

SIDE ÜHENDUVUSE ARENGU TULEVIKUTRENDID, UUTE TEHNOLOOGIATE ÜLEVAADE JA VÕIMALUSED NING KASUTUSPOTENTSIAAL EESTI VAATES

Uuringu lõpparuanne

V1.0

09.10.2024

Uuringu tellis Majandus ja Kommunikatsiooniministeerium. Uuringu juhtmeeskonda kuulusid sideosakonnast projektijuht Liisi Moks ja juhataja asetäitja Mart Laas.

Uuringu teostasid Tallinna Tehnikaülikooli Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituudi ja Majandusanalüüsi ja rahanduse instituudi eksperdid:

- **Anet Tammets**, uuringu projektijuht
- **Priit Roosipuu,** sidelahenduste arendaja/raadiovõrkude valdkonna ekspert
- **Artjom Saia,** majanduse valdkonna ekspert

Autorite tänu

Uuringu teostajad tänavad uuringu tellijat meeldiva koostöö eest!

Aitäh!

Eesti ainsa tehnoloogiaülikoolina on Tallinna Tehnikaülikool (TalTech) inseneri- ja tehnika- hariduse lipulaev Eestis. TalTechi hariduse unikaalsus peitub tehnika-, loodus-, täppis-, majandus- ja terviseteaduste sünergias, mis aitab kaasa uute ideede sünnile. TalTechi eesmärk on saada Läänemere regiooni juhtivaks tehnoloogia- ülikooliks. Käesolevas projektis esindas TalTechi Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut. Instituut loodi 1962. aastal Tallinna Polütehnilises Instituudis (nagu Tallinna Tehnikaülikooli sellel ajal nimetati). Sellest ajast alates on instituudis toimunud elektroonikaalane õppe- ja teadustöö. 2011. aastal nimetati instituut ümber Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituudiks.

Majandusanalüüsi ja rahanduse instituut asutati 1992. aastal teoreetilise majandusteaduse ja -metodoloogia instituudi nime all, oma praegust nime kannab instituut alates 2016. aastast. Meie instituudi tegevust iseloomustavad põhilised märksõnad on kvantitatiivne majandusanalüüs ja rahandus, kaasaegsed kontseptuaalsed lähtekohad majandussüsteemi toimimise mõistmiseks, majandus-, rahandus- ja poliitikamõjude ning -protsesside tõenduspõhine uurimine, kõrgetasemeline teadustöö, interdistsiplinaarsus, rahvusvaheline koostöö, rakenduslikkus ja teaduspõhine õppetöö.

Tallinna Tehnikaülikool
Telefon: 620 2002
E-post: info@taltech.ee
Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn

SISUKORD

Tabelite loetelu 3
Jooniste loetelu 4
Lühendid 5
Kokkuvõte 7
Sissejuhatus 9
1. Uued tehnoloogiad sidevaldkonnas 11
1.1 5G võrgud 13
1.1.1. 5G nR nsa 13
1.1.2. 5G nR sa 14
1.1.3. Kolmandate osapoolte juurdepääs 5G teenuste loomisele 16
1.1.4. 5G Fixed Wireless Access (FWA) 17
1.1.5. 6G mobiilside 18
1.1.6. Sagedusalad 18
1.2 Privaatvõrgud (NPN) 20
1.3 Pilvevõrgud 22
1.4 Open RAN 25
1.5 Single RAN (SRAN) 28
1.6 Mobiilsidevõrgu ressursside jagamine 29
1.6.1 MORAN ja MOCN 29
1.7 EDGE Computing 34
1.7.1 EDGE node-i defineerimine 40
1.8 Interneti protokollid IPv4 ja IPv6 42
1.9 WiFi 45
1.9.1 WiFi 6 ja WiFi 7 45
1.10 LEO SAT 46
1.11 IoT 47
2 Tehnoloogiate analüüs ja järeldused 49
2.1 5G juurutamine Eestis mobiilsideoperaatorite vaatenurgast 53
2.1.1 Telia Eesti AS olukord 53
2.1.2 Elisa Eesti AS olukord 54
2.1.3 Tele2 Eesti AS olukord 55
2.2 5G juurutamise analüüs 57

2.2.1 5G juurutamise kulutulemused operaatori kohta 57
2.2.2 5G-teenuste turu mahu hindamine 60
2.3 Edge Nodes 63
1.2. Analüüsi järeldused 65

TABELITE LOETELU

Tabel 1 Seadmete kulud kasutuselevõtustrateegia järgi. 58
Tabel 2 Kulude tulemused põhinevad 1 km^2 objektidevahelisel kaugusel (Inter-Site Distance - ISD) ja on esitatud nelja stsenaariumi põhjal TCO osas. 59
Tabel 3 Eesti objektide keskmised arvestuslikud kulud objekti kohta. 59
Tabel 4. Võimalik 2023. aasta 5G teenuste turumaht erinevate stsenaariumite juures. .61
Tabel 5 Servasõlmede kasutuselevõtu aastane kasv Eestis vs. EL keskmine.....64

JOONISTE LOETELU

Joonis 1 Tehnoloogiate sidusus kaasaegsetes sidevõrkudes 11
Joonis 2 4G LTE mobiilsidevõrk.....12
Joonis 3 5G NR NSA mobiilsidevõrk 13
Joonis 4 5G NR SA mobiilsidevõrk 14
Joonis 5 NPN stsenaarium 1 – SNPN.....20
Joonis 6 NPN stsenaarium 2 - PNI-NPN jagatud raadiovõrguga 20
Joonis 7 NPN stsenaarium 3 - PNI-NPN jagatud raadiovõrgu ja kontrolltasandiga.....21
Joonis 8 NPN stsenaarium 4 - PNI-NPN lahendus privaatse võrguviilakana (Private Slice) 21
Joonis 9 Pilve vajalikud omadused 22
Joonis 10 Pilve teenusmudelid 23
Joonis 11 Pilve kasutusmudelid.....23
Joonis 12 Open RAN arhitektuur 25
Joonis 13 Single RAN lahendus võrrelduna Open RAN lahendusega 28
Joonis 14 Võrgu ressursside jagamise mudelid (3GPP) 30
Joonis 15 Võrgu arhitektuur RAN võrgu jagamise korral (GSMA assotsiatsiooni järgi) ...31
Joonis 16 MORAN ja MOCN lahendused (GSMA assotsiatsiooni järgi) 32
Joonis 17 MOCN lahendus 4G ja 5G tuumvõrkude operaatorite korral. 33
Joonis 18 Edge computing asukohad[30] 37
Joonis 19 EDGE computing-u olulisemad pakkujad.....38
Joonis 20 EDGE computing-u pakkujate konfiguratsioonid/suhted[43].....39
Joonis 21 Latentsuse testid 5G-Routes projektis Valgas (TalTech, Eesti) ja Valkas (LMT, Läti) 5G SA test võrgus. (Antud raport ei ole hetkel vabalt saadaval.) 40
Joonis 22 Määratud ja 5G kasutamiseks valmis spektri hulk nn 5G teerajajate sagedusalades.Need sagedusalad on 700 MHz (703–733 MHz ja 758–788 MHz), 3.6 GHz (3400–3800 MHz) ja 26 GHz (1000 MHz vahemikus 24250–27500 MHz). Kõigil kolmel spektri sagedusalal on võrdne kaal.....50
Joonis 23 Üldine 5G leviala. Vähemalt ühe 5G mobiilsidevõrgu kattega leibkondade protsent. 51
Joonis 24 5G levi sagedusalas 3.4–3.8 GHz. % leibkondadest, kus on 5G katvus 3.4–3.8 GHz spektri sagedusala kasutades. 52
Joonis 25 5G SIM-kaartide osakaal elanikkonnast. 5G mobiilitellimused, mis on määratletud kui SIM-kaardid, mis tekitasid viimase 90 päeva jooksul mis tahes Interneti-liiklust kodumaises 5G võrgus. Allikas: EU's Digital Decade.....61
Joonis 26. Servasõlmed. Arvutus sõlmede arv, mille latentsusaeg on alla 20 millisekundi. 63

LÜHENDID

Lühend	Selgitus
ARPU	Average Revenue Per User
API	Application Programming Interface
CA	Carrier Aggregation
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CDMA	Code Division Multiple Access
EN-DC	New Radio Dual Connectivity
EPC	Evolved Packet Core
GSM	Global System for Mobile Communications
GPRS	General Packet Radio Service
NR	New Radio ehk uus raadioside
5G-ACIA	5G Alliance for Connected Industries and Automation
5GC	Next Generation Core (5G Core)
5G SA	5G Stand Alone
mMTC	Massive Machine Type Communications
MORAN	Multi-Operator RAN
NEF	Network Exposure Function
NIST	US National Institute of Standards and Technology, Information Technology Laboratory
NG-C/U	Next Generation – Control/User
NPN	Non-Public Network
NSA	Non-stand alone
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
O-RAN	Open RAN
RAN	Radio Access Network
SMS	Short Message Service

Lühend	Selgitus
SNPN	Standalone Non-Public Network
TDMA	Time Division Multiple Access
VHCN	Very High-Capacity Networks
WCDMA	Wide band Code Division Multiple Access
4G LTE	4. põlvkonna mobiilside võrk – Long Term Evolution
VoLTE	Voice Over LTE

KOKKUVÕTE

Uuringu käigus tuvastasime, et **5G SA-tüüpi võrkude kommertskasutusse jõudmine järgmise viie aasta jooksul on kriitilise tähtsusega**, et luua võimalused 5G monetiseerimiseks ning uute 5G-spetsiifiliste teenuste turule toomiseks. Eriti oluline on 5G FWA (fikseeritud juhtmevaba ligipääs), mis aitab parandada lairiba interneti kättesaadavust Eestis lähima viie aasta jooksul. Samas prognoosime, et 6G mobiilsidetehnoloogia kommertskasutus Eestis toimub pigem 10 aasta perspektiivis.

Tehnoloogiate osas on **PaaS (Platform as a Service) ideaalne lahendus ettevõtetele, kes soovivad keskenduda innovatsioonile**, jättes infrastruktuuri haldamise spetsialistide hooleks. Meie kogemusele tuginedes on just PaaS pilveteenuste mudel sobivaim 5G võrgu uute teenuste loomisel, eriti väikeste ja keskmise suurusega ettevõtete (VKE) seas. Kuigi NEF (Network Exposure Function) loob võimaluse kasutada IaaS (Infrastructure as a Service) mudelit, on vajalik sellele luua integratsioon ja vahevara, et võimaldada VKE-del teenuste ja rakenduste arendamist ilma 5G võrgu spetsiifikat peensusteni tundmata. Seetõttu on oluline kaasata VKE-sektor uute 5G teenuste arendamisse juba lähima viie aasta jooksul.

Uuring näitas, et **O-RAN lahenduste integratsioon Eestis on suhteliselt keeruline ja ajamahukas**, mis on suurendanud tööjõukulusid. Seetõttu võib O-RAN viie aasta perspektiivis olla pigem sobiv privaatvõrkude loomiseks. Single RAN tehnoloogia on samas oluline, kuna see võimaldab operaatoritel mobiilside raadiovõrku tõhusalt arendada ja hallata ning samal ajal vähendada energiakulusid.

Lisaks toome välja, et **laialdast Edge Node-ide kasutust Eestis järgmise viie aasta jooksul tõenäoliselt ei toimu**, kuna puuduvad teenused, mis vajaksid latentsust alla 20 ms. Arvestades Eesti geograafilist suurust ja suuremate linnade paiknemist, on piisav 2-3 suurema Edge Node'i loomine, näiteks Tartus ja Pärnus. Alternatiivina näeksime suurema arvu lihtsamate (väikese arvutusvõimsusega) Edge Node'ide kasutamist.

IPv4/IPv6 dual stack lahenduse kasutamine on Eestis perspektiivikas ja jätkub ka järgmise 5-10 aasta jooksul. 5G ja 6G jaoks loodud madala latentsusega teenused hakkavad kasutama IPv6 protokolli, kuid nende toimimiseks ei ole vajalik ainult IPv6 võrgu olemasolu.

Lisaks pakuvad Leo satelliitside teenused võimalust interneti teenuse pakkumiseks kohtades, kus muud lairiba teenused on raskesti kättesaadavad või võrgud on ülekoormatud. **Oluline on integreerida Leo satelliitside teenused 5G mobiilside võrkudega,** et tagada uute teenuste kasutamine koostöös teiste mobiilside tehnoloogiatega ning **seeläbi pakkuda täiendavat lisandväärtust lõppkasutajatele.**

Lõpuks, MOCN (Multi-Operator Core Network) lahenduse puhul on võimalik, et sama RAN (Radio Access Network) võrku saavad ühiskasutusse võtta operaatorid, kellel on erinevad tuumvõrgud. Siiski ei kasuta praegu operaatorid Eestis MOCN ja MORAN lahendusi, vaid jagatakse ainult passiivseid seadmeid, nagu antennimaste ja tugijaama konteinereid. Kuna suurem osa Eestist on juba 5G võrkudega kaetud, ei ole enam vajadust jagamise järele, välja arvatud erilahenduste korral, näiteks sisevõrkude jagamisel hoonete sees

(DAS – Distributed Antenna System) ja transpordikoridoride katmisel. Eestisse on transpordikoridoride katmisel **5G kiire lairiba ühenduse jagamine oluline, et vähendada operaatorite kulusid**, kuna antud lahendustes on RAN võrgu koormus keskmine või madal ning ressursside jagamine võimaldab kõrgemat efektiivsust.

Uuringuga rõhutame, et mobiilsideoperaatorite peamine **väljakutse on andmeliikluse kiire kasv**, mis kuuekordistub aastaks 2030. Sellele vastamiseks on vajalik investeerida uue spektri hankimisse ja RAN-i täiendavatesse tugijaamadesse. 5G SA-tehnoloogia massiline kasutuselevõtt avab uusi teenuseid, mis vastavad erinevatele teenusekvaliteedi nõudmistele, edendades innovatsiooni erinevates tööstusharudes. **Siseriikliku rändluse ja 5G infrastruktuuri arendamine on Eestis oluline**, **et tagada kriitiline ühenduvus ja toetada digitaalseid teenuseid**. Samuti peaksid operaatorid keskenduma diferentseeritud teenuste pakkumisele, et suurendada tulude kasvu. 5G võrkude laienemine loob võimalusi süsiniku jalajälje vähendamiseks. Lõppkokkuvõttes on 5G monetiseerimine seotud turunduse ja partnerlussuhete arendamisega, et õigustada kõrgemaid tariife, mille eest tarbijad on valmis maksma, eriti FWA ja kiirusel põhinevate pakkumiste kaudu.

5G edasise arendamise osas võivad soovitused Eestile sisaldada:

Ühenduse infrastruktuur: a) Jätkata käimasolevaid jõupingutusi VHCN-i (Very High Capacity Network) ja 5G leviku toetamiseks, sealhulgas erainvesteeringute soodustamise ja kasutuselevõtu stimuleerimise kaudu; b) tagada uutele osalejatele piisav juurdepääs sagedusribale uuenduslike ettevõtetevaheliste (B2B) ja ettevõtetelt tarbijatele (B2C) rakenduste jaoks ning julgustada operaatoreid kiirendama 5G (SA) eraldiseisvate põhivõrkude kasutuselevõttu.

Küberturvalisus: jätkata 5G küberturvalisuse võimekuse juurutamist, et tagada turvalised ja vastupidavad 5G-võrgud.

Servasõlmed (Edge Node): kuna servaarvutus (Edge Comupting) on tehisintellekti, tulevase võrgu juurutamise ja asjade Interneti (IoT) oluline komponent, tuleb nendes valdkondades investeerimisporgammide ja strateegiate loomisel arvestada servasõlmede (Edge Node) juurutamisega.

SISSEJUHATUS

Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi tellitud uuringu **Side ühenduvuse arengu tulevikutrendid, uute tehnoloogiate ülevaade ja võimalused ning kasutuspotentsiaal Eesti vaates põhieesmärk** on saada ülevaade uutest side ühenduvuse arengu tulevikutrendidest ja sidevaldkonna tehnoloogiatest, mis aitaksid saavutada, et Eesti elanikkonnal oleks võimalik kasutada kvaliteetset sideühendust sõltumata asukohast ning tagaksid majanduse konkurentsivõime, nutikuse ja digitaliseerimise.

Tagamaks, et Eesti digitaalses valdkonnas konkurentsivõimelisena ja säilitada Eesti tugev digiriigi kuvand rahvusvaheliselt, peab olema kindlustatud digitaalse taristu vundament, milleks on side ühenduvus. Uuringu eesmärk on ettevaatavalt mõista: 1) millised on side ühenduvuse tulevikutrendid, 2) millistele neist peab riiklikul tasandil tähelepanu pöörama.

Uuring annab ülevaate:

- millised on uued tehnoloogiad sidevaldkonnas (näiteks OpenRAN, MORAN, NaaS, MOCN, FWA, IPv6, Edge Node, Single RAN, WiFi, LEO SAT, IoT.).
- Millised on side ühenduvuse arengutrendid lähima 5–10 aasta perspektiivis, võttes arvesse Eesti konteksti.
- Millised uued tehnoloogiad on Eesti jaoks kõige olulisemad Eesti digiarengu ja side ühenduvuse vaatepunktist ning arvestades sektori arengusuundumusi?
- Millised uued tehnoloogiad on keskkonnasäästlikumad ning aitavad saavutada energiatõhususe eesmärke?
- Millised on uute tehnoloogiate võimalused ja riskid Eesti vaates? Milliste uute tehnoloogiate kasutuselevõttu peaks Eesti soodustama ning milliste arengus aktiivselt kaasa rääkima?

Uuringu eesmärgist lähtuvalt võeti aluseks uuringu esimesel etapil tehnoloogiate sidusus kaasaegsetes sidevõrkudes, seejärel koostati hetkeolukorra ülevaade vastavalt uutele tehnoloogiatele, mida analüüsiti Eesti kontekstis 5-10 aasta perspektiivis ja arvestades keskkonnasäästlikkuse põhimõtteid, võimalusi ja riske.

Uuringu viisid läbi Tallinna Tehnikaülikooli Thomas Johan Seebecki elektroonikainstituut ja Majandusanalüüsi ja rahanduse instituut.

Käesolev lõpparuanne keskendub uuringu kahele etapile – **uued tehnoloogiad sidevaldkonnas** ja **tehnoloogiate analüüs ja järeldused**. Seega antakse ülevaade arenduses olevate tehnoloogiate kirjeldustest ja analüüsitakse nende potentsiaalse kasutatavuse, energiaefektiivsuse, keskkonnasäästlikkuse ja majandusliku tasuvuse kohta Eesti kontekstis.

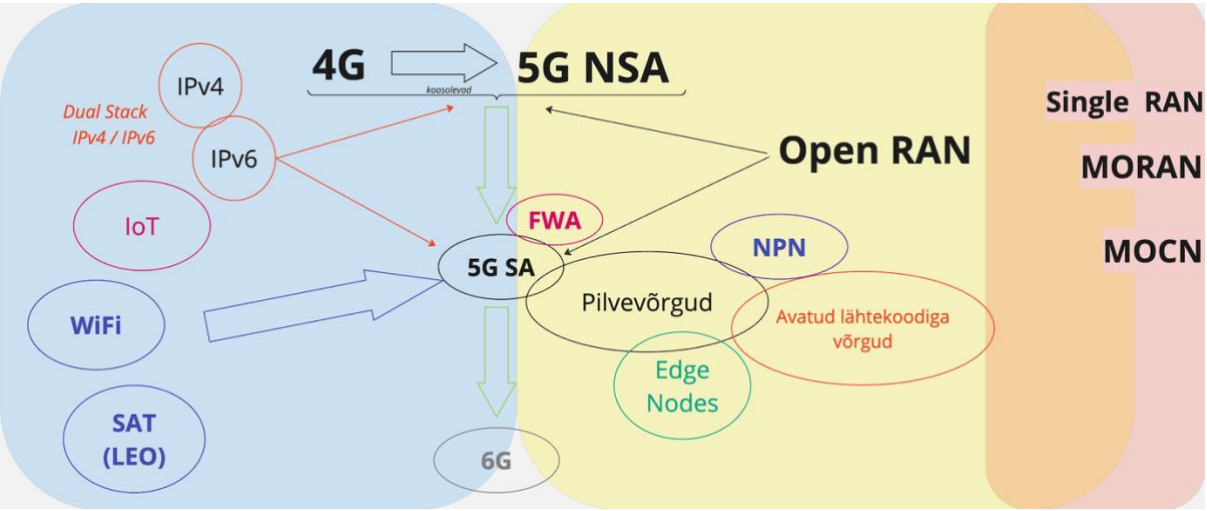
Autorid lähtusid analüüsi koostamisel põhimõtetest, milleks on ausus, erapooletus, tuginemine eriteadmistele ja südametunnistusele. Autorite eriteadmisi kinnitab vastavalt TalTechi pakkumuses välja toodud CV-d. Eksperdid esitavad tehnoloogiad nende seotuse

järjekorras. Tehnoloogiate hindamisel esitatud andmed ja muu informatsioon on kogutud ekspertide poolt heas usus avalikest allikatest, kui arvamuses ei ole eraldi välja toodud, et andmete algallikas on tellija või konkreetne kolmas isik.

1. UUED TEHNOLOOGIAD SIDEVALDKONNAS

2G GSM (Global System for Mobile Communications) oli esimene digitaalne raadiojuurdepääsuvõrgu tehnoloogia, mis kasutas ajajaotuslikku ühispöördust TDMA-d (Time Division Multiple Access). Selle tehnoloogia raames jagavad kasutajad ühte sageduskanalit, mille sees neile antakse eri ajapilud (time slot - see ongi ajajaotus). Ühes sageduskanalis on kaheksa ajapilu, mis võimaldab kaheksat samaaegset kasutajat ühe sageduskanali kohta. Läbilaskevõime suurendamiseks lisatakse tugijaamale sageduskanaleid.

2G GSM on kõneteenust pakkuv võrk, mis võimaldab mõnda piiratud andmesideteenust nagu SMS ja GPRS.3G WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) erineb 2G GSM-i tehnoloogiast, 3G kasutab eri kasutajate vaheliseks raadioressursside jagamiseks erinevaid ortogonaalseid koode. Selle tehnoloogia nimi on Code Division Multiple Access (CDMA) ehk koodjaotusega ühispöördus. 3G töötab teise raadiojuurdepääsuvõrguna 2G GSM-i raadiojuurdepääsuvõrgu kõrval. Nende raadiovõrgud ei ühildu omavahel ja vajavad eraldi sageduskanaleid.

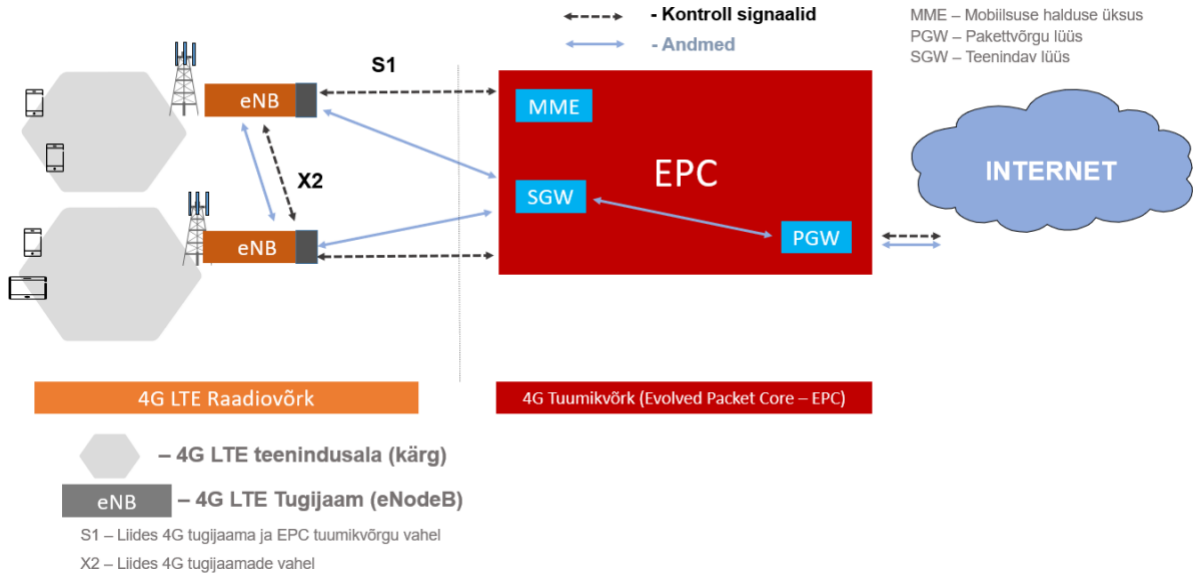


Joonis 1 Tehnoloogiate sidusus kaasaegsetes sidevõrkudes

Kaasaegsed sidevõrgud ühendavad endas mitmeid erinevaid tehnoloogiaid, mis on aja jooksul võrku lisatud ja peavad töötama koostöös (vt. Joonis 1).

3G WCDMA kasutab lairiba sageduskanaleid (5 MHz ühe kanali kohta). GSM kasutab kitsasriba sageduskanaleid (200 kHz ühe kanali kohta). GSM-iga võrreldes kasutab 3G sarnast kõneteenust ja lisaks IP-protokolli toetavaid suure andmekiirusega pakettandmesideteenuseid.
4G LTE (Long-Term Evolution) on oluliselt erinev tehnoloogia võrreldes varasemate 2G ja 3G tehnoloogiaga. 4G LTE kasutab kasutajaandmete edastamiseks kitsaid ortogonaalseid sageduskanaleid. Mille sagedusriba on 15 kHz ühe kanali kohta. Seda nimetatakse raadiojuurdepääsuvõrgu korral ortogonaalse sagedustihendusega (OFDM, Orthogonal

Frequency Division Multiplexing) pöördusmeetodiks. LTE kasutab suure hulga OFDM-kanalite mahutamiseks mastabeeritavat (scalable) sagedusriba (20 MHz sagedusriba korral kuni 1200 kanalit). 4G LTE korral ei toimu koostalitlust ühegi varasemal tehnoloogial põhineva raadiojuurdepääsuvõrgu lahendusega. 4G LTE on täielikult IP-protokolli põhine andmesidevõrk. Kõneteenuste võimaldamiseks peavad võrk ja lõppkasutaja seade (UE) toetama VoLTE (Voice over LTE) tehnoloogiat.
2G, 3G ja 4G raadiojuurdepääsuvõrgu tehnoloogiad on erinevad ning kasutajal saab konkreetsel ajahetkel olla ühendus ainult ühega neist. Lõppkasutaja seade suudab tuvastada ja töötada kõigil neil tehnoloogiatel põhinevaid sidevõrke, et teha kindlaks, millisel on kõige tugevam signaal. Võrguoperaator saab programmeerida SIM-kaardile tehnoloogiapõhised prioriteedid.



Joonis 2 4G LTE mobiilsidevõrk

4G LTE mobiilsidevõrgu arhitektuur on toodud Joonis 2. Suuremate andmeedastuse kiiruste saamiseks on kasutusel CA (Carrier Aggregation ehk sageduskandja agregatsioon) funktsionaalsus kus erinevad 4G LTE sagedused kombineeritakse kokku. 4G LTE tugijaam kasutab Single RAN platvormi (vt Single RAN (SRAN) peatükki) kus kõik erinevad 4G LTE sagedused on hallatud sama kontrolleri poolt tugijaamas.

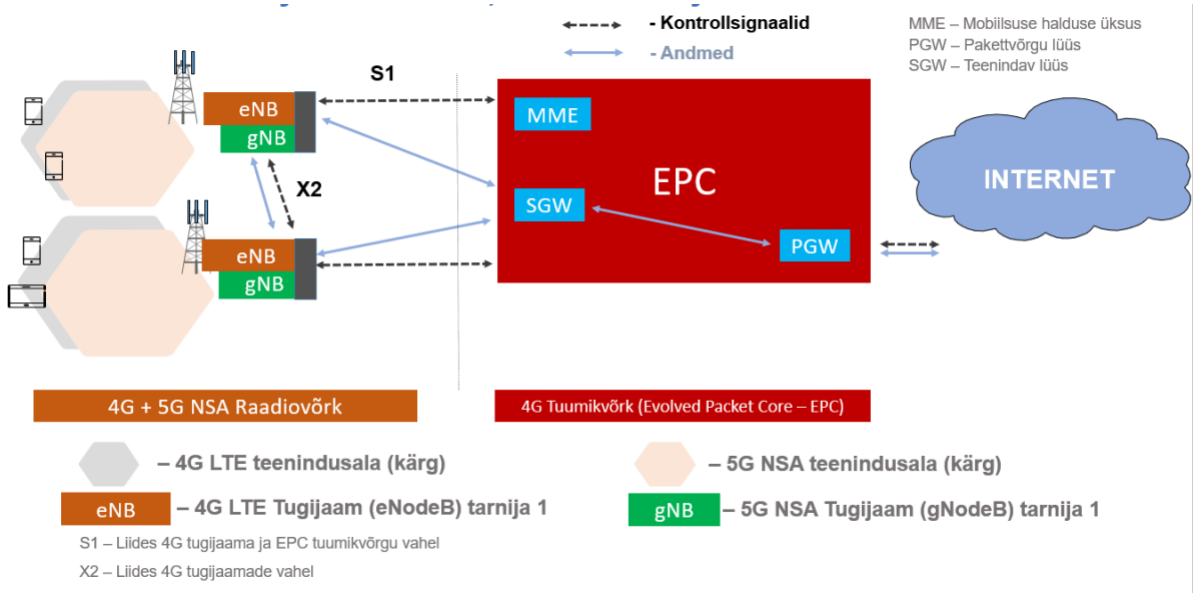
1.1 5G VÕRGUD

1.1.1. 5G NR NSA

5G NR (New Radio ehk uus raadioside) ühildub 4G LTE-ga (Long-Term Evolution ehk neljanda põlvkonna mobiilside). Võib öelda, et 4G LTE on minimaalne 5G NR-i konfiguratsioon. On saavutatud 5G NR-i toimimine koos 4G LTE-ga ja seda nimetatakse 5G NR NSA-ks (Non Stand Alone ehk mitteiseseisev). Seda tehakse EN-DC (New Radio Dual Connectivity ehk kahe võrgu liitühendus) funktsionaalsuse kaudu. Antud juhul on tegemist 5G NSA-tüüpi (mitteiseseisev 5G) lahendusega kus kontrollsignaalid käivad 4G LTE võrgu kaudu aga andmesignaalid liiguvad nii 4G LTE kui ka 5G NR raadioliidese kaudu. Kuna siin on vajalik 4G olemasolu on tegemist 5G mitteiseseisva lahendusega (5G NSA – Non-stand-alone). Antud konfiguratsioonis töötavad 4G LTE ja 5G NSA koostöös kasutades funktsionaalsust EN-DC (4G LTE 5G NR Dual Connectivity). Samuti kasutatakse 4G tuumvõrkku EPC (Evolved Packet Core ehk arendatud pakett-tuumik).

5G NSA ei paku 5G funktsioonide täiskomplekti. Peamiselt toetab see suuremaid andmekiirusi ja suurendab olemasoleva 4G LTE võrgu suutlikkust.

Võrguoperaatorile on kulutõhus võtta kõigepealt kasutusele 5G NSA ja seejärel minna üle 5G SA-le (Stand Alone). 5G NSA ei toeta raadiojuurdepääsuvõrgu viilutust (Slicing), mille korral teenusevoogude kvaliteet on eri teenuste ja kasutusmallide (use case) korral erinev. 5G NSA ei paku erituge sellistele kasutusmallidele nagu suurendatud andmesidekiirus (Enhanced Mobile Broadband, eMBB), tagatud ajakriitiline reaalajasüsteemide andmeside (Ultra Reliable Low Latency Communications, URLLC) ja suurearvuline väikeseadmete kommunikatsioon (Massive Machine Type Communications, mMTC).



Joonis 3 5G NR NSA mobiilsidevõrk

5G NR NSA mobiilsidevõrgu arhitektuur on toodud Joonis 3.

5G NSA-tüüpi võrgu lisamisel sama tarnija võrku lisatakse Single RAN (vt peatükki

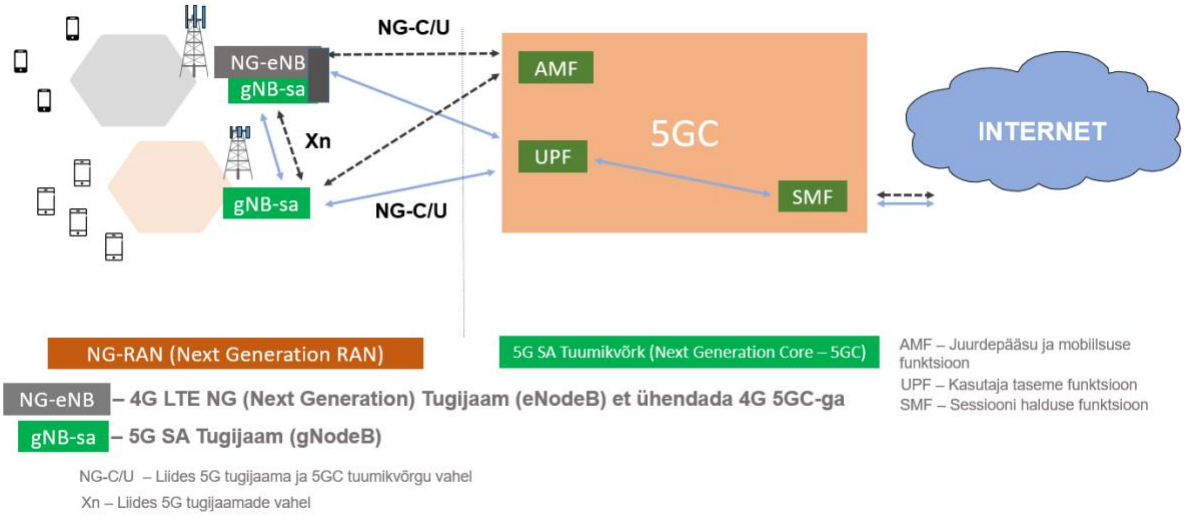
Single RAN (SRAN)) tugijaamale uus raadiokaart mis toetab 5G NR raadioliidest. Suuremate andmeedastuse kiiruste saamiseks on kasutusel CA (Carrier Aggregation) funktsionaalsus kus erinevad 4G LTE ja 5G NSA sagedused kombineeritakse kokku.

1.1.2. 5G NR SA

5G NR SA-tüüpi võrk on 5G täiustatud versioon, mis kasutab selliseid funktsioone nagu pilvvõrk, ja virtualiseeritud funktsioone, mille korral võrgu elemendid on tarkvaras virtualiseeritud. See teeb raadiojuurdepääsuvõrgu virtualiseerimise kaudu avatumaks ja tõhusamaks.

5G SA-tüüpi võrk pakub erituge sellistele kasutusmallidele (Use Case) nagu suurendatud andmesidekiirus (Enhanced Mobile Broadband, eMBB), tagatud ajakriitiline reaalajasüsteemide andmeside (Ultra Reliable Low Latency Communications, URLLC) ja suurearvuline väikeseadmete kommunikatsioon (Massive Machine Type Communications, mMTC). Lõppkasutaja seadmed peavad toetama 5G SA võrke. Enamik lõppkasutaja seadmeid toetab praegu, uuringu teostamise ajal, ainult 5G NSA võrke. 5G SA mobiilsidevõrgu arhitektuur on toodud Joonis 4.

5G SA toob kaasa teistsugused turbekontseptsioonid, mille jaoks on vaja uuendada lõppkasutaja seadmete funktsionaalsust.



Joonis 4 5G NR SA mobiilsidevõrk

Samades lõppkasutaja seadmetes nii mitteiseseisva 5G NSA kui ka iseseisva 5G SA võrgu kasutamine on võimalik juhul, kui seadmele on vastav võimekus loodud. Selliseid telefone nimetatakse kaherežiimseteks 5G telefonideks[1]. Antud seadmete juurutamine võrgus nõuab koostoime testide teostamist. 5G NSA algne pöördus toimub 4G LTE raadiojuurdepääsuvõrgu kaudu, aga 5G SA võrgu algne pöördus toimub otse 5G raadiojuurdepääsuvõrgus. Need funktsioonid tuleb juurutada lõppkasutaja seadmes. See kehtib nii telefonide kui ka võrgu muude lõppkasutaja seadmete kohta (modemid jms).

[1] Understanding NSA 5G and SA 5G: a quick and easy primer (Arusaamine mitteiseseisvast ja iseseisvast 5G-st: kiire ja lihtne juhend) – MobilityArena USA

Seadmete kasutuselevõtul 5G SA võrgus tuleb järgida vastavat võrgujuurutuse varianti[2]. 5G SA korral peavad kasutajad oma lõppkasutaja seadmed välja vahetama, sest mitmed lõppkasutaja seadmed ei toeta praegu 5G SA võrku.

5G SA saab töötada koostöös 5G NSA ja 4G LTE võrkudega. Selline võrgu arhitektuur on esitatud Joonis 4.

Uue põlvkonna 5G NR SA-tüüpi tuumikvõrgu 5GC (Next Generation Core) juurutamisel on vajalik ehitada nii riist- kui ka tarkvaraliselt kogu uus pilve tehnoloogial põhinev tuumikvõrk 5GC. Ühe tarnija korral saab uued 5G SA tugijaamad liita olemasoleva Single RAN platvormiga, mistõttu saavad 5G tugijaamad teenindada nii 5G NSA kui ka 5G SA tehnoloogiaid. 5G SA-tüüpi tugijaamade suhtlus uue tuumikvõrguga 5GC on liides NG-C/U (Next Generation – Control/User). 5G SA tugijaamade omavaheline andmevahetus kasutab Xn-liidest, mis sama tarnija korral tõenäoliselt toetab ka X2 liidest. X2 liides on vajalik 4G LTE tugijaamadega (eNB) suhtlemiseks. EPC ja 5GC vaheliseks kiireks kärjevahetuse halduseks on loodud liides N26 mis ei ole standardi järgi kohustuslik.

5G SA-tüüpi tehnoloogia arengu järgmine samm on 5G Advanced. 5G Advanced toob kaasa täiustatud võimekused, mis ulatuvad kaugemale pelgalt ühenduvusest ja võimaldavad laiema valiku täiustatud kasutusjuhtumeid erinevates valdkondedes. See toetab täiustatud rakendusi, millel on parem liikuvus ja suurem töökindlus, samuti tehisintellekti (AI) ja masinõpet (ML), mis parandavad võrgu jõudlust. Samuti toob see kaasa täiendavaid parandusi spektraalses tõhususes ja energiasäästlikkuses[3].
Hetkel ei ole Eestis kommertskasutuses ühtegi 5G SA mobiilsidevõrku, kuid operaatorid on loonud oma testvõrgud. Edasised plaanid sõltuvad suuresti 5G spetsiifiliste teenuste turule tulekust. Liitreaalsusel põhinevad teenused (AR/VR), kiirused 10 Gbitt/s ja hilistus alla 10 ms võimaldab liitreaalsuse lahenduste laialdast kasutamist näiteks jaemüügis. Hilistuste vähenemine 1 ms juurde võimaldab liitreaalsuse kasutamist meditsiinis ja autonoomseid sõidukeid.
Hilistuse osas võiks välja tuua latentsuse erinevad kriteeriumid, et seostada nende kasutamist teiste funktsionaalsustega:

1. *Kõrgema latentsusega teenused* (*100 ms* juures hilistused mida toetab ka 5G NSA võrk) – IoT seadmed,
2. *Keskmise latentsusega teenused* (*alla 50 ms* hilistused) – telemeditsiinis reaalajas videokonsultatsioonid ja kaugoperatsioonid, nutikate linnade liiklusjuhtimine ja avaliku ohutuse teenused,
3. *Madala latentsusega teenused* (*alla 20 ms* hillistused) – reaalajas mängimine ja liitreaalsuse rakendused (vaja vältida liikumishaigust ja pakkuda realistlikku kogemust),
4. *Ultra-madala latensusega teenused* (*alla 1 ms* hilistused) – autonoomsed sõidukid ja tööstusautomaatika (reaalajas juhtimine ja masinate vaheline suhtlus).

Madala ja ultra-madala latensusega teenuste jaoks **on oluline vajadusel kasutada Edge node-ide funktsionaalsust** (vt. EDGE Computing).

5G SA-tüüpi võrkude kommertskasutusse tulek 5 aasta perspektiivis on oluline, et luua võimalused 5G monetiseerimiseks ja uute, 5G-spetsiifiliste teenuste turuletoomiseks.

[2] https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2020/06/5G-SA-Option-2-ImplementationGuideline-v1.3.pdf
[3] https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/5g-advanced-explained/

1.1.3. KOLMANDATE OSAPOOLTE JUURDEPÄÄS 5G TEENUSTE LOOMISELE

5G SA-tüüpi võrk avab parema juurdepääsu kolmandate osapoolte teenustele. Samas sõltub selle võimaluse pakkumine võrgu omaniku, ehk operaatori otsustest, kas need võimalused avatakse või luuakse. Üheks selliseks võimaluseks on NEF (Network Exposure Function ehk võrgu avamisfunktsioon) mis võimaldab turvalist, paindlikku ja arendajasõbralikku võrguteenuste ja võimaluste pakkumist kolmandatele osapooltele. 5G SA-tüüpi võrgus pakub NEF teenuseid, mis võimaldavad kolmandate osapoolte rakendustel ja teenustel suhelda võrgu funktsioonidega.

5G SA-tüüpi võrgud toetavad avatud API-sid (Application Programming Interface ehk rakendusliidesed), mis võimaldavad kolmandate osapoolte teenustel suhelda võrguga. Need API-d annavad juurdepääsu võrgu funktsioonidele ja andmetele. Avatud API-de kasutamine toimub NEF-i kaudu.

Teenusepakkujad saavad luua spetsiaalseid võrguviile, mis on optimeeritud konkreetsete teenuste jaoks. See tagab, et teenused saavad vajaliku ribalaiuse, väikese latentsuse ja kõrge usaldusväärsuse. Antud võrguviilude teenust taotlemine ja haldamine toimub NEF-i funktsionaalsuse kaudu.

Samuti pakub NEF turvalisi juurdepääsumehhanisme, mis tagavad, et ainult volitatud rakendused ja teenused saavad juurdepääsu võrgu ressurssidele. NEF võimaldab ka kolmandate osapoolte teenustel koguda ja analüüsida võrgu andmeid, et parandada teenuste kvaliteeti ja kasutajakogemust. NEF toetab andmetöötluslahendusi, mis võimaldavad töödelda andmeid lähemal kasutajale, vähendades latentsust ja parandades teenuste jõudlust.

Seega toetab 5G SA-tüüpi võrgu NEF funktsionaalsus uute teenuste loomist ja ühtlasi ka uute arendusportaalide (Advanced Developmental Portal) loomist. Mitmeid Euroopa Liidu poolt rahastatavad projektid teevad pingutusi selliste portaalide loomiseks, kus teenuste arendajatel ei ole vaja põhjalikult tunda 5G SA-tüüpi võrgu spetsiifikat, lihtsustades seeläbi uute teenuste loomist ja turule toomist. Näiteks on sellised projektid EVOLVED-5G projekt[4] ja 5GASP projekt[5].

Kokkuvõttes on NEF-il ehk võrgu avamisfunktsioonil suur potentsiaal suurendada 5G SA-tüüpi võrkude kasumlikkust, pakkudes uusi võimalusi teenuste arendamiseks, turvalisuse ja usaldusväärsuse tagamiseks ning andmete monetiseerimiseks.

Turupotensiaali uutele loodavatele teenustele tuleks hinnata 5G klientide arvu põhjal Eestis, kusjuures kolmandate osapoolte poolt loodavad teenused oleksid pakutavad kõigi operaatorite 5G SA-tüüpi võrkude kaudu.

[4] EVOLVED-5G builds the first 3GPP NEF Emulator to support SMEs on 5G programmability ‹ 5G-PPP

[5] The role of the Network Exposure Function (NEF) in the 5GASP Project – Network Application Community – 5GASP

1.1.4. 5G FIXED WIRELESS ACCESS (FWA)

5G Fixed Wireless Access (FWA) on 5G tehnoloogial põhinev lahendus, mis võimaldab pakkuda kiiret ja stabiilset internetiühendust lõppkasutajatele, kasutades selleks 5G mobiilsidevõrku. Antud tehnoloogia on alternatiiv valguskaabelühendusele. 5G FWA tehnoloogia korral ühendatakse lõppkasutaja seade fikseeritult (üldjuhul otsenähtavuses paikneva) kindla 5G FWA teenust pakkuva tugijaama kärjega. Operaator saab seejuures kontrollida kärjega ühendatud FWA klientide arvu ja nende geograafilist paiknemist, et tagada teenuse kvaliteet ja efektiivsus.

5G FWA juures on oluliseks eeliseks maatriks antennid ja antenni kiire suunamine (beam steering) võrreldes 4G lahendustega, ning muud täiendavad uudsed antennisüsteemi lahendused. Need võimaldavad vähendada häireid ning suurendada ühenduse energeetilist efektiivsust, pakkudes seeläbi kvaliteetsemat teenust. Antud teenus on mõeldud töötama just otsenähtavuse piires, seega saab kasutada sagedusi 24–27 GHz kus on tarkade antennide funktsionaalsus hästi rakendatav.

Eesti Infoühiskonna arengukava 2020 kohaselt on oluliseks eesmärgiks interneti kättesaadavuse suurendamine, et kõigil oleks võimalik kasutada vaba ja kiiret internetti. Mõõdikuteks on siin 30Mbit/s kiirusega interneti kättesaadavus ja 100 Mbit/s või suurema kiirusega (lairiba) interneti kättesaadavus.

Euroopa Liidu poolt koostatud Digital Economy and Society Index (DESI) 2022 Connectivity dokument[6] toob välja, et Eestis on väga suure läbilaskevõimega püsivõrgu kättesaadavus suur – 73%, samal ajal kui ELi keskmine on 70% – ning järgmise põlvkonna juurdepääsuvõrgu kättesaadavus on 90% ehk mis on samal tasemel ELi keskmisega. Väga suure läbilaskevõimega püsivõrgu kättesaadavus on viimase kahe aastaga oluliselt paranenud (16 protsendipunkti võrra) tänu kiire interneti edukale väljaehitamisele, mida on teostanud Eesti elektrivõrguettevõtja Enefit Connect OÜ (endise Elektrilevi) poolt.

Kiiruse 30Mbit/s osakaal Eesti kogu majapidamiste hulgas on umbes 43% (ELi liikmesriikide keskmine on umbes 49%) ning kiirusel 100Mbit/s ja rohkem on osakaaluks umbes 13% kogu majapidamiste arvust (ELi liikmesriikide keskmine on umbes 25%).

Väga suure läbilaskevõimega püsivõrgu kättesaadavus, sealhulgas valguskaabelühendus hooneni, on Eestis kõrgel tasemel, välja arvatud maapiirkondades, kus seda tehnoloogiat ei ole veel paljudele majapidamistele kättesaadavaks tehtud. Valitsus kavatseb kõrvaldada selle puudujäägi sihtotstarbelise avaliku sektori rahastuse ja digivaldkonna 2030. aasta strateegia rakendamise kaudu[7].

4G ja 5G mobiilne internet on valdaval osal Eesti majapidamistest kättesaadav, arvestades kõikide operaatorite summaarset katvust. Samas on tarbimismahtude kasvu tõttu mobiilne internet tihti ülekoormatud.

[6] Estonia in the Digital Economy and Society Index | Shaping Europe's digital future (europa.eu)
[7] Estonia in the Digital Economy and Society Index | Shaping Europe's digital future (europa.eu)

FWA teenus pakub siin alternatiivi nii kohtades, kus ei ole äriliselt mõttekas fiiberoptilist võrku ehitada, kui ka maamajade ja eramute piirkondades mobiilse interneti koormuste vähendamiseks.

FWA korral on tegemist asukohaga seotud raadiolahendusega juurdepääsuvõrguga, mille eeliseks on suur andmesidekiirus ning võrgu rajamise lihtsus ja kiirus. Samuti on antud lahenduse juures eeliseks kasutaja mugavus. Puuduseks võib pidada pidevalt arenevate tehnoloogiate tõttu vajadust pidevalt kaasajastada ja välja vahetada seadmeid, mis tingib suuremad opereerimiskulud.

FWA tehnoloogias nähakse 5G parema monetiseerimise ühte tugisammast[8]. Ka GSMA uuringute kohaselt on 5G FWA üks võimalusi pakkude kõrge kvaliteediga ülisuuri andmeedastuskiiruseid kohtades, kus optika paigaldamine ei ole kuluefektiivne. Samuti loob see operaatoritele võimalusi pakkuda täiendavaid hinnapakette, arvestades andmeedastuskiirusi ja kvaliteeti[9].

5G FWA on oluline Eesti turul lairiba interneti kättesaadavuse parandamiseks lähima 5 aasta perspektiivis.

1.1.5. 6G MOBIILSIDE

6G mobiilside on järgmine samm 5G SA ja 5G Advance mobiilsidevõrkude arendamisel. Hetkel on 6G eelstardiseerimise järgus, ning standardite loomisega tegeleva organisatsiooni 3GPP[10] on kinnitanud 6G mobiilside standardite loomise ajakava[11]. 6G standardite loomisse on kaasatud ka O-RAN Alliance (vt.

[8] https://www.quectel.com/library/fwa-white-paper-2024/
[9] https://data.gsmaintelligence.com/research/research/research-2024/revisiting-5g-monetisation-upping-the-experience
[10] 3GPP Commits to Develop 6G Specifications
[11] 6G Standards Tracker (3gpp.org)

Open RAN). ITU (International Telecommunication Union) mängib standardite loomisel olulist rolli võrgu kriteeriumite määratlemisel ja klassifitseerimisel kui IMT (International Mobile Telecommunications) tehnoloogia. ITU on määranud 6G kui IMT-2030 tehnoloogia, samas kui 5G on defineeritud kui IMT-2020 tehnoloogia. IMT-2030 tehnoloogiate spetsifikatsioonide pakkumine algab 2027. aastal ja kestab kuni 2029. aasta alguseni. Tehnoloogia valik on plaanis otsustada 2030. aasta jooksul.

Lähima 5 aasta jooksul Eestis 6G mobiilside kommertskasutust ei toimu. 10 aasta perspektiivis on reaalne 6G mobiilside kommertskasutuse algus.

1.1.6. SAGEDUSALAD

Eestis on 5G kasutamiseks planeeritud sagedusalad 694-790 MHz, 3400-3800 MHz ja 24.25-27.5 GHz. 5G/6G sagedusalad võib jagada kolme gruppi:

Alla 6 GHz sagedusalad:

On Eestis aktiivselt kasutusel ja siin toimub põhiline 5G mobiilside teenuste pakkumine. Antud sagedusala madalamad sagedused pakuvad suuremat katvusala ka maanteedel ja maapiirkondades.

Plaanis on Eestis leida siin sagedused mida lubada kasutada ka privaatvõrkude loomiseks (vt. Privaatvõrgud (NPN)).

24 – 100 GHz sagedusala (Millimeeterlaine (mmWave) sagedusala):

On Eestis kasutusel, kuid selle laialdane levik on piiratud lõppkasutajate seadmete kättesaadavuse tõttu. Üks olulisimaid aspekte, mida tuleb arvestada, on see, et lõppkasutaja seadmed, mis toetavad mmWave sagedusala USA turul, ei pruugi seda teha Euroopa turul. Siin on fookus suurel sagedusriba laiusel mis võimaldab suuri andmeedastus kiirusi (näiteks 4K/8K videostriiming). Telia on Eesti turul esimesena võtnud kasutusele 26 GHz sagedusala, millega pakutakse fikseeritud juhtmevaba interneti lahendust (FWA – Fixed Wireless Access) Kiili vallas.

Antud sagedusala on Eestis avatud ka privaatvõrkude loomiseks (vt. Privaatvõrgud (NPN)).

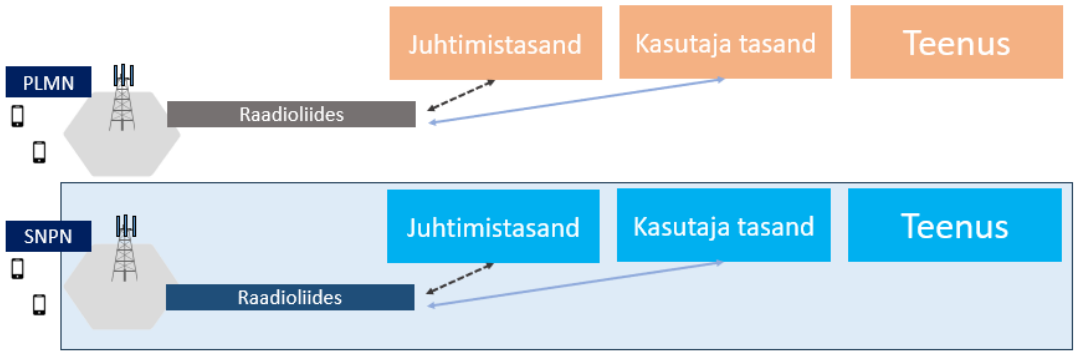
Üle 100 GHz sagedusalad (Teraherts (THz) sagedus):

Antud sagedusalas teostatakse palju uuringuid maailmas ja plaanitakse kasutada 6G mobiilside võrkudes. 5 - 10 aasta perspektiivis tõenäoliselt kommerts kasutusse ei võeta.

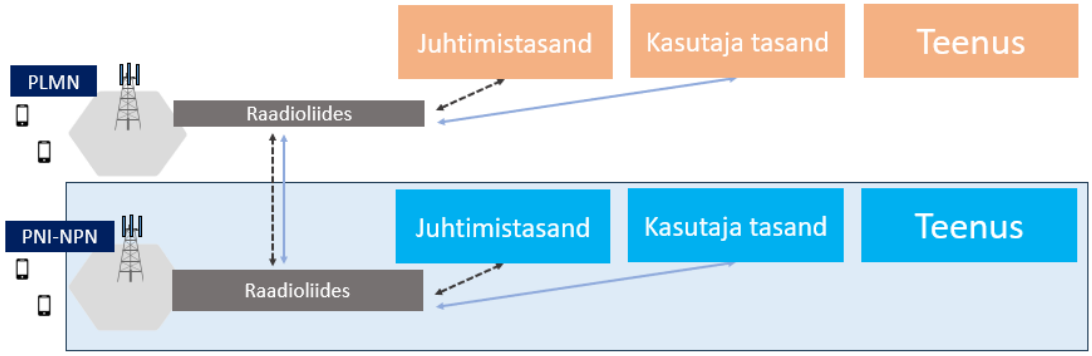
1.2 PRIVAATVÕRGUD (NPN)

Privaatvõrgud ehk NPN (Non-Public Network) on mõeldud privaatseks kasutuseks ettevõtetele (näiteks suuremad tehased ja tootmishooned). NPN võrkude kontseptsioon on olnud implementeeritud juba varasemates mobiilsidegeneratsioonides, kuid 5G võrgud toetavad NPN võrkude erinevaid konfiguratsioone paremini. Privaatvõrkude vajadus on seotud ka sooviga hoida andmed organisatsiooni või ettevõtte sees mitmetes mobiilsidevõrkude kasutusjuhtumites.

Privaatvõrgu kontseptsiooni kohaselt on NPN-võrk isoleeritud/eraldiseisev mobiilsidevõrgu kasutuselevõtt, kus ei toimu suhtlust üldkasutatava kommertsvõrguga. 3GPP määratleb kaks NPN-võrkude kategooriat: eraldiseisev NPN-võrk (SNPN – Standalone Non-Public Network) ja üldkasutatava võrguga integreeritud NPN-võrk (PNI-NPN – Public network integrated NPN).[12] SNPN vajab võrgu omaniku poolset suuremat investeeringut ja haldust, samas kui PNI-NPN võrk võib olla lahendatud privaatse võrguviiluna (network slice) üldkasutatavas 5G mobiilsidevõrgus. 5G-ACIA (5G Alliance for Connected Industries and Automation) käsitleb 4 erinevat NPN võrkude stsenaariumi[13]: SNPN (vt Joonis 5), PNI-NPN jagatud RAN-iga (vt Joonis 6), PNI-NPN jagatud raadiovõrgu ja kontrolltasandiga (vt Joonis 7], PNI-NPN lahendus privaatse võrguviiluna (Private Slice) (vt Joonis 8).

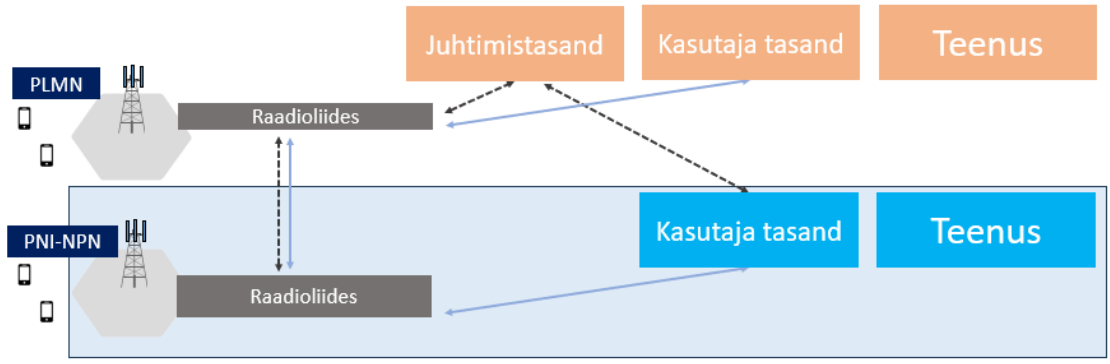


Joonis 5 NPN stsenaarium 1 – SNPN

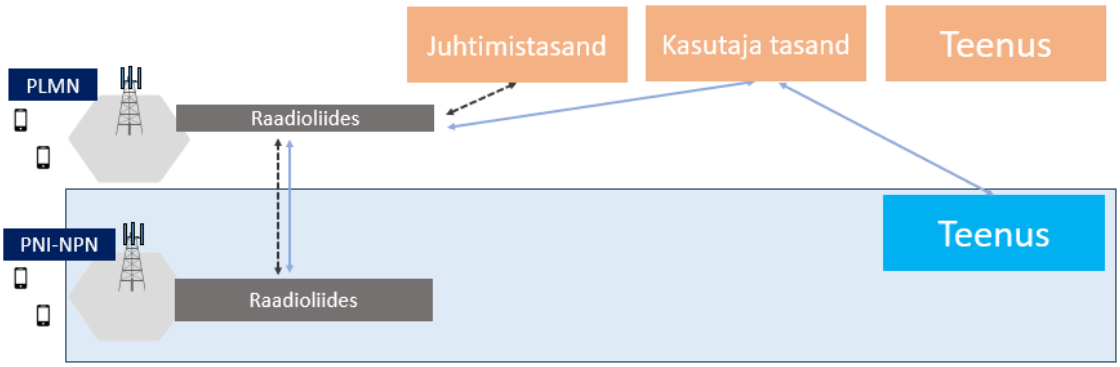


Joonis 6 NPN stsenaarium 2 - PNI-NPN jagatud raadiovõrguga

[12] https://www.3gpp.org/technologies/npn
[13] https://5g-acia.org/whitepapers/5g-non-public-networks-for-industrial-scenarios/



Joonis 7 NPN stsenaarium 3 - PNI-NPN jagatud raadiovõrgu ja kontrolltasandiga



Joonis 8 NPN stsenaarium 4 - PNI-NPN lahendus privaatse võrguviilakana (Private Slice)

Privaatvõrgud ei ole Eestis kasutusel, kuid aktiivselt osaletakse Euroopa Liidu projektides, mis käsitlevad privaatvõrke (näiteks projekt 5G-Timber[14], kus osalevad Eesti ettevõtted Harmet ja Hekotek).

Investeeringute suurust saab vähendada kasutades vabavaralisi avatud lähtekoodiga võrke. Samas tuleb tähelepanu juhtida asjaolule, et sellised võrgud ei oma täielikku funktsionaalsust, nagu on toodud standardites, ning nende rakendused käsitlevad mitmeid funktsionaalsuse aspekte erinevalt. Seega on nende rakendamiseks vajalikud kompetentsed inimesed, keda on hetkel turul väga piiratud arv.

Meie kogemusele toetudes luues 5G SA-tüüpi akadeemilist tuumvõrku TalTech-is on tegemist investeeringuga suuruses 400-500 kEUR-i. Sellele lisaks tuleb arvestada ajakuluga, kuna privaatvõrgu juurutamine võtab aega 3-6 kuud, millele võivad lisanduda seadmete tarnetega seotud viivitused. Antud juhul on olnud tegemist Euroopa tootja poolt tarnitud privaatvõrgu seadmestikuga, mis kasutab sertifitseeritud seadmeid. Kuigi on tegemist pilvevõrguga ja tarkvaralise 5G SA-tüüpi tuumvõrguga, kasutatakse spetsiifilisi tootja poolt heaks kiidetud võrguseadmeid, mis on osa tuumvõrgust.

[14] Consortium — 5G-Timber Project

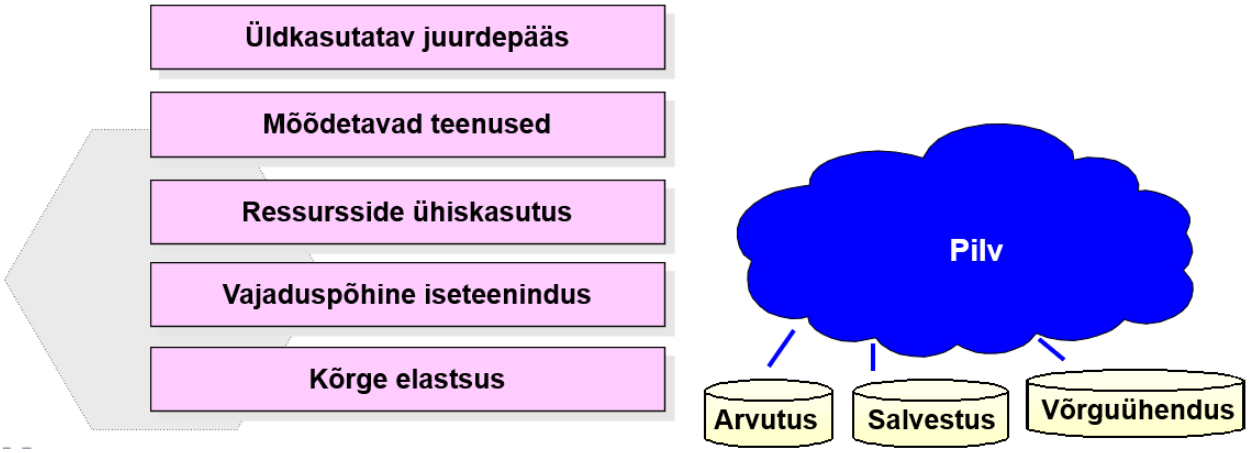
1.3 PILVEVÕRGUD

Pilvevõrkude olulisemad tunnused on:

1. **Jagatav konfigureeritavate arvutusressursside kogum** (võrk, serverid/arvutusvõimsus, salvestusruum, rakendused).
2. **Võimalik minimaalse haldusmahuga kiiresti kasutusele võtta ja vabastada ühiskasutuses olevaid ressursse**.
3. **Edendab saadavust/juurdepääsu ja koosneb viiest hädavajalikust omadusest** (vt. Joonis 9Joonis 9), kolmest teenusmudelist (vt. Joonis 10Joonis 10) ja neljast kasutusmudelist (vt. Joonis 11).

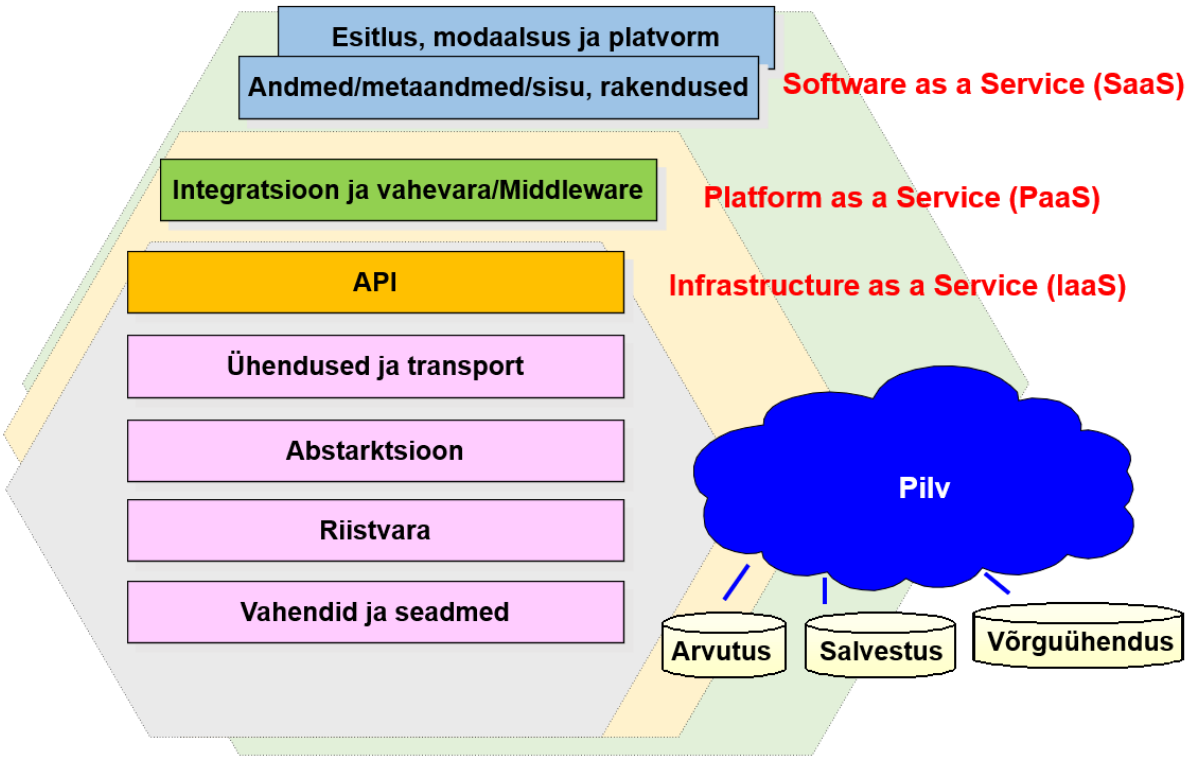
Kokkuvõtvalt on eelpool toodud tunnused defineeritud NIST-i (US National Institute of Standards and Technology, Information Technology Laboratory) poolt järgmiselt:

„Cloud computing is a model for enabling convenient, on-demand network access to a shared pool of configurable computing resources (network, servers, storage, applications etc) that can be rapidly provisioned and released with minimal management effort or service provider interaction. This cloud model promotes availability and is composed of five essential characteristics, three service models and four deployment models."[15]

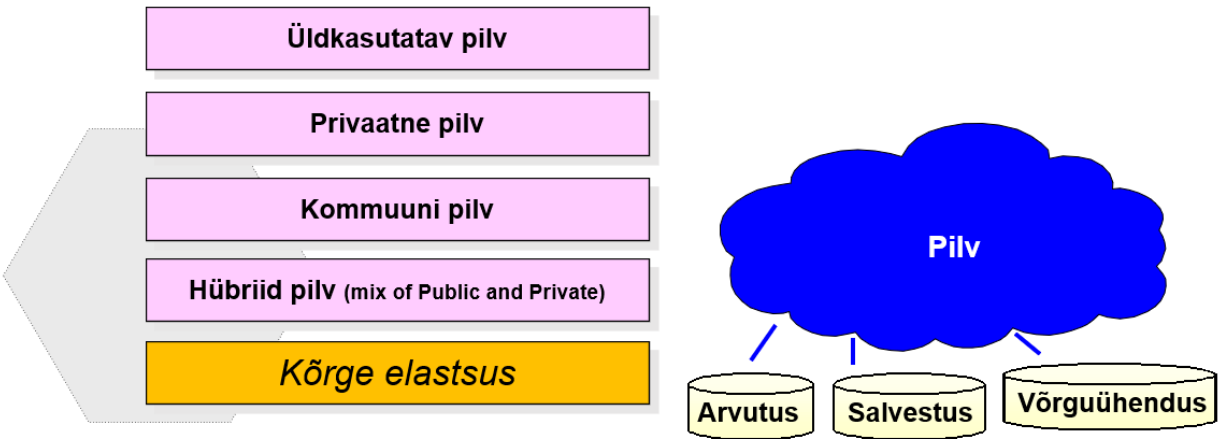


Joonis 9 Pilve vajalikud omadused

[15] https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/legacy/sp/nistspecialpublication800-145.pdf



Joonis 10 Pilve teenusmudelid



Joonis 11 Pilve kasutusmudelid

PaaS (Platform as a Service) on pilveteenuste mudel, mis pakub kasutajatele platvormi rakenduste arendamiseks, käitamiseks ja haldamiseks ilma infrastruktuuri haldamise keerukuseta. See võimaldab arendajatel keskenduda koodi kirjutamisele ja rakenduste loomiseks vajalike tööriistade kasutamisele, muretsemata serverite, salvestusruumi või võrguressursside pärast. PaaS-i pakkujad hoolitsevad infrastruktuuri, operatsioonisüsteemide ja andmebaaside haldamise eest.

PaaS-i eelisteks on kiirem arendusprotsess, kuna arendajad saavad kasutada eelkonfigureeritud keskkondi ja tööriistu. Samuti pakub see skaleeritavust, võimaldades rakendustel kasvada vastavalt vajadusele. PaaS-i abil on lihtsam integreerida erinevaid teenuseid ja API-sid, mis kiirendab arendustööd.

Turvalisus ja andmete varundamine on samuti PaaS-i pakkujate hallata, mis vähendab ettevõtete IT-osakondade koormust. PaaS-i kasutamine üldiselt vähendab kulusid, kuna ettevõtted ei pea investeerima kallisse riistvarasse ja selle hooldusesse. Lisaks võimaldab see kiiremini turule tuua uusi rakendusi ja teenuseid.

PaaS on ideaalne lahendus ettevõtetele, kes soovivad keskenduda innovatsioonile ja arendusele, jättes infrastruktuuri haldamise spetsialistide hooleks.

Meie kogemusele tuginedes on just PaaS pilveteenuste mudel sobivaim 5G võrgu uute teenuste loomisel kolmandate osapoolte poolt, eriti VKE-sektoris. Kuigi eelpool mainitud NEF,loob võimaluse IaaS pilveteenuste mudeliks, on vajalik sellele luua integratsioon ja vahevara, et võimaldada VKE-del teenuste ja rakenduste arendamist ilma 5G võrgu spetsiifikat peensusteni tundmata (vt. Kolmandate osapoolte juurdepääs 5G teenuste loomisele). Oluline juba 5 aasta perspektiivis Eesti turul kaasata VKE-sektor uute 5G teenuste arendamisse.

Maailma 5G mobiilside turul on järjest suuremat populaarsust kogumas **CPaaS** (Communication Platform as a Service) teenusmudel. CPaaS on pilvepõhine teenus, mis on loodud hõlbustama suhtlust mitmete sidekanalite kaudu. CPaaS-i abil saavad ettevõtted integreerida võimsaid ja kergesti ligipääsetavaid side- ja suhtlusvõimalusi erinevatesse ärirakendustesse, luues kohandatud andmevooge, mis paremini haldavad nii sissetulevat kui ka väljaminevat sidet.

Eestis on oluline CPaaS teenusmudelite kasutusele võtmine, et 5G võrkude võimalusi kasutada ja suurendada 5G monetiseerimist.

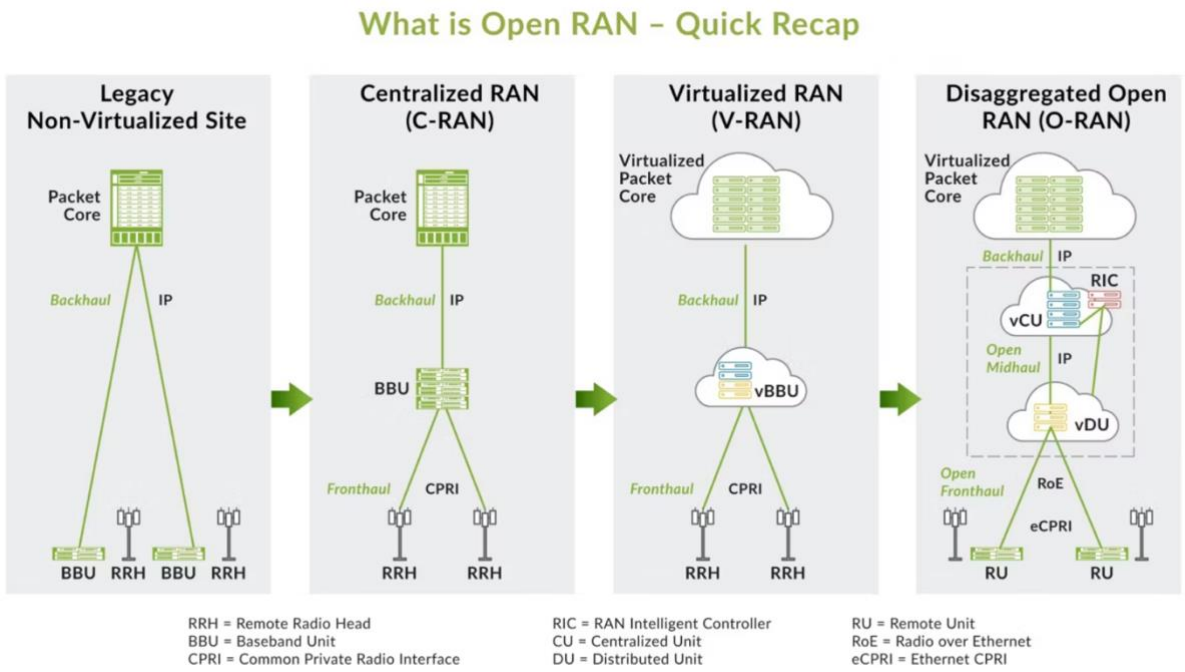
Arendajad saavad sisestada võrgu konfiguratsioone, et optimeerida rakenduste jõudlust või luua uusi rakendusi. See avab uue mõõtme võrgu-tundlike (network-sensitive) kasutusjuhtude loomiseks.

[16] What Is CPaaS? A Powerful Business Enabler (vonage.com)
[17] PowerPoint Presentation (gsma.com)

1.4 OPEN RAN

Open RAN (O-RAN) on avatud spetsifikatsioon, mille eesmärk on lubada raadiojuurdepääsuvõrkude turule rohkem tarnijaid. O-RAN Alliance on raadiojuurdepääsuvõrkude (RAN) valdkonna kogukond[18],[19].

ETSI võttis esimese Open RAN-i spetsifikatsiooni vastu 2022. aasta septembris (ETSI TS 103 859)[5]. O-RAN Alliance koostab tehnilisi spetsifikatsioone, mitte standardeid, kuna tegemist ei ole standardiorganisatsiooniga.



Joonis 12 Open RAN arhitektuur

Open RAN-il on mitu teoreetilist eelist, mis peaksid selle telekommunikatsioonitööstusele külgetõmbavaks muutma[20].

- ***Rohkem konkurentsi ja uuenduslikkust.*** Open RAN edendab sektoris konkurentsi ja uuenduslikkust, kõrvaldades seotuse ühe tarnijaga ja võimaldades mitmel tarnijal oma lahendusi pakkuda. See paneb tarnijad omavahel ärivõimaluste pärast konkureerima, mis võib omakorda vähendada võrgu juurutus- ja hoolduskulusid.
- ***Võrgujõudluse suurenemine.*** Open RAN võib suurendada võrgu jõudlust ja pakkuda suuremat leviala. Open RAN võimaldab võrguoperaatoril valida paljude variantide hulgast, et leida oma vajaduste jaoks parim lahendus, ja annab seega võimaluse luua võrk, mis vastab paremini võrguoperaatori konkreetsetele vajadustele.
- ***Suurem paindlikkus.*** Open RAN pakub võrguoperaatorile tema võrkude arendamisel ja hooldamisel rohkem võimalusi, vabadust ja paindlikkust. See

[18] https://www.o-ran.org/
[19] https://www.etsi.org/newsroom/press-releases/2120-2022-09-etsi-releases-first-o-ran-specification
[20] https://www.techrepublic.com/article/open-ran-benefits/

on eriti kasulik maapiirkondades tegutsevatele võrguoperaatoritele, kes saavad valida lahenduse, mis on välja töötatud levi tagamiseks just selles piirkonnas.

- ***Väiksemad kulud.*** Open RAN võib vähendada seadmete maksumust tänu sellele, et suurendab turul konkurentsi ja annab klientidele rohkem valikuvõimalusi. Kui konkurents turul suureneb, siis kaupade ja teenuste hinnad tavaliselt langevad.

Open RAN-i aluseks on mittekoondatud (*non-aggregated*) raadiojuurdepääsuvõrgu funktsionaalsus, mille loomiseks kasutatakse elementidevaheliste liideste avatud spetsifikatsioone (Joonis 12). Juurutamiseks saab kasutada tarnijast sõltumatut riistvara ning avatud liidestel ja kogukonna väljatöötatud standarditel põhinevat tarkvarapõhist tehnoloogiat[21].

Open RAN-i puudus on see, et see ei toeta olemasolevaid Single RAN-i lahendusi. Kuigi O-RAN Alliance'i[22] on olemas palju sertifitseeritud avatud testimis- ja integratsioonikeskusi (Open Testing & Integration Centre, OTIC), jätab eri tarnijate ühilduvus endiselt soovida. Seetõttu peab operaator leidma või koolitama vajalikud integratsiooniga tegelevad inimesed või tellima selle allhanke korras. Kuna integratsiooniga tegelejaid on suhteliselt vähe, on see töö kallis ja ajamahukas. Samuti on erinevate tarnijate komponentide dimensioneerimine keeruline, ning suurtel koormustel efektiivne võrgu töötamine raskesti saavutatav.

Ühendkuningriigi valitsus on teinud märkimisväärseid pingutusi O-RAN-i kasutusele võtuks kommertsvõrkudes[23]. Siin on toodud välja ka operaatorite poolt leitud puudused O-RAN seadmetes: seadmed kasutavad spetsiifilisi protsessoreid (põhiliselt Intel-i toodangut), üldkasutatavate protsessorite kasutamisel on võimsuse efektiivsus madal, mitmed tarkvaratooted (näiteks DU, CU) toetuvad spetsiifilisele riistvarale.

O-RAN-i integratsiooniga tegelejaid on suhteliselt vähe, seega on see kaasa toonud töö kalliduse ja ajamahukuse. Samuti on erinevate tarnijate komponentide dimensioneerimine keeruline ja suurtel koormustel efektiivne võrgu töötamine raskesti saavutatav.

O-RAN Eestis 5 aasta perspektiivis võib olla pigem privaatvõrkude loomiseks.

Eestis on O-RAN-i kohta välja toodud järgmist[24]:

1. Kulude vähendamine: O-RAN võimaldab kasutada erinevate tootjate seadmeid, mis võib vähendada võrgu rajamise ja hooldamise kulusid.

2. Innovatsioon: Avatud standardid soodustavad innovatsiooni ja uute tehnoloogiate kiiremat kasutuselevõttu.

3. Paindlikkus: O-RAN võimaldab võrguoperaatoritel paindlikumalt hallata ja optimeerida oma võrke vastavalt vajadustele.

[21] Update: Open RAN explained (Uudne: Open RAN lahti seletatult) | Nokia
[22] https://www.o-ran.org/testing-integration
[23] Open RAN in High Demand Density Environments Technical Guidance - GOV.UK (www.gov.uk)
[24] Kuidas on toimunud Eesti mobiilside areng 1G-st kuni 5G-ni - Digitark (telia.ee)

4. Turvalisus: Avatud arhitektuur võimaldab paremat turvalisuse kontrolli ja kiiremat reageerimist turvaohtudele.

Kohalikud lahendused: Eesti ettevõtted saavad arendada ja pakkuda oma lahendusi, mis sobivad paremini kohalike oludega.

6. Töökohtade loomine: O-RAN võib soodustada uute töökohtade loomist IT- ja telekommunikatsioonisektoris.

7. Võrgu jõudlus: O-RAN võimaldab paremat võrgu jõudlust ja kvaliteeti, kuna see võimaldab kasutada parimaid saadaval olevaid lahendusi.

8. Roheline tehnoloogia: O-RAN võib aidata vähendada energiatarbimist ja keskkonnamõju, kuna see võimaldab tõhusamat võrguressursside kasutamist.

9. Koostöövõime: O-RAN standardid tagavad, et erinevate tootjate seadmed töötavad sujuvalt koos, mis võib parandada võrgu töökindlust.

10. Tulevikukindlus: O-RAN võimaldab võrguoperaatoritel kiiremini kohaneda tulevaste tehnoloogiliste muutustega ja pakkuda paremaid teenuseid.

Eelpool toodud punktidega tuleb nõustuda, kuid meie kogemus näitab, et siin kohal peab arvestama mitme kriitilise aspektiga. Esiteks on paljud O-RAN seadmete tootjad eelneva telekommunikatsiooni seadmete tootmise kogemuseta ning sellest tingituna võivad nende seadmed käitud erinevalt sidevõrkude suurtel koormustel. Teiseks, kuna O-RAN seadmed toodetaks mitme erineva tootja poolt siis on vajalik nende hea integreerimine, kuhu on vaja kaasta kogemustega integraator. Kuna O-RAN-il puuduvad spetsiifilised testimisjuhised, näitab praktika, et seadmed ei pruugi alati teineteisega kogu funktsionaalsuses kokku sobituda. Seetõttu on kogemustega integraatori kaasamine hädavajalik – see suurendab kulusid ja võrgu loomiseks kuluvat aega.

5 aasta perspektiivis pole Eestis laialdast O-RAN-i kasutusele võttu näha; pigem võib seda kasutada privaatvõrkude loomisel või erilahenduste tarbeks mingites konkreetsetes valdkondades (näit. põllumajandus, meedia jne).

10 aasta perspektiiv on palju positiivsem: tõenäoliselt on O-RAN võrkude suurem kasutuselevõtt seotud 6G mobiilside võrkude tulekuga pärast 2030. aastat.

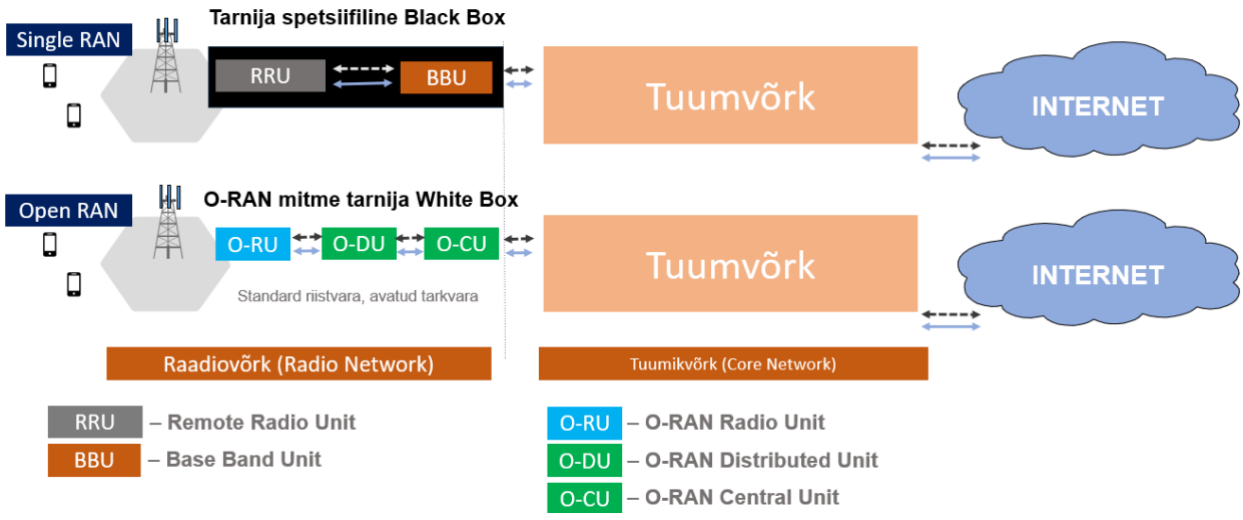
1.5 SINGLE RAN (SRAN)

Single RAN-i tehnoloogiat kasutava lahenduse korral saab üks tugijaam käitada samal ajal 2G, 3G ja 4G tehnoloogiat[25]. Näiteks Nokia Single RAN hõlmab universaalset riistvara ja 2G, 3G, 4G ning 5G NSA ja SA tehnoloogiale ühist tarkvara. See toetab mitut riistvara jagamise võimalust – raadioside, *fronthaul*-ühendus, põhiriba, *backhaul*-ühendus, OAM, sageduskanal –, vähendades keerukust ja suurendades kulutõhusust. See kontseptsioon pakub läbini tulevikukindlat lahendust, mis on turvaline ning kasutab ühte ühist käitus- ja haldussüsteemi[26].

Single RAN-i tehnoloogiat kasutavad lahendused on projekteeritud paindliku ja tõhusana ning võimaldavad võrguoperaatoril kiiresti kohaneda uute tehnoloogiliste lahenduste ja standarditega. Nende eesmärk on vähendada omamise kogukulu, lihtsustades võrgu haldamist ja hooldamist. Single RAN-i lahendustele ei pakuta tarnijaülest tuge. Seega peab 2G, 3G, 4G ja 5G tehnoloogia pärinema samalt tarnijalt, et kasutada Single RAN-i eeliseid. 3GPP ei standardi Single RAN-i lahendust (vt.Joonis 13).

Single RAN-i lahendusel on palju ärieeliseid, sealhulgas: [27]

- Single RAN vähendab omamise kogukulu üle 30%.
- Pärandvõrgu ajakohastamine tasub end ära kahe-kolme aastaga.
- Energiatarbimine väheneb keskmiselt 40%.
- Dünaamiline sageduskanali jagamine SRAN-i abil, mis vähendab 5G juurutusmaksumust kuni 60%.
- SRAN võimaldab uue raadiojuurdepääsutehnoloogia (RAT) sekunditega aktiveerida ja võib vähendada 5G raadioside kapitalikulusid 60%.



Joonis 13 Single RAN lahendus võrrelduna Open RAN lahendusega

Single RAN on oluline tehnoloogia, mis võimaldab operaatoritel mobiilside raadiovõrku tõhusalt arendada ja hallata, võimaldades samal ajal energiat säästlikult kasutada.

[25] https://www.nokia.com/networks/mobile-networks/airscale-radio-access/single-ran-advanced/
[26] https://www.nokia.com/networks/mobile-networks/airscale-radio-access/single-ran-advanced/
[27] https://www.nokia.com/networks/mobile-networks/airscale-radio-access/single-ran-advanced/

1.6 MOBIILSIDEVÕRGU RESSURSSIDE JAGAMINE

1.6.1 MORAN JA MOCN

Mobiilsidevõrkude jagamine tähendab infrastruktuuri ja/või sideseadmete jagamist mitme operaatori vahel. Infrastruktuuri all mõeldakse sidemaste, ehitisi ja seadmete ruume, samas sideseadmete alla kuulvad RAN, transportvõrgu ja tuumvõrgu seadmed (vt. Joonis 14)

Võrgu opereerimise juhtimise seisukohast on kasutusel kaks lahendust:

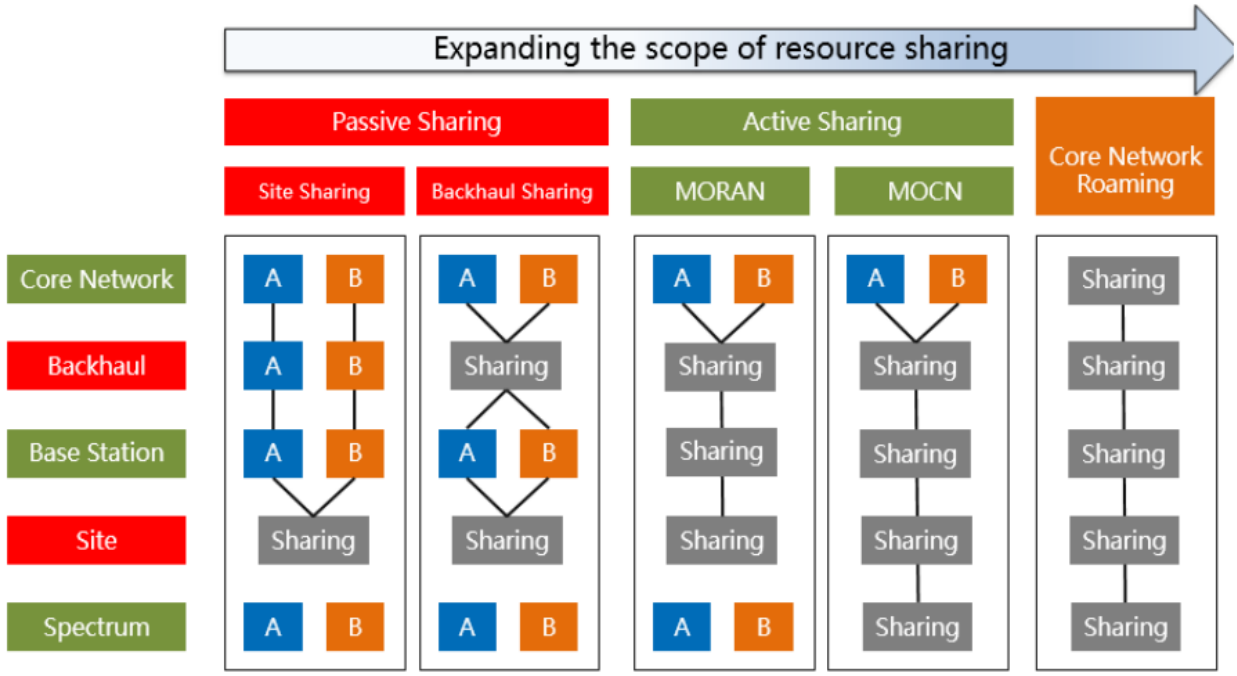
1. Iseseisvalt ehitatud sidevõrgud ja võrgu ressursside jagamine ärilise lepingutega.
2. Loodud ühisettevõte mis tegutseb iseseisvalt ning teostab võrgu ehituse ja halduse.

Võrgu ressursside jagamine võib olla kas võrgu aktiivseadmete jagamine või ainult passiivseadmete jagamine. Passiivne jagamine hõlmab sidemastide ja muu transportvõrgu passiivseadmete jagamist. Aktiivseadmete jagamine sisaldab endas RAN (Radio Access Network – Raadio juurdepääsu võrk) võrgu osade, nagu tugijaamad ja riigisisese tuumvõrgu (CN – Core Network) vahelise roamingu. Aktiivseadmete jagamine nõuab rohkem operaatorite vahelist koordineerimist ja on tehniliselt keerukam.

3GPP on standardiseerinud mobiilsidevõrgu jagamise/ühiskasutuse[28].

- 3GPP TS 23.251 defineerib tuumvõrgu jagamise (MOCN - Multi-Operator Core Network) lahenduse. Selles sisalduvad võrgu valimise, süsteemi informatsiooni saatmise ja paljud teised funktsioonid, samuti ka lõppkasutaja seadmetele esitatavad võrgu jagamise nõuded.
- 3GPP TS 25.331 defineerib vajalikud ühendusliideste protokollid.
- 3GPP TS 38.331 defineerib protokollid ja nõudmised tuleviku võrkude jagamiseks.

[28] https://www.gsma.com/get-involved/gsma-foundry/wp-content/uploads/2023/02/5G-NCCS_GSMA-Guide_27.02.2023.pdf



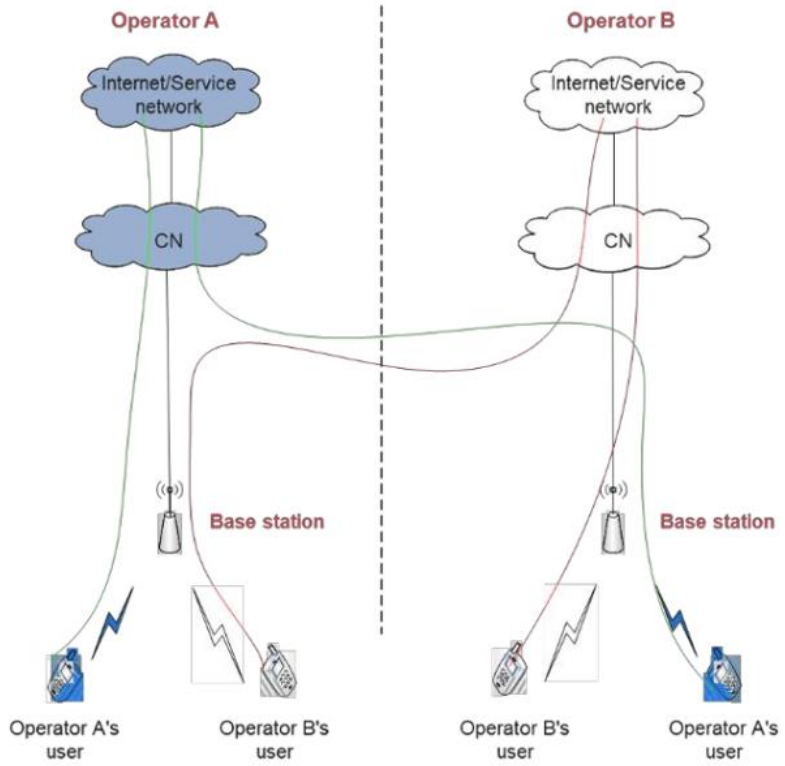
Joonis 14 Võrgu ressursside jagamise mudelid (3GPP)

Operaatorid ja seadmetootjad võtsid kasutusele ka raadiovõrgu jagamise mõiste MORAN (Multi-Operator RAN) tähistamaks tehnilist lahendust kus on kasutusel sama RAN infrastruktuur (antennid, võimendid, saatjad, jne), kuid iga operaator kasutab oma sagedust (vt. Joonis 15).[29]

MORAN-tüüpi lahenduse korral kasutatakse mitut sageduskanalit, ning operaatorite võrkude PLMN ID-d saadetakse nendel sageduskanalitel. BBU-d (Baseband Unit ehk baassagedusüksus) on ühiskasutuses ja ühendatud RRU (Remote Radio Unit ehk kaugraadioüksus) ja AAU-ga (Active Antenna Unit ehk aktiivne antenniüksus). RRU ja AAU on sama tootja seadmed, mis ka BBU. Iga sagedus on konfigureeritud iseseisvalt ja sõltumatult, samuti on sõltumatu nende haldus.

RAN võrgu infrastruktuur pakub loogiliselt ja füüsiliselt eraldatud kärje ressursse koos operaatori põhise tuumvõrgu ühendusega. MORAN-lahendus pakub lihtsat RAN ressursside jagamist ja on sobiv tsenaariumiteks, kus operaatorid peavad säilitama teenuse ja võrgu lahenduse vahelise sõltumatuse.

[29] https://www.gsma.com/get-involved/gsma-foundry/wp-content/uploads/2023/02/5G-NCCS_GSMA-Guide_27.02.2023.pdf



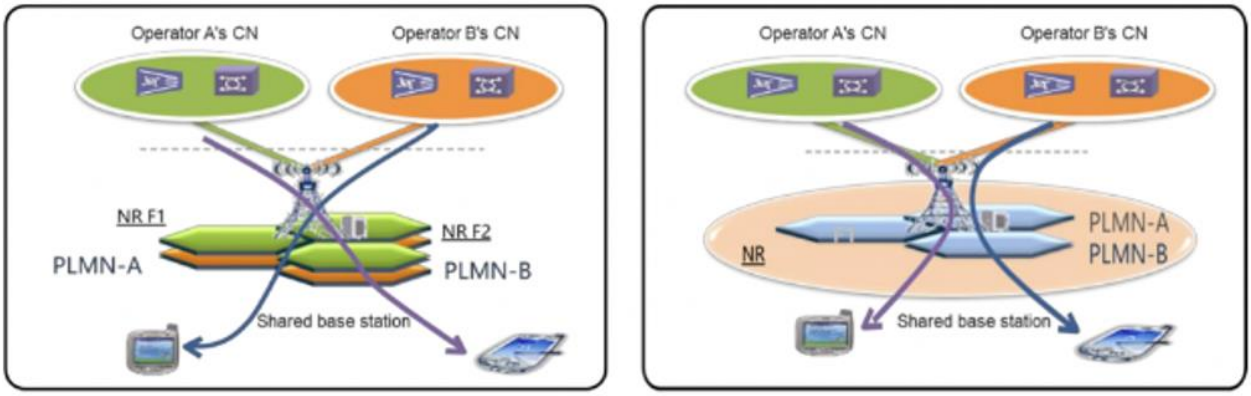
Network Architecture for RAN Sharing (Source: GSMA)

Joonis 15 Võrgu arhitektuur RAN võrgu jagamise korral (GSMA assotsiatsiooni järgi)[30]

Tuumvõrgu jagamise (MOCN) lahenduse korral on üks või mitu sageduskanalit konfigureeritud ühiskasutuseks. Operaatorid jagavad kärgi füüsiliselt ja loogiliselt. Igas kärjes on kasutusel kõikide operaatorite PLMN ID koodid. Kärgede parameetrid peavad olema operaatorite vahel kokku lepitud, kuna kõik operaatorid kasutavad samu parameetreid.

Lõppkasutajad (UE) kes kasutavad ühiskasutuses kärgi, valivad ühe operaatori PLMN-i ja vastavalt valikule ühendab tugijaam kasutaja vastava operaatori tuumvõrguga (CN – Core Network) vastavalt valikule (vt. Joonis 16 ja Joonis 17). MOCN on hea lahendus, kui näiteks operaatoril A on sageduse litsents, kuid operaatoril B puudub sageduse litsents, ent ta on huvitatud kasutama operaatori A sagedusspektrit.

[30] https://www.gsma.com/get-involved/gsma-foundry/wp-content/uploads/2023/02/5G-NCCS_GSMA-Guide_27.02.2023.pdf



Comparison Between MORAN and MOCN (Source: GSMA)

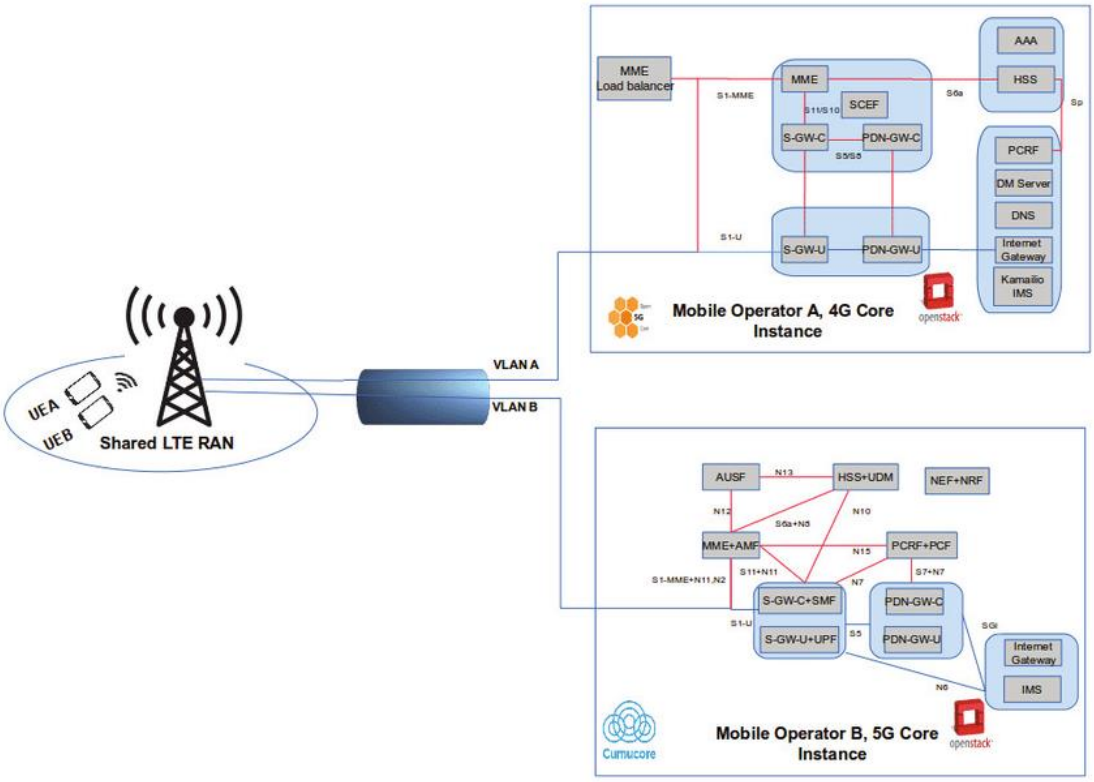
Joonis 16 MORAN ja MOCN lahendused (GSMA assotsiatsiooni järgi)[31]

MOCN-lahenduse puhul saavad sama RAN võrku ühiskasutada näiteks operaator A, kellel on 4G LTE tuumvõrk, ja operaator B, kellel on 5G NR SA tuumvõrk.[1] Tegemist võib olla ka virtualiseeritud tuumvõrkudega, nagu toodud Joonis 17. Eelduseks on, muidugi see, et ühiskasutuses RAN-võrk toetab nii 4G LTE kui ka 5G NR SA raadioliidest.

Hetkel ei kasuta operaatorid Eestis MOCN ja MORAN lahendusi, vaid jagatakse ainult antenni maste ja tugijaama konteinereid (passiivseadmete jagamine). Kuna suurem osa Eestist on 5G-võrkudega juba kaetud, pole enam vajadust jagamist kasutada. Jagamine tuleb kõne alla vaid erilahenduste korral – hetkel kasutatakse sisevõrkude jagamist, kus jagatakse antennivõrku hoonete sees (DAS – Distributed Antenna System) ja tarnspordikoridoride katmisel.

Eestis on transpordikoridoride katmisel 5G kiire lairibaühendusega jagamine oluline, et vähendada operaatorite kulusid. Antud lahendustes onl RAN võrgu koormused üldjuhul keskmised või madalad ning ressursside jagamine võimaldab kõrgemat efektiivsust.

[31] https://www.gsma.com/get-involved/gsma-foundry/wp-content/uploads/2023/02/5G-NCCS_GSMA-Guide_27.02.2023.pdf



Joonis 17 MOCN lahendus 4G ja 5G tuumvõrkude operaatorite korral.[32]

5 aasta perspektiivis ei näe Eestis laialdast MOCN ja MORAN lahenduste kasutuse tõusu näha kuna suurem osa Eestist on juba kaetud 5G teenusetega. Küll aga võib antud tehnoloogia potensiaal olla toeks transpordikoridoride katvuse loomisel, kus 5G suurte mahtudega võrgu rajamine ei ole operaatoritele kuluefektiivne.

[32] https://www.researchgate.net/publication/355629789_4G_RAN_Infrastructure_Sharing_by_5G_Virtualized_Mobile_Network_Operators_A_Tutorial?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoiX2RpcmVjdCJ9fQ

1.7 EDGE COMPUTING

EDGE Computing (ehk serva arvutamine) omab mitmeid definitsioone, üks nendest on kirja pandid Linux Foundation-i poolt[33]:

"The delivery of computing capabilities to the logical extremes of a network in order to improve the performance, operating cost and reliability of applications and services. By shortening the distance between devices and the cloud resources that serve them, and also reducing network hops, edge computing mitigates the latency and bandwidth constraints of today's Internet, ushering in new classes of applications. In practical terms, this means distributing new resources and software stacks along the path between today's centralized data centers and the increasingly large number of devices in the field, concentrated, in particular, but not exclusively, in close proximity to the last mile network, on both the infrastructure and device sides."

Seega on EDGE computing hajutatud arvutusmudel, mille eesmärgiks on tuua arvutamine ja andmete salvestamine lähemale andmete allikatele. Selle kaudu suurendatakse jõudlust ja rakenduste/teenuste töökindlust, vähendades samal ajal opereerimise kulusid. Edge paikneb lõppseadmete ja pilve ressursside vahel, lühendades kaugust lõppseadme ja teenindavate ressursside vahel, mis võivad asuda pilves.

Füüsilise lähenemise tõttu lõppkasutajale väheneb latentsus võrreldes olukorraga, kus rakendus töötab tsentraliseeritud andmekeskuses. Eeldatakse, et andmed genrereeritakse pidevalt suureneva arvu lõppseadmete poolt, mistõttu Edge lahendused toovad rakendused andmeallikatele lähemale, tagades võrgu ressursside efektiivsem kasutamine.

Samuti võib öelda, et Edge Computing on andmetöötluse mudel, milles andmete töötlemine ja salvestamine viiakse lähemale andmete allikale ehk lõppsedmele. Seadmed mis genereerivad andmeid on andmeallikad (IoT seadmed, sensorid jne). Edge seadmed (Edge device/node) on kohalikud arvutid või serverid mis töötlevad andmeid lähedal nende loomise kohale. Andmete liikumist võimaldavad võrguseadmed ja -ühendused on nimetatud võrgutaristuks. Võrgutaristu võimaldab andmete liikumist Edge seadmete ja andmekeskuse vahel. Antud lahenduse korral on olulised ka tarkvara ja rakendused, mis töötlevad ja analüüsivad andmeid Edge seadmetes, võimaldades minimaalset latentsust ja parandades võrgu efektiivsust.

Olgu siinkohal täpsustavalt mainitud, et Edge node ja Edge server on mõlemad seotud serva arvutamisega, kuid neil on erinevad rollid ja tähendused:

- **Edge server**: See on arvutisüsteem, mis asub võrgu servas, lähedal andmeallikatele või lõppkasutajatele. Edge serverid töötlevad andmeid lokaalselt, et vähendada latentsust, parandada ribalaiuse tõhusust ja suurendada turvalisust[34].

[33] glossary/PDFs/OpenGlossaryofEdgeComputing_2019_v2.0.pdf at master · State-of-the-Edge/glossary · GitHub

[34] https://go.stlpartners.com/What-is-an-edge-server-PDF

- **Edge node**: See on üldisem termin, mis viitab igale seadmele, serverile või väravale, kus saab serva arvutamist teostada. Edge node võib hõlmata edge servereid, aga ka teisi seadmeid, nagu näiteks intelligentsed kaamerad või tööstuslikud masinad[35].

Edge node'i peamised omadused:

1. *Lokaalne andmetöötlus:* Edge node'id töötlevad andmeid kohapeal, mis vähendab latentsust ja parandab reageerimiskiirust.
2. *Andmete salvestamine:* Need seadmed võivad salvestada andmeid lokaalselt, pakkudes kiiret juurdepääsu ja suurendades turvalisust.
3. *Võrgu koormuse vähendamine:* Töötledes andmeid lokaalselt, vähendavad edge node'id vajadust suurte andmehulkade edastamiseks keskserverisse või pilve, mis omakorda vähendab võrgu koormust.
4. *Reaalajas analüüs:* Edge node'id võimaldavad reaalajas andmete analüüsi ja otsuste tegemist, mis on eriti oluline kriitiliste rakenduste puhul, nagu autonoomsed sõidukid ja tööstusautomaatika[36],[37].

Traditsioonilise pilvandmetöötluse korral saadetakse andmed lõppseadme poolt keskserverisse töötlemiseks ja analüüsimiseks. Edge lahenduse puhul aga lõppseadmed ja andurid koguvad andmeid mis töödeldakse lähedal asuvates servaseadmetes (Edge device) või -serverites (Edge server). Kuna andmete töötlemine on lähedal siis saab teha kiireid otsuseid ja reageerida reaalajas. Ainult olulised andmed saadetakse pilveserveritesse täiendvaks analüüsiks ja/või pikaajaliseks salvestuseks.

Ühelt poolt võib öelda, et Edge computing suurendab andmete turvalisust, kuna andmeid töödeldakse lähemal nende loomise kohale. Teiselt poolt paiknevad Edge seadmed väljaspool andmekeskuse turvalist piirkonda ja peavad seetõttu omama täiendavat turvalisust.

5G ja Edge computing täiendavad teineteist mitmel viisil, pakkudes koos võimsamaid lahendusi ja võimaldades uusi rakendusi. Järgnevalt on toodud mõned põhjused, miks 5G vajab Edge computing-ut:

1. **Kiirem andmeedastus***:* 5G pakub oluliselt suuremaid andmeedastuskiirusi võrreldes varasemate mobiilsidevõrkudega. See võimaldab edge seadmetel kiiremini ja tõhusamalt andmeid töödelda ja edastada[38],[25].
2. **Väiksem latentsus:** 5G vähendab latentsust, mis tähendab, et andmed liiguvad kiiremini seadmete ja serverite vahel. Edge computing aitab veelgi vähendada latentsust, kuna andmeid töödeldakse lähemal nende allikale[24,39].
3. **Võrgu koormuse vähendamine:** Edge computing vähendab vajadust saata suuri andmehulkasid keskserverisse või pilve, mis omakorda vähendab võrgu koormust. 5G võimaldab kiiret ja tõhusat andmeedastust, kuid edge computing aitab optimeerida andmete liikumist[24,40].

[35] https://developer.ibm.com/articles/edge-computing-architecture-and-use-cases/
[36] Edge computing architecture and use cases - IBM Developer
[37] Edge Computing {Definition, Architecture & Use Cases} (phoenixnap.com)
[38] What is the Relationship Between 5G and Edge Computing? | Cradlepoint
[39] 5G and edge computing: What they are and why you should care | ZDNET
[40] IBM 5G and Edge Computing | IBM

4. **Reaalajas rakendused:** 5G ja edge computing koos võimaldavad reaalajas rakendusi, nagu autonoomsed sõidukid, tööstusautomaatika ja tervishoiuteenused. Need rakendused nõuavad kiiret andmetöötlust ja madalat latentsust, mida 5G ja edge computing suudavad pakkuda[25,26].
5. **Turvalisus ja privaatsus:** Edge computing võimaldab andmeid töödelda ja salvestada lokaalselt, mis suurendab turvalisust ja privaatsust. 5G toetab seda, pakkudes kiiret ja turvalist ühendust[26].

Tehnilises mõttes 5G-võrke iseloomustavad just *madal latentsusaeg (*peaaegu reaalajas reageerimine), *suur ribalaius (toetab* andmete ülikiiret jagamist); *garanteeritud kvaliteet (*võrgu osa on reserveeritud konkreetse teenuse kasutuseks, siin ka võrguviilakad (Slice)).

Need omadused muudavad 5G peamiseks platvormiks uute tehnoloogiate testimisel ja käivitamisel, nagu asjade internet (IoT), tehisintellekt (AI), virtuaalne ja liitreaalsus (VR ja AR).

Edge-andmetöötlus on nende nõuete täitmise peamine kontseptsioon. See tähendab andmetöötlust kasutaja seadme lähedal või otse selle peal, selle asemel, et saata võrgu kaudu andmed andmetöötluskeskusse ning seejärel võtta ja saata tagasi kasutaja seadmesse. Selline reaalajas suhtlemine võimaldab rakendusi nagu tervise ja patsientide jälgimine, tehasemasinate kaugjuhtimine, arukad võrgud taastuvenergia haldamiseks, autonoomsed sõidukid, vigade täpne avastamine ja kiire sekkumine jne.[41]

EDGE computing kasutab hajutatud arvutusmudelit (distribute computing) millel on mitmeid eeliseid, kuid sellega kaasnevad ka täiendavad väljakutsed:

1. *Turvalisus ja privaatsus:* Andmete liikumine mitme seadme ja asukoha vahel suurendab turvariske. Andmete kaitsmine volitamata juurdepääsu eest ja privaatsuse tagamine on keeruline[42],[43].
2. *Võrgu usaldusväärsus:* Hajutatud süsteemid sõltuvad tugevalt võrguühendustest. Võrgu katkestused või viivitused võivad mõjutada süsteemi jõudlust ja töökindlust.
3. *Andmete sünkroniseerimine:* Andmete kooskõlastamine ja sünkroniseerimine mitme seadme vahel võib olla keeruline, eriti kui seadmed asuvad erinevates geograafilistes asukohtades.
4. *Haldus ja hooldus:* Hajutatud süsteemide haldamine ja hooldamine nõuab rohkem ressursse ja keerukamaid tööriistu, et tagada süsteemi tõrgeteta toimimine.
5. *Kulud:* Kuigi hajutatud arvutusmudel võib pakkuda kulutõhusust, võivad algsed seadistuskulud ja pidevad hoolduskulud olla kõrged.
6. *Ühilduvus ja standardid:* Erinevate seadmete ja süsteemide ühilduvus võib olla probleemiks, kuna puuduvad ühtsed standardid, mis tagaksid sujuva koostöö.

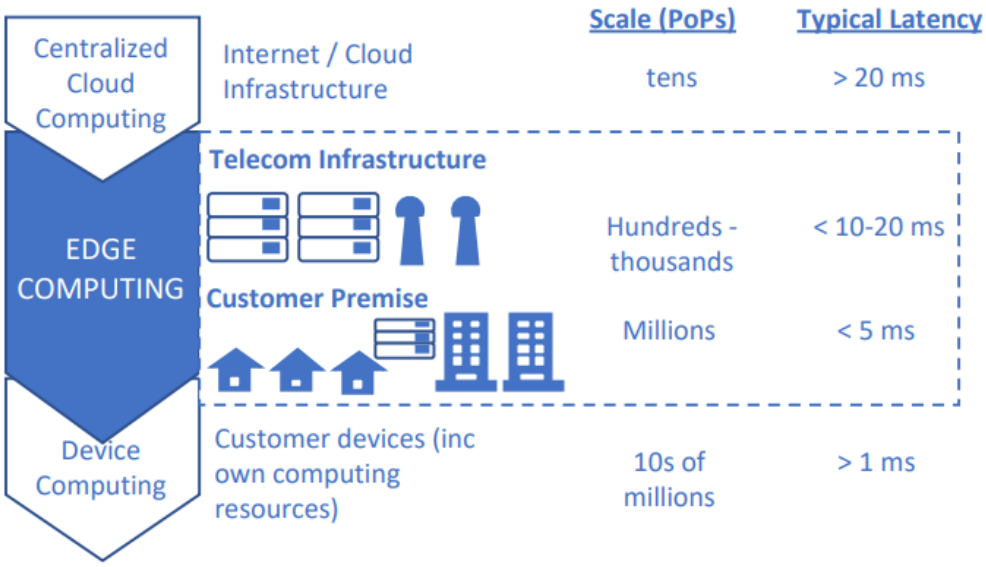
Toodud väljakutsed nõuavad hoolikat planeerimist ja tõhusaid lahendusi, et tagada hajutatud arvutusmudeli edukas rakendamine ja toimimine praktikas.

Mobiilsidevõrkudes rakendused jooksevad nutitelefonis kuid teenused operaatori tuumvõrgus (näiteks IMS teenused) või üldkasutatavas internetis. Antud juhul on rakendused ja teenused üksteisest ajalises mõttes suhteliselt kaugel (üldjuhul 50 – 100

41 5G: Küsimused ja vastused | Shaping Europe's digital future (europa.eu)
42 Edge-arvuti vs hajutatud andmetöötlus: erinevus ja võrdlus (askanydifference.com)
43 Hajutatud andmetöötlus VS pilvandmetöötlus – HashDork

ms). Samas võivad võrgu mingid ühendused või sõlmed olla ülekoormatud ning selle tõttu võib ajaline viide (latentsus) veelgi suureneda, see aga muudab raskeks teenuse kvaliteedi tagamise.

Kui nüüd vaadata täpsemalt kus on võrgu Edge siis selleks ei ole unikaalset asukohta. Edge node-id võivad olla võrgu ruuterites, mobiilside raadiomastides, WiFi hot spot-ides, või ka näiteks DSL-box-ides. Oluline siinjuures on kus paiknevad seadmed milles on arvutuslikud ressursid mida saab kasutada Edge computing-uks (vt. Joonis 18)[44].



Joonis 18 Edge computing asukohad[30]

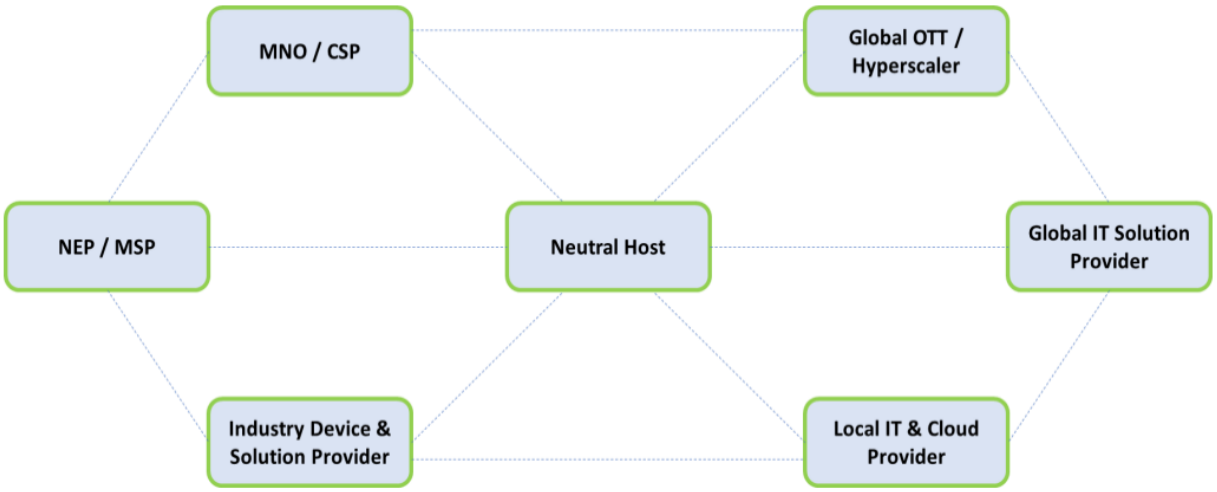
Euroopa Parlamendi ja nõukogu defineeringu järgi vaadatakse Edge node-idena servasõlmi, mille latentsusaeg on väiksem kui 20 millisekundit; näiteks üksikserver või muu ühendatud andmetöötlusressursside kogum, mida käitatakse servtöötlustaristu osana ja mis tavaliselt asub taristu serval töötavas servandmekeskuses ja on seega sihtkasutajatele füüsiliselt lähemal kui keskse andmekeskuse pilvesõlm[45].

Siinkohal tuleb tähelepanu juhtida asjaolule, et kasutusel on ka termin Fog computing ehk uduarvutus[46], mis kirjeldab kihilist mudelit mis võimaldab juurdepääsu jagatud skaleeritavatele arvutusressurssidele. Fog node-id võivad olla nii füüsilised kui ka virtuaalsed ning nad paiknevad lõppseadmete ja kesksete pilveserverite vahel. Selline mudel võimaldab luua hajutatud, hilistuse(latensuse) teadlikke rakendusi ja teenuseid. Fog Computing laiendab Edge computing-u võimekusi suuremale sensorite ja lõppseadmete võrgule.

Uduarvutus või uduvõrgu loomine, tuntud ka kui udustamine, on arhitektuur, mis kasutab ääreseadmeid, et teostada märkimisväärsel hulgal arvutusi, salvestusi ja sidet lokaalselt ning marsruudituna Interneti magistraalvõrgu kaudu.

[44] EdgeComputingFor5GNetworks.pdf (5g-ppp.eu)
[45] Europe's Digital Decade: digital targets for 2030 - Documents - European Commission (europa.eu)
[46] https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.500-325.pdf

Inglise keeles öeldakse: Edge is embedded, Fog is further. Siin mõeldakse, et Edge computing teostatakse võrgu serval olevates seadmetes (Edge node) ning Fog computing lisab täiendava kihi Edge node-i ja pilvserveri vahel.



Joonis 19 EDGE computing-u olulisemad pakkujad[47]

Olulised osalised EDGE computing-u pakkumisel on järgmised (vt. Joonis 19):

- MNO – Telko ja mobiilside võrkude operaatorid,
- CSP (Communication service provider) - side teenuste pakkujad,
- Globaalsed OTT või Hyperscalers – suured globaalsed tegijad keda võib nimetada over-the-top (OTT), üldkasutatavate pilve teenuste pakkujad,
- NEP (Network Equipment Providers) – sidevõrkude seadmete pakkujad,
- MSP (Managed Service Providers) – hallatavate teenuste pakkujad.

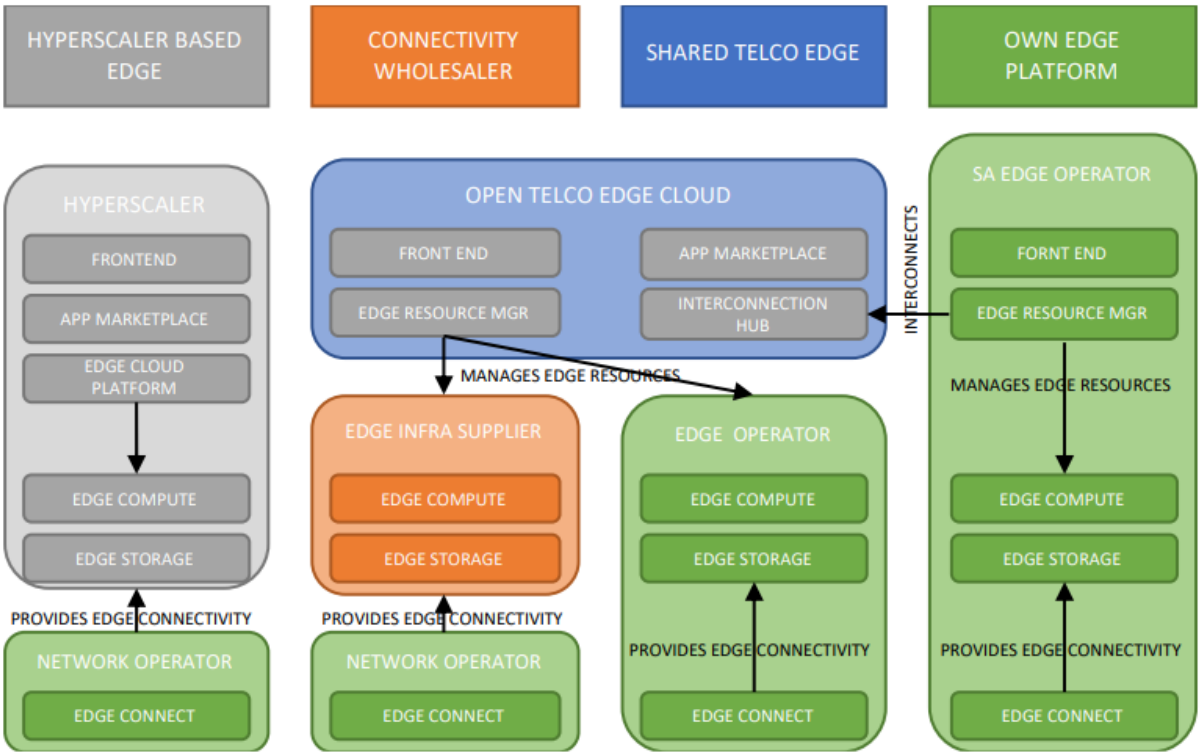
Sellises „kooperatiivses" (koostöölises ja konkurentsivõimelises) maastikus saame eristada globaalseid OTT- või hüperskaalereid ja kohalikke IT- ja pilveteenuse pakkujaid. Samas saame esile tõsta ka globaalseid IT-lahenduste pakkujaid, nagu IBM, Oracle, HPE jne. Teisel poolel on telekommunikatsioonioperaatorid, nt Telcos/Mobile Network Operators (MNOs) ja kommunikatsiooniteenuste pakkujad (CSPs). Lisaks pakuvad telekommunikatsioonitarnijad, nt võrgu seadmete pakkujad (NEP), üha enam hallatavaid teenuseid, tegutsedes seega hallatavate teenuste pakkujatena (MSP). 5G ja võrguvõimalustega tööstuse tarvis (Industry 4.0) tegelevad ühtlasi ka globaalsed tööstusseadmete ja lahenduste pakkujad (nt Siemens, Bosch, ABB jne) samuti servaandmetöötluse ja servapilveteenuste valdkonnaga.

Nende osalejate seas on oluline tuua esile ka niinimetatud neutraalse host-i (teenusepakkuja), kes võib hallata kohalikku või privaatset sagedusala ja pakkuda teenuseid, mis võimaldavad füüsilisi või virtuaalseid ressursse jagada mitme

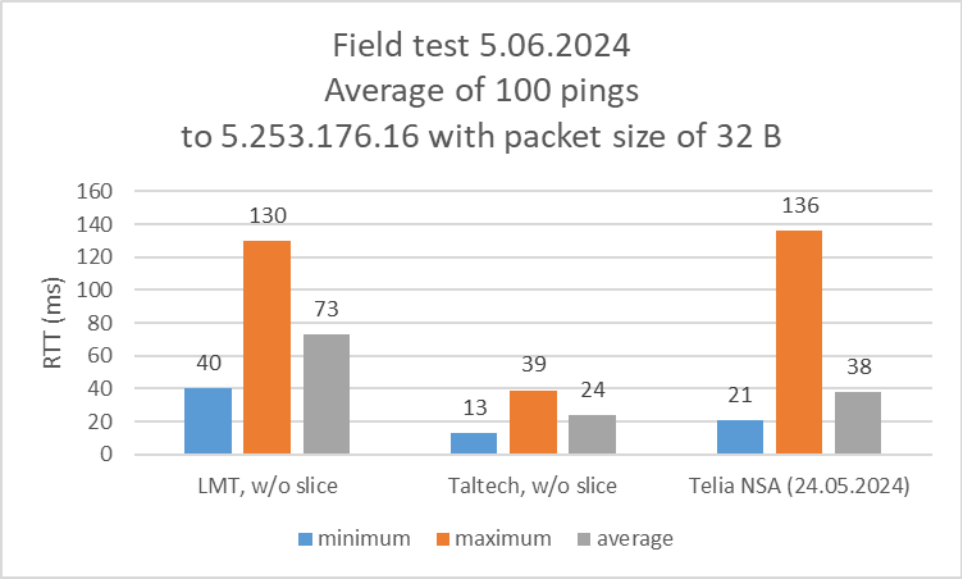
[47] EdgeComputingFor5GNetworks.pdf (5g-ppp.eu)

teenusepakkuja vahel, parandades sel viisil majanduslikku tõhusust kohtades, kus teised osalejad individuaalselt tegutsedes ei näe tõhusat ärimudelit.

Olulisi Edge Computing-u pakkujaid on hea tutvustada läbi näidiskonfiguratsioonide[48] (vt. Joonis 20).



Joonis 20 EDGE computing-u pakkujate konfiguratsioonid/suhted[43]



[48] EdgeComputingFor5GNetworks.pdf (5g-ppp.eu)

Joonis 21 Latentsuse testid 5G-Routes projektis Valgas (TalTech, Eesti) ja Valkas (LMT, Läti) 5G SA test võrgus. *(Antud raport ei ole hetkel vabalt saadaval.)*

5G-Routes[49] projektis oleme mõõtnud võrgu latentsust TalTech-i akadeemilise 5G SA tuumvõrgus (vt. Joonis 21). Testide käigus mõõtsime latensust Valga linnast Eestis ja Valka linnast Lätis TalTech-i tuumvõrku Tallinnas Mustamäel. Nagu näha on ülekandevõrgu sisukohast latensus Valgast vähem kui 40ms, samas Läti võrgus lisandub täiendavalt vähemalt 20 ms hilistust. Võrdluseks on toodud ka Valgast tehtud latentsuse testid Telia 5G NSA võrgu kaudu TalTech-i pilveserverisse. Toodud testide käigus on latensust mõõdetud ping-testidega kus ping-testi ajas sisaldub nii paketi saatmine kui ka vastuvõtmine (kahesuunaline hilistus). Ühesuunaline hilistus on seega poole väiksem.

Eesti siseselt tekib vajadus Edge node-ide järele peamisel teenustele, mis vajavad ühesuunalist hilistust, garanteeritult alla 20 ms. Teised teenused saavad kasutada ressursse Tallinna pilveserverites.

Lahendusena võiks siin Tartusse paigaldada Edge Node-i, mis teenindaks kogu Lõuna-Eesti piirkonda, võimaldades seeläbi madalamat latentsust ja paremat teenuse kvaliteeti. Teise võimalusena näeksime suurema arvu lihtsamate (väikese) arvutusvõimsusega Edge Node-ide kasutamist.

Vaadates Edge seadmete kasutamist 5G võrkudes, pakub LBO (Local Break Out) lahendus siin mitmeid eeliseid [50]. LBO võimaldab võrgu serval omada ühendusi väliste võrkudega, (näit. Interneti-ühendus) ja sellisel juhul võib Edge paikneda just välisvõrgus, kuid jääda ikkagi võrgu serva lähedale. Siin tuleks rõhutada järgmist kolme olulist punkti:

- **Madalam latentsus:** LBO võimaldab andmete töötlemist lähemal kasutajale, mis vähendab latentsust ja parandab jõudlust, eriti reaalajas rakenduste puhul.
- **Võrgu koormuse vähendamine:** LBO aitab vähendada koormust kesksetes andmekeskustes, suunates liikluse lokaalselt võrgust välja, mis võib parandada võrgu üldist efektiivsust.
- **Privaatsus ja turvalisus:** LBO võimaldab tundlike andmete lokaalsemat töötlemist, mis võib parandada privaatsust ja turvalisust.

Kuigi LBO lahendus ei ole mobiilsideoperaatoritele kohustuslik, võib see pakkuda märkimisväärseid eeliseid, eriti rakendustes ja teenustes, mis nõuavad madalat latentsust ja suurt jõudlust.

1.7.1 EDGE NODE-I DEFINEERIMINE

On kindlad parameetrid mille alusel saab kinnitada, et tegemist on Edge Node-iga:

- Füüsiline asukoht: Edge node paikneb võrgu äärel, seega lähemal kasutajale kui traditsiooniline andmekeskus. Ta pakub madalat latentsust (vähem kui 20ms) ja on kõrge kättesaadavusega ja usaldusväärne.

[49] https://www.5g-routes.eu/
[50] Distribution of 5G core to network edge | Fierce Network (fierce-network.com)

- Funktsionaalsus: Edge Node-i ülesanne on andmete töötlemine ja salvestamine võimalikult lähedal andmeallikale ehk lõppkasutajale.
- Andmeedastuskiirus ja arvutusvõimsus: üldiselt on Edge Node-id väiksemad ja vähema arvutusvõimsusega kui traditsioonillised andmekeskused. Nende võimsus on piisav vaid kohalike rakenduste ja teenuste toetamiseks. Nad on võimelised töötlema suures mahus andmeid väga kiiresti.
- Ühendatus: Edge Node-id on ühendatud ka suurema võrguga andmete vahetuse võimaladamiseks, samas on nad võimelised autonoomselt töötama kohalike rakenduste ja teenuste toetamiseks.
- Turvalisus: Edge Node on varustatud turvafunktsioonidega, et kaitsta andmeid volitamata juurdepääsu eest.

Kui seade vastab enamikule ülaltoodu kriteeriumitele võib öelda, et tegemist on Edge Node-iga.

5-aastases perspektiivis ei teki Eestis laialdast Edge node-ide kasutust, kuna puuduvad teenused, mis vajaksid hilistusi alla 20 ms. Arvestades Eesti geograafilist suurust ja suuremate linnade paiknemist, on piisav 2-3 suurema Edge node-i, näiteks Tartus, Pärnus, vajadusel ka suurematele saartele. Alternatiivina võiks kaaluda suurema arvu lihtsamate (väikese) arvutusvõimsusega Edge Node'ide kasutamist (vt. 2.3).

1.8 INTERNETI PROTOKOLLID IPV4 JA IPV6

Internet Protocol version 6 (IPv6) on kõige viimane version Interneti Protokollis (IP). Tegemist on protokolliga mis ruudib liiklust üle Internet-i. IPv6 pakub eeliseid võrreldes IPv4-ga (Internet Protocol version 4)[51],[52],[53]:

1. Rohkem IP-aadresse: IPv6 kasutab 128-bitiseid aadresse, mis võimaldab 2^128 unikaalset aadressi. See on tohutu kasv võrreldes IPv4 32-bitiste aadressidega, mis võimaldavad ainult 4,3 miljardit unikaalset aadressi.

2. Parem turvalisus: IPv6-l on sisseehitatud IPsec (Internet Protocol Security), mis pakub autentimist ja krüpteerimist, parandades seeläbi võrgu turvalisust.

3. Efektiivsem marsruutimine: IPv6 võimaldab tõhusamat marsruutimist ja andmepakettide töötlemist, kuna see ei nõua pakettide fragmenteerimist.

4. Automaatne aadressi konfiguratsioon: IPv6 toetab stateless address autoconfiguration (SLAAC – Stateless Aadress Auto-configuration), mis võimaldab seadmetel automaatselt oma IP-aadressi määrata ilma käsitsi sekkumiseta.

5. Kvaliteedi tagamine (QoS): IPv6-l on sisseehitatud kvaliteediteenused, mis võimaldavad eristada viivitustundlikke pakette, parandades seeläbi teenuse kvaliteeti.

IPv6 on loodud tuleviku vajadusi silmas pidades, pakkudes rohkem aadresse ja paremat turvalisust ning efektiivsust. Samas tuleb tagada ka vanemate seadmete, mis kasutavad IPv4-ja, funktsionaalsus võrgus. Seda tehakse IPv4/IPv6 dual stack lahendusega. IPv4/IPv6 dual stack lahendus võimaldab mõlemat protokolli paralleelselt kasutada, mis samas mõjutab võrgu efektiivsust mitmel viisil[54],[55],[56]:

1. Parema ühenduvuse tagamine: Dual stack võimaldab seadmetel suhelda nii IPv4 kui ka IPv6 võrkudega, parandades seeläbi üldist ühenduvust.

2. Suurenenud keerukus: Kahe protokolli haldamine võib suurendada võrgu keerukust ja nõuda rohkem ressursse, kuna seadmed peavad toetama mõlemat protokolli.

Võrgu jõudlus: Uuringud näitavad, et IPv6-l on parem ühenduvus ja väiksem pakettide kadu võrreldes IPv4-ga, kuid IPv6 võib põhjustada suuremat latentsust ja madalamat läbilaskevõimet.

[51] IPv4 vs. IPv6: What Are the Differences? (howtogeek.com)
[52] IPv4 vs. IPv6: What are the main differences? | TechRadar
[53] What is the difference between IPv4 and IPv6? | Juniper Networks US
[54] Deploying Dual-Stack IPv4 and IPv6 Networks (networkcomputing.com)
[55] Understanding Dual Stacking of IPv4 and IPv6 Unicast Addresses | Junos OS | Juniper Networks
[56] Information | Free Full-Text | Empirical Analysis of IPv4 and IPv6 Networks through Dual-Stack Sites (mdpi.com)

3. Turvalisus: Dual stack võib pakkuda paremat turvalisust, kuna IPv6-l on sisseehitatud IPsec tugi, kuid see võib ka suurendada turvaprobleemide riski, kuna mõlemad protokollid peavad olema turvatud.

4. Üleminek ja ühilduvus: Dual stack lahendus võimaldab sujuvat üleminekut IPv4-lt IPv6-le, ilma et oleks vaja olemasolevat võrku täielikult ümber ehitada.

Dual stack lahendus parandab võrgu paindlikkust ja tulevikukindlust, kuid see nõuab täiendavaid ressursse ja hooldust.

IPv6 ja IPv4 kiiruse võrdlemisel on tulemused üldiselt sarnased, kuid mõningatel juhtudel on IPv6 kiirem. IPv6 peaks olema veidi kiirem, kuna see ei vaja NAT (Network Address Translation) tõlkeid, mis võivad IPv4 puhul aega võtta[57]. Näiteks Akamai leidis, et veebilehed laadivad IPv6-ga keskmiselt 5% kiiremini ja 95% juhtudest 15% kiiremini võrreldes IPv4-ga[58].

Paljud testid on näidanud, et IPv4 ja IPv6 kiirused on enamasti võrdsed. Mõnel juhul on leitud, et IPv4 oli isegi veidi kiirem, kuna IPv6 paketid on suuremad, mis võib mõnikord põhjustada suuremat latentsust[59]. Samuti sõltuvad IPv¤ ja IPv6 kiiruse erinevused ka võrgu ülesehitusest.

Paljudes võrkudes kasutatakse IPv4 ühenduste korral IPv6 pakettide kapseldamist ehk tunneling lahendust. IPv6 tunneling võib mõjutada võrgu efektiivsust mitmel viisil[60],[61],[62],[63]:

1. Lisatud latentsus: Tunneling lisab täiendava kapseldamise kihi, mis võib suurendada latentsust, kuna IPv6 paketid peavad läbima täiendava töötlemisetapi, et neid IPv4 pakettidesse kapseldada ja seejärel lahti pakkida.

2. Suurenenud keerukus: Tunneling suurendab võrgu keerukust, kuna see nõuab täiendavat konfiguratsiooni ja haldust. See võib suurendada vigade tekkimise riski ja nõuda rohkem ressursse võrgu haldamiseks.

3. Võrgu jõudlus: Mõnel juhul võib tunneling vähendada võrgu jõudlust, kuna täiendav kapseldamine võib suurendada pakettide suurust ja seega vähendada läbilaskevõimet.

4. Ülemineku lihtsustamine: Tunneling võimaldab sujuvat üleminekut IPv4-lt IPv6-le, võimaldades IPv6 liiklust IPv4 infrastruktuuri kaudu. See võib olla kasulik, kui täielik üleminek IPv6-le ei ole kohe võimalik.

4G ja 5G mobiilside võrkudes saavad lõppkasutaja seadmed kasutada erinevate teenustega samaaegselt nii IPv4 kui ka IPv6 aadresse. Üheks näiteks siin on kõne üle 4G

[57] IPv4 vs IPv6 Performance Comparison (sucuri.net)
[58] IPv4 vs IPv6: Which Is Faster? | FS Community
[59] IPv4 vs IPv6: The Difference Explained | Cybernews
[60] RFC 7059: A Comparison of IPv6-over-IPv4 Tunnel Mechanisms (rfc-editor.org)
[61] IPv6 tunneling over IPv4 Configuration (networklessons.com)
[62] IPv4 vs. IPv6: How the Upgrade Improves Routing Efficiency - Telehouse- Telehouse
[63] Information on RFC 7059 » RFC Editor (rfc-editor.org)

LTE võrgu VoLTE (Voice over LTE). Voice over LTE (VoLTE) kasutab IPv6 aadresse [64],[65],[66]. IPv6 võimaldab tõhusamat marsruutimist ja andmepakettide töötlemist, mis on kriitiline VoLTE jaoks, kuna see nõuab madalat latentsust ja kõrget kvaliteeti. Samuti võimaldab IPv6 kasutamine VoLTE-s tagada parema jõudluse, turvalisuse ja skaleeritavuse võrreldes IPv4-ga.

Enamik 5G võrke on loodud töötama dual stack konfiguratsioonis[67]. See võimaldab sujuvat üleminekut IPv4-lt IPv6-le ja tagab, et seadmed mis toetavad ainult ühte protokolli, saavad endiselt ühenduse luua.

IPv6 kasutuselevõtt ei ole ainult tehniline uuendus, vaid ka strateegiline samm, mis avab uusi turge ja võimalusi. IPv6 kasutuselevõtt avab mitmeid uusi ärivõimalusi erinevates sektorites:

1. Telekommunikatsioon: Telekommunikatsooniettevõtted saavad kasutada IPv6, et toetada mobiilseadmete ja järgmise põlvkonna võrkude levikut. IPv6 võimaldab rohkemate seadmete ühendamist ja paremat võrgu jõudlust.

2. Pilveteenused: Pilveteenuse pakkujad saavad IPv6 abil rahuldada kasvavat nõudlust pilvepõhiste rakenduste ja teenuste järele. IPv6 suur aadressiruum võimaldab rohkemate serverite ja teenuste ühendamist.

3. Asjade Internet (IoT): IPv6 on kriitiline IoT seadmete jaoks, kuna see võimaldab suurel hulgal seadmetel võrku ühenduda. See avab uusi võimalusi nutikate kodude, tööstusautomaatika ja tervishoiuseadmete arendamiseks[68].

4. E-kaubandus ja veebiteenused: IPv6 võimaldab paremat veebilehtede ja e-kaubanduse platvormide jõudlust, kuna see vähendab NAT-i vajadust ja parandab ühenduvust[69].

Tuleb ka märkida, et 5G võrgu Local Break Out (LBO) funktsionaalsus ei nõua tingimata IPv6 protokolli kasutamist, kuid IPv6 pakub võimalusi (aadresside kättesaadavus, parem jõudlus ja madalam latensus, tulevikukindlus), mis muudavad selle eelistatuks[70].

Eestis on kõikidel võrgu operaatoritel kasutusel IPv4/IPv6 dual stack tehnoloogia.

IPv4/IPv6 dual stack lahenduse kasutamine Eestis on perspektiivikas ja jätkub ka 5-10 aasta persektiivis. 5G ja 6G jaoks loodud madala latensusega teenused hakkavad kasutama IPv6 protokolli kuid ei nõua ainult IPv6 võrgu olemasolu.

[64] IPv4 vs. IPv6: What Are the Differences? (howtogeek.com)
[65] IPv4 vs. IPv6 - What's the difference, and which is faster? - SiteGround KB
[66] IPv4 vs. IPv6 | What it Means & Key Differences Explained (avg.com)
[67] The Business Case for IPv6-Only Enterprise - American Registry for Internet Numbers (arin.net)
[68] The Rise of IPv6: A Global Perspective on Network Adoption - IPv6.net
[69] How to Build a Business Case for IPv6 (eweek.com)
[70] 220401-IPv6-in-5G.pdf (ipv6council.be)

1.9 WIFI

1.9.1 WIFI 6 JA WIFI 7

WiFi 6 ja **WiFi 7** on standardid, mis on Eestis juba kasutusel. Need tehnoloogiad võimaldavad suuremaid andmeedastuskiiruseid võrreldes vanemate lahendustega ja suudavad konkureerima isegi 5G kiire andmeside teenustega. Siiski on WiFi-võrkudes ülimadalate latensuste saavutamise garanteerimine endiselt väljakutse, kuigi WiFi 6 ja WiFi 7 on suutnud võrgu latensust oluliselt vähendada[71].

Eestis pakuvad mobiilsideoperaatorid VoWiFi (Voice over WiFi) teenust, kus WiFi võrku kasutatakse VoLTE kõneteenuse pakkumiseks. VoWiFi tehnoloogia tagab hea helikvaliteediga kõned ka nendes ruumides, kus mobiililevi on nõrk või puudub täielikult. WiFi-kõnede tegemiseks on vajalik VoLTE-kõnede teenus ja VoWiFi tehnoloogiaga telefoni[72],[73].

WiFi võrkude suurem integreerimine mobiilsidevõrkudega on oluline. Operaatorid Eestis on juba kasutamas WiFi-võrkude poolt pakutavaid eeliseid läbi VoWiFi kõneteenuse.

[71] https://www.wi-fi.org/beacon/rolf-de-vegt/reduced-latency-benefits-of-wi-fi-6-ofdma
[72] https://www.telia.ee/era/mobiil/muud-lisateenused/volte-vowifi/
[73] https://www.elisa.ee/et/elisast/teenuste-tingimused-ja-hinnakiri/arikliendi-tingimused/vowifi

1.10 LEO SAT

LEO satelliidid, ehk madalal orbiidil tiirlevad satelliidid, asuvad tavaliselt 500 kuni 2000 kilomeetri kõrgusel Maa pinnast. Need satelliidid liiguvad väga kiiresti, tehes ühe tiiru ümber Maa umbes 90 minutiga. LEO satelliidid on eriti kasulikud kiireks andmesideks, kuna nende signaalide viivitus on väiksem võrreldes kõrgemal orbiidil asuvate satelliitidega. Tänu madalale orbiidile on LEO satelliitide pildid ja andmed väga kõrge resolutsiooniga. LEO satelliidid moodustavad suuremaid võrgustikke ehk konstellatsioone, et tagada pidev katvus ja ühendus.

Üks tuntumaid Leo satelliitide projekte on SpaceX-i Starlink, mille eesmärk on pakkuda globaalset internetiühendust. LEO satelliidid leiavad üha rohkem kasutust ka telekommunikatsioonis ja IoT (asjade interneti) seadmete ühendamisel.

Kuigi LEO satelliidid on väiksemad ja odavamad ehitada, vajavad nad sagedasemat asendamist, kuna nende eluiga on lühem kui kõrgematel orbiitidel asuvatel satelliitidel.

LEO satelliitide teenus Eestis pakub võimalust internetiühenduse pakkumiseks kohtades, kus muud lairiba teenused on raskesti kättesaadavad või võrgud on ülekoormatud.

LEO satelliitide teenuste integreerimine 5G mobiilside võrkudega on vajalik, et tagada uute teenuste kasutamine koos teiste mobiilside tehnoloogiatega. See koostöö võimaldab pakkuda lõppkasutajatele täiendavat lisandväärtust ja parandad teenuste kättesaadavust.

1.11 IOT

Asjade interneti (IoT – Internet of Things) lahendused kasutavad tehnoloogiaid, kus fookus on lihtsatel seadmetel mis tarbivad minimaalselt energiat, kuid saavutavad samas laia katvusala. Madalvõimsusega laia ala (LPWA – Low Power Wide Area) IoT-ühendust pakuvad kaks tehnoloogiat, mis moodustavad 5G "massiivse IoT" komponendi.

- **NB-IoT (Narrow Band – IoT)** on optimeeritud madala kiirusega andmesideühenduse jaoks, pakkudes maksimaalset ulatust, energiatõhusust ja kuluefektiivsust.
- **LTE-M (4G LTE - Machine type communication)** pakub kõrgemaid andmeedastuskiirusi, võimaldades teha asju, mis varem olid võimalikud ainult kõrge jõudlusega IoT-ga.

Mõlemad antud tehnoloogiad ulatuvad kaugemale ja sügavamale maa alla ning hoonetesse kui traditsiooniline 2G, 3G, 4G ja 5G-ühendustega.

Kitsaribaline IoT (NB-IoT) on loodud massiivse ulatusega IoT jaoks. Optimeeritud madala andmeedastuse jaoks, tagab see maksimaalse aku kestvuse ja ulatuse. See on ideaalne statsionaarsete mõõtmis- ja aruandlussensorite jaoks, mis peavad andmeid saatma vaid paar korda päevas – see võimaldab ka aku kestvust kuni 10 aastat. See sobib hästi nii kaugematesse asukohtadesse kui ka kõrge seadmete tihedusega olukordadesse, kus on vaja häireteta ühendust.

LTE-M on loodud madalvõimsusega laia ala (LPWA) kasutusjuhtumite jaoks, mis vajavad arenenumaid võimalusi. See toetab andmeedastuskiirusi kuni 1 Mbps, mis tähendab, et see suudab toetada näiteks madala resolutsiooniga videovalvet ja Voice over LTE (VoLTE) teenust. See võimaldab ka täielikku liikuvust mobiilside operaatori võrgus, näiteks GPS-jälgimise jaoks. LTE-M võimaldab ka üle õhu (OTA) turva- ja püsivara uuendusi, et IoT-lahendust pidevalt täiustada.

Telia avas 2019 aastal kogu Eestit katva IoT võrgu mis kasutab NB-IoT tehnoloogiat[74]. Samuti on NB-IoT tehnoloogiad saadaval ka Elisa ja Tele2 võrgus. Kõik NB-IoT võrgud Eestis kasutavad 800 MHz sagedusi ja pakuvad seega laia katvusala.

LTE-M (nimetatud ka kui LTE CAT-M) tehnoloogiat pakuvad Eestis Telia (800 ja 1800 MHz sagedustel) ja Elisa (1800 MHz sagedusel).

Suuremad IoT lahendused Eestis on hetkel elektriarvestitest alguse saanud kommunaalteenuste digitaliseerimine, mis on jõudnud gaasi-, kaugkütte- ja veearvestite näitude kauglugemiseni[75].

[74] https://www.telia.ee/uudised/telia-avas-eestit-katva-asjade-interneti-vorgu
[75] https://www.telia.ee/ari/mobiil/m2m-ja-iot-teenused/asjade-internet/

Tarkade linnade raames kasutatakse IoT lahendusi kus seadmeid on tuhandeid, näiteks Tartu Targa linna projekt[76]. Samuti on käimas mitmeid uurimisprojekte, näiteks sadevee äravoolu juhtimiseks (vt. Projekt DEPART[77]).

NB-IoT ja LTE CAT-M tehnoloogiad on Eestis perspektiivikad ja olulised.

Antud tehnoloogiad on ka 5G võrkudes IoT lahenduste jaoks kasutusel. Lähiajal on tulemas täiendus IoT tehnoloogiatele 5G RedCap (Reduced capability) tehnoloogia näol.

5G RedCap (lühend sõnast "reduced capability" ehk "vähendatud võimekus") on suhteliselt uus standard, mis on loodud toetama seadmeid, mis saavad kasu mõnest 5G eelisest (nagu suur kiirus, ülimadal latentsus ja kõrge töökindlus), kuid ei vaja täieliku 5G võimekust. 5G RedCap seadmed kasutavad näiteks osalist 5G sagedusriba mis on konfigureeritud just IoT seadmete jaoks. 5G täieliku funktsionaalsuse kasutamine on paljude IoT kasutusjuhtumite jaoks ebapraktiline ja tarbetult kallis ning paljudel turgudel pole 5G võrguinfrastruktuuri veel kasutusele võetud. See tõenäoliselt muutub aja jooksul, kui rohkem võrke ehitatakse ja kulud vähenevad – kuid suure osa IoT turu jaoks pole täielik 5G lihtsalt vajalik.[78]

5G RedCap edasi arendus on 5G eRedCap (enhanced-RedCap) tehnoloogia.

Counterpoint Research eeldab, et 5G eRedCap on kaubanduslikult saadaval aastaks 2026 ning prognoosib, et 5G eRedCap moodulid moodustavad 2030. aastaks 8% kogu mobiilse IoT moodulite tarnetest.[79]

5 aasta perspektiivis on oluline Eestis alustada 5G RedCap tehnoloogia pakkumist 5G kommertsvõrkudes lisaks NB-IoT ja LTE CAT-M tehnoloogiatele.

[76] https://tarktartu.telia.ee/et/lights
[77] ETIS
[78] https://www.quectel.com/library/5g-redcap-white-paper/?creative=702089448369&keyword=5g%20redcap&matchtype=b&network=g&device=c&gad_source=1&gclid=CjwKCAjw6c63BhAiEiwAF0EH1BkgPsOqXmSnPd3gGwHhGF8kLwAK3LThzlBxIyoonwnSx4HKAVPJPBoCbMQQAvD_BwE
[79] https://www.counterpointresearch.com/insights/5g-redcap-massive-iot-adoption/

2 TEHNOLOOGIATE ANALÜÜS JA JÄRELDUSED

Eesti on EL-is ainulaadse profiiliga. Vaatamata mõõdukale suurusele näitab Eesti majandus positiivset positsiooni, mille SKT on ligikaudu 36 miljardit eurot ja SKP elaniku kohta 30 700 eurot[80]. Eestis on IKT-sektoril riigi majanduses oluline roll, moodustades 6,83% SKP-st, mis näitab Eesti arenenud digimajandust ja pühendumust IKT sektoritevahelisele integreerimisele. Riigis on aga väga kõrge digitaalse intensiivsuse indeksiga ettevõtete osakaal suhteliselt väike – 4,3%. See viitab sellele, et kuigi IKT sektor üldiselt on tugev, võib esineda koondumist vähestesse ettevõtetesse või digitaalse intensiivsuse kasvuruumi laiemates ettevõttesegmentides.

Eesti digistrateegia 2030 võeti vastu 7. oktoobril 2021[81]. See strateegia on kooskõlas Gigabit Society ühenduvuseesmärkidega (sealhulgas eesmärgiga teha kogu elanikkonnale kättesaadavaks kiirus 100 Mbps – täiendatav kiirusele 1 Gbps). Strateegia keskendub juurdepääsuvõrkude arendamisele ning 5G ja 6G põhiinfrastruktuuri arendamisele. Juurdepääsuvõrkude arendamine toetab VHCN-i (fixed very high-capacity networks, ehk väga suure võimsusega püsivõrkude) arendamist maapiirkondades, mis on osutunud operaatoritele majanduslikult keeruliseks. 5G ja 6G põhiinfrastruktuuri arendamine toetab tuumiktaristu rajamist peamistes transpordikoridorides Eestis[82], võimaldades katkematut 5G levi ja tehes vastava tehnoloogia turule jõudmisel vajalikke ettevalmistusi 6G kasutuselevõtuks.

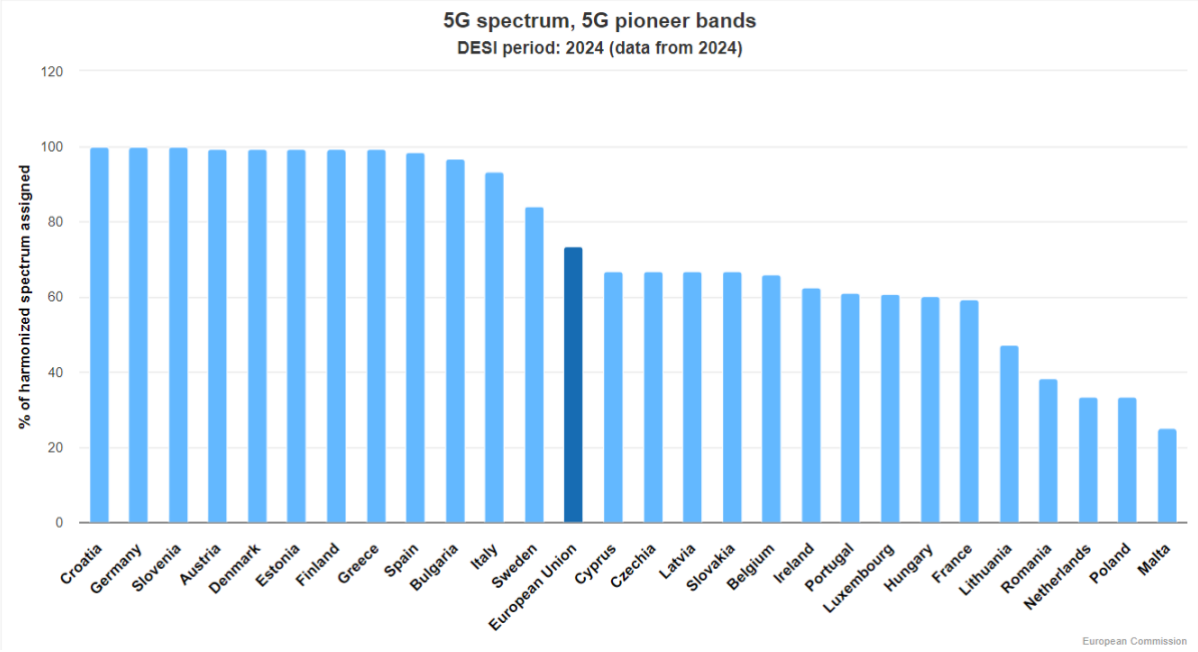
Eesti IKT-sektori jätkusuutlikkuse praktikad näitavad mõõdukat kaasatust, 28,9% ettevõtetest on võtnud meetmeid IKT-seadmete energiatarbimise vähendamiseks (kasvav teadlikkus energiatõhususe vajadustest)[83]. 46,3% ettevõtetest arvestab aga enne hankeotsuse tegemist IKT teenuste või seadmete keskkonnamõjuga.

Mobiilitööstus edendab jätkuvalt ühenduvust kogu maailmas. 2023. aasta lõpus kasutas mobiilset internetti 58% maailma elanikkonnast, mis võrdub 4,7 miljardi kasutajaga. 4G moodustab jätkuvalt suurema osa mobiilsideühenduste baasist, kuid 5G – praegu 20% ühendustest kogu maailmas – kasvab kiiremini kui miski varem. Kui ühenduste arv on jõudsalt kasvanud, siis mobiilioperaatori tulud mitte. Ülemaailmselt on operaatori tulude kasv madala, ühekohalise numbriga, surve keskmisele tulule kasutaja kohta (ARPU –

[80] https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/edge-observatory
[81] https://digital-skills-jobs.europa.eu/en/actions/national-initiatives/national-strategies/estonia-estonian-digital-agenda-2030
[82] 5G Corridor Study for Latvia, Estonia and Lithuania. 30.06.2023. 21-EU-DIG-LATEST_5GS. Priit Soom (ELASA), Mart Uusmaa (Telia), Priit Roosipuu (TalTech), Margus Rohtla (TalTech), Ove Uhtlik (Elisa), G. Ancāns (VAS ES), J. Tutovs (VAS ES), A. Vērdiņš (VAS ES), M. Aleksandrovs (VAS ES), K. Saliņš (VAS ES), A. Peršēvics (VAS ES), T.Kallaste (ELASA), R.Innos (ELASA).
[83] https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/edge-observatory

Average Revenue Per User) on tingitud konkurentsist, püsivate hinnalisade puudumisest ja alles tekkivatest uutest ettevõtte võimalustest[84].

Eesti tegeleb infrastruktuuri täiustamisega, nagu näiteks võrkudele juurdepääsu toetuskava (Access to Networks Support Scheme - ANSS) 1.0 ja 2.0. Tarbijakaitse ja Tehnilise Järelevalve Amet (TTJA, riigi reguleeriv asutus) ning sideoperaatorid panustasid 5G leviala suurendamisse aastani 2023 (kaasa arvatud). Tänu 700 MHz ja 3.4–3.8 GHz sagedusalade raadiospektrite oksjonitele 2022. aastal on 5G leviala iga-aastaselt märkimisväärselt kasvanud. 2023. aastal müüdi 26 GHz sagedusala enampakkumisel. Kõik kolm peamist mobiilsideoperaatorit said kaks litsentsi (iga litsents 400 MHz ribalaiusega). Linnade ja maapiirkondade vahel on oluline lõhe ning valitsuse eesmärk on sellega tegeleda ja tagada kõigile võrkudele juurdepääsu toetuskava (ANSS) 4.0 kaudu täielik katvus. Siiski on suurem vajadus avaliku ja erasektori investeeringute järele, et jõuda rohkemate majapidamisteni ja katta vähese ühenduvusega piirkondi. Lisaks puuduvad Eestis rakendusmeetmed servasõlmede (vt EDGE Computing) osas. Ohutu ja turvalise digikeskkonna loomine on Eesti jaoks oluline igal tasandil. Meetmed võivad hõlmata riigi infrastruktuuri tugevdamist ja elanike küberjulgeolekualaste oskuste parandamist.



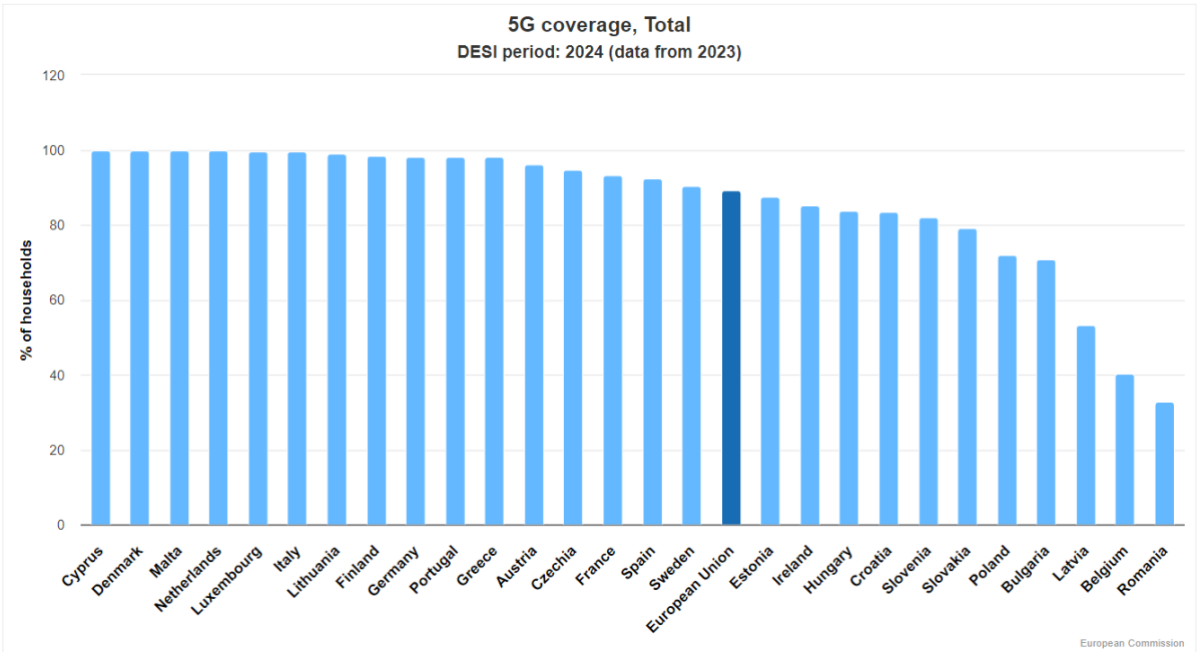
Joonis 22 Määratud ja 5G kasutamiseks valmis spektri hulk nn 5G teerajajate sagedusalades.Need sagedusalad on 700 MHz (703–733 MHz ja 758–788 MHz), 3.6 GHz (3400–3800 MHz) ja 26 GHz (1000 MHz vahemikus 24250–27500 MHz). Kõigil kolmel spektri sagedusalal on võrdne kaal.

Allikas: EU's Digital Decade 85.

84 https://data.gsmaintelligence.com/research/research/research-2024/revisiting-5g-monetisation-upping-the-experience

85 https://digital-decade-desi.digital-strategy.ec.europa.eu/datasets/desi/charts/desi-indicators?period=desi_2024&indicator=desi_5g_spectrum&breakdown=5g_pb&unit=pc_spectrum_

Eestil on kasutamata potentsiaal panustada EL-i digitaalse kümnendi (EU's Digital Decade[86]) 5G eesmärgi saavutamisse, näidates samas positiivset dünaamikat. 5G levi Eestis (87,5%) jääb veidi alla EL-i keskmisele (89,3%). Seevastu on riigi hinnanguliselt 99% elanikkonnast ja 87,5% territooriumil 5G katvus. 5G leviala märkimisväärne kasvumäär 102% on oluliselt kõrgem kui ELi keskmine, umbes 10%.



Joonis 23 Üldine 5G leviala. Vähemalt ühe 5G mobiilsidevõrgu kattega leibkondade protsent.

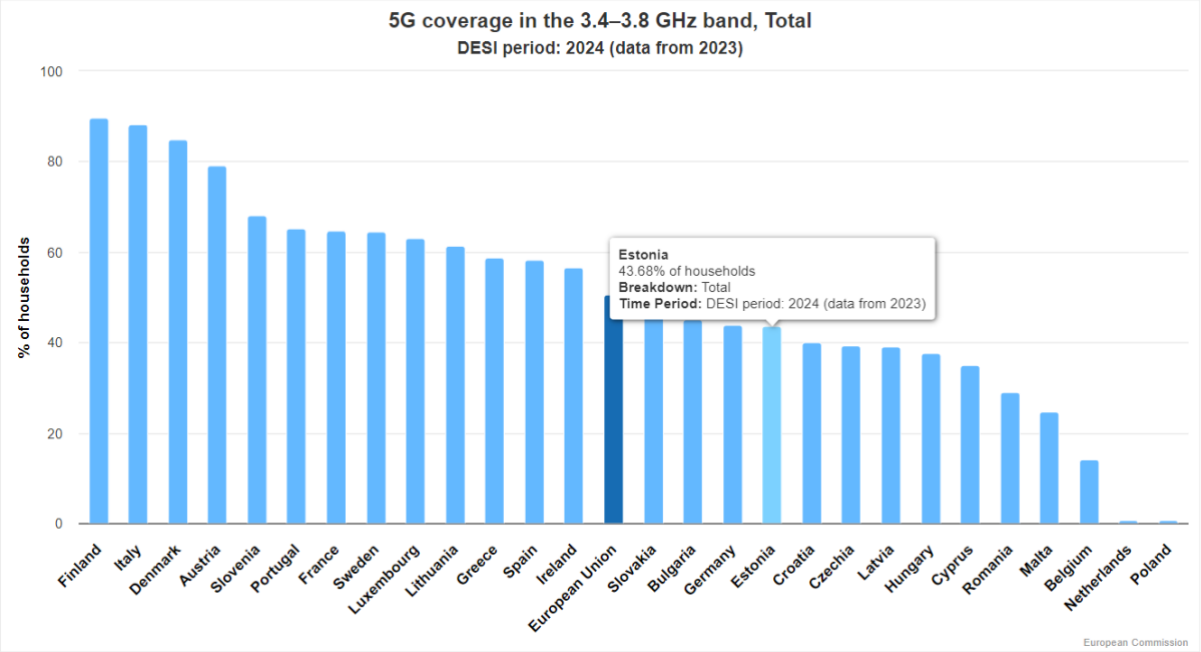
Allikas: EU's Digital Decade[87].

5G sagedusalas 3.4–3.8 GHz, mis on laia ribalaiust nõudvate täiustatud rakenduste jaoks hädavajalik, hõlmas 2023. aastal 43,7% Eesti majapidamistest, jäädes veidi alla EL-i keskmisele (50,6%; vt joonist allpool).

assigned&country=AT,BE,BG,HR,CY,CZ,DK,EE,EU,FI,FR,DE,EL,HU,IE,IT,LV,LT,LU,MT,NL,PL,PT,RO,SK,SI,ES,SE

[86] https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/factpages/estonia-2024-digital-decade-country-report#:~:text=Digital%20rights%20and%20principles,the%20EU%20average%20(45%25).

[87] https://digital-decade-desi.digital-strategy.ec.europa.eu/datasets/desi/charts/desi-indicators?period=desi_2024&indicator=desi_5gcov&breakdown=total_pophh&unit=pc_hh_all&country=AT,BE,BG,HR,CY,CZ,DK,EE,EU,FI,FR,DE,EL,HU,IE,IT,LV,LT,LU,MT,NL,PL,PT,RO,SK,SI,ES,SE



Joonis 24 5G levi sagedusalas 3.4–3.8 GHz. % leibkondadest, kus on 5G katvus 3.4–3.8 GHz spektri sagedusala kasutades.

Allikas: EU's Digital Decade[88].

Riigis on kolm peamist aktiivset sideoperaatorit. TTJA kohaselt telekommunikatsiooniturg on konkurentsivõimeline; uutel tulijatel võib aga olla raske turule siseneda peamiselt juba küllastunud turu ja madalate jaehindade tõttu. Ka TTJA hinnangul on mobiiliturg tarbijatele taskukohane. Kaks kolmest operaatorist teatasid, et nad on oma 3G-võrke sulgemas. Näitena võib tuua ka selle, et Tallinna linn, Telia, Ericsson ja Intel on loonud Tallinna Sadamasse 5G testimis- ja uurimisala. See prooviversioon võimaldab sadamas viibivatel kommertskruiisilaevade reisijatel Interneti-ühenduse luua[89].

88 https://digital-decade-desi.digital-strategy.ec.europa.eu/datasets/desi/charts/desi-indicators?period=desi_2024&indicator=desi_5gcov_3400_3800&breakdown=total_pophh&unit=pc_hh_all&country=AT,BE,BG,HR,CY,CZ,DK,EE,EU,FI,FR,DE,EL,HU,IE,IT,LV,LT,LU,MT,NL,PL,PT,RO,SK,SI,ES,SE

89 https://www.ericsson.com/en/cases/2017/5g-telia-tallink

2.1 5G JUURUTAMINE EESTIS MOBIILSIDEOPERAATORITE VAATENURGAST

2.1.1 TELIA EESTI AS OLUKORD

Telia arendas ja laiendas 2023. aastal aktiivselt 5G võrku üle Eesti. Telia opereerib praegu üle 500 tugijaama üle riigi ja on hiljuti käivitanud kommertslikud 5G teenused sagedusalas 26 GHz[90] [91].

Telia sulges 2023. aastal ligi paarkümmend aastat tegutsenud 3G võrgu, mille sulgemine on oluline ka keskkonnajalajälje vähendamise seisukohalt, kuna kaasaegsemad 4G ja 5G tehnoloogiad on energiasäästlikumad. Seetõttu on mobiilivõrgus põhirõhk 4G ja 5G tehnoloogiate kasutamisel. 2023. aasta lõpu seisuga on u. 99% ettevõtte mobiilsest andmesideliikluse mahust toimus 4G ja 5G võrkudes.

2023. aasta mais lülitas ettevõte Tallinnas sisse oma esimese 26 GHz sagedusalas töötava 5G tugijaama, mille toel saavutati mobiilse interneti kiirusrekord (ületades 2,2 Gbit/s). Telia-l on Eestis 26GHz kasutusel üks tugijaam Kiili vallas[92]. Tegemist on püsiinterneti ühendust pakkuva lahendusega mis töötab otsenähtavuse piires (FWA – Fixed Wireless Access lahendus – vt. 5G Fixed Wireless Access (FWA)).

Laulu- ja tantsupeo ajal (2024) püstitati Telia 5G võrgu võimekuse testimise raames ettevõtte mobiilivõrgus uus kasutusrekord. Laulupeo ajal tehti Tallinna lauluväljakul Telia mobiilivõrgus ligi 260 tuhat mobiilikõnet ja saadeti ligi 70 tuhat sõnumit ning kokku teenindati ca 5,8 terabaiti (TB) andmesidet (sellest veidi alla poole liikus 5G võrgus).

Samas Telia Grupi teenuste tulud, nagu sarnased, kasvasid 6,9%, mis tulenes mobiilside- ja fikseeritud teenuste tulude suurenemisest vastavalt 8,1% ja 6,5%. Mobiiliteenuste tulude kasv oli tingitud ARPU ja abonentide arvu suurenemisest[93].

Praeguses 5G juurutamisel Baltikumis järgib Telia ICNIRP (Rahvusvaheline mitteioniseeriva kiirguse kaitse komisjon) suuniseid, mida uuendati 2020. aastal, et hõlmata 5G sagedusi (nimetatakse ka 5G spektriks). 5G tehnoloogia on suures osas üles ehitatud samale taristule, mis eelmiste põlvkondade mobiilsidevõrgud, nagu 3G ja 4G, ning kasutatavad seadmed peavad kinni samadest rangetest EMF-nõuetest (elektromagnetväljad) ja kokkupuutepiirangutest.

Investeeringud

Telia investeeris 2023. aastal Eesti turule ligi 54 miljonit eurot. Suuremad investeeringud hõlmasid 5G võrgu ja optilise püsivõrgu rajamist ning suuremat rõhku pandi

[90] https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/digital-decade-2024-5g-observatory-report
[91] Telia Eesti AS majandusaasta aruanne, 2023.
[92] Telia hakkas pakkuma suurima jõudlusega teenust uuel 5G sagedusalal 26 GHz | AM.ee
[93] https://www.teliacompany.com/assets/u5c1v3pt22v8/sdSKIw4u0YrvJ6N6vxNQ7/02342e48ab73873bddc3df6519d8603b/telia-company-annual-and-sustainability-report-2023.pdf

küberturvalisuse lahenduste arendamisele. Perioodil 2018-2023 on ettevõte kohalikule turule investeerinud ligi 330 miljonit eurot. Ettevõte plaanib 2024. aastal Eestisse investeerida ligikaudu 50 miljonit eurot, millest oluline osa läheb võrguarendustesse, sealhulgas 5G võrgu rajamisse[94].

Investeeringute osas oli üheks oluliseks fookuseks 5G võrgu edasiarendamine ja laiendamine 2023. aasta jooksul. 2023. aasta lõpuks oli ettevõte üle Eesti paigaldanud üle 500 5G tugijaama, mis katsid 5G levialaga juba üle 75% Eesti elanikkonnast. Andmeedastusmahud 5G võrgus kasvasid aastaga ligi 3 korda.

Ettevõte jätkab 2024. aastal suuremahuliste võrguinvesteeringute suunamist nii mobiilside kui ka interneti püsiühendusvõrkudesse. Telia üheks põhifookuseks on 5G võrgu edasiarendus ning 2024. aasta lõpuks on plaanis 5G-ga katta ca 95% Eesti elanikkonnast. Siinkohal arvestatakse just enda investeeringutega ja ei plaanita võrkude täiendavat jagamist teiste operaatoritegaMobiilsidevõrgu ressursside jagamine).

Makromajanduslik ülevaade

2023. aastal jätkus Eestis majanduse mõttes väljakutseid pakkuv periood. Turgu mõjutas erinevate sisendkulude jätkuv kasv, mis kandus teiste toodete ja teenuste hindadesse. Nõrgenenud nõudlus eksporditurgudel mõjutas negatiivselt ka Eesti majandust, mis omakorda õhutas kiiret inflatsiooni ja süvendas ebakindlust tarbijate seas.

Keskkonnamõjud

Ettevõtte keskkonnaeesmärkide põhisisu on muuta oma tegevus CO_2-heite- ja jäätmevabaks aastaks 2030. Alates 2016. aastast kasutab ettevõte ainult rohelist elektrienergiat. Rohelise Energia kliendid kaitsevad loodust, toetavad taastuvenergia tootjaid ning hoiavad puhast keskkonda tulevaste põlvkondade jaoks.

2.1.2 ELISA EESTI AS OLUKORD

Elisa pakub mobiilset andmesidet kõiges kaasaegseimas ja kiireimas 5G võrgus igas maakonnas üle Eesti. Pakutavate võrguhaldusteenuste jaoks on ettevõte loonud eraldiseisva üksusena Network Operation Center (NOC), mille klientideks on valdavalt Soomes ja Eestis asuvad suurettevõtted[95].

2023. aastal jätkas Elisa 4G kiire mobiilse interneti leviala laiendamist ja tihendamist. Ettevõte oli 2023. aasta lõpuks katnud 4G võrguga enam kui 99% Eesti elanikkonnast ja parandanud võrku kõigis Eesti maakondades. Eelmisel aastal oli Elisa peamiseks suunaks 5G võrgu laiendamine, mis oli aasta lõpuks levinud enam kui 75% Eesti elanikkonnast.

Eelmisel aastal rajas ettevõte üle Eesti arvukalt uusi tugijaamu ning parandas 4G levi kvaliteeti. Kokku tõi Elisa mobiilsidevõrku ligi 250 5G tugijaama, millega kaasajastati ka sama palju 4G võrgu tugijaamu.

---

[94] https://arileht.delfi.ee/artikkel/120278999/telia-tehnoloogiajuht-eesti-on-tousnud-euroopas-taas-5g-eestvedajate-hulka-millist-kasu-saavad-tarbijad

[95] Elisa Eesti AS majandusaasta aruanne, 2023.

Ettevõte 5G on rajatud Nokia seadmetele, mistõttu vajab väljavahetamist ka 4G võrk, mis parandab kvaliteetset mobiilse interneti teenust. Lisaks neile ehitati möödunud aastal 40 asukohta üle Eesti täiesti uued 4G tugijaamad.

Eelmisel aastal toodi turule VoLTE (teenust saab kasutada 35 riigis) ja 5G pakkumine ka välismaal partnerite võrgus ja võimalus Elisa partneritel kasutada kohalikku 5G võrku roamingus. 5G on saadaval 63 riigis (kokku on roamingu partnereid 99 operaatorit).

Väljavaade 2024. aastaks

Elisa fookus on jätkuvalt 5G ja 4G LTE leviala tihendamine ja katvuse laiendamine. Ettevõtte tulemust mõjutavad kohaliku majanduse jätkuv langus, inflatsioonikulude kasv ja kõrged energiaallikate hinnad. Lisaks suurendavad ebakindlust geopoliitilised pinged, kuid vaatamata sellele loob Elisa jätkuvalt väärtust kõigile olulistele sidusrühmadele – klientidele, ühiskonnale ja töötajatele.

Riskid

Vastavalt 01.02.2022. jõustunud seaduse (Elektroonilise side) muudatustele peab Elisa kooskõlastama riigiga oma sidevõrkudes kasutatava tarkvara ja riistvara ning vastavad tarnijad. Vastavalt TTJA poolt Elisale väljastatud otsusele ning riist- ja tarkvara kasutusloale on Huawei riist- ja tarkvara kasutamine 5G mobiilivõrgus lubatud kuni 31.12.2025 ning 2G – 4G võrkudes kuni 31.12.2029. Selle tulemusena vahetas ettevõte oma 5G võrgu arenduspartnerit ning arendab 5G võrku koos Nokia ja Ericssoniga. Kuna siseriiklik otsus, millega nõuti Huawei poolt tarnitud riist- ja tarkvara väljavahetamist enne selle kasuliku eluea lõppu, ei sisaldanud vastavat kompensatsioonimehhanismi, on Elisa selle otsuse seaduslikkuse osas edasi kaevanud Tallinna Halduskohtusse ning aruande kinnitamise kuupäeva seisuga kohtumenetlus kestab.

2.1.3 TELE2 EESTI AS OLUKORD

Vaatamata suurenenud inflatsioonile ja seeläbi ka kuludele kasvas Tele2 lõppkasutajateenuste tulu eelmisel astal 2022. aastaga võrreldes 5%. Selle põhjuseks on ettevõtte mõistlikud hinnad, mis pole kulude kasvuga sarnases tempos tõusnud. Tele2 tõi 2023. aasta lõpus esimesena Eestis turule 5G toega kõnekaardid, et kliendid saaksid kasutada kvaliteetset ülikiiret internetti[96].

Tele2 kahekordistas 2023. aastal investeeringuid, panustades 16,3 miljonit (üle 19% ettevõtte käibest) tugisüsteemide arendusse, andmemahtude suurendamisse ja tegevuse järjepidevuse tagamisse. Suurem osa investeeringutest tehti eelmisel aastal 5G võrgu moderniseerimiseks.

Aastaga suurendas Tele2 5G võrku kuus korda, viis 5G mobiilside 122 asulasse üle Eesti ja püstitas uue kodumaise andmesidekiiruse rekordi. Ettevõte jätkas investeerimist rohelisse energiasse ja säilitas seeläbi süsinikuneutraalsuse neljandat aastat järjest.

Ettevõte avas oma 5G võrgu 2022. aastal ning 2023. aastal jätkas Tele2 oma teenuste arendamist üle Eesti. Võrgu arendamine jätkub ka käesoleval aastal ning seda rajatakse

[96] Tele2 Eesti AS majandusaasta aruanne, 2023.

kõige kaasaegsemale tehnoloogiale, mis tagab efektiivsuse, suurema töökindluse ja seeläbi ka parima kogemuse ja hinna kliendile.

2.2 5G JUURUTAMISE ANALÜÜS

5G tehnoloogiate juurutamise hindamisel ja analüüsile pigem tehnilis-majandusliku hinnangu seisukohalt lähenedes[97], raamistikuna ja mõningate andmete kogumiseks kasutati Oughton et al. (2019) allikat[98], kus toodud eeldused on sobivad ka Eesti kontekstis. Samas tuleb arvestada ka sellega, et Telia andmetel plaanib ettevõte tõsta Eesti elanike 5G võrgu katvuse selle aasta lõpuks 95%-ni (2023. aastal 5G katvus 75%), mis tähendab, et vajalikud investeeringud on enamasti juba tehtud.

2.2.1 5G JUURUTAMISE KULUTULEMUSED OPERAATORI KOHTA

Välja toodud Tabel 1 mis kehtib ka Eesti osas, on parameetrid, väärtused ja ühikud erinevate stsenaariumite hindamisel TCO (Total Cost of Ownership – Omandi Kogumaksumuse) alusel (seadmete maksumus vastavalt kasutuselevõtustrateegiale). Üks erinevus Eesti kohta on see, et antenni mastid on kõrgemad linnadest väljas. Linnade sees võib arvestada 30m, maanteedel ka väiksemates linnades ja külades on 80 - 100 m maste palju pandud põldudele. Võib eeldada, et 100m katab kuskil 2-3 30m tugijaama ala, samas küll pole katvus nii hea. Aga meil on Eestis seda suurt katvusala just tehtud. Samas 5G-ga peavad antennid ikkagi madalamale tulema kuna lihtsalt kõrgema sagedusega ei sobi sealt kõrgelt teha[99].

Tabelis (Oughton et al. 2019[100]) esitatud seadmete/teenuste kulud (seadmete hinnangulised kulud vastavalt kasutuselevõtustrateegiale) on esitatud eurodes (konverteeritud EKP EUR/USD kursiga[101] mis on selle analüüsi kontekstis asjakohane. Need on siis hulgi hinnad suurele operaatorile. Linnas on üldjuhul ühel tugijaamal 3 sektorit, seega 3x RAN; maanteedel on kahe sektoriga tugijaamad suures osas, seega 2x RAN. Maanteede tugijaamade arv ja maksumus on võetud eelmisel aastal tehtud uuringust[102] (kitsaskohaks võiks olla see, et seal on arvuliselt pandud vaid uued lisatavad tugijaamad maanteede lõikes). Linnades tuleb eeldusi sageduste osas lähendada, kuna erinevatel sagedustel on erinev katvus ka. Maanteedel on kasutusel ainult madalad sagedused.

---

[97] Täielikuks tehnilis-majanduslikuks hindamiseks ei olnud autoritel piisavalt andmeid, et olemasolevate andmetega hinnata, sealhulgas 5G tehnoloogia kasutuselevõttu.

[98] E., Oughton, K., Katsaros, F., Entezami, D., Kaleshi, Jon Crowcroft. (2019). "An Open-Source Techno-Economic Assessment Framework for 5G Deployment". Vol 7, IEEE Access.

[99] Telia näitas oma 5G võrgus uut kiirusrekordit - Telia

[100] E., Oughton, K., Katsaros, F., Entezami, D., Kaleshi, Jon Crowcroft. (2019). "An Open-Source Techno-Economic Assessment Framework for 5G Deployment". Vol 7, IEEE Access.

[101] https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/euro_reference_exchange_rates/html/eurofxref-graph-usd.en.html

[102] 5G Corridor Study for Latvia, Estonia and Lithuania. 30.06.2023. 21-EU-DIG-LATEST_5GS. Priit Soom (ELASA), Mart Uusmaa (Telia), Priit Roosipuu (TalTech), Margus Rohtla (TalTech), Ove Uhtlik (Elisa), G. Ancāns (VAS ES), J. Tutovs (VAS ES), A. Vērdiņš (VAS ES), M. Aleksandrovs (VAS ES), K. Saliņš (VAS ES), A. Peršēvics (VAS ES), T.Kallaste (ELASA), R.Innos (ELASA).

Tabel 1 Seadmete kulud kasutuselevõtustrateegia järgi.

							Seadmete jagamine strateegia järgi			
Kategooria	Seadmed	Investeeringud (€)	Tegevuskulud (€)	Kogus	CAPEX kokku (€)	OPEX kokku (€)	B	PSS	PBS	MORAN
RAN	Ühe sektori antenn	1326	133	3	3977	398	-	-	-	x
	Üks kaugraadio-seade	3535	354	3	10605	1061	-	-	-	x
	Üks põhiriba seade	8838	884	1	8838	884	-	-	-	x
Tugijaam	Mast (tower)	8838		1	8838	0	-	x	-	x
	Materjalid	4419		1	4419	0	-	x	-	x
	Transport	8838		1	8838	0	-	x	-	x
	Paigaldamine	4419		1	4419	0	-	x	-	x
	Tugijaama rent		8484	1	0	8484	-	x	x	x
Elektri-süsteem	Toide/generaator/ aku süsteem	4419	442	1	4419	442	-	x	x	x
Backhaul-ühendus	Kiire backhaul-ühenduse jaotur	13257	1326	1	13257	1326	-	-	x	x
	Ruuter	1768	177	1	1768	177	-	-	x	x
Kokku		59 655	11 798		69 377	12 771				

Märkused: Baseline (B) - Baasstsenaarium (jagamist pole), Passive site sharing (PSS) - Passiivne jaama jagamine, Passive backhaul sharing (PBS) - Passiivne backhaul-ühenduse jagamine, Active MORAN (MORAN) - aktiivne mitme operaatori RAN. Allikas: Oughton et al., 2019[103] ja autori arvutused.

Artikli põhjal on tuletatud strateegiatel põhinevad (seadmete jagamine vastavalt rakendusstrateegiale – baasstsenaarium (B), passiivne tugijaama jagamine (PSS), passiivne backhaul-ühenduse jagamine (PBS), aktiivne mitme operaatori RAN (MORAN)) TCO hinnangud, et saada eeldus kulude jaotuse kohta Eesti kontekstis. Kuigi on Eestis turg väiksem, on operaatorid samal ajal suured välismaised ettevõtted, seega on need eeldused siin asjakohased.

TCO hinnati iga vara jaoks, arvutades kasutuselevõtu esimesel aastal nõutavate esialgsete kapitalikulude nüüdispuhasväärtuse (NPV) ühekordse kuluna, mis on kombineeritud jooksvate tegevuskuludega (OPEX) vara eluea jooksul (OPEX on 10% kõigi aktiivsete komponentide algsest kapitaliinvesteeringu väärtusest aastas). 10-aastase perioodi jooksul kasutatakse diskontomäära 3,5%.

5G kasutuselevõtu keskmised kulutulemused operaatori kohta, keskendudes ainult erinevatele infrastruktuuri jagamise strateegiatele, on toodud Tabel 2. Tabelist nähtub, et stsenaariumi „aktiivne mitme operaatori RAN (MORAN)" abil on võimalik TCO kulusid (1 km^2 kohta) vähendada 50% võrra, samuti kasutades stsenaariume „Passiivne jaama

[103] E., Oughton, K., Katsaros, F., Entezami, D., Kaleshi, Jon Crowcroft. (2019). "An Open-Source Techno-Economic Assessment Framework for 5G Deployment". Vol 7, IEEE Access.

jagamine (PSS)" või „Passiivne backhaul-ühenduse jagamine (PBS)" võib vähendada kulusid 30% võrreldes baasstsenaariumiga. Siiski on ebatõenäoline, et Eesti kohalikud mobiilsideoperaatorid seda jagamisstrateegiat rakendavad, vaid pigem tegelevad 5G saitide kasutuselevõtuga individuaalsel tasandil.

Tabel 2 Kulude tulemused põhinevad 1 km^2 objektidevahelisel kaugusel (Inter-Site Distance - ISD) ja on esitatud nelja stsenaariumi põhjal TCO osas.

	Baas		PSS 30% vähem kui Baas		PBS 30% vähem kui Baas		MORAN 50% vähem kui Baas	
Kategooria	**% kogu summast**	**EUR**	**% kogu summast**	**EUR**	**% kogu summast**	**EUR**	**% kogu summast**	**EUR**
Tugijaama rent	41	131 763	29	65 623	29	65 245	0,41	65882
RAN	24	78 627	33	73 769	33	73 344	0,24	39313
Ehitustööd	15	47 837	11	24 891	20	44 997	0,15	23918
Elektriseadmed	5	14 835	7	15 840	7	15 749	0,05	7418
Backhaul-ühendus	15	50 440	20	45 257	11	24 748	0,16	25220
Kokku	100	**323 502**	100	**225 379**	100	**224 083**	1,00	**161 750**

Märkused: Kulude tulemused on esitatud nelja stsenaariumi põhjal TCO osas; kõik nõuavad investeeringuid 10 aasta perspektiivis. Baseline (B) - Baasstsenaarium (jagamist pole), Passive site sharing (PSS) - Passiivne jaama jagamine, Passive backhaul sharing (PBS) - Passiivne backhaul-ühenduse jagamine, Active MORAN (MORAN) - aktiivne Mitme operaatori RAN. Allikas: Oughton et al., 2019 ja autori arvutused.

Samuti, kui võrrelda kahest erinevast allikast (Oughton et al. (2019)[104] ja "Cost Calculations Estonia, LATEST_5GS"[105]) arvutatud kulusid, siis on numbrid suurusjärgus võrreldavad, mis annab kulu hinnangutele paikapidavuse (Tabel 3).

Tabel 3 Eesti objektide keskmised arvestuslikud kulud objekti kohta.

	Kulu saidi kohta (sh 3 RAN-i) (I)		Kulu saidi kohta (ainult passiivne), 35% vähem (II)		Kulu saidi kohta (sh 3 RAN-i) (III)		Kulu saidi kohta (ainult passiivne), 35% vähem (IV)	
Kategooria	**EUR**	**% kogu summast**	**EUR**	**% kogu summast**	**EUR**	**% kogu summast**	**EUR**	**% kogu summas**
Torn sh kabinet, piirdeaed, juurdepääsutee, tööd	156 000	36	156 000	56	156 000	40	156 000	64
Fiberühendus	100 988	24	100 988	36	70 569	18	70 569	29
Elektrivarustus	22 570	5	22 570	8	15 920	4	15 920	7
Kohapeal RAN varustus + paigaldus (sh 3 RAN-i)	150 000	35	-	-	150 000	38	-	
Kogukulu (sh 3 RAN-i)	**429 558**	**100**	**279 558**	**100**	**392 489**	**100**	**242 489**	**100**

[104] E., Oughton, K., Katsaros, F., Entezami, D., Kaleshi, Jon Crowcroft. (2019). "An Open-Source Techno-Economic Assessment Framework for 5G Deployment". Vol 7, IEEE Access.

[105] 5G Corridor Study for Latvia, Estonia and Lithuania. 30.06.2023. 21-EU-DIG-LATEST_5GS. Priit Soom (ELASA), Mart Uusmaa (Telia), Priit Roosipuu (TalTech), Margus Rohtla (TalTech), Ove Uhtlik (Elisa), G. Ancāns (VAS ES), J. Tutovs (VAS ES), A. Vērdiņš (VAS ES), M. Aleksandrovs (VAS ES), K. Saliņš (VAS ES), A. Peršēvics (VAS ES), T.Kallaste (ELASA), R.Innos (ELASA).

Märkused: keskmised arvutatud kulud saidi kohta sisaldavad 3 RAN-i, täiskulusid ja ainult passiivset valikut. Veerud I ja II maantee Tallinn-Pärnu-Ikla ning veerud III ja IV Tallinn-Tartu-Valga maantee kohta. Masti kõrgus 80m. Fiiberühendus sisaldab uue võrgu pikkust ja uuendust. Elektrivarustus arvestab kaugust alajaamast. Allikas: projekti "Cost calculations Estonia, LATEST_5GS" lisa 1 ja autori arvutused.

Selle "Cost Calculations Estonia, LATEST_5GS" uuringu raames tehti analüüs 5G tuuminfrastruktuuri rajamise kohta peamistes Eesti transpordikoridorides (Tallinn-Pärnu-Ikla ning Tallinn-Tartu-Valga maanteede kohta), mis tagab katkematu 5G levi.

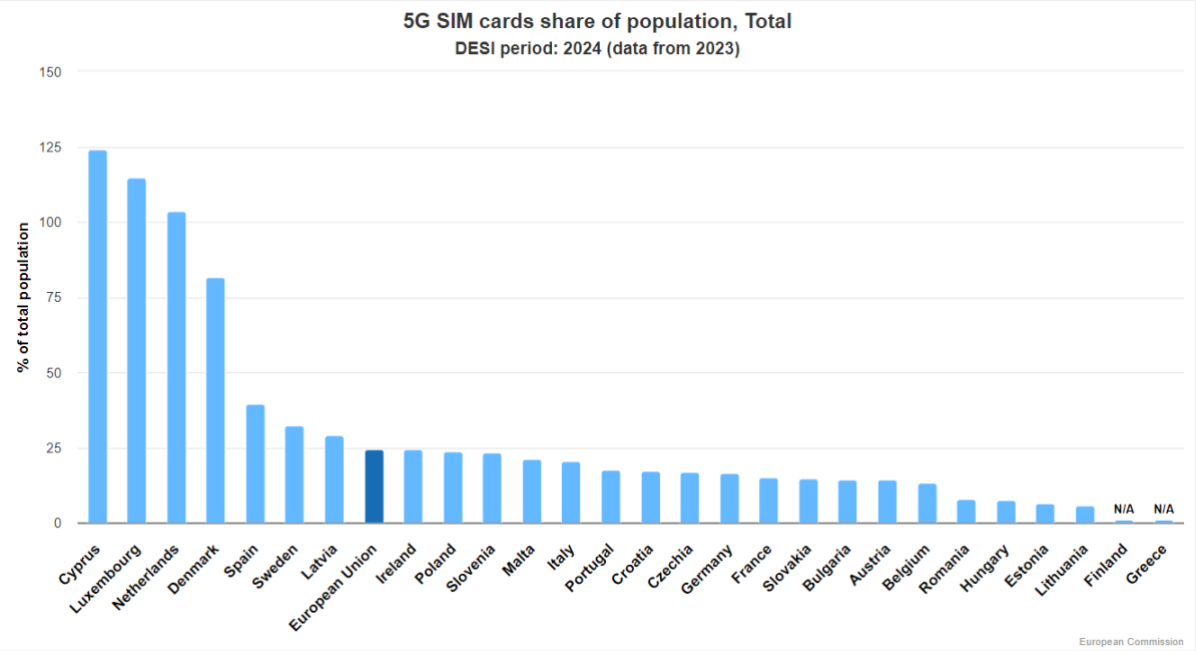
2.2.2 5G-TEENUSTE TURU MAHU HINDAMINE

Tuletatud andmeid saab siduda mobiilsideettevõtete poolt teatatud numbritega (majandusaasta aruannete alusel). Näiteks Telia investeeris kokku 330 miljonit eurot (2018-2023) ja 2023. aastal 54 miljonit eurot, mis ei olnud seotud ainult 5G tehnoloogia juurutamisega (võib teha eeldusi ja suunata selle 5G/4G tehnoloogia arendamisse, kuid täpsemad numbrid pole hetkel saadaval)[i].

Antud analüüsi tulemusena on eeldusi arvestades leitud 5G tehnoloogia kasutuselevõtuga seotud (ehk 5G teenuste) võimalik turumaht 2023. aasta kohta[106]. Erinevate olemasolevate andmeallikate abil on võimalik arvata, kui palju on Eestis 5G kliente (vt eelduste kirjeldust allpool).

Euroopa Komisjoni 2023. aasta statistika (5G SIM-kaartide osakaal elanikkonnast) põhjal moodustasid aga 5G SIM-kaardid (5G-ga ühendatud) Eestis 6,64% kogu elanikkonnast (mis annab 91 279 elanikku), näiteks võrreldes EL-i keskmisega samas kategoorias - 24,62% (vt Joonis 25Joonis 25 ***5G SIM-kaartide osakaal elanikkonnast. 5G mobiilitellimused, mis on määratletud kui SIM-kaardid, mis tekitasid viimase 90 päeva jooksul mis tahes Interneti-liiklust kodumaises 5G võrgus.***)[107].

[106] samas näiteks ARPU (keskmine tulu kasutaja kohta) analüüsi teostamiseks vajaks täpseid numbreid 5G teenuste müügitulu ja ainult 5G teenuseid kasutavate klientide arvu kohta.
[107] Samas operaatorite andmete järgi võivad olla ka mitmed sim kaardid mis on passiivsed.



Joonis 25 5G SIM-kaartide osakaal elanikkonnast. 5G mobiilitellimused, mis on määratletud kui SIM-kaardid, mis tekitasid viimase 90 päeva jooksul mis tahes Interneti-liiklust kodumaises 5G võrgus.
Allikas: EU's Digital Decade108.

Telia andmete järgi aga nende võrgus on üle 125 000 kliendi, kes kasutavad 5G pakette ja üle 160 000 5G-toega telefonide arv[109]. Telia aruande kohaselt katab tema 5G võrk 2023. aasta lõpu seisuga ligikaudu 60% Eestist ja üle 75% Eesti elanikkonnast (ehk 1 031 015[110]) ning paigaldatud on üle 500 5G tugijaama (suured maakonnakeskused). Telia võrgu mobiilipakettide keskmine hind on ligikaudu 26,5 eurot kuus.

Sarnane on olukord ka Elisas - 2023. aastal ehitati üle Eesti kokku 242 5G tugijaama, mis viis nende koguarvu ligi 500-ni[111] ja levis enam kui 75%ni Eesti elanikkonnast. 13% kogu Elisa mobiilivõrgu mobiilse andmeside kasutusest toimub 5G võrgus ning see osakaal kasvab pidevalt. Mobiilipakettide keskmine hind Elisa võrgus on umbes 30 eurot kuus.

Võttes arvesse 5G teenuste müügi hinnataset ja eelpool mainitud eeldusi, võib järeldada, et 2023. aastal võib 5G teenuste turu kogumaht ulatuda 30,93-42,36 miljoni euroni. Arvestades EL-i keskmist 5G SIM-kaartide taset elanikkonna osakaaluna ca 25% (2023), kui Eesti jõuab sellele tasemele nt. järgmise viie aasta jooksul, on Eesti 5G turu kogumaht sama hinnataseme all 115-120 miljonit eurot aastas. Tegelikkuses võib see arv olla palju suurem (arvestades ka inflatsiooni), kuna antud hinnang puudutab ainult eraklientidele suunatud 5G teenuseid ega arvesta äriklientide teenuseid ning 5G tehnoloogia juurutamise oluliselt laiemat rakenduslikku ulatust ja võimalusi erinevate tööstusharude tasandil (täiendavad AI võimalused, tööstuslik asjade internet, juhita autod jne).

108 https://digital-decade-desi.digital-strategy.ec.europa.eu/datasets/desi/charts/desi-indicators?period=desi_2024&indicator=desi_5g_sim&breakdown=total_pophh&unit=pc_pop&country=AT,BE,BG,HR,CY,CZ,DK,EE,EU,FI,FR,DE,EL,HU,IE,IT,LV,LT,LU,MT,NL,PL,PT,RO,SK,SI,ES,SE

109 https://www.telia.ee/5g/

110 1 374 687 seisuga 1.01.2024; https://www.stat.ee/et/avasta-statistikat/valdkonnad/rahvastik/rahvaarv

111 https://www.elisa.ee/et/uudised/elisa-5g-tugijaamade-arv-kasvas-mullu-juba-pea-pooletuhandeni

Tabel 4. Võimalik 2023. aasta 5G teenuste turumaht erinevate stsenaariumite juures.

	5G mobiilipakettide hind, EUR	Eesti rahvaarv	Telia 5G pakette kasuvtavaid kliente	Telia 5G-toega telefonide arv	Eestis 5G SIM-kaarte	EL-i 5G SIM-kaarte Eesti kontekstis
	28,24*	1 374 687	9,1%	11,6%	6,6%	24,6%
			125 000	160 000	91 279	338 173
2023. aasta 5G teenuste turumaht			**42 360 000**	**54 220 800**	**30 932 701**	**114 600 067**

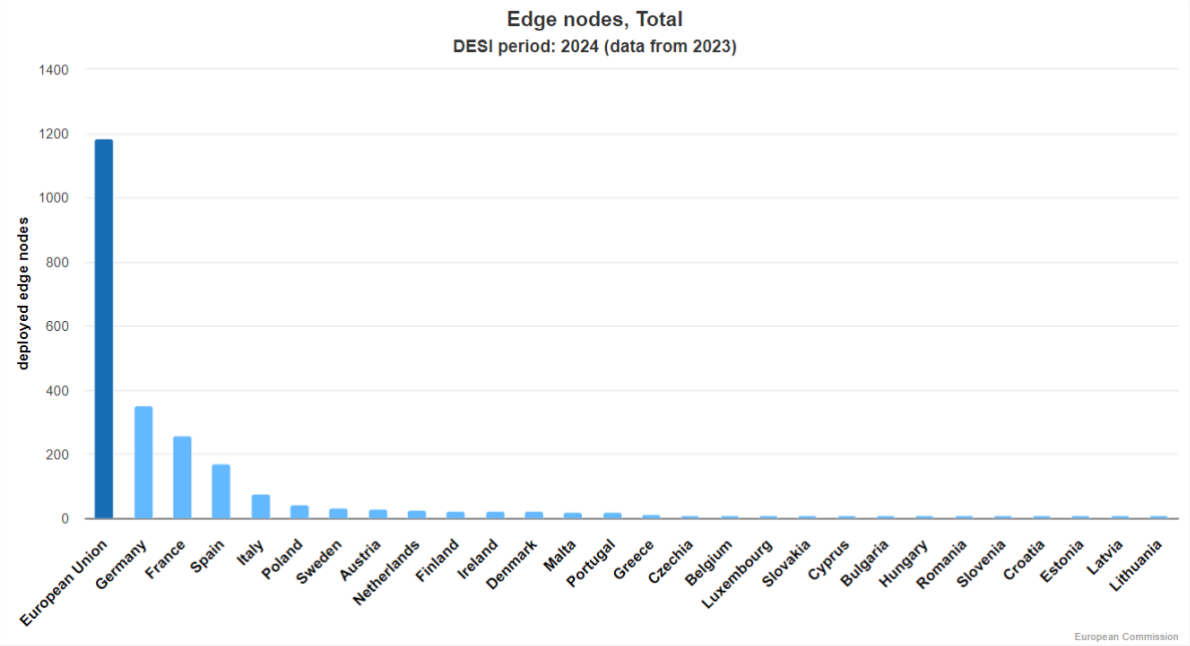
Märkused: * - Telia ja Elisa 5G mobiilipakettide keskmine hind, eurot kuus.
Allikas: Telia[112]; Eesti[113]; European Commission, Digital Decade[114] ja autori arvutused.

Samuti tuleb arvestada, et eratarbijad moodustavad tavaliselt 70–75% enamiku operaatorite tuludest, seega jääb ettevõtetele müümine 5G edu oluliseks mõõtmeks[115]. Kuigi sellist infot on asjakohane kasutada eeldustena, oleks siiski vaja rohkem andmeid, kui palju era- ja ärikliendid 5G teenustest Eestis müügitulu toovad.

[112] https://www.telia.ee/5g/
[113] https://www.stat.ee/et/avasta-statistikat/valdkonnad/rahvastik/rahvaarv
[114] https://digital-decade-desi.digital-strategy.ec.europa.eu/
[115] GSMA Intelligence. "Revisiting 5G monetisation: upping the experience." September 2024.

2.3 EDGE Nodes

Vastavalt servasõlmede (Edge Nodes) juurutamise andmete aruande (Edge Deployment Data Report[116]) hinnangule on Eestis 3 servasõlme. See arv moodustab vähem kui 0,3% ELi hinnangulisest koguarvust – 1186 (vt allolevat joonist). Perioodil 2022–2030 peaks see arv siiski kasvama ca 51 servasõlmeni (servasõlmed, mis võetakse kasutusele)[117]. Põhinedes aastase liitkasvumäära (Compound Annual Growth Rate – CAGR) lähenemisel tähendab see, et sama EL-i taseme saavutamiseks peab Eesti CAGR-i tingimustel kasvama 231% aastas (viie aasta jooksul), võttes arvesse eeldust, et EL-i tase 5 aasta pärast on sama. Hinnanguliselt saab 2030. aastaks tõenäoliselt kasu palju suurem protsent Eesti elanikkonnast servasõlmede pakutavast madalamast latentsusest ja parematest andmetöötlusvõimalustest, mis on ülioluline riigi jaoks, mis tunneb uhkust digitaalse innovatsiooni ja kõrgetasemeliste e-valitsuse teenuste üle.



Joonis 26. Servasõlmed. Arvutus sõlmede arv, mille latentsusaeg on alla 20 millisekundi.

Allikas: EU's Digital Decade, Edge Observatory, Number of Edge nodes deployed per member[118].

[116] https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/edge-observatory
[117] https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/edge-observatory
[118] https://digital-decade-desi.digital-strategy.ec.europa.eu/datasets/desi/charts/desi-indicators?period=desi_2024&indicator=desi_edge&breakdown=total&unit=nb_edge&country=AT,BE,BG,HR,CY,CZ,DK,EE,EU,FI,FR,DE,EL,HU,IE,IT,LV,LT,LU,MT,NL,PL,PT,RO,SK,SI,ES,SE

Tabel 5 Servasõlmede kasutuselevõtu aastane kasv Eestis vs. EL keskmine.

Aasta	Servasõlmede juurutamine	Aastane kasvumäär	ELi keskmine kasv
2022	1		
2023	3	200%	154%
2024	6	100%	99%
2025	11	83%	73%
2026	18	64%	54%
2027	26	44%	34%
2028	34	31%	23%
2029	42	24%	15%
2030	51	21%	12%

Allikas: Edge Observatory for the Digital Decade, 2023[119].

Eeldatakse, et **Servasõlmeid** rakendatakse:

- **energiatõhusal viisil**, et minimeerida selle süsiniku jalajälge ja keskkonnamõju, keskendudes eelkõige kasvuhoonegaaside (KHG) heitkoguste vähendamisele, süsinikusisalduse nullitaseme saavutamiseks.
- et pakkuda turvalist juurdepääsu andmetele ja teenustele. See peab tagama nii füüsilise kui ka **küberturvalisuse**, et tagada katkematu töö ja andmete turvalisus.

Kuigi servasõlmede kasutuselevõtt Eestis kasvab, toimub see palju aeglasemas tempos, mis viitab ettevaatlikule või piiratud ressurssidega lähenemisele investeeringute tegemisel servaarvutuse (Edge Computing) infrastruktuuri või võib peegeldada strateegilist keskendumist teistele digitaalarengu valdkondadele.

Riskid

Eestis rõhutavad levinud küberturvaintsidendid kriitilist vajadust täiustatud turberaamistike järele, mis on osa servasõlmede juurutamise strateegiast. Servaarvutuse (Edge Computing) hajutatud disain, mis töötleb andmeid lõppkasutajale lähemal, suurendab rünnaku pinda, muutes turvalisuse esmatähtsaks. Sellisena eeldab servasõlmede kasutuselevõtt Eesti digitaalmaastikul tõenäoliselt tugevdatud turvameetmete rakendamist, vastupidavate arhitektuuride kasutuselevõttu ja pideva ohuseire tagamist, et säilitada infrastruktuuri terviklikkus ja usaldus[120].

[119] https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/edge-observatory
[120] https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/edge-observatory

1.2. ANALÜÜSI JÄRELDUSED

Üks suurimaid väljakutseid, millega mobiilsideoperaatorid viimasel ajal silmitsi seisavad, on olnud mobiilsidevõrkude kaudu edastatava andmeliikluse kasv. Ülemaailmne mobiilne andmesideliiklus kasvas 2022. aasta igakuise keskmise kasutuse tasemelt 10,2 GB-lt ühenduse kohta 12,8 GB-ni 2023. aastal. Aastateks 2023–2030 prognoositud andmeliikluse kuuekordne suurenemine mõjutab operaatoreid märkimisväärselt. Kõige teravamaks väljakutseks on kapitali eraldamine uue spektri hankimiseks ja täiendavate tugijaamade kasutuselevõtuks raadiojuurdepääsuvõrgus (RAN), et suurendada võrgu juurdepääsukihi katvust ja läbilaskevõimet. Kuid RAN-i versiooniuuendused üksi ei leevenda operaatorite läbilaskevõimet. Uuendusi on vaja ka võrgu backhaul-ühenduse ja selle aluseks olevate transpordikihtide jaoks, samuti põhivõrgu jaoks, kuna operaatorid migreeruvad 4G-lt ja muudelt pärandvõrkudelt 5G eraldiseisvale (5G SA) ja 5G-täiustatud (5G-Advanced) võrgule[121].

5G raadiovõrkude massiline kasutuselevõtt sillutab teed uute 5G teenuste loomisele, kasutades rahvusvaheliselt standardiseeritud 5G SA tehnoloogiat. 5G SA tehnoloogia võimaldab 5G ühenduvust teatud teenusetasemetega, mis vastavad erinevatele teenusekvaliteedi nõudmistele, detailsemat võrgupõhist positsioneerimist (sh siseruumides positsioneerimist) ja globaalselt standardiseeritud või tööstusharu-spetsiifiliste võrgu API-põhiste teenuste eksponeerimist. Uurimisvaldkonnaks on ka valdkonnapõhised lahendused, mis ühendavad 5G SA teenused näiteks IoT/AI ja pilveteenustega.

Kui 5G areng oli algselt ajendatud ja keskendunud kaevandus- ja töötleva tööstuse vajaduste uurimisele, siis transformatiivseid lähenemisviise ja vajadusi täheldatakse sellistes tööstusharudes nagu transport, logistika, energeetika/kommunaalteenused, tervishoid ja põllumajandus[122].

2023. aasta digikümnendi seisu aruandes (State of the Digital Decade report) oli Eestile üheks soovituseks 5G arengu edendamine[123]. Riigi vastupanuvõime suurendamiseks juurutatakse Eestis riiklik rändlus (Roaming). See tagab inimestele kriiside või võrgutõrgete või kokkuvarisemise ajal elementaarse ühenduvuse, sealhulgas andmeside, SMS-i ja häälkõned. Samuti, kuigi käesolevas analüüsis on välja toodud ka hinnangulised 5G tehnoloogiate juurutamisega seotud kulud, tuleb arvestada ka sellega, et Eesti elanike 5G võrgu katvusega seotud vajalikud investeeringud on valdavalt juba tehtud.

---

121 https://data.gsmaintelligence.com/research/research/research-2024/revisiting-5g-monetisation-upping-the-experience

122 https://www.teliacompany.com/assets/u5c1v3pt22v8/sdSKIw4u0YrvJ6N6vxNQ7/02342e48ab73873bddc3df6519d8603b/telia-company-annual-and-sustainability-report-2023.pdf

123 https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/factpages/estonia-2024-digital-decade-country-report#:~:text=Digital%20rights%20and%20principles,the%20EU%20average%20(45%25).

Kvantarvutusse on Eesti investeerinud vähe ja servasõlmedesse veelgi vähem. Väikseima digitaalse intensiivsuse tasemega VKEde osakaal jääb ELi keskmisest allapoole. See on asjakohane ka Digikümnendi Eurobaromeetri 2023 (Digital Decade Eurobarometer 2023[124]) kontekstis, mille kohaselt 85% Eesti elanikest peab oluliseks, et riigiasutused ehitaksid üles tõhusad ja turvalised digitaalsed infrastruktuurid, sealhulgas ühenduvus- ja andmetöötlusvõimalused. 89% arvas, et riigiasutused peaksid suurendama teadus- ja arendustegevust (R&D), et tagada turvalisem ja tugevam digitaaltehnoloogia.

Infrastruktuuri uuendused 5G SA-le ja 5G-Advanced-ile peaksid pakkuma tehnilisi võimalusi, mis on vajalikud suurema võimekuse ja väiksema latentsusajaga teenuste jaoks[125]. 5G-Advanced pakub suurema jõudlusega võrku, millele on lisatud funktsioone ja tehnoloogiaid, mis võimaldavad operaatoritel pakkuda diferentseeritud teenuseid. Operaator võib pakkuda tariife, mis on suunatud klientidele, kes on seotud otseülekandega (nt mängijad või sotsiaalsed mõjutajad). Diferentseeritud kogemus (tarbijatele lisatasu eest juurdepääsu pakkumine suuremale võrgu jõudlusele) võib anda lisatasu ja viia ARPU tõusuni. Operaatorid saavad adresseeritava turu laiendamiseks töötada ka selle nimel, et suurendada klientide teadlikkust nendest diferentseeritud kogemustest. Mida suurem on kasutajate arv, kes otsivad diferentseeritud kogemust, seda suurem on tulude kasv.

Ka **keskkonnamõju** osas Telia Grupi aruande kohaselt suurenes 2022. aastaga võrreldes 2023. aastal elektritarbimine ühe liitumislepingu kohta 1,8%, mis on peamiselt tingitud 5G võrgu väljaarendamisest ja vana üldkasutatava kommuteeritud telefonivõrgu sulgemisest. Elektritarbimine ühe edastatud mobiilse andmeside biti kohta aga vähenes 2023. aastal 12,2%. Samal ajal püüavad ärikliendid üha enam vähendada oma süsiniku jalajälge vähese CO_2-heitega, energiatõhusate ja ringikujuliste toodete ning digiteenuste abil, mis suurendavad tõhusust. Sellised võimalused suurenevad 5G võrkude laienedes.

Lõppkokkuvõttes on **5G monetiseerimine** rohkem seotud tooteturunduse ja partnerlussuhetega. Peamine väljakutse on tõsta sisu või kiirusega seotud tariifide eest kõrgemat hinnalisa, kusjuures tarbijad on valmis maksma. See viitab inimestele, kes tunnevad, et 5G pakub midagi uut või paremat kui see, mis on võimalik olemasoleva 4G teenusega. FWA ja kiirusega seotud tariifid on selleks parimad vahendid, kuna sisuga seotud pakkumised pakuvad turuspetsiifilisemat võimalusi.

5G edasise arendamise osas võivad soovitused Eestile sisaldada:

Ühenduse infrastruktuur: a) Jätkata käimasolevaid jõupingutusi VHCN-i (Very High Capacity Network) ja 5G leviku toetamiseks, sealhulgas erainvesteeringute soodustamise ja kasutuselevõtu stimuleerimise kaudu; b) tagada uutele osalejatele piisav juurdepääs spektrile uurendlike ettevõtetevaheliste (B2B) ja ettevõtetelt tarbijatele (B2C) rakenduste jaoks ning julgustada operaatoreid kiirendama 5G (SA) eraldiseisvate põhivõrkude kasutuselevõttu.

Kübertuvalisus: jätkata 5G küberturvalisuse võimekuse juurutamist, et tagada turvalised ja vastupidavad 5G-võrgud.

[124] https://europa.eu/eurobarometer/surveys/detail/2959

[125] GSMA Intelligence. ”Revisiting 5G monetisation: upping the experience.” September 2024.

Servasõlmed (Edge Node): kuna servaarvutus (Edge Comupting) on tehisintellekti, tulevase võrgu juurutamise ja asjade Interneti (IoT) oluline komponent, tuleb nendes valdkondades investeerimisporgammide ja strateegiate loomisel arvestada servasõlmede (Edge Node) juurutamisega.