

YMPÄRISTÖKESTÄVYYS MATKAVIESTINVERKOISSA: Energiatehokkuutta parantavat tekniikat ja suunnitteluperiaatteet

Raportti 3/3



Tekijät: Nina Ong'uti ja Chinthani Kumaradasa
Centre for Wireless Communications (CWC), Oulun yliopisto
Ohjaaja: Marja Matinmikko-Blue, Oulun yliopisto

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
1 Johdanto	5
2 Metodologia	9
3 Matkaviestinverkon arkkitehtuuri ja energiankulutus	12
3.1 5G-verkon arkkitehtuuri.....	12
3.2 Energiankulutus.....	14
4 Energiatehokkuuden parantamiseen tähtäävät tekniikat.....	17
4.1 Energiaa säästävien tekniikoiden luokittelu.....	17
4.2 Tunnistetut tekniikat	19
5 Energiatehokkuuden parantamisen suunnitteluperiaatteet	25
5.1 Energiatehokkaiden laitteiden ja infrastruktuurin suunnittelu	26
5.2 Dynaaminen mukautuminen dataliikenteeseen	27
5.3 Energiansäästötekniikoiden käyttö verkon osien yli	28
5.4 Energiatehokkaan verkkoarkkitehtuurin suunnittelu	29
5.5 Uusiutuvan energian integrointi	30
5.6 Virtualisointi ja ohjelmisto-ohjattu kehittäminen	31
5.7 Jäähdytyksen ja lämmönhallinnan tehostaminen.....	32
5.8 Elinkaareen perustuva suunnittelu	33
6 Johtopäätökset.....	37
Lähteet.....	39

Tiivistelmä

Julkaisun nimi

YMPÄRISTÖKESTÄVYYS MATKAVIESTINVERKOISSA: Energiatehokkuutta parantavat tekniikat ja suunnitteluperiaatteet

Tekijät: Nina Ong'uti ja Chinthani Kumaradasa, Centre for Wireless Communications (CWC), Oulun yliopisto, Suomi

Ohjaaja: Marja Matinmikko-Blue, Oulun yliopisto, Suomi

Julkaisu vuosi

2026

Tämä raportti tarkastelee ympäristökestävyyttä matkaviestinverkoissa ja keskittyy nykyisten ja tulevien verkkojen energiatehokkuutta parantaviin tekniikoihin ja suunnitteluperiaatteisiin. Raportti on kolmas kolmen raportin sarjassa, jonka Oulun yliopisto on laatinut Green ICT VISIIRI hankkeessa. Selvityksessä käytettiin jäseneltyä monivaiheista tutkimusmenetelmää matkaviestinverkkojen energiatehokkuuden analysoimiseksi. Aluksi tunnistettiin matkaviestinverkkojen rakentamiseen ja ylläpitoon liittyvät keskeiset sidosryhmät. Verkkojen energiatehokkuutta koskevaa aineistoa kerättiin matkaviestinverkko-operaattoreiden, standardointi- ja sääntelyorganisaatioiden, tietoliikennelaitteiden toimittajien, toimialan foorumeiden sekä tutkimusyhteisön julkaisuista. Aineistoanalyysin tuloksena tunnistettiin useita tekniikoita matkaviestinverkkojen energiatehokkuuden parantamiseksi sekä määriteltiin energiatehokkaiden verkkojen suunnitteluperiaatteita. Raportin tulokset osoittavat, että matkaviestinverkkojen energiatehokkuuden parantaminen edellyttää verkon päästä päähän ulottuvaa elinkaari-perusteista lähestymistapaa, jossa yhdistyvät teknologinen innovaatio, älykäs verkonhallinta, arkkitehtuurin optimointi sekä ympäristön kannalta kestävät toimintakäytännöt.

Avainsanat – energiankulutus, energiatehokkuus, ympäristökestävyys, kasvihuonekaasupäästöt, matkaviestintä, matkaviestinverkko-operaattori, verkkosuunnittelu, sidosryhmä.

Tämä raportti on suomenkielinen versio alkuperäisestä [englanninkielisestä raportista](#). Suomenkielisen version teossa on hyödynnetty Microsoft Copilot -tekoälytyökalua.

1

Johdanto



VISIIRI.



Co-funded by
the European Union

1 Johdanto

Kestävä kehitys voidaan yleisesti määritellä kehitykseksi, joka tyydyttää nykyhetken tarpeet viemättä tulevilta sukupolvilta mahdollisuutta tyydyttää omat tarpeensa perustuen klassiseen Brundtlandin raporttiin (Brundtland, 1987). Kestävyys puolestaan voidaan nähdä periaatteena, jonka mukaan varmistetaan, ettei tämän päivän toiminta rajoita tulevien sukupolvien käytettävissä olevien taloudellisten, sosiaalisten ja ympäristöön liittyvien vaihtoehtojen kirjoa (Elkington, 1997).

Tieto- ja viestintäteknologia-alalla (ICT) kestävä kehitys ja kestävyys tarkastellaan nykyisin kolmen toisiinsa kytkeytyvän pilarin kautta sisältäen taloudellisen, sosiaalisen ja ympäristökestävyys näkökulmat (Hexa-X-II, 2023). Nämä kolme kestävyys pilaria edustavat erillisiä mutta tiiviisti toisiinsa liittyviä näkökulmia. Kun digitaalisten ratkaisujen ja palvelujen kysyntä laajenee pilvilaskentaan ja tekoälyyn (artificial intelligence, AI) ja matkaviestinyhteyksien vaatimukset kasvavat edelleen, myös ICT-sektorin ympäristövaikutukset kasvavat (World Bank Group, 2024), (IEA, 2025). Dataliikenteen kasvu, laitteiden käyttö ja palvelujen virtualisointi lisäävät energiankulutusta sekä resurssien ja materiaalien käyttöä, mikä puolestaan kasvattaa kasvihuonekaasupäästöjä. Kansainvälinen televiestintäliitto ITU (International Telecommunication Union) ja Maailmanpankki arvioivat vuonna 2023 kahtasataa johtavaa digitaalista yritystä ja raportoivat, että nämä yritykset kuluttivat arviolta 581 TWh sähköä, mikä vastaa 2,1 % maailman sähkönkulutuksesta. Tarkastelluista 200 yrityksestä 166 yrityksen yhteenlasketut operatiiviset päästöt olivat 297 miljoonaa tCO_{2e}, mikä on noin 0,8 % maailman energiaan liittyvistä päästöistä. Tämä merkitsee 1,4 %:n kasvua päästöissä edellisvuoteen verrattuna (ITU WB, 2025).

ICT-sektoria koskevia kestävyteen liittyviä sääntelykehyksiä ja standardeja ovat muun muassa Pariisin sopimus (UNFCCC, 2019), Yhdistyneiden kansakuntien kestävä kehityksen tavoitteet (UN SDGs) (United Nations, 2015) ja Euroopan vihreän kehityksen ohjelma (European Green Deal) (European Commission, 2019). Ne määrittelevät korkean tason tavoitteet ICT-sektorin ympäristökestävyys vaikutusten hallitsemiseksi. Pariisin sopimus (UNFCCC, 2019) on kansainvälinen ilmastopöytäkirja, joka hyväksyttiin 195 maassa Pariisissa Ranskassa vuonna 2015. Sen tavoitteena on varmistaa, että maapallon keskilämpötilan nousu pysyy selvästi alle kahdessa celsiusasteessa esiteolliseen aikaan verrattuna ja pyrkii siihen, että lämpötilan nousu rajoittuu enintään 1,5 celsiusasteeseen. YK:n kestävä kehityksen tavoitteet (United Nations, 2015) muodostavat kansainvälisesti sovitun 17 tavoitteen toimintaohjelman, joka kehottaa muun muassa poistamaan köyhyyden, suojelemaan planeettaa sekä varmistamaan rauhan ja hyvinvoinnin kaikille vuoteen 2030 mennessä. Euroopan vihreän kehityksen ohjelma (European Commission, 2019) on oikeudellisesti sitova strategia, jonka tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 50 % vuoteen 2030 mennessä ja saavuttaa ilmastoneutraalius vuoteen 2050 mennessä muuttamalla Euroopan taloutta, energiajärjestelmiä, liikennettä ja teollisuutta.

ICT-sektorin matkaviestinverkkoinfrastruktuuri muodostaa nykyaikaisen yhteiskunnan selkärangan. Matkaviestinverkoilla on kaksijakoinen rooli ympäristökestävyydessä. Yhtäältä ne aiheuttavat ympäristökestävyyteen liittyvää kuormitusta tuottamalla kasvihuonekaasupäästöjä muun muassa energiankulutuksen, valmistuksen, logistiikan ja käytön kautta muodostaen niin sanotun ympäristöjalanjäljen. Toisaalta ne toimivat ympäristökestävyyden parannusten ja eri sektoreiden päästöjen vähentämisen mahdollistajina tarjoamalla digitaalisia ratkaisuja, jotka optimoivat resurssien käyttöä, vähentävät matkustamista ja parantavat toiminnan tehokkuutta, mikä muodostaa niin sanotun ympäristökädenjäljen. Matkaviestinratkaisut voivat mahdollistaa älykkäitä liikennejärjestelmiä, etätyötä ja täsmäviljelyä sekä edistää päästövähennyksiä muilla sektoreilla. Tämä kaksijakoinen rooli muodostaa alalle sekä haasteen että mahdollisuuden osallistua kestäväan kehitykseen (GSMA, 2023f), (NGA, 2023a).

ICT-sektorin energiankulutuksen kasvu vaikuttaa suoraan hiilidioksidipäästöihin. Standardointijärjestö 3GPP:n arvion mukaan matkaviestintäala tuottaa 0,2-0,3 prosenttia maailman kasvihuonekaasupäästöistä (3GPP, 2025). Euroopan komission arvioiden mukaan digitaaliset teknologiat aiheuttavat 8-10 prosenttia Euroopan unionin energiankulutuksesta ja 2-4 prosenttia kasvihuonekaasupäästöistä (ECO, 2022). Dataliikenteen nopea kasvu on lisännyt matkaviestinverkkojen ympäristöjalanjälkeä erityisesti energiankulutuksen ja kasvihuonekaasupäästöjen osalta. Verkkojen kehittyessä 4G:stä 5G:hen ja tulevaisuudessa 6G:hen verkkoinfrastruktuurin tiheys kasvaa, uusia taajuualueita otetaan käyttöön ja laskentavaatimukset lisääntyvät, mikä johtaa energiankulutuksen kasvuun. Samalla ympäristökestävyyteen liittyvät sitoumukset korostavat energiankulutuksen vähentämisen tarvetta, koska se vaikuttaa suoraan kasvihuonekaasupäästöihin. Sääntelyvaatimukset edellyttävät myös vastuullisuutta ja läpinäkyvyyttä. Koska energiankulutus muodostaa operaattoreilla noin 23 prosenttia operatiivisista kustannuksista (ITU/WB, 2024), operaattorit odottavat laitevalmistajien priorisoivan energiatehokkuutta tuotteissaan, ja tämä vaatimus ulottuu koko toimitusketjuun. Näin energiatehokkuudesta on tullut matkaviestintäverkkojen keskeinen kehityskohde. Kansainvälisen televiestintäliitto ITU:n (International Telecommunication Union) telestandardintisektori ITU-T määrittelee energiatehokkuuden hyödyllisen tuotoksen ja energiankulutuksen väliseksi suhteeksi (ITU-T L.1330, 2015). Energiatehokkuus on keskeinen tekijä matkaviestinnän ympäristökestävyydessä, sillä matkaviestinverkot kuluttavat sähköä radioliityntäverkoissa (radio access network, RAN), siirtoverkoissa, ydinverkossa (core network), sähkönsyöttöjärjestelmissä, jäähdytysratkaisuissa ja muussa tukevassa infrastruktuurissa. Tämän vuoksi energiatehokkuutta käytetään laajasti keskeisenä suorituskykymittarina (key performance indicator, KPI) matkaviestinverkkojen energiankulutuksen arvioinnissa.

Tämä selvitys on toteutettu VIISIIRI-hankkeessa, joka on kansallinen vihreän siirtymän Green ICT -hanke Suomessa. Hankkeen tavoitteena on vauhdittaa ICT-sektorin vihreää siirtymää edistämällä ympäristön kannalta kestäviä käytäntöjä, vähentämällä ympäristövaikutuksia ja edistämällä energiatehokkaiden ratkaisujen käyttöönottoa tulevaisuuden ICT-ratkaisussa, joihin kuuluvat matkaviestinverkot. Tämä raportti on kolmas Oulun yliopiston kolmesta raportista, jotka käsittelevät matkaviestinverkkojen ympäristökestävyyttä. Sarjan muut raportit ovat "Ympäristökestävyys

matkaviestinverkoissa: Selvitys matkaviestinnän sidosryhmien toimista ja indikaattoreista” (ensimmäinen raportti) sekä ”Ympäristökestävyys matkaviestinverkoissa: Sääntelyn ja standardoinnin analyysi” (toinen raportti). Raportit on mahdollista lukea toisistaan riippumatta.

Raportin loppuosa rakentuu seuraavasti. Luvussa 2 kuvataan selvityksessä käytetty menetelmä. Luku 3 esittelee matkaviestintäverkon arkkitehtuurin sekä energian kulutuksen verkon eri osissa. Luvussa 4 tunnistetaan energiatehokkuutta parantavia tekniikoita. Luvussa 5 esitellään suunnitteluperiaatteita, joiden avulla tulevien matkaviestinverkkojen energiatehokkuutta voidaan parantaa. Lopuksi luvussa 6 esitetään johtopäätökset.

2

Metodologia



VISIIRI.



Co-funded by
the European Union

2 Metodologia

Tässä selvityksessä tarkastellaan matkaviestinverkkojen energiatehokkuutta analysoimalla verkkojen energiatehokkuutta parantavia tekniikoita, joiden tavoitteena on vähentää energiankulutusta. Raportissa kuvataan, kuinka verkon eri osat vaikuttavat energiankulutukseen sekä esitellään menetelmiä, joilla energiatehokkuutta voidaan parantaa matkaviestinverkoissa. Metodologian vaiheet on esitetty kuvassa 2.1. Menetelmä koostuu viidestä peräkkäisestä vaiheesta, jotka sisältävät sidosryhmien tunnistamisen, tietolähteiden valinnan, tiedonkeruun ja lajittelun, aineiston analysoinnin ja luokittelun sekä lopuksi raportoinnin. Näitä vaiheita kuvataan tarkemmin seuraavassa.

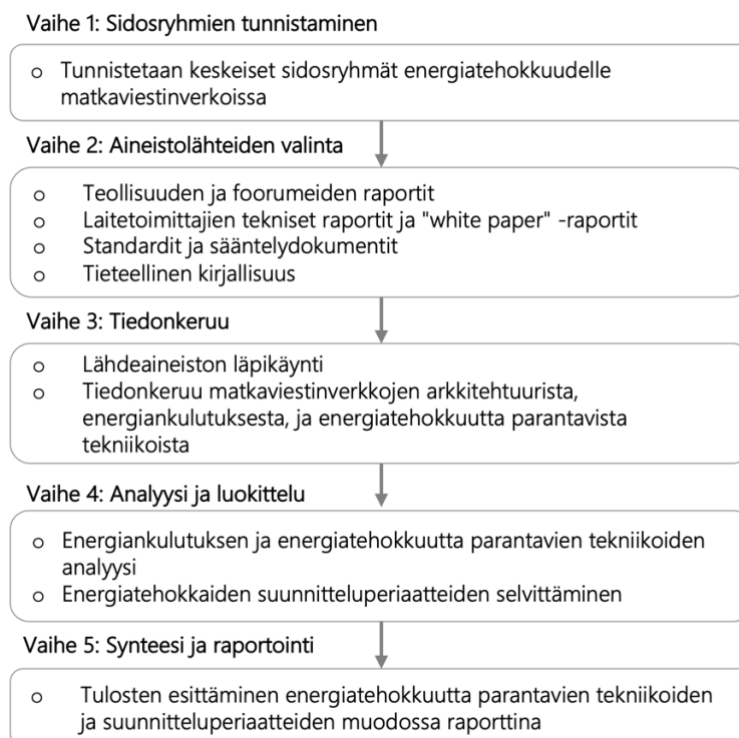
Ensimmäisessä vaiheessa (sidosryhmien tunnistaminen) tunnistettiin selvityksen kannalta olennaiset sidosryhmät. Näihin kuuluvat matkaviestinverkko-operaattorit (mobile network operator, MNO), tietoliikennelaitteiden toimittajat (telecommunication equipment provider, TEP), sääntely- ja standardointiorganisaatiot, toimialanfoorumit sekä tutkijat. Operaattorit hankkivat ja operoivat matkaviestinverkoja. Tietoliikennelaitteiden toimittajiin kuuluvat laitevalmistajat, jotka suunnittelevat ja toimittavat verkkoinfrastruktuuria ja -laitteita, kuten tukiasemia, ydinverkkoratkaisuja ja päätelaitteita. Ne vaikuttavat energiankulutukseen laitteiden suunnittelun kautta, mukaan lukien laitteisto- ja ohjelmistoratkaisut. Toimialan forumit kokoavat yhteen operaattoreita, laitevalmistajia ja muita sidosryhmiä tiedon ja parhaiden käytäntöjen jakamiseksi, yhteisten intressien edistämiseksi sekä alan ohjeistusten kehittämiseksi. Ne vaikuttavat kestävyteen liittyvien viitekehysten, energiatehokkuusmittarien ja tavoitteiden muodostumiseen. Sääntelyviranomaiset määrittelevät matkaviestintäalan toimijoille pelisäännöt ja toimintaedellytykset varmistaakseen muun muassa reilun kilpailun ja luotettavien palvelujen saatavuuden. Standardointiorganisaatiot puolestaan laativat yhteisesti hyväksytyjä standardeja, joita verkkojen ja laitteiden tulee noudattaa saumattoman viestinnän mahdollistamiseksi monitoimijaympäristössä. Tutkijat eri organisaatioista tekevät tutkimusta matkaviestintäverkkojen kehittämiseksi ja julkaisevat uusimpia tuloksiaan tulevaisuuden teknologioista, mukaan lukien laitteisto- ja ohjelmistoratkaisut, jotka tukevat nykyaikaisten matkaviestinverkkojen kehitystä.

Toisessa vaiheessa (aineistolähteiden valinta) tunnistettiin käytettävät tietolähteet, joihin sisältyi erilaisia julkaisuja ja raportteja. Näihin kuuluivat operaattoreiden ja laitevalmistajien julkaisut energiatehokkuudesta ja kestävydestä sekä teknologiaa käsittelevät white paper -raportit. Toimialan foorumeilta tunnistettiin raportteja energianhallinnasta, energiatehokkuudesta, tulevaisuuden teknologioista, kuten 6G:stä, sekä matkaviestintäalan nykytilasta. Lisäksi mukaan otettiin laitevalmistajien teknisiä dokumentteja, jotka tarjoavat näkökulmia laitesuunnitteluun ja radioteknologioihin. Sääntely- ja standardointiorganisaatioista tarkasteltiin raportteja ja suosituksia energiansäästöteknologioista sekä verkkoarkkitehtuureista. Näihin kuuluivat muun muassa 3GPP:n (Third Generation Partnership Project)

(3GPP), Kansainvälisen televiestintäliitto ITU:n telestandardointisektorin (International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector, ITU-T) ja radiosektorin (International Telecommunication Union Radiocommunication Sector, ITU-R) sekä Euroopan komission julkaisuja. Tutkimuskirjallisuuden näkökulmaa tuotiin mukaan vertaisarvioitujen lehti- ja konferenssiartikkeleiden kautta, jotka edustavat alan uusinta tutkimustietoa.

Kolmannessa vaiheessa (tiedonkeruu) kerätyistä dokumenteista poimittiin tietoja muun muassa verkkoarkkitehtuurista, energiankulutukseen vaikuttavista tekijöistä, energiatehokkuutta parantavista tekniikoista sekä näihin tekniikoihin liittyvistä rajoitteista ja kompromisseista. Lisäksi aineistoa analysoitiin tavoitteena tunnistaa verkkojen suunnitteluun liittyviä periaatteita, jotka ohjaavat energiatehokkaampien matkaviestintäverkkojen suunnittelua, käyttöönottoa ja operointia.

Neljännessä vaiheessa (analyysi ja luokittelu) tunnistettiin aluksi noin 30 energiatehokkuutta parantavaa ja energiankulutusta vähentävää tekniikkaa, joita myöhemmin yhdisteltiin ja ryhmiteltiin. Aineiston analyysin tuloksena tiedot koottiin neljään energiansäästötekniikoiden pääluokkaan sekä niitä täydentäviin energiansäästötekniikoihin ja energiatehokkaan suunnittelun periaatteisiin. Lopuksi viidennessä vaiheessa (synteesi ja raportointi) tulokset yhdistettiin ja koottiin tähän raporttiin.



Kuva 2.1: Menetelmä energiatehokkuutta parantavien tekniikoiden ja suunnitteluperiaatteiden tunnistamiseksi.

3

Matkaviestinverkon arkkitehtuuri ja energiankulutus

VISIIRI.



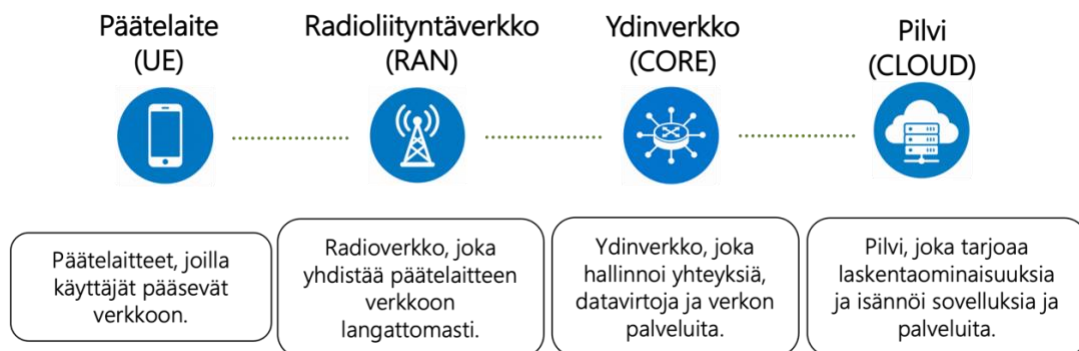
Co-funded by
the European Union

3 Matkaviestinverkon arkkitehtuuri ja energiankulutus

Matkaviestinverkot ovat muuttuneet yhä monimutkaisemmiksi jokaisen uuden sukupolven (esim. 2G, 3G, 4G, 5G ja tuleva 6G) myötä. Uudet matkaviestinverkon sukupolvet ovat tuoneet mukanaan uusia ominaisuuksia ja toiminnallisuksia sekä mahdollistaneet suuremmat tiedonsiirtonopeudet, kasvavan määrän liitettyjä laitteita ja pienemmän viiveen aiempiin järjestelmiin verrattuna (Narjes Lassoued et al., 2026) (ITU-R, 2022) (Salma Tika et al., 2025). Matkaviestinverkkojen kehittyminen on johtanut energiankulutuksen kasvuun koko verkossa, vaikka uudemmat sukupolvet ovatkin yleensä energiatehokkaampia kuin edeltäjänsä.

3.1 5G-verkon arkkitehtuuri

5G-verkon arkkitehtuuri on päästä päähän ulottuva järjestelmä, joka koostuu päätelaitteesta (User Equipment, UE), radioliityntäverkosta (Radio Access Network, RAN), 5G-ydinverkosta (Core) sekä pilvi- ja datakeskusinfrastruktuurista (Cloud) (ITU-R, 2022) (3GPP, 2022), kuten kuvassa 3.1 esitetään. Yhdessä nämä osa-alueet mahdollistavat matkaviestinverkon ja vaikuttavat eri tavoin verkon kokonaisenergiankulutukseen.



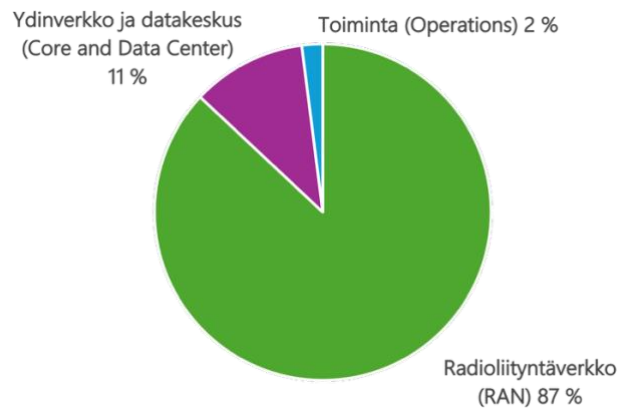
Kuva 3.1. Matkaviestintäverkon arkkitehtuuri.

Päätelaite (UE) tarkoittaa mitä tahansa laitetta, jota käyttäjä käyttää yhteyden muodostamiseen 5G-verkkoon. Tällaisia laitteita voivat olla esimerkiksi älypuhelimet, esineiden Internet (Internet of Things, IoT) -laitteet, puettavat laitteet, autonomiset ajoneuvot sekä muut yhdistetyt järjestelmät, jotka käyttävät radioverkkoa yhteyden muodostamiseen. Nämä laitteet tuottavat ja kuluttavat dataa sekä ovat suorassa vuorovaikutuksessa verkon kanssa. Päätelaitteiden yhteenlaskettuun energiankulutukseen

vaikuttavat erityisesti liitettyjen laitteiden määrän ja dataliikenteen kasvu. Dataliikenteen kasvu johtaa useampiin tiedonsiirto- ja signaalintapahtumiin, mikä tyypillisesti kasvattaa energiankulutusta sekä laite- että verkkotasolla (Xiao Yao et al., 2025) (ITU-R, 2022).

Radioliityntäverkko (RAN) yhdistää päätelaitteen ydinverkkoon ja vastaa radioliikenteen toteuttamisesta. Se koostuu tukiasemista, joihin kuuluvat radiotaajuusyksiköt (radio frequency, RF) ja kantataajuuden käsittely-yksiköt sekä niitä tukevat järjestelmät, kuten sähkönsyöttö- ja jäähdytysjärjestelmät. RAN tunnetaan laajasti matkaviestintäverkkojen suurimpana energiankuluttajana. GSMA:n mukaan noin 87 prosenttia operaattorien energiankulutuksesta kohdistuu RAN-verkon toimintaan (GSMA, 2021), kun taas NGMN raportoi osuuden olevan noin 73 prosenttia (NGMN, 2021a). Myös laitevalmistajat korostavat, että RAN vastaa suurimmasta osasta verkon energiankulutusta (Ericsson, 2022) (Nokia, 2023). Tukiasemissa energiankulutusta hallitsevat erityisesti radiolähetyskomponentit, joista tehovahvistimet muodostavat merkittävän osan kokonaiskulutuksesta (Huawei, 2021) (NGMN, 2021a).

5G-ydinverkko (core) vastaa verkon ohjaus- ja hallintatoiminnoista, kuten tunnistautumisesta, liikkuvuuden hallinnasta, istuntojen hallinnasta ja päätöksenteosta (3GPP, 2022). Se yhdistää RAN-verkon ulkoisiin verkkoihin ja mahdollistaa palvelujen päästä päähän -toimituksen. 5G-ydinverkko perustuu palvelupohjaiseen arkkitehtuuriin (Service-Based Architecture, SBA), jossa verkkotoiminnot toteutetaan ohjelmistokomponentteina, jotka tarjoavat palveluita muille valtuutetuille verkkotoiminnoille standardoitujen rajapintojen kautta (3GPP, 2022). Tämä mahdollistaa modulaarisuuden, skaalautuvuuden ja verkkotoimintojen joustavan käyttöönoton. 5G-ydinverkko on luonteeltaan pilvipohjainen juuri palvelupohjaisen arkkitehtuurinsa ansiosta (3GPP, 2022). Tämä tarkoittaa, että verkkotoiminnot ajetaan pilvi-infrastruktuurissa, mikä lisää riippuvuutta laskentaresursseista. Tutkimukset osoittavat, että nykyaikaisissa verkkoarkkitehtuureissa energiankulutukseen vaikuttavat yhä enemmän laskentakuorma ja datankäsittelyvaatimukset (Rajkumar Buyya et al., 2025). Kuvassa 3.2 esitetään energiankulutuksen jakautuminen 5G-verkossa RAN-verkon, operatiivisen toiminnan, ydinverkon ja datakeskusten kesken (GSMA Intelligence, 2026).



Kuva 3.2. Operaattoreiden 5G-verkkojen energiankulutuksen jakautuminen verkon osien välillä (lähde: GSMA Intelligence, 2026).

3.2 Energiankulutus

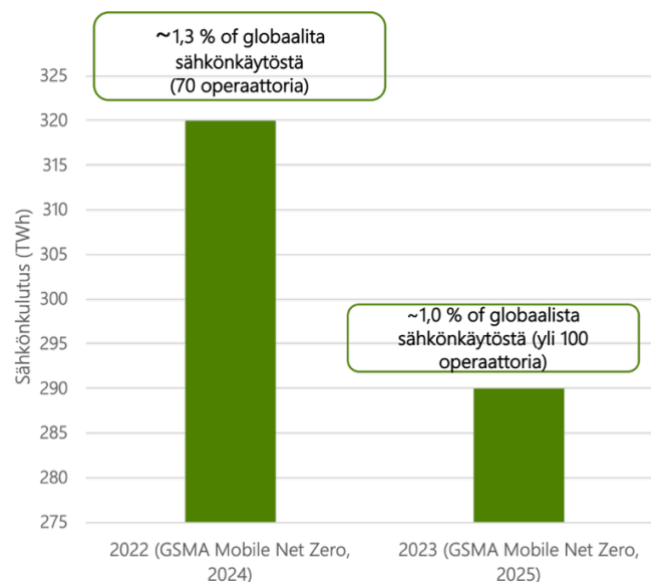
Matkaviestintäverkkojen energiankulutusta kasvattavat arkkitehtuuriin, toimintaan ja teknologiaan liittyvät tekijät, jotka ulottuvat koko verkkoon. On arvioitu, että 5G-verkko kuluttaa noin kolme kertaa enemmän energiaa kuin 4G-verkko (Tingwei Chen et al., 2025), vaikka 5G-verkkoteknologian energiatehokkuuden on arvioitu olevan nelinkertainen 4G-verkkoihin verrattuna (A. De Domenico et al., 2026). Verkkojen kehittyessä niiden rakenteellinen monimutkaisuus lisääntyy, mikä vaikuttaa suoraan energiankulutukseen. Päätelaitetasolla älypuhelimien, IoT-laitteiden ja muiden yhdistettyjen laitteiden määrän kasvu on lisännyt energiankulutusta (NGA, 2022a).

RAN-verkon energiankulutukseen vaikuttavat useat eri tekijät. Kehittyneiden teknologioiden käyttöönotto lisää aktiivisten verkkoelementtien määrää, mikä kasvattaa energiankulutusta (Huawei, 2021) (NGMN, 2023a). Suuren tukiasemamäärän erityisesti piensolujen (small cells) käyttöönotto kasvattaa kokonaisenergiatarvetta, vaikka yksittäiset solut kuluttaisivatkin vähemmän energiaa (NGMN, 2021a). Korkeampien taajuusalueiden käyttö lisää energiankulutusta suurempien etenemishäviöiden vuoksi, mikä edellyttää suurempaa lähetystehoja ja monimutkaisempaa radioverkkojen laitteistoa (5G Americas, 2023; Huawei, 2021).

RAN-verkon toimintoja toteutetaan yhä enemmän ohjelmistoina yleiskäyttöisillä laskenta-alustoilla. Tämä parantaa resurssien käyttöastetta, mutta kasvattaa samalla ohjelmistopohjaisen käsittelyn vaatimaa laskentakuormaa. Lisäksi verkkokomponenttien välisten yhteentoimivien rajapintojen käyttöönotto lisää koordinointi- ja signaalointitarpeita, mikä kasvattaa energiankulutusta (O-RAN, 2021). Ydinverkko muodostaa suhteellisen pienen osan matkaviestintäverkon kokonaisenergiankulutuksesta. Yhdessä pilvi-infrastruktuurin kanssa sen osuus on noin 12 prosenttia

verkon kokonaisenergiankulutuksesta (GSMA, 2021). Verkkotoimintojen siirtäminen ohjelmistopohjaisiksi sovelluksiksi tarkoittaa, että käsittely siirtyy erillisistä tietoliikennelaitteista yleiskäyttöisille laskenta-alustoille datakeskuksissa. Tämä kasvattaa energiankulutusta lisääntyneiden laskenta-, tallennus- ja orkestrointivaatimusten vuoksi (NGA, 2022a). Viimeaikaiset tutkimukset vahvistavat, että energiankulutus määräytyy yhä enemmän laskentakuorman kuin pelkän laitteiston perusteella (Francisco Crespo et al., 2025) (J. Lorincz et al., 2026).

Tekoälyn (artificial intelligence, AI) ja koneoppimisen (machine learning, ML) integrointi verkon toimintoihin kasvattaa lisäksi laskennallisia vaatimuksia. AI/ML-menetelmiä käytetään verkon eri osa-alueilla suorituskyvyn optimointiin ja resurssien hallintaan (Eilaf MA Babai et al., 2025) (Jibum Hong et al., 2025) (ITU-R, 2022) (NGA, 2022a). AI-mallien kouluttaminen ja suorittaminen vaativat kuitenkin huomattavia laskentaresursseja, mikä lisää energiankulutusta erityisesti pilviympäristöissä (IEA, 2025a) (NGA, 2023c). Toinen merkittävä haaste koko verkolle on verkon kapasiteetin ja todellisen liikennetarpeen välinen epäsuhde. Verkot suunnitellaan yleensä kestäämään ruuhkahuippuja, mutta suurimman osan ajasta niiden käyttöaste on huomattavasti pienempi. Tämän seurauksena verkkoelementit pysyvät aktiivisina myös silloin, kun niitä hyödynnetään vain osittain, mikä johtaa alhaisempaan energiatehokkuuteen (NGMN, 2021a). Tämän ongelman ratkaiseminen edellyttää dynaamista resurssienhallintaa sekä mukautuvia energiansäästötekniikoita (ITU-T, 2022) (5G Americas, 2023) (NGA, 2022a). Nämä tekijät yhdessä lisäävät matkaviestintäverkkojen energiankulutusta. Matkaviestinverkko-operaattoreiden sähkönkulutuksen kehitys on esitetty kuvassa 3.3.



Kuva 3.3. Matkaviestinverkko-operaattoreiden maailmanlaajuinen sähkönkulutus (lähteet: (GSMA, 2025b) ja (GSMA, 2024)).

4

Energiatehokkuuden parantamiseen tähtäävät tekniikat

VISIIRI.



Co-funded by
the European Union

4 Energiatehokkuuden parantamiseen tähtäävät tekniikat

Matkaviestinverkkojen energiatehokkuuden parantaminen edellyttää useiden eri tekniikoiden yhdistämistä verkon eri osissa. Tässä luvussa esitellään yleiskatsaus energiatehokkuutta parantaviin menetelmiin matkaviestinverkoissa.

4.1 Energiaa säästävien tekniikoiden luokittelu

Matkaviestinverkkojen energiankulutuksen vähentämiseksi standardointiorganisaatiot, kuten 3GPP ja ITU, ovat määritelleet energiansäästötekniologioille useita luokkia, joiden avulla verkkojen energiatehokkuutta voidaan parantaa (3GPP, 2025) (ITU-T, 2022). 3GPP:n Release 18 -julkaisussa energiaa säästävät tekniikat jaetaan neljään pääalueeseen seuraavasti:

- o Aika-alue (Time domain)
- o Taajuusalue (Frequency domain)
- o Tila-alue (Spatial domain)
- o Tehoalue (Power domain)

Näitä osa-alueita kuvataan tarkemmin seuraavissa alaluvuissa.

Aika-alue (Time domain)

Aika-alueen energiansäästötekniikat perustuvat siihen, että verkon tiettyjä komponentteja kytketään väliaikaisesti pois päältä ajanjaksoina, jolloin verkossa ei siirretä hyödyllistä tietoa. Verkko jakaa ajan kehyksiin (frame), jotka jakautuvat edelleen alikehyksiin (subframe), aikaväleihin (slot) ja symboleihin (symbol), jotka ovat pienin aikayksikkö tiedonsiirrossa (ITU-T, 2022) (Xiao Yao et al., 2025) (Taehyoung Kim et al., 2020). Verkko tunnistaa sellaiset symbolit, aikavälit tai alikehykset, joiden aikana dataa ei lähetetä, ja kytkee esimerkiksi tehovahvistimen tilapäisesti pois käytöstä.

Yksi keskeinen menetelmä on kehittynyt lepotila (advanced sleep mode), jossa ohjaus- ja käyttäjätason lähetyksiä, kuten synkronointisignaali lohkoja ja järjestelmätietolohkoja, vähennetään pidempien lepotilajaksojen mahdollistamiseksi (Toufiquel Islam et al., 2023). Toinen menetelmä on epäjatkuvuus lähetys ja vastaanotto (discontinuous transmission/reception), jonka avulla lähettimet ja vastaanottimet voivat siirtyä passiiviseen tilaan silloin, kun symboleissa tai aikaväleissä ei ole lähetettävää tietoa. Lisäksi herätesignaaleja (wake-up signals) käytetään aktivoimaan lähetys vain tarvittaessa, mikä

pienentää lähetystehoa. 4G-verkoissa referenssisignaalit lähetetään 0,2 millisekunnin välein, jolloin komponenttien sammuttamisesta saatavat säästöt jäävät vähäisiksi. 5G-verkoissa ongelmaa on lievitetty vähentämällä tyhjäkäyntitilan signaalointikuormaa (ITU-T, 2022) (Xiao Yao et al., 2025) (Taehyoung Kim et al., 2020).

Tila-alue (Spatial domain)

Tila-alueen energiansäästö perustuu tukiaseman peittoalueen mukauttamiseen liikennetarpeen mukaan. Säästö saavutetaan vähentämällä aktiivisten antennielementtien tai säteilykeilojen määrää silloin, kun liikennekuormitus on vähäinen. Esimerkiksi massiivi MIMO (Massive Multiple-Input Multiple-Output) -järjestelmissä antenniryhmän osia voidaan poistaa käytöstä tai aktiivisten lähetys-elementtien määrää voidaan rajoittaa. Kun peittoaluetta tai aktiivisten lähetys-elementtien määrää pienennetään, vähemmän komponentteja tarvitsee pitää toiminnassa. Näin osa antennijärjestelmistä sekä niihin liittyvistä laitteista, kuten tehovahvistimista, voidaan sammuttaa tai niiden toimintaa voidaan rajoittaa. Tämä vähentää energiankulutusta. Lisäksi tarpeettomien signaalien lähettämistä alueille, joilla ei ole käyttäjiä, voidaan vähentää, mikä parantaa resurssien käytön tehokkuutta. Tällä on kuitenkin vaikutuksia peittoalueeseen ja palvelun laatuun. Aktiivisten elementtien määrän vähentäminen voi heikentää signaalin voimakkuutta, alentaa tiedonsiirtonopeuksia ja aiheuttaa peittoaukkoja erityisesti solun reuna-alueilla (ITU-T, 2022) (Xiao Yao et al., 2025).

Taajuusalue (Frequency domain)

Taajuusalueen energiansäästötekniikat pyrkivät vähentämään energiankulutusta mukauttamalla radiotaajuusresurssien käyttöä. Sen sijaan, että kaikki käytettävissä olevat taajuuskaistat ja kantoaallot olisivat jatkuvasti aktiivisia, verkko voi dynaamisesti pienentää käytössä olevaa kaistanleveyttä liikennetarpeen mukaan. Yksi tällainen menetelmä on tukiasemien tai kapasiteettia lisäävien solujen tilapäinen sammuttaminen vähäisen liikennekuorman aikana. Muita menetelmiä ovat kantoaaltojen mukauttaminen (carrier adaptation) ja kaistanleveysosien mukauttaminen (bandwidth part adaptation). Taajuusalueen energiansäästöjä voidaan saavuttaa joko sammuttamalla koko kantoaalto tai muuttamalla sen toimintaparametreja. Kun kantoaalto poistetaan käytöstä, myös siihen liittyvä laitteisto voidaan sammuttaa. Jos taajuus pysyy aktiivisena, laitteistoa ei voida kokonaan kytkeä pois päältä, jolloin energiansäästö jää pienemmäksi. Lisäksi yhden kantoaallon sammuttaminen voi edellyttää liikenteen siirtämistä toiselle kantoaallolle, mikä voi vaatia suurempaa lähetystehoa peiton ja palvelun laadun säilyttämiseksi (ITU-T, 2022) (Xiao Yao et al., 2025).

Tehoalue (Power domain)

Tehoalueen energiansäästötekniikoilla pyritään pienentämään lähetystehoa vähentämällä tehovahvistimien lähtötehoa sekä säätämällä dynaamisesti signaalien ja kanavien lähetystehoa liikennetilanteen mukaan. Keilan optimoinnilla (beam optimization) parannetaan tukiaseman ja päätelaitteen välisen signaalin kohdentamista. Ohjelmistopohjainen optimointi vähentää väärään suuntaan kohdistuvia lähetyksiä, jolloin energiaa ei kulu tarpeettomasti. Lisäksi antenneja suunnitellaan suuremmalla antennivahvistuksella, jolloin sama signaalitaso voidaan saavuttaa pienemmällä lähetysteholla. Näin verkon peitto voidaan säilyttää samalla, kun energiankulutus pienenee. Lähetystehon pienentäminen vaikuttaa kuitenkin suoraan verkon peittoon ja yhteyden laatuun tukiaseman ja päätelaitteen välillä. Siksi tehon alentamista on hallittava siten, ettei verkon suorituskyky heikkene liikaa (3GPP, 2025) (Xiao Yao et al., 2025).

4.2 Tunnistetut tekniikat

Tutkimuksessa tunnistettiin seuraavat energiatehokkuutta parantavat tekniikat matkaviestintäverkoissa:

- o AI/ML-optimointi (AI/ML optimisation)
- o Sammutusominaisuudet (Switch-off capabilities)
- o Lähes nollaenergiaa käyttävä viestintä (Near-zero energy communication)
- o Energian talteenotto (Energy harvesting)
- o Energianhallintajärjestelmät (Energy management systems)
- o RAN-verkon yhteiskäyttö (RAN sharing)
- o Reunalaskenta (Edge computing)
- o Virtualisointi (Virtualisation)
- o Tavoiteperusteinen hallinta (Intent-based management)
- o Jäähdytysteknologiat (Cooling technologies)

AI/ML-optimointi (AI/ML Optimisation)

AI/ML-optimointi tarkoittaa tekoälyn ja koneoppimisen hyödyntämistä operaattorien verkoissa suurten tietomäärien analysoimiseksi, liikennemallien tunnistamiseksi sekä verkon toiminnan säätämiseksi reaaliaikaisesti. Sen avulla voidaan hallita resursseja tehokkaammin, tehostaa verkkosuunnittelua, automatisoida toimintoja ja parantaa energiatehokkuutta. AI/ML-mallit voivat ennustaa liikennemääriä ja mukauttaa verkon resurssit todelliseen kuormitukseen. Niitä voidaan käyttää myös aikataulutuksen, verkon suunnittelun ja operatiivisten toimintojen optimointiin. Tekoäly vähentää lisäksi manuaalisen työn tarvetta automatisoimalla verkon hallintaa ja tunnistamalla ennakoivasti häiriöitä. Toisaalta AI/ML-järjestelmät vaativat suuria määriä koulutusdataa ja huomattavia

laskentaresursseja. Käytettävät laitteistot, kuten GPU:t, FPGA-piirit ja ASIC-piirit, kuluttavat paljon energiaa, mikä vähentää saavutettavien energiansäästöjen nettovaikutusta (ITU-R, 2022) (Martins Odiamenhi et al., 2024). AI/ML-optimoinnin voidaan katsoa kuuluvan kaikkiin luvussa 4.1 tunnistettuun neljään energiansäästöalueeseen eli aika-, taajuus-, tila- ja tehoalueeseen.

Sammutusominaisuudet (Switch-off Capabilities)

Sammutusominaisuudet tarkoittavat verkkoelementtien osittaista tai täydellistä poistamista käytöstä matalan liikennekuorman aikana energiankulutuksen vähentämiseksi. Esimerkiksi tukiasemat kuluttavat huomattavan määrän energiaa myös silloin, kun ne eivät aktiivisesti palvele käyttäjiä. Alikuormitettujen tukiasemien sammuttaminen säästää energiaa, joka muuten kuluisi niiden ylläpitämiseen. Menetelmään liittyy kuitenkin kompromissi energiansäästöjen ja palvelun suorituskyvyn välillä. Tukiasemien sammuttaminen voi heikentää palvelun laatua, kasvattaa viivettä ja pienentää tiedonsiirtokapasiteettia (Adrian Ichimescu et al., 2024). Sammutusominaisuuksien voidaan katsoa kuuluvan kaikkiin neljään energiansäästöalueeseen eli aika-, taajuus-, tila- ja tehoalueeseen.

Lähes nollaenergiaa käyttävä viestintä (Near-Zero Energy Communication)

Lähes nollaenergiaa käyttävä viestintä perustuu laitteisiin, jotka toimivat ympäristöstä kerätyllä energialla, kuten aurinkoenergialla, lämpöenergialla, tuulivoimalla tai muista luonnollisista lähteistä saatavalla energialla. Koska näiden laitteiden energiantarve on erittäin pieni, ne eivät usein tarvitse akkuja. Laitteet hyödyntävät erittäin vähän energiaa kuluttavia radiopiirejä, kuten nanowattiluokan vastaanottimia, jotka keräävät energiaa ympäristöstään. Tämän ansiosta ne soveltuvat kohteisiin, joissa sähkönsaatus on rajallinen. Kerätty energia ei kuitenkaan yleensä riitä jatkuvaan tai laskennallisesti vaativaan toimintaan, minkä vuoksi teknologia soveltuu vain rajattuihin käyttötapauksiin eikä laajamittaiseen käyttöönottoon (R. Citroni et al., 2024) (3GPP, 2025) (NGA, 2023a) (NGA, 2023c). Tämä tekniikka kuuluu aika- ja tehoalueen energiansäästöluokkiin.

Energian talteenotto (Energy Harvesting)

Energian talteenotolla tarkoitetaan tekniikoita, joiden avulla laitteet voivat hankkia toimintansa vaatiman energian luonnollisista tai ihmisen tuottamista lähteistä, kuten radiotaajuisista signaaleista, kehon lämmöstä, valosta, auringon säteilystä, tuulesta, kitkasta, lämpötilavaihteluista ja värähtelyistä. Energian talteenottojärjestelmiin kuuluu elektroniikkapiirejä, jotka keräävät pieniä määriä energiaa ympäristöstä ja muuntavat sen laitteen käytettävissä olevaksi sähköenergiaksi. Tämän ansiosta paristojen tai akkujen tarve vähenee tai poistuu kokonaan, mikä mahdollistaa pienempien ja energiatehokkaampien laitteiden kehittämisen. Lisäksi verkkosähkön käyttö vähenee, mikä pienentää kokonaisenergiankulutusta. Talteen otettavan energian määrä on kuitenkin yleensä rajallinen eikä sitä ole jatkuvasti saatavilla. Tämän vuoksi teknologia soveltuu pääasiassa vähän energiaa kuluttaville

laitteille. Lisäksi radiotaajuisia signaaleja tasavirraksi muuntavien tasasuuntaajien hyötysuhde on edelleen rajallinen, vaikka se kehittyy jatkuvasti (ITU-R, 2022) (Peter Sevcik et al., 2025) (R. Citroni et al., 2024). Energian talteenoton katsotaan kuuluvan aika- ja tehoalueen energiansäästöluokkiin.

Energianhallintajärjestelmät (Energy Management Systems)

Energianhallintajärjestelmillä tarkoitetaan menetelmiä, joilla matkaviestintäverkoissa suunnitellaan, ohjataan ja optimoidaan energian hankintaa ja käyttöä koko verkon laajuudessa. Ne tukevat kustannustehokkaiden energialähteiden hyödyntämistä, kuten vähähiilisen sähkön hankintaa sekä uusiutuvan energian tuotantoa verkkosolmuissa. Lisäksi ne ohjaavat akkujen latausta ja purkua siten, että sähköä käytetään mahdollisimman kustannustehokkaasti. Energianhallintajärjestelmät yhdistävät tietoja energiantarpeesta, sähkön hinnasta ja uusiutuvan energian tuotannosta sekä määrittävät kuhunkin sijaintiin soveltuvimman energiansyöttöstrategian. Näin vältetään energian tuhlaaminen tilanteissa, joissa eri verkkoalueiden energiantarpeet poikkeavat toisistaan. Sääennusteita voidaan hyödyntää uusiutuvan energian tuotannon ennustamiseen, jolloin operaattorit voivat suunnitella energian käyttöä etukäteen ja hyödyntää uusiutuvia energialähteitä tehokkaammin. Järjestelmien tehokas toiminta edellyttää suuria määriä reaaliaikaista dataa sekä tarkkoja ennusteita. Tarvittava tieto kerätään useista eri lähteistä, kuten tukiasematasolta, verkkotasolta ja sähköverkosta. Tämän tiedon hyödyntäminen voi edellyttää AI/ML-ratkaisuja, jotka puolestaan lisäävät energiankulutusta. Lisäksi osa uusiutuvista energialähteistä, kuten aurinko- ja tuulivoima, on luonteeltaan vaihtelevaa, eikä edullista energiaa välttämättä ole saatavilla silloin, kun kysyntä on suurimmillaan (NGMN, 2025a). Energianhallintajärjestelmien katsotaan kuuluvan kaikkiin neljään energiansäästöluokkaan: aika-, taajuus-, tila- ja tehoalueeseen.

RAN-verkon yhteiskäyttö (RAN Sharing)

RAN-verkon yhteiskäytöllä tarkoitetaan järjestelyä, jossa kaksi tai useampi operaattori käyttää samaa verkkoinfrastruktuuria sen sijaan, että jokainen operaattori rakentaisi ja ylläpitäisi oman verkkonsa. Käytössä on useita erilaisia yhteiskäyttömalleja. Näistä yksi on Multi-Operator Core Network (MOCN), joka mahdollistaa taajuusresurssien jakamisen. Toinen on Multi-Operator Radio Access Network (MORAN), jossa radioliityntäverkon infrastruktuuria voidaan jakaa. Kolmas malli on Gateway Core Network (GWCN), jossa myös osa ydinverkon komponenteista voidaan jakaa operaattoreiden kesken. Infrastruktuurin yhteiskäyttö vähentää aktiivisena pidettävien verkkoelementtien määrää ja ehkäisee päällekkäisten verkkojen rakentamista. Tämä pienentää kaikkien osallistuvien operaattoreiden energiankulutusta riippumatta käytetystä energialähteestä. Yhteiskäyttö kuitenkin lisää operatiivista monimutkaisuutta, sillä operaattoreiden on koordinoitava liikenteenhallintaa, palvelun laatua, taajuuksien käyttöä ja vikojen käsittelyä. Lisäksi yhteiskäyttöä voivat rajoittaa operaattoreiden erilaiset taajuusomistukset. Esimerkiksi MORAN-mallissa taajuuksia ei voida jakaa, minkä vuoksi radiolaitteita ei

voida täysin yhteiskäyttää. Tämä rajoittaa saavutettavia energiansäästöjä. Myös erot peitto-ominaisuuksissa ja käytettävissä olevassa kaistanleveydessä voivat edellyttää lisäverkon rakentamista, mikä kasvattaa sekä investointi- (CAPEX) että käyttökustannuksia (OPEX) sekä energiankulutusta. Lisäksi yhteiskäyttö voi lisätä läpinäkyvyyteen, luotettavuuteen ja yksityisyyteen liittyviä riskejä (5G Americas, 2023) (ITU-R, 2022). RAN-verkon yhteiskäyttö kuuluu kaikkiin neljään energiansäästöluokkaan.

Reunalaskenta (Edge Computing)

Reunalaskenta on pilvilaskennan muoto, jossa osa tietojenkäsittelystä ja datan tallennuksesta siirretään keskitetystä pilvestä verkon reunalla sijaitseviin solmuihin. Menetelmää käytetään erityisesti sovelluksissa, jotka edellyttävät erittäin pientä viivettä. Reunalaskenta voi myös tarkoittaa laskentatehtävien siirtämistä päätelaitteesta verkkoon. Kun laskentakuormaa siirretään verkon reunalle, datan kuljettamiseen liittyvät kustannukset ja energiantarve vähenevät, koska kaikkea liikennettä ei tarvitse välittää ydinverkkoon tai keskitettyihin datakeskuksiin. Mikäli energiantensiivisiä prosesseja siirretään päätelaitteista verkon reunalle, päätelaitteiden akun käyttöikä pitenee. Lisäksi kuormien joustava jakaminen mahdollistaa resurssien tehokkaamman hyödyntämisen ja vähentää ylimitoitettun laskentakapasiteetin tarvetta. Reunalaskenta edellyttää kuitenkin uuden infrastruktuurin rakentamista verkon reunalle. Tämä lisää prosessointitarvetta sekä sähkön- ja jäähdytyksen kulutusta. Näin ollen osa saavutettavista energiansäästöistä voi kumoutua lisääntyneen infrastruktuurin vuoksi (ETSI, 2023) (ITU-R, 2022) (NGA, 2023a) (Muhammad Ilyas Khattak et al., 2025). Reunalaskennan katsotaan kuuluvan aika-, tila- ja tehoalueen energiansäästöluokkiin.

Virtualisointi (Virtualisation)

Verkkotoimintojen virtualisointi (Network Function Virtualization, NFV) tarkoittaa verkkotoimintojen irrottamista erillisestä laitteistosta ja niiden toteuttamista ohjelmistoina yleiskäyttöisillä laskenta-alustoilla. Näitä kutsutaan virtualisoiduiksi verkkotoiminnoiksi (Virtualized Network Functions, VNF). NFV liittyy läheisesti ohjelmisto-ohjattuihin verkkoihin (Software Defined Networking, SDN). Suorittamalla useita VNF-toimintoja samoilla palvelimilla voidaan vähentää tarvittavan laitteiston määrää ja sammuttaa tarpeettomia laitteita, mikä säästää energiaa. NFV mahdollistaa myös VNF-instanssien dynaamisen skaalaamisen siten, että resursseja varataan vain tarpeen mukaan, mikä vähentää energiankulutusta (Z. Ezzeddine et al., 2024) (Josip Lorincz et al., 2024). Virtualisointi tuo kuitenkin mukanaan ylimääraistä laskennallista kuormitusta. Useiden verkkotoimintojen suorittaminen samalla palvelimella lisää resurssikilpailua, mikä voi heikentää suorituskyyä ja kasvattaa energiankulutusta toimintoa kohden. Tämän seurauksena osa saavutetuista energiansäästöistä menetetään (ETSI, 2014) (Josip Lorincz et al., 2024) (Z. Ezzeddine et al., 2024). Virtualisoinnin katsotaan kuuluvan aika- ja tehoalueen energiansäästöluokkiin.

Tavoiteperusteinen hallinta (Intent-based Management)

Tavoiteperusteisella hallinnalla tarkoitetaan ohjelmistotoimintoja, jotka ohjaavat verkon toimintaa ennalta määriteltujen tavoitteiden perusteella, kuten energiatehokkuuden parantamiseksi. Pilvipohjaisissa järjestelmissä nämä toiminnot suoritetaan yleiskäyttöisillä prosessoreilla toimivilla ohjelmistokomponenteilla. AI/ML-pohjainen energianhallinta arvioi verkon tilaa, sääennusteita ja ympäristön lämpötilaa määrittäessään, miten eri työkuormat tulisi suorittaa. Tämän tiedon perusteella verkkotoimintoja voidaan priorisoida siten, että ne tukevat asetettuja tavoitteita, kuten energiatehokkuutta. Pilvinatiivissa RAN-ympäristössä tekoälyä käytetään myös näiden prosessien automatisointiin. Tavoiteperusteinen hallinta perustuu jatkuvaan AI/ML-analyysiin, joka vaatii merkittävää laskentatehoa ja energiankulutusta. Tämän vuoksi saavutettavien energiansäästöjen määrä voi osittain pienentyä (Adrian Ichimescu et al., 2024) (NGA, 2023a) (SUSTAIN 6G, 2025). Tavoiteperusteisen hallinnan katsotaan kuuluvan kaikkiin neljään energiansäästöluokkaan.

Jäähdytysteknologiat (Cooling Technologies)

Jäähdytysteknologioilla tarkoitetaan menetelmiä, joilla tietoliikennelaitteiden tuottamaa ylimääräistä lämpöä poistetaan energiankulutuksen vähentämiseksi. Tehoton jäähdytys kasvattaa suoraan verkon kokonaisenergiankulutusta. Jäähdytystekniikoihin kuuluvat esimerkiksi ulkoilmaan perustuva vapaa jäähdytys, vesi- ja nestejäähdytysratkaisut, energiatehokkaammat puhaltimet sekä muut lämmönhallintamenetelmät. Jäähdytysratkaisut toimivat eri tavoin. Ulkoilmaan perustuvassa jäähdytyksessä voidaan hyödyntää ympäröivää ilmaa ilman mekaanisia jäähdytyslaitteita. Vesi- ja nestejäähdytys siirtävät lämpöä ilmaa tehokkaammin, minkä vuoksi niiden energiankulutus on pienempi suhteessa poistettuun lämpömäärään. Puhallinpohjaisissa ratkaisuissa voidaan hyödyntää energiatehokkaampia puhaltimia. Lisäksi laitetilojen lämpötilaa voidaan nostaa hallitusti siten, että vapaan jäähdytyksen käyttö lisääntyy, tai lämpötiloja voidaan säätää vuodenaikojen mukaan. Sähköllä toimivat jäähdytysjärjestelmät lisäävät kuitenkin operaattorien energiankulutusta. Lisäksi joillakin jäähdytysmenetelmillä on omia ympäristövaikutuksiaan esimerkiksi vedenkulutuksen tai kylmäaineiden käytön muodossa (NGMN, 2023b) (Narjes Lassoued et al., 2026). Jäähdytysteknologioiden katsotaan kuuluvan aika- ja tehoalueen energiansäästöluokkiin.

5

Energiatehokkuuden parantamisen suunnitteluperiaatteet

5 Energiatehokkuuden parantamisen suunnitteluperiaatteet

Energiatehokkuus saavutetaan parhaiten silloin, kun se huomioidaan matkaviestinverkkoteknologian suunnittelun lähtökohtaisena vaatimuksena eikä vasta käyttöönoton jälkeen lisättävänä ominaisuutena. Jos energiansäästöominaisuuksia lisätään jo käytössä olevaan verkkoon, seurauksena ovat usein lisäkustannuksia ja tekninen monimutkaisuus. Verkot tulee suunnitella siten, että ne pystyvät mukautumaan ennakoituihin ja ennakoimattomiin muutoksiin liikennemäärissä, teknologioissa ja operatiivisissa vaatimuksissa vaarantamatta käytettävyyttä, palvelun laatua tai energiatehokkuutta. Tässä luvussa esitetään kahdeksan suunnitteluperiaatetta, joiden avulla energiatehokkuus voidaan sisällyttää matkaviestinverkkoihin jo niiden suunnitteluvaiheessa. Kuvassa 5.1 esitetään ehdotetut energiatehokkaiden verkkojen suunnitteluperiaatteet.



Kuva 5.1: Ehdotetut suunnitteluperiaatteet energiatehokkaille matkaviestinverkoille.

5.1 Energiatehokkaiden laitteiden ja infrastruktuurin suunnittelu

Matkaviestintäverkkojen energiankulutukseen vaikuttavat sekä laitteiston että sitä tukevan infrastruktuurin suorituskyky. Tämän vuoksi tällä tasolla esiintyvät tehottomuudet kertautuvat koko verkossa. Energiatehokkaiden laitteiden ja infrastruktuurin suunnittelu on siten keskeinen energiatehokkaiden verkkojen suunnitteluperiaate. Verkon energiatehokkuuden tulee alkaa sen yksittäisistä komponenteista. Koska verkkolaitteet ovat jatkuvasti käytössä ja muodostavat kaikkien verkkotoimintojen perustan, niiden suunnittelun kehittäminen vaikuttaa merkittävästi koko verkon energiatehokkuuteen (ITU-T, 2022). Lisäksi voidaan hyödyntää passiivista infrastruktuuria, kuten valokuitukaapeleita sekä yksinkertaistaa verkkosolmujen rakennetta. Nollaenergialaitteiden (zero-energy device) konsepti on hyödyllinen (NGA, 2023a), sillä nämä laitteet hyödyntävät ympäristöstä kerättyä energiaa eivätkä tarvitse perinteistä energiansyöttöä.

Energiatehokkaat laitteistot (NGMN, 2023b), tekoälykiihdyttimien käyttöönotto (Hexa X II, 2025; ITU-R, 2022) sekä suurjännitteisen tasavirran hyödyntäminen verkkokohteissa (NGMN, 2021a) voivat parantaa energianhallintaa. Radioverkkoratkaisujen energiatehokkuuden kannalta erityisen tärkeä komponentti on tehovahvistin, jonka osuus radionverkon energiankulutuksesta on noin 60 prosenttia (NGMN, 2021a). Myös RF-laitteiden, joihin tehovahvistimet kuuluvat, arvioidaan vastaavan noin 60 prosentista verkkokohteen energiankulutuksesta (Huawei, 2021). Puolijohdemateriaaleja ja piirejä kehitetään jatkuvasti energiatehokkaammiksi. Esimerkiksi galliumnitridi (GaN) tarjoaa suuremman tehotiheyden, korkeamman käyttöjännitteen ja paremman lämmönjohtavuuden kuin perinteiset ratkaisut (NGMN, 2021a; NGA, 2022b; NGMN, 2023b; NGA, 2023c). Tämän vuoksi galliumnitridivahvistimia käytetään laajasti 5G-laitteissa, joissa niiden energiatehokkuus on parempi kuin 2G-, 3G- ja 4G-järjestelmissä.

Laitteiden energiatehokkuutta voidaan parantaa myös yhdistämällä useita toimintoja samaan komponenttiin. Esimerkiksi tehovahvistimet voidaan suunnitella sisältämään useita aiemmin erillisiä toimintoja yhdessä paketissa (NGMN, 2021a). Monitaajuusteknologiat voivat lisäksi pienentää laitteiden kokoa, painoa ja energiankulutusta (Ericsson, 2022; Ericsson, 2024). Radiolähettimissä voidaan hyödyntää energiatehokkaita ASSP- ja ASIC-piirejä (NGMN, 2023b). Verkkokohteiden yksinkertaistaminen parantaa myös RAN-verkon energiatehokkuutta. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi laitemäärän vähentämistä teknisissä tiloissa, mikä vähentää jäähdytystarvetta (Huawei, 2021), tai siirtymistä sisätiloista ulkoasennuksiin, jolloin voidaan hyödyntää ulkoilmaa jäähdytyksessä (NGMN, 2023b). Tehokkaampia jäähdytysmenetelmiä, kuten lämmönvaihtimia ja lämpöputkia, voidaan myös hyödyntää (ITU-T, 2016). Lisäksi suurjännitteinen tasavirta vähentää vaihtovirran ja tasavirran välisiä muunnosvaiheita ja siten energiahäviöitä (NGMN, 2021a).

5.2 Dynaaminen mukautuminen dataliikenteeseen

Toinen suunnitteluperiaate on verkon dynaaminen mukautuminen todelliseen dataliikennekysyntään. Verkot mitoitetaan tavallisesti ruuhkahuippujen perusteella, vaikka suurimman osan ajasta niitä käytetään huomattavasti tätä alhaisemmalla kuormituksella (Narjes Lassoued et al., 2026; NGMN, 2021a). Tämän seurauksena osa resursseista kuluttaa energiaa ilman täysimääräistä hyödyntämistä. Dynaamisen mukautumisen tarkoituksena on sovittaa verkon toiminta todellista kuormitusta vastaavaksi. Sen sijaan, että kapasiteetti pysyisi jatkuvasti samalla tasolla, verkko voi mukauttaa resurssien käyttöä reaaliaikaisen tai ennustetun kysynnän perusteella (A. De Domenico et al., 2026). Tämä mahdollistaa verkkoelementtien skaalaamisen, uudelleenkonfiguroinnin tai väliaikaisen sammuttamisen silloin, kun liikenne on vähäistä.

Radioliityntäverkon tasolla nämä mukautusmekanismit toimivat ajan, taajuuden, tilan ja lähetystehon ulottuvuuksissa. Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi lepotilojen hyödyntämistä sekä lähetystehon alentamista, joiden avulla tukiaseman komponenttien aktiivisuutta voidaan vähentää hiljaisen liikenteen jaksoina. Kun tiedonsiirto- ja prosessointitoiminnot pidetään mahdollisimman lähellä todellista tarvetta, voidaan vähentää käyttämättömiin tai vajaakäytöllä oleviin resursseihin liittyvää energiankulutusta (J. X. Salvat Lozano et al., 2025). Dynaamista mukautumista sovelletaan myös virtualisoitujen ja pilvipohjaisten verkkoarkkitehtuurien laskentaresursseihin. Verkkotoimintoja voidaan skaalata ylös- tai alaspäin liikennekuorman mukaan, jolloin laskentakapasiteettia ei tarvitse pitää jatkuvasti täysimääräisesti varattuna. Tutkimukset osoittavat, että tällainen dynaaminen skaalaus voi vähentää energiankulutusta sovittamalla laskentaresurssit paremmin todelliseen palvelukysyntään (J. Lorincz et al., 2026). Viimeaikaiset tutkimukset osoittavat myös, että dataliikennetilanteen huomioivat ohjausstrategiat voivat olla tehokkaampia kuin staattiset verkkokonfiguraatiot. Kun resurssien allokointia mukautetaan jatkuvasti havaittujen tai ennustettujen dataliikenneolosuhteiden perusteella, verkot voivat välttää sekä tiedonsiirto- että laskentaresurssien tarpeetonta käyttöä (Xiao Yao et al., 2025). Tämän vuoksi adaptiivinen ohjaus on tärkeä osa verkon kokonaisenergiatehokkuuden ja järjestelmän suorituskyvyn parantamista.

Ennustamisen merkitys kasvaa jatkuvasti tässä prosessissa. Tekoälyyn perustuvat ja dataohjautuvat menetelmät mahdollistavat liikennemäärien muutosten ennakkoinnin, jolloin verkot voivat mukauttaa toimintaansa aiempaa ennakoivammin (A. De Domenico et al., 2026). Tämä lyhentää viivettä kysynnän muutosten ja verkon reagoinnin välillä sekä parantaa mukautumisen tehokkuutta. Dynaamiseen mukautumiseen liittyy kuitenkin myös kompromisseja. Verkon kokoonpanon ja asetusten toistuvat muutokset voivat vaikuttaa palvelun jatkuvuuteen, viiveeseen ja järjestelmän vakauteen, mikäli niitä ei hallita huolellisesti. Lisäksi epätarkat liikenne-ennusteet voivat heikentää mukautumisella saavutettavia hyötyjä ja johtaa resurssien tehotomaan kohdentamiseen. Kokonaisuudessaan dynaaminen mukautuminen parantaa energiatehokkuutta vähentämällä verkkoon varatun kapasiteetin ja todellisen kysynnän välistä kuilua. Kun tiedonsiirto-, laskenta- ja infrastruktuuriresurssien käyttö

sovitetaan vastaamaan mahdollisimman tarkasti todellisia käyttöolosuhteita, voidaan tarpeetonta energiankulutusta vähentää samalla, kun verkon vaadittu suorituskyky ja palvelun laatu säilytetään.

5.3 Energiansäästötekniikoiden käyttö verkon osien yli

Kolmas suunnitteluperiaate on energiansäästötekniikoiden käyttö verkon eri osien yli. Energiatehokkuuden parantaminen edellyttää, että energiansäästötoimenpiteitä toteutetaan samanaikaisesti päätelaitteissa, radioliityntäverkossa, ydinverkossa sekä pilviympäristöissä sen sijaan, että keskityttäisiin ainoastaan yhteen verkon osaan. Verkkolaitteiden energiatehokkuutta tulisi tarkastella päästä päähän -näkökulmasta (NGMN, 2024a; NGMN, 2025b), ja koko verkkoa tulisi optimoida kokonaisuutena (NGA, 2023a). Kun tiedonsiirtoa, laskentaa ja datan kuljetusta tarkastellaan yhdessä, voidaan energiankulutusta vähentää tehokkaammin kuin yksittäisiä verkon osia erikseen optimoimalla (Narjes Lassoued et al., 2026) (J. Lorincz et al., 2026).

RAN-verkon on tunnistettu olevan verkon suurin energiankuluttaja, minkä vuoksi energiansäästötoimenpiteiden painopisteen tulisi kohdistua erityisesti siihen (GSMA Intelligence, 2026; A. De Domenico et al., 2026). Myös operaattoreiden ydinverkot sekä datakeskus- ja pilviympäristöt tarjoavat merkittäviä mahdollisuuksia energiankulutuksen vähentämiseen. Tämän vuoksi energiansäästötekniikoita on sovellettava useissa verkon osa-alueissa, joista kukin kohdistuu eri energiankulutuksen lähteisiin. Radioliityntäverkossa esimerkiksi epäjatkuva lähetys (discontinuous transmission), lepotilat (sleep modes), antennien vaimennus (antenna muting) ja lähetystehon säätö voivat vähentää energiankulutusta pienentämällä radio- ja kantataajuuskomponenttien aktiivisuutta matalan liikennekuorman aikana (Narjes Lassoued et al., 2026). Nämä menetelmät vähentävät suoraan tiedonsiirtoon liittyvää energiankulutusta, joka muodostaa suurimman osuuden verkon kokonaisenergiankulutuksesta (NGMN, 2024b) (Xiao Yao et al., 2025).

Ydinverkossa sekä pilvi-infrastruktuureissa energiatehokkuus riippuu pitkälti siitä, miten laskentakuormia hallitaan. Verkkotoimintojen siirtyessä yhä enemmän virtualisoituihin ja pilvipohjaisiin ympäristöihin energiankulutuksen painopiste siirtyy erillisistä verkkolaitteista yhteisiin laskentaresursseihin. Tämän vuoksi työkuormien tehokas kohdentaminen, resurssien konsolidointi sekä dynaaminen skaalautuminen ovat keskeisiä keinoja tämän siirtymän hallitsemiseksi ja tarpeettoman energiankulutuksen välttämiseksi (J. Lorincz et al., 2026; A. De Domenico et al., 2026). Tekoälyn hyödyntämisellä on tärkeä rooli energiansäästötoimien koordinoinnissa koko verkon tasolla. Liikennemalleja analysoivia ja kysyntää ennustavia AI/ML-algoritmeja voidaan käyttää esimerkiksi dynaamiseen taajuuksien hallintaan, häiriöiden vähentämiseen sekä energiatehokkaaseen verkkosuunnitteluun (NGA, 2023b; Nouri Omheni et al., 2025). Esimerkkeihin kuuluvat tekoälypohjaiset viestintäprotokollat, jotka toimivat useissa verkon kerroksissa samanaikaisesti (Chouksey, 2025). Tekoäly

voi lisäksi tukea vikojen palautumista, energian optimointia, optimaalista resurssien ajoitusta sekä verkkosuunnittelua (ITU-R, 2022).

5.4 Energiatehokkaan verkkoarkkitehtuurin suunnittelu

Neljäs suunnitteluperiaate on energiatehokkaan verkkoarkkitehtuurin suunnittelu. 5G-matkaviestintäverkon arkkitehtuuri muodostaa päästä päähän ulottuvan järjestelmän, joka koostuu toisiinsa liittyvistä osa-alueista kuten päätelaitteista, radioliityntäverkosta, ydinverkosta sekä operaattorin pilvi- ja datakeskusinfrastruktuurista (3GPP, 2022) (ITU-R, 2022). Tämä järjestelmätason rakenne määrittää, miten verkkotoiminnot jakautuvat verkossa sekä miten data ja ohjaussignaalit liikkuvat eri verkko-osien välillä. Samalla se vaikuttaa siihen, missä tiedonkäsittely, tiedonsiirto ja tallennus tapahtuvat sekä kuinka tehokkaasti resursseja hyödynnetään koko järjestelmässä (A. De Domenico et al., 2026) (Bhuvaneshwar Doorgakant et al., 2025). Vaikuttamalla siihen, missä käsittely, tiedonsiirto ja ohjaustoiminnot suoritetaan, verkkoarkkitehtuurilla on keskeinen merkitys resurssien käyttöön ja siten myös energiankulutukseen.

Verkon toiminnallinen rakenne perustuu verkkotoimintojen eriyttämiseen ja niiden väliseen vuorovaikutukseen. 5G-ydinverkossa palvelupohjainen arkkitehtuuri (Service-Based Architecture, SBA) mahdollistaa sen, että verkkotoiminnot tarjoavat palveluja toisilleen standardoitujen rajapintojen kautta (3GPP, 2022). Koska verkkotoiminnot voidaan ottaa käyttöön ja skaalata toisistaan riippumatta, laskentaresursseja voidaan kohdentaa tarkemmin todellista kysyntää vastaavasti, mikä parantaa resurssien käyttötehokkuutta. Radioliityntäverkossa arkkitehtuuri perustuu toimintojen jakamiseen eri verkkokomponenttien kesken. Kun tukiaseman toiminnot voidaan jakaa erillisiin yksiköihin, jotka voidaan sijoittaa toisistaan riippumatta (3GPP, 2022), voidaan myös laskentatehtävien sijoittelua muuttaa verkon sisällä. Toimintojen keskittäminen voi vähentää päällekkäisyyttä ja parantaa resurssien yhteiskäyttöä, mutta samalla se kasvattaa verkkosolmujen väliseen tiedonsiirtoon liittyviä vaatimuksia. Toimintojen hajauttaminen lähemmäs verkon reunaa puolestaan vähentää siirtotarvetta, mutta lisää paikallisten verkkosolmujen laskentakuormaa (Abir Laouadi et al., 2025) (Bhuvaneshwar Doorgakant et al., 2025).

Avoimet ja hajautetut arkkitehtuurit tuovat verkkoon lisää joustavuutta. "Open RAN" perustuu avoimiin rajapintoihin verkkokomponenttien välillä, mikä helpottaa verkkoelementtien modulaarista integrointia (Michele Polese et al., 2024). Tämä modulaarisuus tukee verkkotoimintojen riippumatonta käyttöönottoa ja skaalaamista, mutta voi samalla lisätä koordinointi- ja signalointikuormaa. Tämän seurauksena resursseja voidaan käyttää joustavammin, mutta ei välttämättä aina energiatehokkaammin (Sotiris Chatziiltis et al., 2025; Ahmed Al-Tahmeesschi et al., 2025). Toinen tärkeä suunnitteluratkaisu liittyy siihen, miten verkkotoiminnot sijoitetaan keskitettyihin ja hajautettuihin ympäristöihin. "Cloud RAN" ja reunalaskenta (edge computing) edustavat erilaisia lähestymistapoja laskentaresurssien

sijoittamiseen verkon sisällä (J. Lorincz et al., 2026). Keskitetyt arkkitehtuurit parantavat resurssien yhteiskäyttöä ja käyttöastetta, kun taas hajautetut arkkitehtuurit vähentävät tiedonsiirtotarvetta ja viivettä. Nämä valinnat määrittävät, missä energiantensiiviset tehtävät, kuten laskenta ja tiedonsiirto, toteutetaan (Bhuvaneshwar Doorgakant et al., 2025) (NGA, 2022a).

Reunalaskenta laajentaa tätä ajattelutapaa tuomalla tiedonkäsittelyn lähemmäs radioliityntäverkkoa. Multi-access edge computing (MEC) mahdollistaa sovellusten ja palveluiden suorittamisen verkon reunalla lähellä käyttäjiä (Shi-Yu Zhang et al., 2025). Tämä vähentää pitkien tiedonsiirtoreittien tarvetta, mutta samalla kasvattaa hajautettujen verkkosolmujen laskentakuormaa. Näin energiankulutus ei varsinaisesti poistu, vaan siirtyy verkon toiseen osaan. Verkkoviipalointi (network slicing) tuo verkkoarkkitehtuuriin lisäksi loogisen kerroksen, jonka avulla samalla fyysisellä infrastruktuurilla voidaan toteuttaa useita virtuaalisia verkkoja (3GPP, 2022). Tämä voi parantaa resurssien kohdentamista sovittamalla kapasiteetin tarkemmin eri palveluiden tarpeisiin. Toisaalta useiden loogisten verkkojen hallinta lisää järjestelmän hallinta- ja koordinoititarpeita, mikä voi vaikuttaa kokonaisenergiatohokkuuteen (Josip Lorincz et al., 2024) (M. Weng et al., 2025)

5.5 Uusiutuvan energian integrointi

Viides suunnitteluperiaate on uusiutuvan energian integrointi. Matkaviestinoperaattorit sitoutuvat yhä useammin nettonollapäästöihin, ja siirtymistä uusiutuvaan energiaan pidetään laajalti yhtenä tärkeimmistä keinoista vähentää verkkotoimintojen hiilijalanjälkeä (GSMA Intelligence, 2026). Tässä mielessä uusiutuvan energian integrointi on sekä operatiivinen toimenpide että strateginen painopiste. Kokonaisuudessaan uusiutuvan energian integrointi tukee verkkojen ympäristökestävyyttä vähentämällä riippuvuutta hiili-intensiivisestä sähköstä ja ylläpitämällä samalla toimintavarmuutta energian varastoinnin ja älykkään ohjauksen avulla.

Tämän vuoksi energiansyötön hiili-intensiteetin vähentäminen on keskeistä matkaviestintäverkkojen ympäristökestävyyden parantamisessa, mikä tekee uusiutuvan energian integroinnista tärkeää. Energiatohokkuuden parantaminen voi vähentää kokonaisenergiankulutusta, mutta verkkotoiminnan ympäristövaikutukset riippuvat edelleen käytetyn energian lähteestä. Viimeaikainen tutkimus pitää siirtymistä uusiutuvaan energiaan keskeisenä keinona vähentää matkaviestintäverkkojen kasvihuonekaasupäästöjä (A. De Domenico, 2026).

Osa operaattoreista on raportoinut hankkivansa kaiken käyttämänsä sähkön uusiutuvista energialähteistä (Deutsche Telekom, 2024) tai kehittävänsä ratkaisuja, jotka tukevat siirtymistä uusiutuvaan energiaan televiestintäverkoissa (Elisa, 2025; Telia, 2024). Nämä esimerkit osoittavat alan laajempaa siirtymää kohti vähähiilisempää verkkotoimintaa. Uusiutuvan energian integrointiin liittyy kuitenkin myös haasteita, sillä esimerkiksi aurinko- ja tuulivoimatuotanto ovat luonteeltaan vaihtelevia.

Tämä voi aiheuttaa epätasapainoa energian tarjonnan ja verkon kysynnän välille erityisesti silloin, kun energijärjestelmät muuttuvat hajautetummiksi. Tämän seurauksena televiestintäverkot tarvitsevat uusia energianhallintamenetelmiä, jotka kykenevät hallitsemaan vaihtelevuutta tehokkaammin (Y. Zhong et al., 2025). Energiavarastointijärjestelmillä on tässä keskeinen rooli. Akut voivat varastoida ylimääräistä uusiutuvaa energiaa ja tarjota varavoimaa tuotannon ollessa vähäistä, mikä parantaa toimintavarmuutta ja mahdollistaa uusiutuvan energian tehokkaamman hyödyntämisen (NGMN, 2023a). Uusiutuvia energialähteitä, energiavarastoja ja sähköverkkoa yhdistävät hybridijärjestelmät lisäävät myös verkkojen joustavuutta energiantuotannon ja kysynnän tasapainottamisessa.

Uusiutuvan energian integroinnin tehokkuutta voidaan edelleen parantaa älykkään energianhallinnan avulla. Koneoppimiseen perustuvat menetelmät ja optimointialgoritmit voivat auttaa ennustamaan sekä liikennekysyntää että uusiutuvan energian tuotantoa, jolloin energiankäyttö voidaan sovittaa paremmin saatavilla olevaan uusiutuvaan energiaan (K. Ukoba et al., 2024; A. De Domenico et al., 2026). Käytännössä tämä tarkoittaa, että energianhallintajärjestelmät voivat hyödyntää sääennusteita ja sähköverkon tilatietoja uusiutuvan energian käytön suunnittelussa ja optimoinnissa (A. De Domenico et al., 2026). Operatiivisten hyötyjen lisäksi uusiutuvan energian integrointi on tärkeää myös pitkän aikavälin kestävä kehityksen tavoitteiden saavuttamisessa.

5.6 Virtualisointi ja ohjelmisto-ohjattu kehittäminen

Kuudes suunnitteluperiaate on virtualisoinnin ja ohjelmisto-ohjatun kehittämisen hyödyntäminen. Virtualisointi ja ohjelmisto-ohjattu kehittäminen parantavat energiatehokkuutta mahdollistamalla laskentaresurssien tehokkaamman käytön ja vähentämällä riippuvuutta kiinteistä laitteistoratkaisuista. Sovittamalla laskentatoiminta paremmin kulloiseenkin kysyntään ja keskittämällä toimintoja yhteiselle infrastruktuurille nämä menetelmät mahdollistavat mukautuvamman ja energiatietoisemmän verkon toiminnan. Kiinteät laitteistopohjaiset toteutukset johtavat usein laskentaresurssien tehoittomaan käyttöön, minkä vuoksi virtualisointi ja ohjelmisto-ohjattu kehittäminen muodostavat keskeisen periaatteen energiatehokkuuden parantamisessa. Verkkotoimintojen irrottaminen valmistajakohtaisesta laitteistosta ja niiden toteuttaminen ohjelmistoina yhteisellä yleiskäyttöisellä infrastruktuurilla muuttaa sitä, miten kapasiteettia varataan ja hyödynnetään verkossa (NGMN, 2023a; J. Lorincz et al., 2026). Tämä mahdollistaa tehokkaamman toiminnan työkuormien yhdistämisen ja dynaamisen resurssien kohdentamisen avulla. Sen sijaan, että verkkotoiminnot suoritettaisiin erillisillä laitteilla, jotka ovat pitkiä aikoja vajaakäytöllä, virtualisoidut ympäristöt mahdollistavat useiden tehtävien suorittamisen samalla fyysisellä laitteistolla. Tutkimusten mukaan työkuormien keskittäminen pienemmälle määrälle palvelimia vähentää aktiivisten prosessointiyksiköiden kokonaismäärää, mikä puolestaan alentaa energiantarvetta (NGMN, 2023a; J. Lorincz et al., 2026).

Ohjelmisto-ohjattu kehittäminen lisää myös huomattavasti joustavuutta resurssien hallinnassa. Verkkotoimintoja voidaan ottaa käyttöön, skaalata tai siirtää tarpeen mukaan, mikä mahdollistaa laskentakapasiteetin paremman sovittamisen liikennekuormaan. Tämä vähentää tarpeetonta laskentaa hiljaisina ajanjaksoina (A. De Domenico et al., 2026; J. Lorincz et al., 2026). Yhdistettynä ohjelmisto-ohjattuihin verkkoihin (Software Defined Networking, SDN) tämä joustavuus mahdollistaa verkon resurssien keskitetyimmän hallinnan ja optimoinnin (J. Lorincz, 2026). Tämän lähestymistavan vaikutukset näkyvät erityisesti radioliityntäverkossa. Virtualisoitu RAN (vRAN) ja hajautetut arkkitehtuurit mahdollistavat tukiasematoimintojen suorittamisen yhteisillä laskenta-alustoilla erikoistuneen laitteiston sijaan. Tutkimukset osoittavat, että tämä voi parantaa resurssien käyttöastetta ja mahdollistaa laskentatehtävien joustavamman sijoittelun. Paikallisista olosuhteista riippuen toimintoja voidaan keskittää tai hajauttaa energian käytön optimoimiseksi eri verkkokohteissa (A. Kalia et al., 2025).

Virtualisointiin liittyy kuitenkin myös kompromisseja. Yleiskäyttöiset palvelimet voivat olla tietyissä suurta suorituskykyä vaativissa tehtävissä vähemmän tehokkaita kuin erikoistunut laitteisto, ja virtualisoitujen ympäristöjen hallintaan liittyvä ylimääräinen käsittelykuorma voi osittain kumota saavutettavat energiansäästöt. Lisäksi näitä toimintoja tukevat datakeskukset kuluttavat huomattavia määriä energiaa sekä laskentaan että jäähdytykseen, jolloin energiankulutus siirtyy erillisistä verkkolaitteista keskitettyyn pilvi-infrastruktuuriin (A. De Domenico et al., 2026). Näistä haasteista huolimatta siirtyminen kohti ohjelmisto-ohjattua kehittämistä ohjaa toimialaa kohti joustavampaa ja tehokkaampaa toimintaa. Mahdollistamalla resurssien dynaamisen kohdentamisen, vähentämällä laitteistojen päällekkäisyyttä ja tukemalla keskitettyä optimointia nämä ratkaisut tarjoavat keinon energiatehokkuuden parantamiseen, mikäli niitä hallitaan tehokkaasti (NGMN, 2024a; J. Lorincz et al., 2026).

5.7 Jäähdytyksen ja lämmönhallinnan tehostaminen

Seitsemäs suunnitteluperiaate on jäähdytyksen ja lämmönhallinnan tehostaminen. Lämmönhallinta muodostaa merkittävän piilokustannuksen matkaviestintäverkoissa, sillä huomattava osa kokonaisenergiankulutuksesta liittyy laitteiden tuottaman lämmön poistamiseen. Prosessointitehon ja liikennekuormien kasvaessa myös radiolaitteiden, kantataajuuskäsittelyn ja laskentalaitteistojen tuottama lämpö lisääntyy, mikä kasvattaa jäähdytystarvetta (NGMN, 2023a; T. Dbouk et al., 2025; A. De Domenico et al., 2026). Jäähdytyksen tehokkuus on siten merkittävä tekijä verkon kokonaisenergiatehokkuuden kannalta. Parempi lämmönhallinta parantaa energiatehokkuutta vähentämällä suoraan lämmön poistamiseen tarvittavaa energiankulutusta. Energiatehokkaiden laitteistoratkaisujen ja lämpötilatietoisten käyttömenetelmien yhdistäminen mahdollistaa verkon energiankulutuksen vähentämisen samalla, kun laitteiston luotettavuus säilyy (NGMN, 2023a; A. De Domenico et al., 2026).

Jäähdytyksen ja lämmönhallinnan tehostaminen edellyttää sekä aktiivisen jäähdytyksen tarpeen vähentämistä että lämmönpoistoon käytettävien teknologioiden kehittämistä. Yksi merkittävimmistä menetelmistä on vapaa jäähdytys (free cooling), jossa lämmön poistamiseen hyödynnetään ympäristöolosuhteita, kuten ulkoilmaa tai alhaisia lämpötiloja. Mekaanisen ilmastoinnin tarpeen vähentyessä myös lämmönhallinnan energiankulutus pienenee merkittävästi (ITU-T, 2022). Menetelmän tehokkuus riippuu kuitenkin maantieteellisestä sijainnista ja ilmasto-olosuhteista, mikä voi rajoittaa sen käyttöä lämpimillä tai kosteilla alueilla (Dlzar Al Kez et al., 2025). Nestejäähdytys tarjoaa vaihtoehdon erityisesti suuren tehotehyyden ympäristöissä, kuten datakeskuksissa. Koska nesteet johtavat lämpöä huomattavasti ilmaa tehokkaammin, niillä voidaan poistaa lämpöä tehokkaammin tiheästi sijoitetuista laskentakomponenteista (NGMN, 2023a; D. Zhou et al., 2025). Tämä auttaa ylläpitämään turvallisia käyttölämpötiloja myös silloin, kun prosessorit toimivat jatkuvasti suurella kuormituksella.

Fyysisten jäähdytysratkaisujen lisäksi myös lämpötilatietoinen käyttö on tärkeää. Jakamalla työkuormia strategisesti voidaan välttää paikallisten lämpöpiikkien muodostumista ja vähentää jäähdytysjärjestelmiin kohdistuvaa kuormitusta (NGMN, 2024a). Tämä osoittaa, että jäähdytyksen tehokkuus riippuu sekä laitteiston suorituskyvystä että siitä, miten verkon resursseja ajoitetaan ja hyödynnetään. Vapaa jäähdytys pidentää myös laitteiden käyttöikää vähentämällä komponentteihin kohdistuvaa lämpörasitusta. Pienempi vikataajuus parantaa epäsuorasti energiatehokkuutta vähentämällä laitteiden vaihtotarvetta ja siitä aiheutuvaa ympäristökuormitusta (A. De Domenico et al., 2026). Näihin parannuksiin liittyy kuitenkin myös kompromisseja. Kehittyneet menetelmät, kuten nestejäähdytys, lisäävät usein järjestelmien monimutkaisuutta ja käyttöönoton kustannuksia (D. Zhou et al., 2025). Passiiviset menetelmät, kuten vapaa jäähdytys, puolestaan ovat riippuvaisia paikallisista ympäristöolosuhteista (NGMN, 2024a; Dlzar Al Kez et al., 2025).

Tekoäly voi tukea jäähdytyksen ja lämmönhallinnan optimointia. AI-pohjaiset ohjausjärjestelmät voivat säätää jäähdytyksen voimakkuutta dynaamisesti reaaliaikaisten työkuormien, sisäisten lämpötilakarttojen ja sääolosuhteiden perusteella (Xiyong Li et al., 2025; Shrenik Jadhav et al., 2026). Datakeskuksissa koneoppimiselle hyödynnetään jo ilmavirtojen hallinnan parantamiseen sekä lämpötilahuippujen ennustamiseen ennen niiden syntymistä. Tämä viittaa siihen, että lämmönhallinta on siirtymässä pelkästään fyysisistä ratkaisuista kohti älykkäämpiä, dataohjautuvia optimointimenetelmiä.

5.8 Elinkaareen perustuva suunnittelu

Kahdeksas suunnitteluperiaate on elinkaareen perustuvan suunnittelun omaksuminen. Matkaviestinverkkojen ympäristövaikutusten arviointi edellyttää energiankulutuksen ja päästöjen huomioimista koko elinkaaren ajan (A. Furberg et al., 2026). Energiatehokkuutta tulee tarkastella verkon koko elinkaaren näkökulmasta aina raaka-aineiden hankinnasta valmistukseen, käyttöön, käytöstä

poistamiseen ja kierrätykseen saakka. Verkkolaitteet toimivat jatkuvasti, ja niiden käytön aikainen vaihe aiheuttaa suurimman osan päästöistä (L. Williams et al., 2022; NGMN, 2021b). Verkkolaitteiden sisältämän energian määrää on vähennettävä jo raaka-aineiden hankintavaiheessa. Samoin valmistusprosessien energiankulutusta tulee pienentää käyttämällä energiatehokkaita tuotantomenetelmiä erityisesti puolijohdevalmistuksessa ja energiantensiivisten komponenttien tuotannossa (NGMN, 2021b).

Elinkaaren loppuvaiheella tarkoitetaan vaihetta, jossa laitteet poistetaan käytöstä. Tällöin ne voidaan kunnostaa uudelleenkäyttöä varten, purkaa varaosiksi tai kierrättää materiaalien hyödyntämiseksi. Laitteiden käyttöiän pidentäminen vähentää uusien laitteiden valmistustarvetta, jolloin vältetään raaka-aineiden louhintaan, jalostukseen ja tuotantoon liittyvä energiankulutus. Vanhojen laitteiden korvaamista uudemmilla ja energiatehokkaammilla ratkaisuilla tulee arvioida tapauskohtaisesti, sillä uusien laitteiden käytönaikaiset energiansäästöt voivat olla suurempia kuin vanhojen, energiantensiivisten laitteiden käytöstä aiheutuva energiankulutus (NGMN, 2024a).

Pelkästään käytönaikaisen vaiheen tarkasteleminen antaa puutteellisen kuvan verkon energiatehokkuudesta, minkä vuoksi elinkaaren perustuva suunnittelu on keskeinen periaate pitkän aikavälin ympäristökestävyyden saavuttamiseksi. Koska matkaviestinverkot kuluttavat energiaa koko elinkaarensa ajan raaka-aineiden hankinnasta valmistuksen kautta käytöstä poistamiseen, energiatehokkuutta on tarkasteltava koko elinkaaren näkökulmasta eikä ainoastaan käyttövaiheen osalta (NGMN, 2021b; NGMN, 2024b). Tämä lähestymistapa näkyy yhä vahvemmin myös eurooppalaisissa sääntelykehyksissä. Esimerkiksi EU:n Ekosuunnitteludirektiivi (EU Ecodesign Directive) (EU, 2024a) ja EU:n Ekosuunnittelua koskeva asetus (EU Ecodesign for Sustainable Products Regulation) (EU, 2024b) edellyttävät energiatehokkuuden, kestävyiden ja kierrätettävyyden huomioimista jo suunnitteluvaiheessa. Lisäksi EU:n Kiertotalouden toimintasuunnitelma (EU Circular Economy Action Plan) (European Commission, 2020) korostaa resurssien käytön vähentämisen ja tuotteiden käyttöiän pidentämisen merkitystä. Yhdessä nämä sääntelykehykset osoittavat, että elinkaarinäkökohdat ovat keskeisessä asemassa kestävyiden edistämisessä. Elinkaaren eri vaiheiden merkitys on myös muuttunut. Vaikka käyttövaihe on pitkään ollut huomion keskipisteenä, viimeaikaiset tutkimukset osoittavat, että laitteisiin sitoutuneen energian (embodied energy) merkitys kasvaa käyttöaikaisen energiatehokkuuden parantuessa (L. Williams et al., 2022). Tämän vuoksi energiankulutusta on vähennettävä myös materiaalien käsittelyssä ja laitteiden valmistuksessa.

Materiaali- ja valmistusvaiheissa energiankulutus syntyy pääasiassa raaka-aineiden hankinnasta ja komponenttien valmistuksesta. Tätä voidaan vähentää materiaalitehokkuudella, kierrätettyjen materiaalien käytöllä ja puhtaammilla valmistusprosesseilla (NGMN, 2024b). Näin laitteiden sisältämän energian määrä pienenee jo ennen niiden käyttöönottoa. Käyttövaiheessa energiatehokkuus säilyy tärkeänä jatkuvan verkkotoiminnan vuoksi. Liikennekuorman mukauttaminen, virtualisointi ja jäähdytyksen optimointi ovat edelleen keskeisiä keinoja energiankulutuksen vähentämiseksi (NGMN,

2021a; NGMN, 2024a) (Adrian Ichimescu et al., 2024). Suunnittelussa on kuitenkin vältettävä tilannetta, jossa käyttöaikaisia energiansäästöjä tavoitellaan muiden elinkaarivaiheiden kustannuksella.

Myös käytöstä poistamisen vaihe on merkittävä sääntelyn kohde. EU:n Sähkö- ja elektroniikkaromudirektiivi (EU Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Directive) (EU, 2012) kannustaa sähkö- ja elektroniikkalaitteiden uudelleenkäyttöön sekä materiaalien kierrätykseen. Laitteiden käyttöiän pidentäminen kunnostamisen avulla on erityisen tehokas keino vähentää uusien laitteiden valmistustarvetta ja välttää korvaavien laitteiden tuotantoon liittyvä energiankulutus (L. Williams et al., 2022; NGMN, 2021b). Elinkaareen perustuva suunnittelu edellyttää lopulta eri vaihtoehtojen välisten kompromissien arviointia. Vaikka uudemmat laitteet voivat tarjota paremman käyttöaikaisen energiatehokkuuden, näitä hyötyjä on tarkasteltava suhteessa uuden laitteiston valmistukseen ja käyttöönottoon sitoutuvaan energiaan (NGMN, 2024b). Tekoäly voi tukea päätöksentekoa ennakoivan kunnossapidon ja paremman omaisuudenhallinnan avulla tunnistamalla laitteiden heikkenemisen varhaisessa vaiheessa, mikä voi pidentää laitteiden käyttöikää ja lykätä ennenaikaisen korvaamisen tarvetta (Taimia Bitam et al., 2025).

6

Johtopäätökset

VISIIRI.



Co-funded by
the European Union

6 Johtopäätökset

Tässä raportissa on tarkasteltu menetelmiä energiatehokkuuden parantamiseen matkaviestinverkoissa. Matkaviestinverkkojen kehitys sukupolvesta toiseen on lisännyt dataliikennettä, mikä on johtanut verkkojen energiankulutuksen kasvuun. Raportissa on esitetty, kuinka energiatehokkuutta voidaan parantaa matkaviestintäverkoissa eri teknologioiden avulla, kuten AI/ML-optimoinnin, sammutusominaisuuksien, lähes nollaenergiaa käyttävän viestinnän, energian talteenoton, energianhallintajärjestelmien, radioliityntäverkon yhteiskäytön, reunalaskennan, virtualisoinnin, tavoiteperusteisen hallinnan sekä jäähdytysteknologioiden avulla.

Raportissa on lisäksi tunnistettu, kuinka matkaviestintäverkkoja voidaan suunnitella energiatehokkaammiksi esittämällä kahdeksan suunnitteluperiaatetta, joita tulisi hyödyntää matkaviestintäverkkojen suunnittelussa. Nämä suunnitteluperiaatteet kattavat energiatehokkaiden laitteiden ja infrastruktuurin suunnittelun, dynaamisen mukautumisen liikennekysyntään, energiansäästötekniikoiden soveltamisen, energiatehokkaan verkkoarkkitehtuurin suunnittelun, uusiutuvien energialähteiden integroinnin, virtualisoinnin ja ohjelmisto-ohjatun kehittämisen hyödyntämisen, jäähdytyksen ja lämmönhallinnan tehostamisen sekä elinkaareen perustuvan suunnittelun omaksumisen.

Yhteenvedona tämä raportti tarjoaa matkaviestinverkko-operaattoreille, verkkoinfrastruktuurin toimittajille ja muille sidosryhmille keinoja, tekniikoita ja suunnittelun lähestymistapoja, joiden avulla matkaviestinverkkojen energiatehokkuutta ja ympäristökestävyyttä voidaan parantaa. Yhteistyö matkaviestinverkko-operaattoreiden, laitevalmistajien, standardointi- ja sääntelyorganisaatioiden, energiantoimittajien sekä tutkijoiden välillä tukee energiatehokkuuden kehittämistä sekä samalla teknologista kehitystä, tehokasta palveluntuotantoa ja ympäristökestävyyttä.

7

Lähteet



VISIIRI.



Co-funded by
the European Union

Lähteet

(3GPP, 2022)	3GPP, "5G System Overview," 2022. https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview
(3GPP, 2025)	3GPP, "Energy Efficiency in 3GPP Technologies," 2025. https://www.3gpp.org/technologies/ee-article
(5G Americas, 2023)	5G Americas, "Energy Efficiency and Sustainability in Mobile Communications Networks". Bellevue, WA, USA: 5G Americas, 2023. https://5gamericas.org/wp-content/uploads/2023/12/Energy-Efficiency-and-Sustainability-in-Mobile-Communications-Networks-WP.pdf
(A. De Domenico et al, 2026)	A. De Domenico, N. Piovesan, X. Zhou, X. Li, M. Olsson, and X. Chen, "Advancing green mobile networks," Nature Communications, vol. 17, no. 1, p. 3221, Apr. 2026, doi: 10.1038/s41467-026-71562-1 https://www.nature.com/articles/s41467-026-71562-1
(A. Furberg et al, 2026)	A. Furberg et al., "Guidelines for Assessments of the Global Information and Communication Technology Sector's Direct Energy Use and Climate Impact: Key Aspects and Future Scenarios," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 226, 2026. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032125008494
(A. Kalia et al, 2025)	A. Kalia et al., "Towards Energy Efficient 5G vRAN Servers," in Proc. USENIX NSDI, 2025. https://www.usenix.org/system/files/nsdi25-kalia.pdf
(Adrian Ichimescu et al, 2024)	A. Ichimescu et al., "Energy Efficiency for 5G and Beyond 5G: Potential, Limitations, and Future Directions," 2024. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11598088/
(Ahmed Al-Tahmeesschi et al, 2025)	Ahmed Al-Tahmeesschi, Yi Chu, Gurdeep Singh, Charles Turyagyenda, Dritan Kaleshi, David Grace, Hamed Ahmadi, "Maximising Energy Efficiency in Large-Scale Open RAN", 2025 https://arxiv.org/abs/2509.10097
(Brundtland, 1987)	G. Brundtland, "Our Common Future". Oxford, U.K.: Oxford University Press, 1987. http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf
(Bhuvaneshwar Doorgakan et al, 2025)	Bhuvaneshwar Doorgakany, Tulsi Pawan Fowdur, Mobayade O. Akinsolu, "End-to-end power models for 5G RAN architectures with a perspective on 6G", 2025 https://www.mdpi.com/2227-7390/13/3/466
(Chouksey RR, 2025)	Chouksey RR, "AI-Driven Energy-Efficient and Secure Communication Protocol for 5G and 6G Networks", 2025 https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=11086052

(D. Zhou et al, 2025)	D. Zhou et al., "Accelerating Liquid Cooling Adoption in Data Centres: Necessity, Challenges and Solutions," Technology Review for Carbon Neutrality, vol. 1, 2025. https://www.sciopen.com/article/10.26599/TRCN.2025.9550014
(Deutsche Telekom, 2024)	Deutsche Telekom, "Corporate Responsibility Report 2024", 2024. https://report.telekom.com/cr-report/2024/_assets/downloads/entire-dtag-cr24.pdf
(Dlzar Al Kez et al, 2025)	D. Al Kez, A. M. Foley, F. W. B. M. H. Wong, A. Dolfi, and G. Srinivasan, "AI-driven cooling technologies for high-performance data centres: state-of-the-art review and future directions," Sustain. Energy Technol. Assess., vol. 82, p. 104511, 2025, doi: 10.1016/j.seta.2025.104511. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221313882500342X
(ECO, 2022)	ECO, "Policy Briefing – The Impact of Green Policies on the Internet Infrastructure Industry," 2022. https://international.eco.de/event/policy-briefing-the-impact-of-green-policies-on-the-internet-infrastructure-industry/
(Eilaf MA Babai et al, 2025)	E. M. Babai et al., "Which Deep Learner? A Systematic Evaluation of Advanced Deep Forecasting Models Accuracy and Efficiency for Network Traffic Prediction," 2025. https://arxiv.org/pdf/2601.02694
(ELisa, 2025)	Elisa, "Elisa Annual Report", 2025. https://static.elisa.com/v2/image/2tqybbhjs47b/4X1mA7vtwlpAw693BjgPdy/Elisa_AnnualReport_2025.pdf
(Elkington, 1997)	J. Elkington, "Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business", 1997. https://johnelkington.com/archive/TBL-elkington-chapter.pdf
(Ericsson, 2022)	Ericsson, "On the Road to Breaking the Energy Curve". Stockholm: Ericsson, 2022. https://www.ericsson.com/4aa14d/assets/local/about-ericsson/sustainability-and-corporate-responsibility/documents/2022/breaking-the-energy-curve-report.pdf
(Ericsson, 2024)	Ericsson, "Build an energy-efficient core network", 2024 https://www.ericsson.com/en/core-network/energy-efficiency
(ETSI, 2014)	ETSI, "Network Function Virtualization (NFV); Architectural Framework," 2014. https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/NFV/001_099/002/01.02.01_60/gs_NFV002v010201p.pdf
(ETSI, 2023)	ETSI, "ETSI GS MEC 002 V3.1.1 Multi-access Edge Computing (MEC): Use Cases and Requirements," 2023. https://cdn.standards.iteh.ai/samples/63524/9aef3341973c41d98fb166f1a21164a3/ETSI-GS-MEC-002-V3-1-1-2023-04-.pdf
(EU, 2012)	Euroopan parlamentti, "EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI 2012/19/EU, annettu 4 päivänä heinäkuuta 2012, sähkö- ja " Euroopan unionin virallinen lehti, elokuu 2012. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32012L0019

(EU, 2024a)	European Union, "Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council," 2024. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32009L0125
(EU, 2024b)	Euroopan parlamentti, "Kestävien tuotteiden ekologiselle suunnittelulle asetettävien vaatimusten puitteista," Euroopan unionin virallinen lehti, 2024. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401781
(European Commission, 2019)	European Commission. (2019). Commission Regulation (EU) 2019/424 of 15 March 2019 laying down eco-design requirements for servers and data storage products pursuant to Directive 2009/125/EC and amending Commission Regulation (EU) No 617/2013. Euroopan unionin virallinen lehti, L 74, 46–66. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/424/oj/eng
(European Commission, 2020)	European Union, "A New Circular Economy Action Plan," EUR-Lex, n.d. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN
(European Commission, 2026)	European Commission, "The European Green Deal," 2026. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
(European Commission, 2026)	European Commission, "A New Circular Economy Action Plan: For a Cleaner and More Competitive Europe," 2020. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52020DC0098
(Francisco Crespo et al, 2025)	F. Crespo et al., "Energy-Aware CPU Orchestration in O-RAN: A dApp-Driven Lightweight Approach," 2025. https://arxiv.org/pdf/2508.00629
(GSMA Intelligence, 2026)	GSMA Intelligence, "Going Green: Measuring the Energy Efficiency of Mobile Networks and Towers", 2026. https://www.gsmainelligence.com/research/research-file-download?reportId=78352&assetId=78356
(GSMA, 2021)	GSMA, "Going Green: Benchmarking Energy Efficiency of Mobile Networks". London: GSMA, 2021. https://www.gsmainelligence.com/research/research-file-download?id=60621137&file=300621-Going-Green-efficiency-mobile.pdf
(GSMA, 2023)	GSMA, "Mobile Net Zero: State of the Industry on Climate Action 2023", 2023. https://www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/external-affairs/wp-content/uploads/2023/02/Mobile-Net-Zero-%E2%80%93-State-of-the-Industry-on-Climate-Action-2023.pdf
(GSMA, 2024)	GSMA, "Mobile Net Zero 2024: State of the Industry on Climate Action," GSM Association, London, United Kingdom, 2024 https://www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/external-affairs/wp-content/uploads/2024/02/Mobile-Net-Zero-2024-State-of-the-Industry-on-Climate-Action.pdf
(GSMA, 2025b)	GSMA, "Mobile Net Zero: State of the Industry on Climate Action 2025", Jun. 2025. Mobile Net Zero 2025 State of the Industry on Climate Action

(Hexa-X-II, 2023)	Hexa-X-II, "Environmental, Social and Economic Drivers and Goals for 6G", 2023. https://hexa-x-ii.eu/wp-content/uploads/2023/07/Hexa-X-II_D1.1_final-website.pdf
Hexa X II, 2025	Deliverable D2.5: "Final overall 6G system design", 2025 https://hexa-x-ii.eu/wp-content/uploads/2025/04/Hexa-X-II_D2.5_Final_v1.0.pdf
(Huawei, 2021)	Huawei, Green 5G White Paper. Shenzhen: Huawei, 2021. https://www-file.huawei.com/dam/asset/view/54cedbd244584d40a98d90f29265522c.pdf
(IEA, 2025a)	IEA, "Data Centre Energy Use: Critical Review of Models and Results", 2025. https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/2025/05/Data-Centre-Energy-Use-Critical-Review-of-Models-and-Results.pdf
(IEA 2025b)	IEA, "Energy and AI", 2025 https://iea.blob.core.windows.net/assets/de9dea13-b07d-42c5-a398-d1b3ae17d866/EnergyandAI.pdf
(ITU-R, 2022)	ITU-R, "Future Technology Trends of Terrestrial International Mobile Telecommunications Systems Towards 2030 and Beyond". Geneva: ITU-R, 2022. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2516-2022-PDF-E.pdf
(ITU-T, 2016)	ITU-T, "Green ICT Solutions for Telecom Network Facilities", ITU-T Recommendation L.1325: 2016. https://www.itu.int/rec/T-REC-L.1325-201612-I
(ITU-T, 2022)	ITU-T, "Energy Saving Technologies and Best Practices for 5G Radio Access Network (RAN) Equipment". Geneva: ITU-T, 2022. https://www.itu.int/epublications/zh/publication/itu-t-l-1390-2022-08-energy-saving-technologies-and-best-practices-for-5g-radio-access-network-ran-equipment/en
(ITU-T, 2015)	ITU-T, "Energy efficiency measurement and metrics for telecommunication networks," Recommendation ITU-T L.1330, International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, Mar. 2015 https://www.itu.int/rec/T-REC-L.1330-201503-I/en
(ITU/WB, 2024)	ITU/WB, "Measuring the Emissions and Energy Footprint of the ICT Sector," 2024. https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Documents/Publications/2024/ITU-World%20Bank%20Measuring%20the%20Emissions-Energy%20Footprint%20of%20the%20ICT%20Sector%202024.pdf
(ITU and WBA, 2025)	ITU and WBA, "Greening Digital Companies 2025: Monitoring Emissions and Climate Commitments", Geneva, Switzerland, and Amsterdam, Netherlands: International Telecommunication Union (ITU) and World Benchmarking Alliance (WBA), 2025 https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Documents/Publications/2025/ITU-WBA-Greening-Digital-Companies-2025.pdf
(J. Lorincz, 2026)	J. Lorincz et al., "Mobile Network Softwarization: Technological Foundations and Impact on Improving Network Energy Efficiency," 2026. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12846110/
(J. X. Salvat Lozano et al, 2025)	J. X. Salvat Lozano et al., "Kairos: Energy-Efficient Radio Unit Control for O-RAN via Advanced Sleep Modes," in Proc. IEEE INFOCOM, 2025. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=11044736

(Jibum Hong et al, 2025)	J. Hong et al., "A Comprehensive Survey on LLM-Based Network Management and Operations," 2025. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/nem.70029
(Josip Lorincz et al., 2024)	J. Lorincz et al., "A Comprehensive Overview of Network Slicing for Improving the Energy Efficiency of Fifth-Generation Networks," 2024. https://www.mdpi.com/1424-8220/24/10/3242
(K. Ukoba et al, 2024)	K. Ukoba et al., "Optimizing Renewable Energy Systems through Artificial Intelligence: Review and Future Prospects," Energy and Environment, SAGE, 2024. https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0958305X241256293
(L. Williams et al, 2022)	L. Williams et al., "The Energy Use Implications of 5G: Reviewing Whole Network Operational Energy, Embodied Energy, and Indirect Effects," 2022. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121012958
(M. Weng et al, 2025)	M. Weng et al., "A Power-Aware 5G Network Slicing Scheme for IIoT Systems with Age Tolerance," Sensors, vol. 25, no. 22, p. 6956, Nov. 2025. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12656179/
(Martins Odiamenhi et al, 2024)	M. Odiamenhi et al., "Advancements and Challenges in Antenna Design and Rectifying Circuits for Radio Frequency Energy Harvesting," 2024. https://www.mdpi.com/1424-8220/24/21/6804
(Michele Polese et al, 2023)	M. Polese, M. Dohler, and F. D.-K., "Empowering the 6G Cellular Architecture with Open RAN," 2023. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10329947
(Miha Pipan et al, 2026)	M. Pipan, M. Šimic, and N. Heraković, "Performance Benchmarking of 5G SA and NSA Networks for Wireless Data Transfer," J. Sens. Actuator Netw., vol. 15, no. 1, p. 18, Feb. 2026, doi: 10.3390/jsan15010018.: https://www.mdpi.com/2224-2708/15/1/18
(Muhammad Ilyas Khattak et al, 2025)	M. I. Khattak et al., "Evolving Multi-Access Edge Computing (MEC) for Diverse Ubiquitous Applications," 2025. https://link.springer.com/article/10.1007/s11235-025-01310-1
(NGA, 2022a)	NGA, "Green G: The Path Toward Sustainable 6G". Washington, DC: Next G Alliance, 2022. https://nextgalliance.org/white_papers/green-g-the-path-towards-sustainable-6g/
(NGA, 2023a)	ATIS Next G Alliance, "Sustainable 6G Connectivity: A Powerful Means of Doing Good", Washington, DC, 2023. https://nextgalliance.org/white_papers/sustainable-6gconnectivity-a-powerful-means-ofdoing-good/
(NGA, 2023b)	NGA, "Sustainable AI for Telecommunication". Washington, DC: Next G Alliance, 2023. https://nextgalliance.org/white_papers/sustainable-ai-in-telecompromises-and-challenges-in-6g/

(NGA, 2023c)	NGA, "6G Technologies". Washington, DC: Next G Alliance, 2022. https://nextgalliance.org/white_papers/6g-technologies/
(NGMN 2021a)	NGMN, "Network Energy Efficiency". Frankfurt: NGMN, 2021. https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/211009-GFN-Network-Energy-Efficiency-1.0.pdf
(NGMN, 2021b)	NGMN, "Green Future Networks: Network Equipment Eco-Design and End-to-End Service Footprint", 2021. https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/210719-NGMN-Green-future-Networks-Eco-design-v1.0.pdf
(NGMN, 2023a)	NGMN, "Network Energy Efficiency Phase 2". Frankfurt: NGMN, 2023. https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN-Network-Energy-Efficiency-Phase2.pdf
(NGMN, 2023b)	NGMN, "Network Energy Efficiency Phase 3A". Frankfurt: NGMN, 2023. https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/231204-NGMN-NEE-Phase-3A.pdf
(NGMN, 2024a)	NGMN, "Green Future Networks: A Roadmap to Energy Efficient Mobile Networks", 2024. https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/GFN-Energy-Efficiency-Roadmap-V1.0.pdf
(NGMN, 2024b)	NGMN, "Reducing Environmental Impact: Best Practices and Recommendations". Düsseldorf: NGMN, 2024. https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/GFN-Reducing-Environmental-Impact.pdf
(NGMN, 2025a)	NGMN, "Energy Management and Flexibility", 2025. https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/2507-NGMN-GFN-Energy-Management-and-Flexibility-in-Mobile-Networks-v1.0.pdf
(NGMN, 2025b)	NGMN, "Green Future Networks: Metering in RAN Transport Networks". Frankfurt: NGMN, 2025. https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/2512-Metering-in-RAN-Transport-Networks-v1.0.pdf
(Nokia, 2023)	Nokia, "Energy Efficiency in Next-Generation Mobile Networks", 2023. https://www.nokia.com/asset/i/212810/
(Nouri Omheni et al, 2025)	N. Omheni, H. Koubaa and F. Zarai, "Artificial intelligence for 5G and 6G networks: A taxonomy-based survey of applications, trends, and challenges", 2025 https://www.mdpi.com/2227-7080/13/12/559
(O-RAN, 2021)	O-RAN Alliance, "O-RAN Minimum Viable Plan and Acceleration", 2021. https://mediastorage.o-ran.org/white-papers/O-RAN-Minimum-Viable-Plan-and-Acceleration-towards-Commercialization-white-paper-2021-06.pdf
(Peter Sevcik et al, 2025)	P. Sevcik et al., "Self-Sustaining Operations with Energy Harvesting Systems," 2025. https://www.mdpi.com/1996-1073/18/17/4467

(R. Citroni et al, 2025)	R. Citroni et al., "Efficient Integration of Ultra-Low Power Techniques and Energy Harvesting in Self-Sufficient Devices: A Comprehensive Overview of Current Progress and Future Directions," 2024. https://www.mdpi.com/1424-8220/24/14/4471
(Rajkumar Buyya et al, 2025)	R. Buyya et al., "Energy-Efficiency and Sustainability in New Generation Cloud Computing: A Vision and directions for integrated management of data centre resources and workloads" 2025. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/spe.3248
(Salma Tika et al, 2025)	S. Tika et al., "Where 6G Stands Today," 2025. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=11313438
(Shi-Yu Zhang et al, 2025)	S.-Y. Zhang et al., "Optimal Multi-Access Edge Computing System Deployment in Private 5G Networks for Multi-Story Construction Sites," 2025. sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804525002814/pdf?md5=5f049c430c52810eba5d4775dfcdafae&pid=1-s2.0-S1084804525002814-main.pdf
(Sotiris Chatzimiltis et al, 2025)	Sotiris Chatzimiltis, Mohammad Shojafar, Mahdi Boloursaz Mashhadi, Rahim Tafazolli, "Surviving the storm: The impacts of Open RAN disaggregation on latency and resilience", 2025 https://arxiv.org/pdf/2505.00605
(SUSTAIN 6G, 2025)	SUSTAIN-6G, "D3.1 6G Technology Sustainability Inventory and Gap Analysis", 2025. https://zenodo.org/records/19365685
(T Dbouk et al, 2025)	T. Dbouk, O. Mourad. "A Review on Thermal Management and Heat Dissipation Strategies for 5G and 6G Base Stations: Challenges and Solutions" https://www.mdpi.com/1996-1073/18/6/1355
(Taehyoun g Kim et al, 2020)	T. Kim et al., "Evolution of Power Saving Technologies for 5G New Radio," 2020. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9246536
(Taimia Bitam, 2025)	Taimia Bitam et al, "Artificial intelligence of things for next-generation predictive maintenance", 2025 https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12737171/
(Telia, 2024)	Telia, "Telia Sustainability Report 2024", 2024. https://www.telia.ee/images/documents/TELIA_raport_ENG_2024.pdf
(Tingwei Chen et al, 2025)	T. Chen, et al, "Modelling the 5G energy consumption using real-world data: Energy fingerprint is all you need," in Proc. IEEE Global Communications Conference Workshops, Taipei, Taiwan, Dec. 2025 https://arxiv.org/pdf/2406.16929
(Toufiquil Islam et al, 2023)	T. Islam et al., "Enabling Network Power Savings in 5G-Advanced and Beyond," 2023. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10121451
(UN, 2026)	United Nations, "The 17 Goals," 2026. https://sdgs.un.org/goals

(UNFCCC, 2026)	UNFCCC, "The Paris Agreement," 2026. https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement
(Xiao Yao et al, 2025)	X. Yao et al., "A Comprehensive Survey of Energy Saving Techniques in 5G RAN," 2025. https://www.techrxiv.org/doi/full/10.36227/techrxiv.175977235.54366216/v1
(Y. Zhong et al, 2025)	Y. Zhong et al., "Integrating Distributed Photovoltaic and Energy Storage in 5G Networks for Sustainable IoT Applications," Discover Internet of Things, Springer Nature, Feb. 2025. https://link.springer.com/article/10.1007/s43926-025-00105-9

VISIIRI – Vihreän siirtymän ICT-ekosysteemi

Green ICT -hanke VISIIRI luo kokonaiskuvan Suomen ICT-alan vaikutuksista ilmastoon ja ympäristöön. Hanke tukee ICT-alan vihreää siirtymää yhdistämällä alan toimijat valtakunnalliseen ekosysteemiin, joka mahdollistaa parhaiden käytäntöjen jakamisen ja suomalaisen teollisuuden ja akateemisten toimijoiden kohtaamisen.

Hanke kehittää menetelmiä ICT-alan ympäristövaikutusten mittaamiseen ja tuottaa ympäristötietoisuutta lisääviä koulutusmateriaaleja yritysten käyttöön. Ympäristötietoisuuden lisääminen pienentää ICT-alan hiilijalanjälkeä, ja samaan aikaan kädenjälki suurenee. Samalla vihreä bisnes luo Suomeen edelläkävijyyttä, joka avaa mahdollisuuksia kansainvälisillä markkinoilla.

Hankeaika

01.04.2024–31.05.2026

Lisätietoja

tieke.fi/green-ict-visiiri

