., “The TCP Maximum Segment Size and Related Topics” Internet Engineering Task Force IETF, RFC 879, November 1983 – pp.1-10.
- [66] Jacobson V., Braden R., Borman D., “TCP Extensions for High Performance”, Internet Engineering Task Force IETF, RFC 1323, May 1992 – pp.2-25.

- [67] James F. Kurose, Keith W. Ross, "Computer networking : a top-down approach. 6th ed" // Pearson, ISBN-13: 978-0-13-285620-1, 2012 – pp.35-47, 185-285.
- [68] Kevin R. Fall, W. Richard Stevens, "TCP/IP Illustrated, Vol. 1: The Protocols" // Addison-Wesley Professional, ISBN: 9780321336316, 2011, pp.579-793.
- [69] Al-Bahadili, Hussein, "Simulation in Computer Network Design and Modeling: Use and Analysis" // IGI Global, ISBN13: 9781466601918, 2012 – pp.259.-283.
- [70] Yang, P., Luo, W., Xu, L., Deogun, J.S., Lu, Y., "TCP Congestion Avoidance Algorithm Identification," 2011 31st International Conference on Distributed Computing Systems, 2011, pp. 310-321.
- [71] N. Dukkupati, T. Refice, Y. Cheng, J. Chu, T. Herbert, A. Agarwal, A. Jain, and N. Sutin, "An argument for increasing TCP's initial congestion window," ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol. 40, no. 3, July 2010 – pp.27–33.
- [72] Abed, G., Ismail, M., Jumari, K., "Exploration and evaluation of traditional TCP congestion control techniques", Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, 2012 – pp.145–155.
- [73] Constantine B., Forget G., Geib R., Schrage R., "Framework for TCP Throughput Testing", Internet Engineering Task Force IETF, RFC 6349, August 2011 – pp.5-26.
- [74] Bauer, S., Clark, D., Lehr, W., "Understanding Broadband Speed Measurements" TPRC 2010, SSRN: <https://ssrn.com/abstract=1988332>, 2010 – pp.1-38.
- [75] R. Prasad, C. Dovrolis, M. Murray, K. Claffy, "Bandwidth estimation: metrics, measurement techniques, and tools," IEEE Network, vol. 17, no. 6, Nov.-Dec. 2003 – pp. 27-35.
- [76] M. A. Alrshah and M. Othman, "Performance evaluation of parallel TCP, and its impact on bandwidth utilization and fairness in high-BDP networks based on test-bed," 2013 IEEE 11th Malaysia International Conference on Communications (MICC), 2013 – pp. 23-28.
- [77] Eiropas Telekomunikāciju standartu institūts "Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS and network performance metrics and measurement methods; Part 4: Indicators for supervision of Multiplay services" (ETSI ES 202 765-4 V1.1.1 (2010-10)), 2010 – pp. 10-20.
- [78] Starptautiskā telekomunikāciju savienība (ITU); Rekomendācija E.800 Quality of telecommunication services: concepts, models, objectives and dependability planning – Terms and definitions related to the quality of telecommunication services, 2008. – pp. 5-47.
- [79] Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC) "A framework for Quality of Service in the scope of Net Neutrality", BoR (11) 53, 2011. pp. 6-53.
- [80] Lipenbergs, E., StafECKa, A., Ivanovs, G., **Smirnova (Vagale), I.**, Gavars P., "Quality of Service Parameter Measurements Data Analysis in the Scope of Net Neutrality"//

- Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium PIERS 2017, Nanyang, SG, 2017, pp. 1-5.
- [81] **Smirnova (Vagale), I.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V., Ivanovs, G., The Analysis of the Impact of Measurement Reference Points in the Assessment of Internet Access Service Quality, No: 2019 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2019), KĀina, Ksiamena, 17- 20 decembris, 2019.
- [82] Lietuvas Republikas elektronisko komunikāciju regulējošās iestādes (RTT) 2020.gada 3.marta ziņojums Nr. LD-708 “Bezvadu interneta piekļuves pakalpojumu kvalitātes rādītāji 2019.gadā”, pieejams: <https://www.rtt.lt/d/belaides-interneto-prieigos-paslaugu-kokybes-rodikliu-ivertinimo-ataskaita-4/> - 7.lpp.
- [83] Patērētāju aizsardzības un tehniskās uzraudzības departamenta (TTJI) 2019. gada 2.septembra pakalpojumu kvalitātes mērījumu rezultātu kopsavilkums “Mobilā interneta datu pārraides ātrums Igaunijā 2019.gadā”, pieejams: <https://www.ttja.ee/eraklient/side-ja-meediateenused/sideteenused-numeratsioon/mootmised> - 3.lpp.
- [84] Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas (SPRK) 2020.gada 23.aprīļa pārskats “Elektronisko sakaru pakalpojumu kvalitātes pārskats par 2019. gadu”, pieejams: https://www.sprk.gov.lv/sites/default/files/editor/ESPD/Faili/Parskati/KVALITATES_PARSKATS2019.pdf – 10-13.lpp.
- [85] Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas (SPRK) 2020.gada 23.aprīļa pārskats “Elektronisko sakaru pakalpojumu kvalitātes pārskats par 2020. gadu”, pieejams: https://www.sprk.gov.lv/sites/default/files/editor/ESPD/Faili/Parskati/KVALITATES_PARSKATS2020.pdf – 19.lpp.
- [86] **Smirnova (Vagale), I.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V. “Mathematical algorithm for processing measurement results of internet access service in the scope of net neutrality”// Proceedings of LATVIAN JOURNAL OF PHYSICS AND TECHNICAL SCIENCES, LV, 2018, N 3, pp. 63.-69.
- [87] **Vagale, I.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V., Ivanovs, G., Development of Internet Measurement Principles for Representation of Measured Provision of Service (QoS-2). Journal of Information and Telecommunication, 2021, Vol. 5, No. 2., 267. - 277.lpp.
- [88] Krastiņš, O. “Statistika un ekonometrija: mācību grāmata augstskolām” // Rīga: LR Valsts statistikas komiteja, 1998. – 30.lpp.
- [89] Juris Rieksts-Riekstiņš “Hipotēžu pārbaude ar neparametriskajiem testiem” Diplomdarbs, Rīga: Latvijas Universitāte, Fizikas un matemātikas fakultāte, matemātikas nodaļa, 2011. – 13.lpp.
- [90] S. Siegel and N.J. Castellan Jr. “Nonparametric statistics for the behavioral sciences” // McGraw-Hill Book Company, 1988 – p. 204.

- [91] Weiers R.M., "Introduction to Business Statistics, Seventh Edition" // South-Western, Cengage Learning, 2011 – pp. 293.-294.
- [92] 3GPP TS 37.320. V16.6.0 (2021-09) 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio measurement collection for Minimization of Drive Tests (MDT); Overall description; Stage 2 (Release 16) – pp. 9-28.
- [93] 3GPP TS 32.422 V12.6.0 (2021-03) 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Telecommunication management; Subscriber and equipment trace; Trace control and configuration management (Release 12) – pp. 11-140.
- [94] J. Johansson, W. A. Hapsari, S. Kelley and G. Bodog, "Minimization of drive tests in 3GPP release 11," in IEEE Communications Magazine, vol. 50, no. 11, November 2012 – pp. 36-43.
- [95] W. A. Hapsari, A. Umesh, M. Iwamura, M. Tomala, B. Gyula and B. Sebire, "Minimization of drive tests solution in 3GPP," in IEEE Communications Magazine, vol. 50, no. 6, June 2012 – pp. 28-36.
- [96] Micheli D., Diamanti R., "Statistical Analysis of Interference in a Real LTE Access Network by Massive Collection of MDT Radio Measurement Data from Smartphones," 2019 PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring), 2019 – pp. 1906-1916.
- [97] Po-Chiang Lin, "Minimization of Drive Tests using measurement reports from user equipment," 2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), 2014 – pp. 84-85.
- [98] Baumann, D., "Minimization of Drive Tests (MDT) in Mobile Communication Networks.", Seminars FI / IITM WS 13/14, Network Architectures and Services, March 2014 – pp. 9-16.
- [99] Chernogorov F., Puttonen J., "User satisfaction classification for Minimization of Drive Tests QoS verification," 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013 – pp. 2165-2169.
- [100] Rohde & Schwarz, "LTE- Advanced (3GPP Rel.11) Technology Introduction", White Paper // Rohde & Schwarz GmbH & Co, 2013. – 29.-30.lpp.
- [101] Scaloni A., "Minimization of Drive Test (MDT) An Innovative Methodology for Measuring Customer Performance on Mobile Network "The GeoSynthesis Project"", ITU Workshop on "Benchmarking of emerging technologies and applications. Internet related performance measurements" Geneva, Switzerland, March 11th 2019.

- [102] Highland, F., Stephenson, J., “Fitting the Problem to the Paradigm: Algorithm Characteristics Required for Effective Use of MapReduce” *Procedia Computer Science*, 2012, pp. 212–217.
- [103] **Smirnova (Vagale), I.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V., Gavars, P., Ivanovs, Ģ. Network Slicing in the Scope of Net Neutrality Rules. No: Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS 2019), Itālija, Roma, 17.-20. jūnijs, 2019.
- [104] Twilio Inc.: How to Determine Good Cellular Signal Strength / Elektronisks resurss. - <https://www.twilio.com/docs/iot/supersim/how-determine-good-cellular-signal-strength>
- [105] Telco Antennas Pty Ltd: 4G LTE Signal Strength Reference Guide / Elektronisks resurss. - <https://www.telcoantennas.com.au/blog/guide-to-mobile-networks/4g-lte-signal-strength-reference-guide/>
- [106] Centrālās statistikas pārvalde: Centrālās statistikas pārvaldes datubāze / Elektronisks resurss - <https://stat.gov.lv/lv>
- [107] Soft Computing and Intelligent Information Systems: Introduction to MapReduce / Elektronisks resurss - <http://sci2s.ugr.es/BigData#Big%20Data%20Technologies>
- [108] Push Technology, Inc.: Browser connection limitations / Elektronisks resurss. - https://docs.pushtechnology.com/cloud/latest/manual/html/designguide/solution/support/connection_limitations.html
- [109] The Energy Sciences Network (ESnet): Host Tuning / Elektronisks resurss. - <https://fasterdata.es.net/host-tuning/background/>
- [110] Dheeraj Sanghi: Computer Networks (CS425) / Elektronisks resurss. - <https://www.cse.iitk.ac.in/users/dheeraj/cs425/lec21.html>
- [111] CRnetPACKETS, Network performance analysis: The relationship between the Maximum Transmission Unit (MTU) and the Maximum Segment Size (MSS) / Elektronisks resurss. - <https://crnetpackets.com/2016/01/27/the-relation-between-maximum-transmission-unit-mtu-and-the-maximum-segment-size-mss/>
- [112] European Commission, Eurostat, RAMON (Reference And Management Of Nomenclatures): NUTS (Nomenclature of Territorial Units for Statistics), by regional level, version 2021 / Elektronisks resurss. - https://ec.europa.eu/eurostat/ramon/nomenclatures/index.cfm?TargetUrl=LST_NOM_DTL&StrNom=NUTS_2021L&StrLanguageCode=EN&IntPcKey=&StrLayoutCode=HIERARCHIC
- [113] Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisija: Elektronisko sakaru nozares rādītāji faktos un skaitļos – 2020 / Elektronisks resurss. - https://infogram.com/es_nozares_raditaji_2020-1hd12yx3rpmqw6k?live
- [114] HighSpeedInternet: Your Ultimate Guide to Internet Speed: Everything You Need to Know / Elektronisks resurss. - highspeedinternet.com

- [115] The Analysis Factor, LLC: Checking the Normality Assumption for an ANOVA Model / Elektronisks resurss. - <https://www.theanalysisfactor.com/checking-normality-anova-model/>
- [116] Frost, J.: Using Post Hoc Tests with ANOVA / Elektronisks resurss. - <https://statisticsbyjim.com/anova/post-hoc-tests-anova/>

PIELIKUMU SARAKSTS

1. pielikums.

Ziņojumu starptautiskās konferencēs, publikāciju zinātniskajos žurnālos, rakstu pilna teksta konferenču rakstu krājumos saraksts.

2. pielikums.

Promocijas darba rezultātu izmantošana starptautiskos projektos, kā arī elektronisko sakaru nozares semināros un konferencēs.

3. pielikums.

Promocijas darba rezultātu izmantošana Latvijas regulēšanas ietvara izstrādē un pilnveidošanā saistībā ar plašjoslas interneta kvalitātes jautājumiem.

Ziņojumu starptautiskās konferencēs, publikāciju zinātniskajos žurnālos, rakstu pilna teksta konferenču rakstu krājumos saraksts

Ziņojumi starptautiskajās konferencēs:

1. Lipenbergs, E., Stafecka, A., Ivanovs, Ģ., **Smirnova, (Vagale) I.** Quality of Service Measurements and Service Mapping for the Mobile Internet Access. No: 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS 2017), Krievija, Sanktpēterburga, 22.-25. maijs, 2017.
2. Lipenbergs, E., **Smirnova, (Vagale) I.**, Stafecka, A., Ivanovs, Ģ., Gavars, P. Quality of Service Parameter Measurements Data Analysis in the Scope of Net Neutrality. No: 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS 2017), Singapūra, Nanyang, 19.-22. novembris, 2017.
3. **Smirnova, (Vagale) I.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V., Gavars, P., Ivanovs, Ģ. Network Slicing in the Scope of Net Neutrality Rules. No: Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS 2019), Itālija, Roma, 17.-20. jūnijs, 2019.
4. **Smirnova, (Vagale) I.**, Lipenbergs E., Bobrovs V., Ivanovs Ģ., “The Analysis of the Impact of Measurement Reference Points in the Assessment of Internet Access Service quality”// Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium PIERS 2019-Fall, PIERS Xiamen, Ķīna, 17.-20. decembris, 2019.

Publikācijas zinātniskajos žurnālos:

1. **Smirnova (Vagale), I.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V. “Mathematical algorithm for processing measurement results of internet access service in the scope of net neutrality”// Proceedings of LATVIAN JOURNAL OF PHYSICS AND TECHNICAL SCIENCES, LV, 2018, N 3, pp. 63.-69.
2. **Vagale (Smirnova), I.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V., Ivanovs, G., Development of Internet Measurement Principles for Representation of Measured Provision of Service (QoS-2). Journal of Information and Telecommunication, 2021, Vol. 5, No. 2., 267. - 277.lpp.

Raksti pilna teksta konferenču rakstu krājumos:

1. Lipenbergs, E., Stafecka, A., Ivanovs, Ģ., **Smirnova, (Vagale) I.** Quality of Service Measurements and Service Mapping for the Mobile Internet Access. In: 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS 2017), Russia, Saint Petersburg, 22-25 May, 2017. pp. 2526.-2532.
2. Lipenbergs, E., **Smirnova, (Vagale) I.**, Stafecka, A., Ivanovs, Ģ., Gavars, P. Quality of Service Parameter Measurements Data Analysis in the Scope of Net Neutrality. In: 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS 2017), Singapore, Nanyang, 19-22 November, 2017., pp. 1230.-1234.
3. **Smirnova, (Vagale) I.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V., Gavars, P., Ivanovs, Ģ. Network Slicing in the Scope of Net Neutrality Rules. In: Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS 2019), Italy, Rome, 17-20 June, 2019., pp. 1516. - 1521.

4. **Vagale (Smirnova), I.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V., Ivanovs, Ģ. The Analysis of the Impact of Measurement Reference Points in the Assessment of Internet Access Service Quality. No: Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - Fall): 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium, Ķīna, Xiamen, 17.-20. decembris, 2019. Piscataway: IEEE, 2019, pp. 2972.-2977.

Promocijas darba rezultātu izmantošana starptautiskos projektos, kā arī elektronisko sakaru nozares semināros

1. Eiropas Elektronisko sakaru regulatoru iestādes (BEREC) End-user ekspertu darba grupas dokumentu sagatavotāju grupas dalībnieks, 2020.
2. Interneta kvalitātes mērījumu datu analītika un rezultātu sagatavošana un iesniegšana Eiropas Komisijas projektam “Mapping of Fixed and Mobile Broadband Services in Europe (SMART 2014/0016)”, 2017-2021.
3. Prezentācija seminārā: European Commission DG CONNECT 3rd Stakeholder Consultation Workshop on “Mapping of fixed and mobile Broadband Services in Europe”, Brussels, Belgium, 2017
4. Prezentācija seminārā: Eastern Partnership Electronic Communications Regulators Network (EaPeReg) technical workshop on Net Neutrality, Minsk, Republic of Belarus, 2017.
5. Prezentācija seminārā: Eastern Partnership Electronic Communications Regulators Network (EaPeReg) technical workshop on consumer issues – empowerment and QoS from the point of view of consumers, Kyiv, Ukraine, 2016.
6. Eiropas Elektronisko sakaru regulatoru iestādes (BEREC) Open Internet ekspertu darba grupas dalībnieks, 2015-2021.

Promocijas darba rezultātu izmantošana Latvijas regulēšanas ietvara izstrādē un pilnveidošanā saistībā ar platjoslas interneta kvalitātes jautājumiem

1. Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisija: “**Elektronisko sakaru pakalpojumu kvalitātes prasību, kvalitātes pārskatu iesniegšanas un publiskošanas noteikumi**”, SPRK noteikumu projekts.
2. Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisija: “**Elektronisko sakaru pakalpojuma līguma un kopsavilkuma noteikumi**”, SPRK noteikumu projekts.
3. Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisija: “**Elektronisko sakaru pakalpojumu kvalitātes mērījumu metodika**”, SPRK noteikumu projekts.
4. Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisija: ikgadēji **Elektronisko sakaru pakalpojumu kvalitātes pārskati**, SPRK, 2016-2020.
5. Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisija: ikgadēji **Pārskati par atvērta interneta prasību uzraudzību**, SPRK, 2017-2020.