

Sami Hautala

TIETOVERKKOJEN ENERGIANKULUTUS JA PÄÄSTÖT

TIETOVERKKOJEN ENERGIANKULUTUS JA PÄÄSTÖT

Sami Hautala
Opinnäytetyö
Syksy 2023
Energia- ja ympäristötekniikka
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energia- ja ympäristötekniikka

Tekijä(t): Sami Hautala

Opinnäytetyön nimi: Tietoverkkojen energiankulutus ja päästöt

Työn ohjaaja(t): Saku Leskelä

Työn valmistuslukukausi ja -vuosi: Syksy 2023

Sivumäärä: 64 + 9 liitettä

Työssä selvitin eri tiedonsiirtotekniikoiden sähkökulutuksia gigatavun siirtämiseen. Tietojen lähteinä on käytetty pääasiassa Euroopan komission yhteinen tutkimuskeskus eli Joint Research Centre (JRC):n vuoden 2021 raporttia, jossa määritellään Euroopan alueella myytävien tietoverkko-laitteiden sähkökulutuksia, sekä monia muita lähteitä niin kirjallisia ja suullisia lähteitä.

Tuloksena havaittiin, että selvästi eniten sähköä kuluu puhelinmodeemi yhteydellä 'nykyaikaisen' keskuksen kautta toiseen puhelinmodeemiin. Toiseksi eniten matkapuhelinverkossa vanhemmasta tekniikasta 5G-verkoon asti. 6G-verkko lienee pääsevän DOCSIS 3.0 tekniikan alapuolelle, mutta tuleva DOCSIS 4.0 lienee olevan energiatehokkaampi. SHDSL-tekniikka kuluttaa sähköä huomattavasti enemmän gigatavua kohden kuin ADSL2+ tekniikka, mutta vähiten kuluttavimmat tekniikat ovat Ethernet ja valokuitu.

Yleensä mitä suurempi yhteysnopeus, sitä vähemmän sähköä kuluu gigatavun siirtoon (sitä, nopeammin gigatavu siirtyy), mutta yhteyden ylläpitoon kuluu sähköä enemmän eli energiatehokkain valinta on sopivan yhteysnopeuden valitseminen sellaisella tekniikalla, jossa yhteyden ylläpito ei kuluta suuresti sähköä esimerkiksi on tuki virransäästö toiminnoille, jos yhteydellä on ajoittain hetkiä, jolloin tietoa siirtyy vähän.

Matkapuhelinverkossa tiedonsiirto vie vähiten sähköä mahdollisimman nopean liittymän ja verkon käytöllä parhaassa signaalinvoimakkuudessa, mutta pienien datamäärien ollessa kyseessä IoT-käyttöä varten olevat tekniikat ovat todennäköisesti energiatehokkaimmat, sekä mahdollisesti 2G-verkko. Tietoverkkojen päästöissä kuuluisi huomioida sähkökulutus, laitteiden elinkaari, ylläpidosta ja purkamisesta aiheutuvat päästöt. Itse pitäisin tärkeänä myös sitä, että mahdollistetaan asiakkaat välttämään omia päästöjään ylläpidettävän tietoverkon avulla, niin, että asiakkaat voivat tehdä esimerkiksi etätöitä ja käyttää myös vanhoja laitteita ja järjestelmiä niin kauan kuin niillä on käyttöikä jäljellä.

Asiasanat: Tietoverkot, sähkökulutus, matkapuhelinverkko, valokuitu ja päästöt.

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Energy- and environment technology

Author(s): Sami Hautala
Title of thesis: Energy Consumption and Emissions of Data Networks
Supervisor(s): Saku Leskelä
Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2023
Number of pages: 64 + 9 appendices

Keywords: Data networks, electricity consumption, mobile network, fibre optic network and emissions.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	13
2	TIETOVERKKOJEN SÄHKÖNKULUTUS.....	14
2.1	Kiinteä puhelinverkko	14
2.1.1	Lankapuhelin (PSTN ja POTS)	15
2.1.2	xDSL (HDSL, SHDSL, ADSL, VDSL ja G.fast)	17
2.2	Ethernet (valokuitu ja RJ-45)	20
2.3	G.hn	24
2.4	Kaapeliverkko (koaksiaalisella kaapelilla toteutettu verkko)	26
2.5	Matkapuhelinverkot	27
2.5.1	2G (GSM, GPRS, EDGE)	29
2.5.2	3G (UMTS, HSDPA, HSPA+).....	30
2.5.3	4G (LTE, LTE-A).....	31
2.5.4	5G (5G-NSA, 5G-SA).....	33
2.5.5	6G	33
2.6	WLAN (Wi-Fi)	34
2.7	Laitetilat.....	35
2.8	Varavoimajärjestelmät.....	36
2.9	Verkon hallintajärjestelmät (monitorointi ja lakisääteisen tiedon tallennus)	36
2.10	Laskutus, viankorjaus, asiakaspalvelu	37
2.11	Sähkönkulutuksen jakautuminen	37
3	VERTAILU ERI TEKNIKOIDEN VÄLILLÄ.....	39
3.1	Oletettu verkon käyttäjän vaikutus.....	41
3.2	Vertailu muihin julkisiin lukuihin	42
3.3	M2M tiedonsiirtotekniikat.....	45
4	TIETOVERKKOJEN PÄÄSTÖJEN LÄHTEET	47
5	ESIMERKKILASKELMIA	49
5.1	Harvaan-asuttu maaseutu alue (esimerkkilaskelma 1).....	49
5.2	Kaupunkialue (esimerkkilaskelma 2).....	52
5.3	Runkoverkko (esimerkkilaskelma 3).....	54
6	YHTEENVETO	56
	LÄHTEET.....	59

LIITTEET 23

SANASTO

10GBase-T	On standardi, joka tarjoaa 10 Gbit/s yhteydet parikaapeleiden kautta enintään 100 metrin päähän.
2G	Yleisnimitys toisen sukupolven matkaviestinjärjestelmästä. Esimerkiksi GSM, GPRS ja EDGE.
3G	Yleisnimitys kolmannen sukupolven matkaviestinjärjestelmästä. Esimerkiksi UMTS, HSDPA ja HSPA+.
4G	Yleisnimitys neljännen sukupolven matkaviestinjärjestelmästä. Esimerkiksi LTE ja LTE-A.
5G	Yleisnimitys viidennen sukupolven matkaviestinjärjestelmästä. Esimerkiksi 5G-SA.
5G-NSA	5G Non-Standalone on 5G-verkko, joka vaatii toimiakseen 4G-verkon rinnalle.
5G-SA	5G Standalone on 5G-verkko, joka toimii itsenäisesti ilman 4G-verkkoa.
6G	Yleisnimitys kehitteillä olevan kuudennen sukupolven matkaviestinjärjestelmästä.
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line. Asymmetrinen digitaalinen tilaajajohto.
ADSL2+	ADSL-tekniikkaan pohjautuva paranneltu versio, joka mahdollistaa suuremmat nopeudet.
BBU	Base Band Unit. Järjestelmämoduuli, johon kytketään RRU:t, sekä runkoverkkoyhteydet.
Bluetooth	Radioaaltoihin perustuva lyhyen kantaman langaton tiedonsiirtotekniikka
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification. Tekniikka, jonka avulla on mahdollista siirtää dataa kaapelitelevisioverkossa.
DSL	Digital Subscriber Line. Yleisnimitys digitaalisen tilaajajohdon tekniikoille.
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer. Puhelinkeskuksessa oleva usean digitaalisen tilaajajohdon yhteinen päätelaite.

Dual-Carrier	Mahdollistaa yhdistämisen kahteen eri soluun, jotta saa molempien solujen kapasiteetin käyttöön. Käytetään myös lyhennystä DC.
eCall	Ajoneuvon hätäpuhelujärjestelmä, joka lähettää sijainti- ja tilannetiedot lähimpään hätäkeskukseen ajoneuvon jouduttua onnettomuuteen.
EC-GSM-IoT	Extended Coverage – GSM – Internet of Things. 2G-verkossa toimiva ominaisuus IoT-laitteita varten.
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution. 2G-verkossa toimiva ominaisuus, jolla mahdollistetaan nopeampi datasiirto.
EEE	Energy Efficient Ethernet. Energiatehokas Ethernet, jonka avulla on mahdollista säästää sähköä.
EPON	Ethernet passive optical network. Ethernet-tekniikalla toimiva passiivinen valokuituverkko.
Ethernet	IEEE 802.3 -standardissa määritelty tekniikka, jota käytetään liitettäessä tietokoneita lähiverkkoon kiinteällä yhteydellä.
fax	Telekopiointilaitte, jonka avulla voidaan siirtää kopio tekstistä, piirroksista tai kuvasta televerkon kautta.
G.fast	On yksi DSL-tekniikan standardeista, joka mahdollistaa 1 Gbit/s nopeudet.
G.hn	Gigabit Home Networking. On määritelmä, jonka avulla saadaan maksimissaan 2 Gbit/s nopeudet kotiverkoissa.
GBIC	Gigabit interface converter. On standardi muuntimille, joita käytetään valokuituverkossa.
GE	Gigabit Ethernet.
GHz	Gigahertz (1000 MHz).
GPON	Gigabit Passive Optical Networks. 1 Gbit/s nopeudet mahdollistava passiivinen valokuituverkko.
GPRS	General packet radio service. Mahdollistaa Internetin käytön 2G-verkossa.
GSM	Global System for Mobile Communications. GSM on ETSin standardisoima nimitys 2G-verkolle.
HDSL	High-bit-rate digital subscriber line. Mahdollistaa nopean symmetrisen yhteyden puhelinverkkoa pitkin. Toimii 1,544 tai 2,048 Mbit/s nopeudella.

HFC	Hybrid fiber-coaxial. Tarkoittaa verkkoa, jossa käytetään koaksiaali-kaapelia ja valokuitua. Vastaava kuin kaapelitelevisioverkko.
HomePNA	Home Phoneline Networking Alliance. Kehittää ja standardisoi teknologioita kotiverkkoja varten, ensimmäinen tekniikka HomePNA 1.0 on kehitetty vuonna 1990.
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access. 3G-verkossa toimiva ominaisuus datanopeuksien kasvattamiseksi.
HSPA+	Evolved High Speed Packet Access. 3G-verkossa toimiva ominaisuus datanopeuksien kasvattamiseksi.
I-CCAP	Integrated Converged Cable Access Platform. Eräänlainen kaapelireititin, joka tarvitaan kaapelitelevisioverkon palveluiden tuottamiseen.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers. Järjestö joka on määritellyt useita eri standardeja mm. tietoverkoissa käytettäviä tekniikoita varten.
IoT	Internet of Thing. Esineiden Internet ovat laitteita, jotka on kytketty tietoverkkoihin.
IP	Internet Protocol. Protokolla, joka luo perustan pakettikytkentäiselle tiedonsiirrolle Internetissä.
kbit/s	Kilobittiä sekunnissa.
kW	Kilowatti tunti, 1000 wattia.
LoRaWAN	On langaton tiedonsiirtoverkko, joka on suunniteltu erilaisia IoT-laitteita varten, joilta vaaditaan pientä energiankulutusta.
LTE	Long Term Evolution. Yksi 4G-verkon standardeista.
LTE-A	LTE Advanced (LTE+ tai 4G+) Yksi 4G-verkon standardeista, joka mahdollistaa usean eri taajuuden käytön yhtä aikaa kapasiteetin kasvattamiseksi.
LTE-M	Long-Term Evolution Machine Type Communication (LTE-MTC). Yksi 4G-verkon standardeista, joka mahdollistaa pieni sähkönkulutuksisen tiedonsiirron 4G-verkossa.
M2M	Machine to machine. Laitteiden välinen viestintä.
Mbit/s	Megabittiä sekunnissa.
MBUS	Meter-Bus. On standardisoitu mittareiden väliseen tiedonsiirtoon langallisesti tai langattomasti.

MHz	Megahertz (1000 KHz).
MIMO	Multiple-input and multiple-output. Tarkoittaa tietoliikennetekniikkaa, jossa sekä lähetykseen että vastaanottoon käytetään samanaikaisesti useampaa kuin yhtä tekniikkaa esim. kahta johdinparia tai kahta antennia.
mW	Milliwatti, 1/1000 wattia.
NB-IoT	Narrowband Internet of things. On IoT-laitteille suunniteltu pieni sähkönkulutusinen tiedonsiirtoverkko.
PLC	Power Line Communications. Datasähkö.
PON	Passive Optical Network. Kuituverkkotekniikka, jossa hyödynnetään passiivisia verkkokomponentteja.
POTS	Plain old telephone service. Perinteinen puhelinpalvelu.
PSTN	Public Switched Telephone Network. Yleinen kiinteästi kytketty puhelinverkko.
QSFP	Quad Small Form-factor Pluggable. On SFP:tä 4 kertaa nopeampi liitäntä.
RAN	Radio access network. Radioverkko.
RJ-45	8-pinninen liitäntä, jonka avulla voidaan esimerkiksi kytkeä tietokoneita toisiinsa.
RMD	Remote MAC-PHY device. Tekee DOCSIS verkossa prosessointia, tarvitaan I-CCAP:n lisäksi.
RRU	Remote radio unit. On radioyksikkö, joka voidaan sijoittaa etäälle BBU-yksiköstä.
RS-232	Sarjaliikennetekniikka.
Sektorit	Antennin keilan mukainen alue, jolla on yksi tai useampi solu.
SFP	Small Form-factor Pluggable. On pieni helposti laitettava verkko kortin moduuli, joita käytetään esimerkiksi lähettimenä ja vastaanottimena valokuituverkossa.
SFP+	On kehittyneempi versio SFP:stä, mahdollistaa suuremmat nopeudet.
SHDSL	Single pair high bit rate DSL.
Sigfox	On 868 MHz taajuudella toimiva IoT-laitteita varten suunniteltu pieni sähkönkulutusinen tiedonsiirtoverkko.

SISO	Single Input Single Output. Tarkoittaa tekniikkaa, jossa lähetyksessä ja vastaanotossa käytetään vain yhtä tekniikkaa esim. yhtä johdinparia tai yhtä antennia.
Solu	Yksittäinen radioverkon "tukiasema", joka toimii tietyllä taajuusalueella ja tekniikalla.
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System. Kolmannen sukupolven matkapuhelinjärjestelmä (3G).
VAMOS	Voice services over Adaptive Multi-user channels on One Slot. Mahdollistaa 2G-verkossa puhelujen määrän moninkertaistamisen.
VDSL	Very High Speed Digital Subscriber Line. Suurikapasiteettinen digitaalinen tilaajajohto.
VDSL2	VDSL-tekniikkaan pohjautuva paranneltu versio, joka mahdollistaa suuremmat nopeudet.
ViLTE	Video over LTE. Mahdollistaa videopuhelut 4G-verkossa teleoperaattorin kautta.
ViNR	Video over new radio. Mahdollistaa videopuhelut 5G-verkossa teleoperaattorin kautta.
VoIP	Voice over Internet protocol. Mahdollistaa puhelujen soittamisen Internetin kautta.
VoLTE	Voice over LTE. Mahdollistaa äänipuhelut 4G-verkossa teleoperaattorin kautta.
VoNR	Voice over new radio. Mahdollistaa äänipuhelut 5G-verkossa teleoperaattorin kautta.
VoWi-Fi	Voice over Wi-Fi. Mahdollistaa äänipuhelut Wi-Fi-verkossa teleoperaattorin kautta.
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy.
W	Watti on SI-järjestelmän tehon ja säteilyvirran yksikkö.
WDM	Tarkoittaa aallonpituusjakoista multipleksointia.
Wh/Gt	Wattituntia gigatavua kohden. Ilmaisee kuinka monta wattia kuluu gigatavun siirrossa.
Wi-Fi	Wireless Fidelity. Yleisnimitys IEEE 802.11-tekniikoille (WLAN).
WLAN	Wireless Local Area Network. Langaton lähiverkko, IEEE standardiperhe 802.11.

xDSL

Digital Subscriber Line. Yleisnimitys digitaaliselle tilaajajohdolle, esimerkiksi ADSL.

1 JOHDANTO

Tietoverkkojen merkitys on nykyisessä yhteiskunnassa merkittävä: lähes kaikki käyttävät tietoverkkoja niin työssään ja vapaa-ajallaan. Epäsuorasti moni palvelu tai tuote on riippuvainen tietoverkoista jossain vaiheessa. Monet asiat nykyään hoituvatkin suurimmaksi osaksi tietoverkkojen kautta.

Maailmanlaajuisesti tiedonsiirtomäärät ovat kasvaneet voimakkaasti usean vuoden ajan, ja ICT-sektorista on tullut merkittävä päästölähde. Mobiiliverkkojen osuus tiedonsiirtomäärissä on kasvanut huomattavasti, ja erilaiset IoT-ratkaisut (Internet of Things) ovat yleistyneet. Erilaisten tietoverkkojen sähkönkulutusta ja päästöjä ei ole suuresti vertailtu keskenään, varsinkaan langattoman- ja kiinteänverkon osalta. Elinkaaripäästöjä vertailtu vielä vähemmän.

Tässä työssä selvitetään, paljonko erilaiset käytössä olevat laajasti tunnetut tiedonsiirtotekniikat kuluttavat sähköä. Työssä vertaillaan eri tiedonsiirtotekniikoita erilaisissa käyttötarkoituksissa, jotta löytyy paras vaihtoehto sähkönkulutuksen osalta ja mietitään päästövaikutuksia.

2 TIETOVERKKOJEN SÄHKÖNKULUTUS

Tietoverkkojen sähkönkulutus koostuu monesta osasta. Ainoa osuus, jonka käyttäjä huomaa, on yleensä oman päätelaitteen ja mahdollisen modeemin kuluttama sähkö. Kaikki muu kulutus tapahtuu muualla. Ensin oman teleoperaattorin päässä, sitten valtakunnallisessa/maailmanlaajuisessa runkoverkon laitteissa ja sen jälkeen esimerkiksi jonkin palvelinsalin verkkolaitteiden kautta halutulle kohde palvelimelle.

Kuitenkin pelkkä tiedonsiirtolinkin muodostus ei riitä, vaan teleoperaattorinkin päässä tarvitaan runsaasti erilaisia verkkolaitteita ja palvelimia, jotta esimerkiksi asiakas saa tarvitsemansa IP-osoitteen ja reititys toimii oikein. Myös verkkoa pitää hallita ja valvoa sekä tallentaa lakisääteisiä asioita verkon käytön osalta. Palvelimien sähkönkulutus on tekemäni kyselyn mukaan merkittävä usealla teleyrityksellä (1).

Kiinteitä tietoverkkoja ovat kaikki sellaiset yhteydet, joissa tietoliikenne kulkee fyysistä kaapelia pitkin. Erilaisia kaapelityyppejä on lukuisia, kaapelissa data voi siirtyä esimerkiksi sähköisesti tai valon avulla. Tutuimmat yleisesti käytetyt kiinteän verkon tekniikat ovat lankapuhelin (PSTN), xDSL, Ethernet, valokuitu, kaapelinetti (DOCSIS).

Langattomia tietoverkkoja ovat kaikki sellaiset yhteydet, joissa tietoliikenne kulkee langattomasti radioaalloilla. Erilaisia käytettyjä taajuuksia on useita ja samoin erilaisia tekniikoita. Tunnetuimmat ovat matkapuhelinverkot (2G-5G), WLAN-verkot (Wi-Fi) ja Bluetooth.

2.1 Kiinteä puhelinverkko

Kiinteä puhelinverkko perustuu kahteen tai useampaan johtimeen. Johtimet ovat yleensä kuparia, mutta myös kuparilla päällystettyä metallilankajohdinta käytetään. Joissain harvoissa tapauksissa on myös piikkilanka-aitaa ja maan sähkönjohtavuutta hyödyntämällä saatu toimiva johdinpari puheyhteydelle.

Kiinteän puhelinverkon kaapelit kulkevat niin maassa kuin ilmassa, ja Suomessa verkkoa on rakennettu eniten vuonna 1970 – 1990, jolloin lankapuhelimen puhelintiheydet kasvoivat voimakkaasti (2).

Viimeisen 10 vuoden aikana kiinteän puhelinverkon kehitys Suomessa on kulkenut siihen suuntaan, että verkkoa on alettu purkamaan entistä enemmän ja yhteyksiä korvaamaan vaihtoehtoisilla tekniikoilla. Sama kehitys jatkuu yhä, moni teleoperaattori on luopumassa kokonaan kiinteästä puhelinverkosta, tai on jo luopunut. Suurimmat syyt verkon alasajoon ovat verkon käyttöasteen pieneneminen, ikääntynyt verkko (kasvava huoltotarve) ja pitkät linjapituudet (ei mahdollista toteuttaa helposti nopeita laajakaista yhteyksiä).

2.1.1 Lankapuhelin (PSTN ja POTS)

Lankapuhelin toimii kiinteässä puhelinverkossa kahden johtimen avulla (1 pari). Puhelimia ja keskuksia on ollut erilaisilla tekniikoilla käytössä ja siten sähkönkulutus on vaihdellut suuresti. Lankapuhelimessa tarvitaan sähköä kaiutinta, mikrofonia ja soittokelloa varten. Näiden tarvitsema sähköenergiamäärä on erittäin pieni, joten käsivälitteiset keskuksat perustuivat siihen, että soittokellon sähkö tuotettiin esimerkiksi käsikäyttöisen generaattorin avulla ja käytettiin esimerkiksi paristoa antamaan sähkön kaiuttimella ja mikrofonille. Puhelinkone tarvitsee noin 1 mW tehon (3, s. 63).

Myöhemmin keskuksia automatisoitiin ja sähkönkulutus alkoi kasvamaan analogisten keskuksien aikana. Kulutus kasvoi jopa niin paljon, ettei eräs sähköyhtiö uskaltanut alkuun edes sähkölaskua lähettää, koska ei tiennyt kulutuksen kasvun johtuneen uudesta automatisoidusta keskuksista. Sittemmin kulutus on vähentynyt ja keskuksat muuttuneet entistä enemmän digitaaliseksi. Vielä nykyään on pääasiallisesti käytössä 1980 – 1990-luvun PSTN keskuksia. (4)

Kulutus vaihtelee verkon tilojen muutoksien mukaan esimerkiksi silloin, kun keskuksen kautta soittaa toiselle (keskuksen releet vaihtavat tilaa ja keskus hälyttää tilaajaa). Muulloin kulutus on aika vakioita ja ei suuresti vaihtelee, vaikka käynnissä olisi monta pitkäkestoista puhelua. Vanha kokemus oli, että 10 kW:a riittää 30000 tilaajan keskukselle eli per tilaaja kulutus on noin 0,33 W. (4)

Sähkönkulutus per puhelinlinja oli noin 3 W vuonna 1997 Saksan tele- ja postialan sääntelyviranomaisen (RegTP) mukaan ja noin 2,4 W vuonna 2001 Deutsche Telekomien mukaan. Suurta sähkönkulutuksen laskua ei ole odotettavissa. (5)

Kuvassa 1 nähdään, kuinka sähkönkulutus on kehittynyt vuosien saatossa lankapuhelin verkossa. Käsivälitteisten keskuksien aikana sähköä ei ole juuri kulunut itse puheluihin, automatisoinnin myötä ja lopulta tietokoneohjattuihin puhelinkeskuksiin mentäessä sähkönkulutus on kasvanut suuresti. Sitten kulutus on pienentynyt tekniikan kehittyessä. Kulutus on vaihdellut kovasti eri valmistajien ja aikakausien keskustyyppien mukaan, joten tarkkoja lukemia ei ole saatavilla, myös keskuksen koko vaikuttaa asiaan. (4)



KUVA 1. PSTN-verkon sähkönkulutuksen kehitys (4)

Tunnetuimmat datasiirtotekniikat lankapuhelinverkossa ovat olleet fax ja puhelinmodeemi. Näistä molempia on vielä nykyäänkin käytössä mutta vähenemissä määrin. Nykyiset faxit toimivat kuin puhelinmodeemit, ja siksi puhelinmodeemin kautta on mahdollista myös vastaanottaa tai lähettää faksi.

Puhelinmodeemin teoreettinen maksiminopeus on 56 kbit/s, mutta linjan nopeus voi olla myös tätä alhaisempi esim. 33,6 kbit/s. Lähetysnopeus on maksimissaan 48 kbit/s tai 33,6 kbit/s. (6.)

Puhelinmodeemilla kestää 1 gigatavun siirto lähes 40 tuntia. Modeemi vie todennäköisesti 0,5 – 4 W sähköä riippuen liitännätavoista. Esimerkiksi SM-56 puhelinmodeemi, jossa on RS-232 ja 10/100 Mbit/s Ethernet-portti tarvitsee sähköä 3 wattia (7).

Kokonaiskulutus lienee nykyään päästä päähän olevalla puhelinmodeemiyhteydellä kahden modeemin kuluttama sähkö ja keskuksessa kulutettu sähkö. Esimerkiksi kaksi kappaletta SM-56 modeemia vie 6 W ja keskuksen osuudeksi voidaan laskea Deutsche Telekom:in ilmoittama 2,4 W. Se on yhteensä 8,4 W. Näin ollen Gigatavun siirto kuluttaa sähköä puhelinmodeemilla noin 340 W.

Vastaavasti tunnin puhelun soittaminen kuluttaa sähköä keskuksen osalta noin 2,4 W ja kahden puhelinkoneen viemän 2 mW eli tunnin puhelu lankapuhelimella kuluttaa sähköä noin 2,4 W. Jos linja ei ole käytössä kulutus on sama noin 2,4 W. Kulutus voi olla suurempi, jos puheluun ei vastata nopeasti.

Nämä luvut vaihtelevat suuresti eri keskustyyppien mukaan, keskuksen käyttöasteen mukaan ja käytettävien päätelaitteiden osalta. Jos käytössä on iso keskus matalalla käyttöasteella, kulutus on huomattavasti suurempaa, vastaavasti kulutus voi olla näitä lukuja pienempää, jos keskus on energiatehokas ja käyttöaste korkea.

2.1.2 xDSL (HDSL, SHDSL, ADSL, VDSL ja G.fast)

DSL-yhteyksiä on useita erilaisia, kotikäytössä tutuimmat ovat ADSL ja VDSL. HDSL ja SHDSL ovat symmetrinen versio, ja niitä on käytetty esimerkiksi yrityskäytössä ja siellä, missä on tarvittu saman samaa nopeutta molempiin suuntiin. xDSL-yhteyksissä on tyypillistä, että nopeus laskee linjan pituuden kasvaessa tai linjan laadun huonontuessa. Maksiminopeuksia harvoin saadaan pitkällä linjalla, mutta yhteys voi toimia hitaammalla nopeudella jopa tosi pitkän linjan päässä.

HDSL:n, SDSL:n ja SHDSL:n nopeudet ovat yleensä aina samat per pari, ja jos kyseinen yhteysnopeus ei muodostu, ei muodostu myöskään yhteys. SHDSL:ssä pareja lisäämällä saadaan nopeutta lisättyä. HDSL on kolmen parin vuoksi vikasietoisempi yhteys. Taulukko 1:ssä tarkemmin xDSL tekniikoista ja niiden yleisesti tunnetusta maksimiyhteyspituudesta, joka vaihtelee paljon linjan laadun ja tavoitellun nopeuden mukaan.

TAULUKKO 1. Erilaisia xDSL tekniikoita ja niiden tunnettuja maksiminopeuksia (8; 9; 10).

Tekniikka	Latausnopeus	Lähetysnopeus	Johdinmäärä	Yhteyspituus
HDSL	2,048 Mbit/s	2,048 Mbit/s	3x2	noin 6 km
SDSL	2,048 Mbit/s	2,048 Mbit/s	1x2	noin 3 km
ADSL	8 Mbit/s	0,640 Mbit/s	1x2	noin 6 km
ADSL2+M	24 Mbit/s	3,3 Mbit/s	1x2	noin 6 km
SHDSL	2,3 Mbit/s - 9,2 Mbit/s	2,3 Mbit/s - 9,2 Mbit/s	1x2 – 4x2	noin 3 km
VDSL	52 Mbit/s	2,3 Mbit/s	1x2	noin 300 m
VDSL2	100 Mbit/s	100 Mbit/s	1x2	noin 300 m
G.fast	1000 Mbit/s	1000 Mbit/s	1x2	noin 100 m

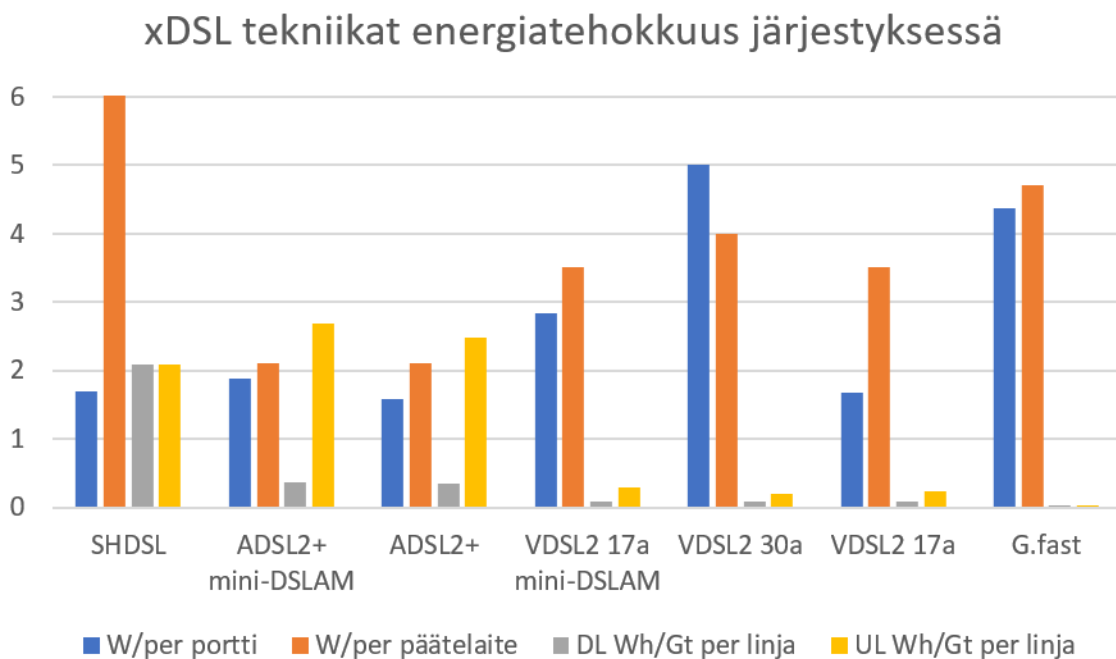
Edellä mainituista tekniikoista eniten on käytössä ADSL2+, SHDSL, VDSL2, sekä G.fast on yleis-
tymässä. Nämä tekniikat tarvitsevat esimerkiksi teletilassa olevasta DSLAMista oman portin,
osassa DSLAM:eista on mahdollisuus laittaa samaan laiterunkoon eri tekniikoiden kortteja, joissa
on vaihteleva määrä valitun tekniikan portteja. Esimerkiksi Nokia Siemens Networks:in hiX 5635
M1100 -kehikossa löytyy 16 korttipaikkaa, ja siihen saa seuraavat kortit: 72-porttinen ADSL2+, 48-
porttinen SHDSL, 48-porttinen VDSL2 ja 10-porttinen GE (11).

DSLAMien sähkönkulutuksien osalta löytyy valmistajilta hyvät dokumentit, joiden avulla saadaan
laskettua portti kohtainen kulutus ja sitä kautta kulutus per gigatavu (Liite 1). Euroopan komission
yhteinen tutkimuskeskus eli Joint Research Centre (JRC):n vuoden 2021 ”Code of Conduct on
Energy Consumption of Broadband Equipment” raportista nähdään määritelmät Euroopassa myy-
tävien ja osallistuvien yritysten valmistamille ja hankkimille laajakaistalaitteille (12).

JRC:n raportin mukaan sähkönkulutus ei juurikaan kasva (noin 0,1 W) suuremmalla lähetysteholla.
Raportissa kerrotaan myös vektoroinnin kasvattavan sähkönkulutusta 0,05 – 0,6 W. Itse linjan säh-
könkulutus näiden lisäksi 0,15 W niin ollaan aikalailla samoissa lukemissa mitä kolmen eri laiteval-
mistajan dokumenteista löytyy. (12)

JRC:n raportista löytyy myös päätelaitteiden sähkönkulutuksia, mutta useilla eri valmistajien päätelaitteiden kulutustiedot on ilmoitettu vain suuntaa-antavasti 'maksimikulutuksena', 'vähemmän kuin' tai kerrotaan vain virtalähteen tekniset tiedot. Joten JRC:n lukemat ovat tarkemmat.

Kuvassa 2 nähdään mistä osista eri DSL tekniikoissa sähkönkulutus muodostuu. DSLAM:in päässä kuluu sähköä selkeästi eniten VDSL2 30a profiililla (hiX 5608 8-porttinen), toiseksi eniten G.fast tekniikalla (GES1116-FSA 16-porttinen). Myös päätelaitteen sähkönkulutus on suurempi mitä nopeampi tekniikka kyseessä, paitsi SHDSL-päätelaite kuluttaa selkeästi eniten sähköä. Energiatehokkaiden näistä DSL tekniikoista G.fast siirtää gigatavun 0,02 Wh/Gt. (LIITE 1)



KUVA 2. xDSL tekniikat energiatehokkuus järjestyksessä (oikealla energiatehokkain) (LIITE 1)

JRC:n raportissa kerrotaan myös laitteiden joutotilan (idle) sähkönkulutuksista, jolloin laitteet ovat valmiudessa siirtämään dataa. Taulukko 2:ssa nähdään kotipäätelaitteiden osalta vertailu. Erot watteina ovat pieniä. (12)

TAULUKKO 2. Kotipäätelaitteiden sähkönkulutusero aktiivisen ja joutotilan välillä (12)

Tekniikka	Joutotila W	Aktiivitila W	Ero W	Ero %
ADSL2+	2,0	2,1	0,1	4,8
VDSL2 (<17a)	3,0	3,5	0,5	14,3
VDSL2 (35b)	3,8	4,0	0,2	5
G.fast (106a-c)	3,5	3,8	0,3	7,9
G.fast (212a, 212c)	4,4	4,7	0,3	6,4

VDSL2:ssa on mahdollista säästää sähköä jopa 50 % alhaisen energiankulutuksen tilassa, sekä 25 % jos halutaan käyttää VoIP (POTS tilassa). Se vaatii tuen DSLAMilta ja päätelaitteelta. DSLA-Missa oleva VDSL2 portti kuluttaa sähköä 0,5 W kun portti on valmiudessa muodostamaan yhteyden. (12)

2.2 Ethernet (valokuitu ja RJ-45)

Ethernet tekniikka mahdollistaa useita eri nopeuksia, tunnetuimmat nopeudet ovat 100 Mbit/s ja 1000 Mbit/s. Yleensä Ethernet tunnustetaan RJ-45 liittimestä, johon kytketään kaksi tai neljä parinen kuparikaapeli varustettuna RJ-45 liittimillä. RJ-45 liittimiä löytyy lähes kaikista reitittimistä, monista tietokoneista, televisioista ja muista laitteista, jotka voi kytkeä verkkoon johdolla.

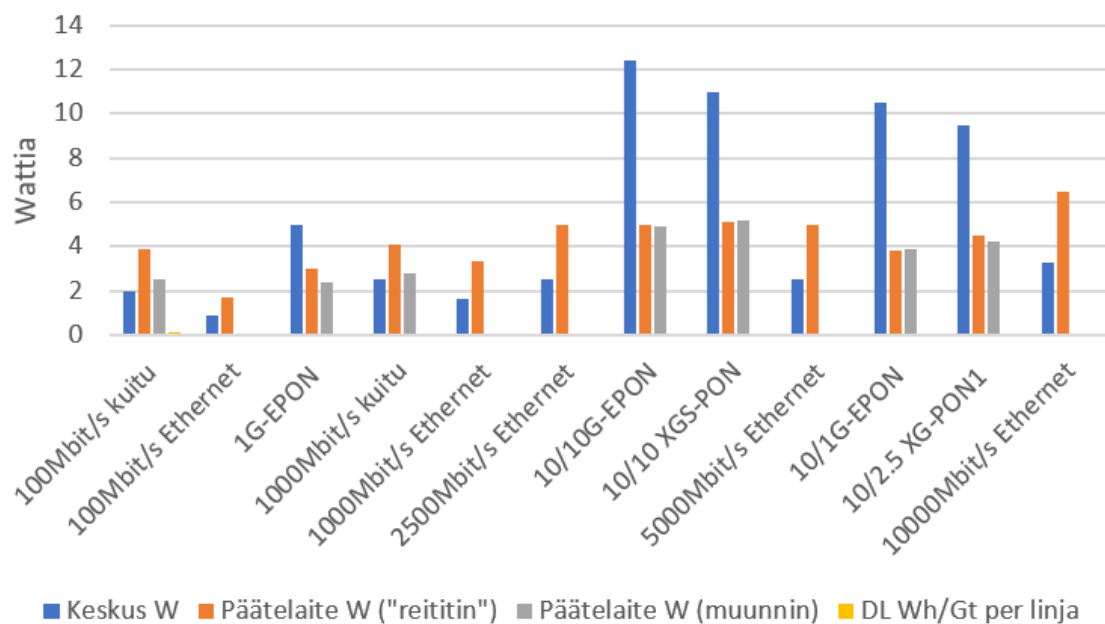
Samaa tekniikkaa voidaan käyttää monissa muissakin käyttötarkoituksissa, esimerkiksi erilaisissa moduuleissa esimerkiksi SFP, GBIC, QSFP, jotta voidaan rakentaa valokuidulla toteutettuja verkkoja. FS valmistaa verkkolaitteita ja heidän mukaansa SFP-portilla on pienempi energiankulutus verrattuna RJ-45 porttiin (13). Esimerkiksi 10GBase-T (10 Gbit/s Ethernet RJ-45 liittimillä) kuluttaa sähköä 2 – 5 wattia, vastaavasti SFP+ (valokuidulla) toteutettu kuluttaa noin 0,7 wattia (14).

JRC:n raportin mukaan ero ei ole niin merkittävää päätelaitteiden osalta käyttääkö valokuitua vai RJ-45 liittimin varustettua parikaapelia. Raportista ei löydy keskuspään laitteiden sähkönkulutus-tietoja Ethernet RJ-45 osalta, joten sen osuudeksi oletetaan puolet päätelaitteen sähkönkulutuksesta. Valokuidussa jos tarvitaan koko taattu kapasiteetti yhdelle käyttäjälle suora kuituyhteys vie

vähemmän sähköä, kuin vaikka EPONin avulla toteutettuna. Jos voidaan hyödyntää PON tekniikoiden etua ja jakaa yhteys useammalle loppukäyttäjälle eri nopeuksilla, saadaan sähkökulutuksessa säästettyä. (12)

Liite 2:ssa on laskettu erilaisilla Ethernet tekniikoilla toteutettujen yhteyksien sähkökulutuksia gigatavun siirrossa. Kuva 3 on laadittu tuloksien pohjalta ja esittää JRC:n raportin kulutustietojen pohjalta laskennalliset sähkökulutukset.

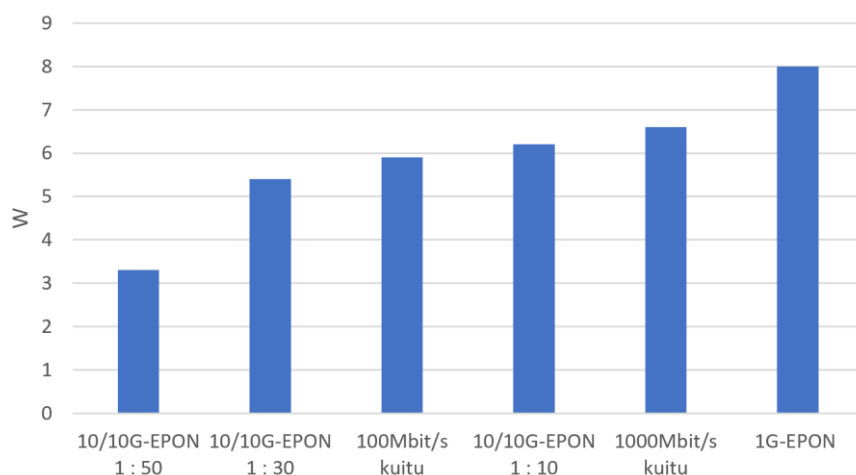
Ethernet tekniikoista havaitaan, että tiedonsiirrossa 100 Mbit/s kuitu yhteys vie eniten sähköä (0,13 Wh/Gt) ja vähiten 10 Gbit/s Ethernet RJ-45 (0,002 Wh/Gt). Linja kohtainen sähkökulutus nousee selvästi suuremmilla nopeuksilla, joka tarkoittaa sitä, että suurempia nopeuksia ei kannata rakentaa turhaan, jos linjaa ei kuormiteta riittävästi Wh/Gt luku voi kasvaa suuremmaksi kuin hitaammilla linjoilla. (LIITE 2)



KUVA 3. Erilaisilla Ethernet yhteyksillä sähkökulutuksen jakautuminen (LIITE 2)

PON-tekniikoissa jaetaan yksi kuitu passiivisilla jakajilla useampaan osaan, jonka avulla voidaan keskuksen päässä päästä pienemmällä laitemäärällä. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi yksi 1 Gbit/s linkki voidaan jakaa vaikka kymmeneen osaan niin jokainen pääteleite saa vähintään 100 Mbit/s nopeuden. Kuvassa 4 nähdään sähköä kuluvan huomattavasti vähemmän per pääteleite jos

10/10 Gbit/s EPON yhteys jaetaan usealle käyttäjälle. Tämä on hyödyllistä, jos käyttäjät tarvitsevat vaikka vain 100 Mbit/s nopeuden. Hyöty jää pieneksi, jos kaikki käyttäjät tarvitsevat yhtä aikaa 1 Gbit/s nopeuden, silloin 10/10 Gbit/s EPON riittää vain kymmenelle käyttäjälle ja ero suoraan 1 Gbit/s yhteyteen jää sähkönkulutuksessa 0,4 wattiin.



KUVA 4. Erilaisten EPON jakosuhteiden merkitys sähkönkulutukseen päätelaitteiden kanssa (W/päätelaite) (LIITE 2)

Tein muutamilla erilaisilla Ethernet RJ-45 kytkimillä sähkönkulutusmittauksia, mittauksissa havaittiin, ettei verkon kuormitus vaikuta juurikaan sähkönkulutukseen. Merkittävin vaikutus oli kuinka monta Ethernet porttia oli aktiivisena ja laitteen oma joutotilan kulutus (ilman yhtään kytkettyä laitetta). Laitteen ikä ei suoraan vaikuta sähkönkulutukseen, vaan enemmänkin laitteen ominaisuudet, joten laitevalinnassa kannattaa tutkia eri vaihtoehtot ja etsiä käyttötarkoitukseen sopivin laite. (15)

Sain nähtäville parin eri datakeskuksen kytkimien sähkönkulutustiedot, joiden perusteella vahvistuu oman mittauksen havainnot. Kyseisissä datakeskuksissa kytkimissä on pääasiassa valokuidulla kytketty laitteet. Datakeskuksen kytkimet ovat Cisco ja Extreme valmistajilta, osassa kytkimistä kulutus vaihteli, todennäköisesti johtuen tuulettimien pienestä nopeus muutoksesta tai laitteen LED-valojen välkkeestä. Pienessä otannassa vaihtelu 15 minuutin tasolla oli keskimäärin vain noin 4 %, joissain kytkimissä suurempaa ja pienempää. Watteina ero vaihteli 0 – 30 W välillä, keskimäärin noin 10 wattia. Kytkimien yhteydet datakeskuksissa ovat aina päällä. (16)

Valokuituverkossa tietoa voidaan siirtää monella muullakin tekniikalla kuin Ethernet tekniikalla. Joten ne myös eroavat sähkönkulutuksen osalta. Runkoyhteyksien nopeusluokissa Ethernet tekniikalla toteutettuna sähköä kuluu 10 Gbit/s portissa 7 W (kuva 5), joka on noin 0,008 W/hGt. WDM tekniikalla 10 Gbit/s kuluttaa arviolta noin 50 W, joka on noin 0,011 Wh/Gt. Luvut sisältävät vastavasti laitteen rungon kulutuksen. Suuritehoinen lähetin kuluttaa enemmän sähköä esimerkiksi 1200 km 10 Gbit/s WDM-tekniikan lähetin kuluttaa noin 15 % enemmän sähköä verrattuna 200 km ver-sioon. (17)

Table 7 Ethernet layer (bidirectional)

Type	Remarks	Power consumption [Watt]	Power efficiency [Watt/Gbps]
Ethernet 1 Gbps port	Includes chassis overhead	7 W	7 W/Gbps
Ethernet 10 Gbps port		38 W	3.8 W/Gbps
Ethernet 40 Gbps port		(105 W)	(2.6 W/Gbps)
Ethernet 100 Gbps port		(205 W)	(2.1 W/Gbps)
Ethernet 400 Gbps port		(560 W)	(1.4 W/Gbps)
Ethernet 1 Tbps port		(1100 W)	(1.1 W/Gbps)

KUVA 5. Ethernet valokuitu porttien sähkönkulutuksia runkoverkon laitteissa, suluissa laskennalliset sähkönkulutukset. Vuodelta 2012 (17)

Kuvassa 6 nähdään, että JRC:n raportissa olevat laitteisiin tulevat runkoyhteydet kuluttavat per portti huomattavasti vähemmän energiaa kuin edellä nähdyssä kuva 5:ssa. Syynä tähän on todennäköisesti energiatehokas Ethernet, joka vähentää huomattavasti sähkönkulutusta pienessä kuormituksessa. Sähkön säästövaikutus on merkittävä. Isoimmillaan ero on 5,5 W verrattuna 38 W, mutta tämä ero ei ole todellinen. Kyseessä on erilaiset laitteet, joita vertaillaan ja itse laitteen jou-totilan sähkönkulutus lienee eroavan suuresti. Prosentuaalinen ero voi olla hyvinkin suurta, mutta se riippuu paljon kuormituksesta ja laitteiden yhteensopivuudesta.

Table 18b: Uplink Interfaces

Uplink Interfaces (Note 18.2)	Tier 2021 (1.1.2021 - 31.12.2021) (W)	Tier 2022 (1.1.2022 - 31.12.2022) (W)	Tier 2023 (1.1.2023 - 31.12.2023) (W)
PIP 1000Mbit/s (Energy Efficient Ethernet)	1,8	1,8	1,8
PIP 10Gbit/s (Energy Efficient Ethernet)	5,5	5,5	5,5
PIP 25Gbit/s (Energy Efficient Ethernet)	12,5	12,5	12,5
PIP 100Gbit/s (Energy Efficient Ethernet)	45,0	45,0	45,0
PON (GPON) (2.5G/1G)	3,7	3,7	3,7
XG-PON1 (10G/2.5G)	4,6	4,6	4,6
XGS-PON (10G/10G)	8,6	8,6	8,6
NG-PON2 (40G/10G)	11,0	11,0	11,0
PON (1G-EPON)	1,8	1,8	1,8
PON (10G/1G-EPON)	4,6	4,6	4,6
PON (10G/10G-EPON)	5,5	5,5	5,5

Source: JRC, 2021

KUVA 6. Tulevien runkoyhteyksien sähkönkulutus (12)

Energy Efficient Ethernet (EEE) on määritelty IEEE Std 802.3-2012 SECTION SIX standardissa, ja jos molemmat kytketyt laitteet tukevat sitä niin laitteet voivat keskustella keskenään pienemmällä nopeudella ja sen avulla alentaa sähkönkulutustaan. (12)

Kuvassa 7 näytetään, kuinka paljon linkin nopeus ja kuormitus vaikuttaa EEE:n kanssa portin sähkönkulutukseen. Ero on huomattavan suuri 10 Gbit/s portilla, pienemmillä kuormitusasteilla. Esimerkiksi yleisesti käytetyn 1500-tavun kehyskoolla 10Gbase-T portti 1 Gbit/s kuormalla kuluttaa sähköä noin 2 W, ilman EEE:tä kulutus olisi noin 4 W. Sopivan linkkinopeuden valinta säästää myös sähköä, jos valitaan 1 Gbit/s porttinopeus, kulutus on noin 0,6 W täydellä kuormalla.

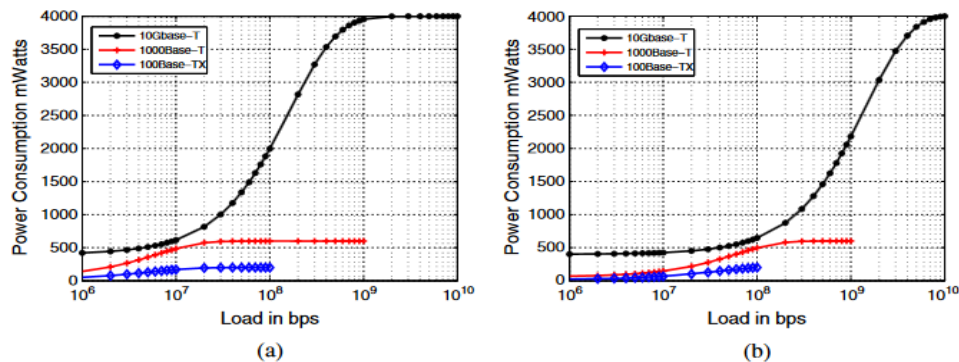


Figure 3. Energy Efficient Ethernet with Adaptive Link Rate for Poisson traffic for (a) 150-byte data frames and (b) 1500-byte data frames.

KUVA 7. Energiatehokas Ethernet mukautuvalla linkkinopeudella eri kuormituksilla (18)

2.3 G.hn

G.hn tekniikka on HomePNA:n seuraaja (19). Se toimii matalalla taajuualueella, monien olemassa olevien tekniikoiden rinnalla. Tekniikkana G.hn on paljon vähemmän tunnettu kuin vaikka G.fast, koska hyvin harva operaattori tarjoaa G.hn yhteyksiä asiakkailleen.

G.hn tekniikkaa voidaan verrata G.fast tekniikkaan, niiden maksiminopeudet ovat lähes samat (käytän laskuissa samaa 1000 Mbit/s molempiin suuntiin). Suurin ero on käytetyssä taajuualueessa, sekä tekniikan monipuolisuudessa. G.hn tekniikkaa voidaan käyttää puhelinkaapelia (yhdeillä

(SISO) tai kahdella (MIMO) parilla), antennikaapelia ja sähköverkkoa pitkin (datasähkö (PLC)). G.fastia käytetään vain puhelinkaapelia pitkin.

G.hn tekniikka mahdollistaa useiden päätelaitteiden kytkemisen samaan linjaan, niin että laitteet jakavat dynaamisesti yhteyden kapasiteetin. G.hn MIMO tekniikka mahdollistaa myös suurempien nopeuksien saavuttamisen pitkillä puhelinkaapeleilla, verrattuna G.fastiin.

Itse olen ollut toteuttamassa G.hn verkkoa antennikaapelointia ja puhelinkaapelointia pitkin hyvällä tuloksella. Taulukossa 3 on esitetty Giga Copper Networksin laitteiden tietoja, sekä sähkönkulutuksia.

G4201TM (G.hn muunnin Ethernetiksi) kulutti sähköä laitevalmistajan ilmoittaman enintään 3 wattia, näin pieniä kulutuksia en voi omilla mittareilla mitata tarkasti, mutta luku ei ylittynyt. G4204T kulutti sähköä ilman yhteyksiä 6 W ja G.hn yhteys päällä 6 – 7 wattia. Kun laitteen 2,4 GHz Wi-Fi:n kautta ladataan noin 100 Mbit/s kulutus on 8 W, 5 GHz verkossa noin 190 Mbit/s nopeudella kulutus on 9 W. Kun siirsin palvelinkoneen laitteen LAN-porttiin ja latsin 5 GHz verkon yli 300 Mbit/s kulutus oli 11 W. G4224T sähkönkulutus ilman päätelaitteita oli 73 – 74 wattia, yhden päätelaitteen kanssa 75 wattia. Kulutus ei noussut kytkemällä pari laitetta vielä lisää. En mitannut kulutusta tilanteessa, jossa olisi kaikki portit käytössä.

TAULUKKO 3. Giga Copper Networks ilmoittamia G.hn laitteiden teknisiä tietoja (19)

Malli	G.hn liitin	ETH-liitin	Sähkönkulutus	Paino
G4201(C/TM)	1x (antenni tai puhelin)	1x RJ-45	<3 W	0,19 kg
G4204(C/T)	1x (antenni tai puhelin)	4x RJ-45	<4 W	0,35 kg
G4204(C/T)-W	1x (antenni tai puhelin)	4x RJ-45 + Wi-Fi (2,4 & 5)	<8 W	0,4 kg
G4200C	6x (antenni)	2x RJ-45 + 1x SFP	<40 W	1,85 kg
G4200-8(C/T)	8x (antenni tai puhelin)	2x RJ-45 + 1x SFP	<55 W	4,2 kg
G4224T	24x (puhelin)	1x RJ-45 + 2x SFP	80 W	5,2 kg

Liite 3 nähdään, että G.hn on energiatehokas tekniikka myös pienillä porttimäärillä ja G.fastiin verrattuna sähkönkulutus eroaa erilaisesta päätelaitteesta johtuen G.fastin eduksi. G.fast päätelaitteesta on Wi-Fi ja muut toiminnallisuudet sammutettu ilmoitetulla sähkönkulutuksella (4,7 W/per linja) ja G.hn laitteessa ne ovat päällä (8 W/per linja). Keskuslaitteen sähkönkulutuksen osalta G.hn kuluttaa selvästi vähemmän sähköä yhden (3 W/per linja) ja 24-portin (3,3 W/per linja) versioissa, 6- (6,7 W/per linja) ja 8-portin (6,9 W/per linja) versioissa taas 16-porttinen G.fast laite (4,4 W/per linja) on pienempi kulutuksinen.

G.hn osalta en omassa mittauksissani nähnyt verkon kuorman vaikuttavat G.hn tekniikan osalta sähkönkulutukseen, myöskään linjan päällä tai pois olemisessa ei ollut suurta vaikutusta, mahdollisesti enintään 0,5 watin vaikutus. Wi-Fi verkon kuorma vaikutti selvästi sähkönkulutukseen.

2.4 Kaapeliverkko (koaksiaalilla kaapelilla toteutettu verkko)

Kaapeliverkossa voidaan datayhteyksiä toteuttaa useilla eri tekniikoilla. Edellä mainittu G.hn toimii myös kaapeliverkossa ja sen käyttö onnistuu niin antenni TV:n kanssa rinnakkain tai kaapeli TV:n kanssa rinnakkain. Samoin toimii myös DOCSIS tekniikat kuvassa 7 nähdään erilaisia DOCSIS versioita ja niiden nopeuksia. Nykyisin on vielä paljon käytössä DOCSIS 3.0, mutta DOCSIS 3.1 tulon on moni operaattori jo varautunut esimerkiksi myymällä vain DOCSIS 3.1 päätelaitteita.

	DOCSIS 1.0	DOCSIS 1.1	DOCSIS 2.0	DOCSIS 3.0	DOCSIS 3.1	DOCSIS 4.0
Highlights	Initial cable broadband technology, high speed internet access	Added voice over IP service, gaming, streaming	Higher upstream speed, capacity for symmetric services	Greatly enhances capacity, channel bonding, IPv6	Capacity and efficiency progression, OFDM, wideband channel	Symmetrical streaming and increased upload speeds
Downstream Capacity	40 Mbps	40 Mbps	40 Mbps	1 Gbps	10 Gbps	10 Gbps
Upstream Capacity	10 Mbps	10 Mbps	30 Mbps	200 Mbps	1-2 Gbps	6 Gbps
First Specification Issue Date	1996	1999	2001	2006	2013	2019

KUVA 8. DOCSIS versiot ja nopeudet (20)

Kaapeliverkko on jaettu rakennusten tai huoneistojen kesken ja se on yleensä aina jaettua kaistaa niin kuin matkapuhelinverkko tai valokuidun PON-tekniikalla toteutettu verkko, mutta verkossa käytetään vahvistimia. Näissä edellä mainituissa tekniikoissa, jos saadaan mitoitettua käyttäjämäärä verkon kapasiteetin suhteen sopivaksi, käyttäjillä kapasiteettia on aina riittävästi käytettävissä,

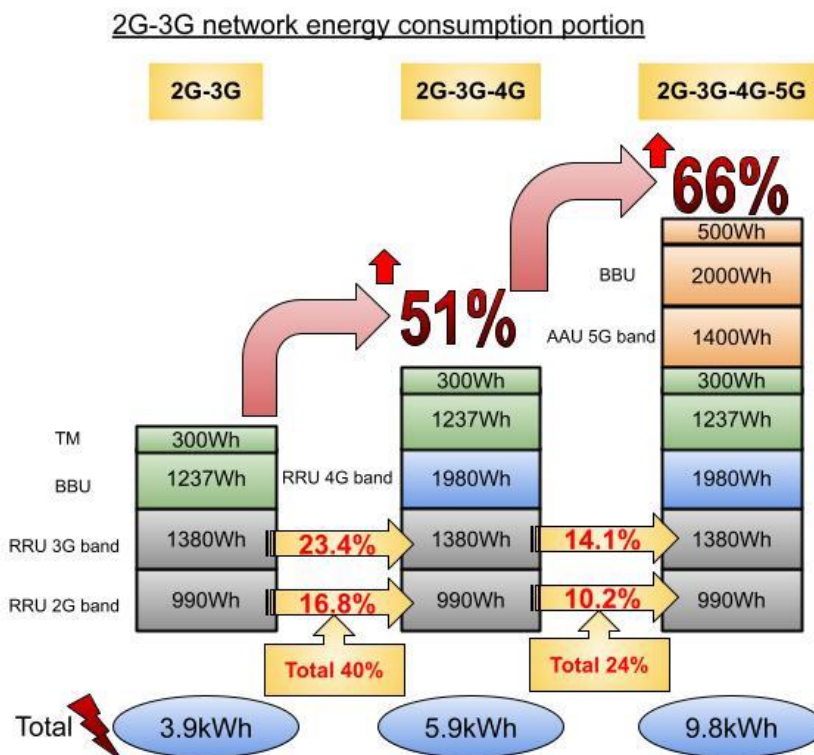
mutta välillä voi kapasiteetti siltikin loppua, jos poikkeavan suurta käyttöä tapahtuu ja verkon kapasiteetti loppuu kesken. Silloin joudutaan muuttamaan verkon kokoa tai lisäämään kapasiteettia niin että se riittää.

JRC:n raportissa kerrotaan I-CCAP kuluttavan sähköä 40 W per Gbit/s ja lisäksi RMD kuluttaa sähköä 13 W per Gbit/s. Nämä laskettuna yhteen ja jaettuna kahdeksalla saadaan noin 6,6 Wh/Gt. DOCSIS 3.0 modeemi vie sähköä 5,5 W tunnissa eli sen kulutus huomioituna gigatavun siirtoon kuluu sähköä yhteensä noin 6,6 Wh. DOCSIS 3.0 modeemin joutotilan kulutus on 5 W, DOCSIS 3.1 sähkönkulutus on suurempaa 13,1 W käytössä ja joutotilassa 9,3 W. (12)

DOCSIS tekniikka kuluttaa selvästi DSL- ja Ethernet-tekniikoihin nähden enemmän sähköä.

2.5 Matkapuhelinverkot

Matkapuhelinverkkojen sähkönkulutus on kasvanut uusien sukupolvien myötä, kuva 8 näyttää miten kulutus kasvanut ja mistä osista sähkönkulutus koostuu.



KUVA 9. 2G-5G verkon sähkönkulutuksen kehitys (21)

Matkapuhelinverkon tukiaseman sähkönkulutus koostuu useista osista, kuva 9 näyttää kuinka eri osien kulutus yleensä jakaantuu. Suurin osa sähköstä kuluu radioon ja signaalin prosessointiin. Toiseksi eniten jäähtyäkseen, Suomen olosuhteissa jäähtymisen merkitys ei todennäköisesti ole näin suuri. (22)

Laitteiden hyötysuhteet vaikuttavat suuresti edellä kuvassa 9 näkyviin prosentteihin, esimerkiksi 2G:n alkuaikoina vahvistimen hyötysuhde oli alle 20 % ja nykyisin vahvistimien hyötysuhde on jopa yli 50 %. Myös prosessorit ovat kehittyneet ja ne pystyvät tekemään paljon enemmän asioita pienemmällä energiankulutuksella. (22)

Vanha nyrkkisääntö on ollut, että 3 kW teholle mitoitetaan per teleoperaattori, tämä sääntö toteutuu monissa haja-asutusalueen telemastoilla vieläkin. Uusien laitteistojen avulla keskimääräinen teho tyyppillisellä käyttöasteella voi jäädä, jopa reiluun kilowattiin per teleoperaattori (23).

Kuvasta 8 nähdään, että jokainen matkapuhelinverkon tekniikka tarvitsee RRU:n (Remote Radio Unit). RRU on radio, joka lähettää signaalia antenniin, antennista signaali leviää antennin keilan mukaisesti ympäristöön. Lähetin lähettää yhtä taajuutta tai useampaa riippuen sen ominaisuuksista. Useamman taajuuden lähettämistä varten on olemassa "multiband" radioita. Radion sähkönkulutus riippuu siitä, millaista signaalia se lähettää, kaistanleveys ja lähetysteho. Sillä ei ole vaikutusta, onko taajuus korkea vai matala (matala taajuus kantaa pitemmälle samalla lähetysteholla). (23)

Base Band Unit (BBU), tekee lähes kaiken muun, se prosessoi signaalit ja sen kautta ohjataan radioita ja niihin menevää signaalia. Uudemmissa BBU-yksiköillä voidaan tehdä signaalit useille eri matkapuhelinverkkojen versioille, esimerkiksi 2G - 5G:hen. Ratkaisevin tekijä on se, että montako vapaata porttia BBU:sta löytyy ja miten suurta taajuusalueita tarvitaan. Nykyään samalla BBU-yksiköllä voidaan lähettää useiden eri tekniikoiden signaalia radioille tai useampaa taajuutta tukevalle radiolle (multiband). (23)

RRU:n tilalla voidaan käyttää aktiiviantennia, joka sisältää käytännössä RRU:n ja passiivi antennin ominaisuudet, näin saadaan säästettyä tilaa mastosta. RRU ja antennit sijaitsevat yleensä ylhäällä mastossa. BBU tarvitaan myös ja se sijoitetaan yleensä laitetilaan. (23)

BBU:sta lähtee yhteys (yleensä valokuitu, mutta myös radiolinkki tai kupari yhteyttä voidaan käyttää) runkoverkkoon isommassa laitetilassa (yleensä palvelinsalissa) sijaitsevaan ohjaimen. Ohjaimessa puhelut yhdistyvät toiseen matkapuhelimeen tai jatkavat eteenpäin yleiseen puhelinverkkoon. Ohjaimessa myös data yhteys ohjataan Internettiin. Ohjain voi olla fyysinen oma laite tai virtualisoitu. Sen lisäävä sähkönkulutus vaikutus on noin 0,5 Wh/Gt fyysisellä 2G BSC-yksiköllä (eli 2G-verkon osalta), uudempien tekniikoiden osalta osuus on todennäköisesti todella pieni ja tulevaisuudessa fyysiset yksiköt ovat vaihtumassa virtualisoituihin. Virtualisointi todennäköisesti laskee energiankulutusta, sekä mahdollistaa useamman sukupolven ylläpidon samoilla laitteilla yhtä aikaa. (23)

Ohjaimia ei ole edes jokaisessa kunnassa, eikä välttämättä edes jokaisessa maakunnassa. Yhden ohjaimen läpi kulkee suuri määrä liikennettä, niin niin ne on voitu keskittää isompiin laittiloihin, myös ohjaimia voi virtualisoida ja ohjain voi olla palvelimeen asennettuna. Matkapuhelinverkon tukiasema ei toimi ilman yhteyttä ohjaimen. (23)

Yhteisten komponenttien käyttö matkapuhelinverkossa vähentää sähkönkulutusta, pienentää tilantarpeita ja mahdollistaa useiden eri sukupolvien ylläpidon rinnakkain energiatehokkaasti.

2.5.1 2G (GSM, GPRS, EDGE)

2G verkkoa käytetään Euroopassa 900 MHz ja 1800 MHz taajuusalueella. Suomessa 2G on toteutettu pääsääntöisesti nykyään 900 MHz taajuusalueella, jossa on 124 kanavaa. Jokaisella operaattorilla on 11,4 MHz kaista tälle taajuusalueelle, tämä alue on yleensä jaettu 3G:n kanssa puoliksi ja myöhemmin myös 4G tai 5G voi tulla samalle alueelle laajempaan käyttöön.

11,4 MHz taajuusalue jaetaan kanaviin ja kanavien leveys on 0,2 MHz, näin ollen Manner-Suomessa per operaattori saadaan 57 kanavaa. Näitä kaikkia kanavia ei voida käyttää, koska osa varataan 3G:lle ja yleensä kanava-alueiden väliin jätetään yksi suojakanava. (24)

Yhdessä kanavassa on kahdeksan aikajaksoa, jossa voi tapahtua yksi hyvälaatuinen äänipuhelu, kaksi heikompi laatuista äänipuhelua tai sitten ne voidaan käyttää GPRS- tai EDGE-tiedonsiirtoon. EDGE-tiedonsiirtonopeus on kaikkia kahdeksaa aikaväliä käyttäessä 473,6 kbit/s, mutta käytännön nopeus yleensä 236,8 kbit/s. (24)

VAMOS-tekniikka mahdollistaa 4 puhelua per aikajakso, joten sen avulla saadaan 2G:n puhelukapasiteettia kasvatettua moninkertaisesti. Ericssonin laitteisiin tämän ominaisuuden tuonti vaati vain ohjelmistopäivityksen. (23).

JRC:n raportissa ei kerrota täsmälleen, millainen kaistanleveys on käytössä ja millainen laitekoonpano on. Tästä johtuen jouduin olettamaan, että 2G:n osalta on käytössä kaikki 127 kanavaa ja näiden avulla laskin 5 MHz kaistanleveyden kuluttaman sähkön ruuhkatunnin ajalta. Ruuhkatunti ei ole sama asia kuin täysi kuorma, mutta laskelmassa oletin, että dataa siirtyy maksimikuorman verran. Suojakanavia en huomionut laskelmassa, enkä eri sektoreita, koska muutoin sähkönkulutus pitäisi jakaa kolmella (JRC:n luvuissa kolme sektoria), joka saa sähkönkulutuksen näyttämään niin pieneltä, että se ei ole oikeissa olosuhteissa mahdollista.

Liitteessä 4 nähdään, että sain tukiaseman sähkönkulutukseksi ruuhkatunnin osalta 64,7 Wh/Gt, laskelmassa ei ole mukana päätelaitteen osuutta. Tämä on huomattavasti vähemmän, kuin lankapuhelinverkossa gigatavun siirto puhelinmodeemilla, mutta toisaalta yhden kanavan sähkönkulutus on pienimmillään 4,7 wattia eli hyvälaatuisen puhelun soittaminen kuluttaa 2G-verkossa huomattavasti enemmän sähköä kuin lankapuhelinverkossa. VAMOS-tekniikan avulla yksi puhelu kuluttaa sähköä noin 1,18 wattia, joka on vähemmän kuin lankapuhelinverkossa.

2.5.2 3G (UMTS, HSDPA, HSPA+)

3G verkkoa käytetään Euroopassa 900 MHz ja 2100 MHz taajuusalueella. Suomessa 3G on toteutettu pääsääntöisesti nykyään 900 MHz taajuusalueella, jossa taajuusalueet ovat samalla lailla jaettuina kuin 2G:n puolella, mutta tekniikka on eri.

3G:ssä käytetään koodijakokanavointi järjestelmää, joissa käyttäjä saa käyttöönsä koko kaistanleveyden (5 MHz), koko yhteyden ajaksi. Kuitenkin koko solun kaistanleveys jaetaan kaikkien solujen käyttäjien kesken ortogonaalisten koodien avulla, jotta käyttäjät voidaan erottaa toisistaan. (24)

Puhekoodekkeja on käytössä useita ja ne tarvitsevat tietyn bittinopeuden. Pienin bittinopeus on 4,75 kbit/s ja paras vaatii 23,85 kbit/s. Paras puheenlaatu saavutetaan 3G:ssä AMR-WB koodekin

avulla, josta on käytetty nimitystä HD puhelu. 3G-verkossa puheluita voi olla huomattavasti suurempi määrä kuin 2G-verkossa ja myös paremmalla äänenlaadulla, mutta käytetty koodekki ja sen bittinopeus vaikuttaa määrään. (24)

3G-verkossa on mahdollista saavuttaa 5 MHz kaistanleveydellä maksimissaan 21,1 Mbit/s latausnopeus ja suurin lähetysnopeus on 5,76 Mbit/s. 3G:ssä olisi mahdollisuus käyttää myös MIMO-tekniikkaa, nopeampien nopeuksien saavuttamiseksi tai Dual-Carrieria, mutta niitä ei ole juurikaan käytössä. (24)

JRC:n raportissa ei kerrota täsmälleen, millainen kaistanleveys on käytössä ja millainen laitekoonpano on. Tästä johtuen jouduin olettamaan, että 3G:n osalta on käytössä 5 + 5 MHz kaistanleveys ja näiden avulla laskin 5 MHz kaistanleveyden kuluttaman sähkön ruuhkatunnin ajalta. Ruuhkatunti ei ole sama asia kuin täysi kuorma, mutta laskelmassa oletin, että dataa maksimikuorman verran. Suojakanavia en huomionut laskelmassa, enkä eri sektoreita, koska muutoin sähkönkulutus pitäisi jakaa kolmella (JRC:n luvuissa kolme sektoria), joka saa sähkönkulutuksen näyttämään niin pieneltä, että se ei ole oikeissa olosuhteissa mahdollista.

Liitteessä 4 nähdään, että sain tukiaseman sähkönkulutukseksi ruuhkatunnin osalta 37,7 Wh/Gt, laskelmassa ei ole mukana päätelaitteen osuutta.

2.5.3 4G (LTE, LTE-A)

4G tekniikka on ensimmäinen matkapuhelinverkon tekniikka, jossa ei ole käytössä piirikytkentäisiä puheluja, vaan verkko välittää vain dataa. Tämän takia puhelut on rakennettu kulkemaan data-yhteyden päällä ja kehitetty VoLTE. Toinen vaihtoehto on käyttää muita IP-verkoissa toimivia ratkaisuja esimerkiksi VoIP.

VoLTE:n lisäksi on tullut ViLTE, joka mahdollistaa videopuhelut (myös 3G-verkossa oli mahdollista soittaa videopuheluita). Näissä molemmissa LTE:n yli toteutetuissa tekniikoissa on sellainen ongelma, etteivät ne toimi automaattisesti kaikilla päätelaitteilla, vaan vaaditaan tuki päätelaitteelta ja sen ohjelmistosta, verkolta, sekä teleoperaattorilta. Tämä aiheuttaa haasteita etenkin, jos halutaan käyttää VoLTE:tä ulkomailla tai Suomessa yritetään käyttää sellaista laitetta, jota teleoperaattori ei

tue. Pahimmassa tapauksessa suoraan teleoperaattorilta ostetulla 4G-puhelimellakaan ei voi soittaa 4G-verkon kautta puhelua, vaan puhelin vaihtaa 3G- tai 2G-verkkoon puhelun ajaksi.

VoLTE:ssä on mahdollisuus käyttää samaa AMR-WB koodekkia kuin 3G-verkossa (HD puhelu), sekä monia muita esimerkiksi AMR-WB+ joka mahdollistaa jopa 48 kbit/s bittinopeuden ja EVS koodekin (jopa 128 kbit/s), josta käytetään nimitystä Full-HD Voice (HD+). VoLTE ei takaa hyvälaatuista puhelua ja vaan laatu voi pudota verkon kuormitusasteen ja kuuluvuuden mukaan huonoksi. (25)

4G tekniikka mahdollistaa entistä suurempien kaistanleveyksien käytön, useampien eri moduloitien käytön, sekä myös MIMO:a hyödynnetään käytössä olevissa verkoissa. Kuvassa 10 nähdään kuinka paljon eri modulointi ja kaistanleveys vaikuttaa saatavaan teoreettiseen maksiminopeuteen. Kuvassa ei näy uusimmat moduloinnit, jotka mahdollistavat entistä suuremmat nopeudet.

Modulointi ja koodaus	Bittä / Symboli	MIMO:n käyttö	1.4 MHz	3.0 MHz	5.0 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
QPSK 1/2	1	Yksittäinen	0.8	2.2	3.7	7.4	11.2	14.9
16QAM 1/2	2	Yksittäinen	1.5	4.4	7.4	14.9	22.4	29.9
16QAM 3/4	3	Yksittäinen	2.3	6.6	11.1	22.3	33.6	44.8
64QAM 3/4	4.5	Yksittäinen	3.5	9.9	16.6	33.6	50.4	67.2
64QAM 1/1	6	Yksittäinen	4.6	13.2	22.2	44.7	67.2	89.7
64QAM 3/4	9	2x2 MIMO	6.6	18.9	31.9	54.3	96.7	129.1
64QAM 1/1	12	2x2 MIMO	8.8	25.3	42.5	85.7	128.9	172.1
64QAM 1/1	24	4x4 MIMO	16.6	47.7	80.3	161.9	243.5	325.1

KUVA 10. LTE:n teoreettiset maksiminopeudet eri kaistanleveyksillä ja moduloinneilla (24)

LTE-A (LTE+, 4G+) mahdollistaa yhdistämisen useaan eri taajuudella olevaan LTE-tukiaseman soluun eri kaistanleveyksillä yhtä aikaa eli tämän avulla saadaan suurempi kaistanleveys käyttöön ja suurempi nopeus. Esimerkiksi 800 MHz taajuudelta 10 MHz kaista ja 1800 MHz taajuudelta 20 MHz kaista yhteensä 30 MHz kaistanleveys.

JRC:n raportissa ei kerrota täsmälleen, millainen kaistanleveys on käytössä, millainen modulointi ja millainen laitekoonpano on. Tästä johtuen jouduin olettamaan, että 4G:n osalta käytetään 64QAM-modulointia ja näiden avulla laskin 5 MHz kaistanleveyden kuluttaman sähköän ruuhkatuntin ajalta. Ruuhkatunti ei ole sama asia kuin täysi kuorma, mutta laskelmassa oletin, että dataa maksimikuorman verran. Suojakanavia en huomionnut laskelmassa, enkä eri sektoreita, koska muutoin sähkönkulutus pitäisi jakaa kolmella (JRC:n luvuissa kolme sektoria), joka saa sähkönkulutuksen näyttämään niin pieneltä, että se ei ole oikeissa olosuhteissa mahdollista.

Liitteessä 4 nähdään, että sain tukiaseman sähkönkulutukseksi ruuhkatunnin osalta 24,1 Wh/Gt, laskelmassa ei ole mukana päätelaitteen osuutta.

2.5.4 5G (5G-NSA, 5G-SA)

5G-NSA käyttää ankkuritaajuutena 4G-verkkoa eli se ei toimi ilman yhteyttä 4G-verkkoon. 4G-verkosta tulee tieto, että olisi mahdollista liittyä 5G verkkoon ja päätelaite sitten liittyy 5G:hen halutesaan, jos verkon kuuluvuus ja muut päätelaitteen asettamat vaatimukset täyttyvät. 5G-SA on vielä testivaiheessa ja Suomessa ei ole vielä yleisesti saatavilla miltään operaattorilta. 5G-SA:ssa päätelaite yhdistää suoraan 5G-verkkoon, eikä se vaadi edes 4G-verkon kuuluvuutta.

5G-SA:ssa puhelut tapahtuvat VoNR kautta, vastaavasti kuin VoLTE:ssä, täsmälleen samojen haasteiden kanssa eli päätelaitteen, verkon ja operaattorin pitää tukea VoNR:ää. ViNR on myös mahdollista, jotta videopuhelut onnistuvat.

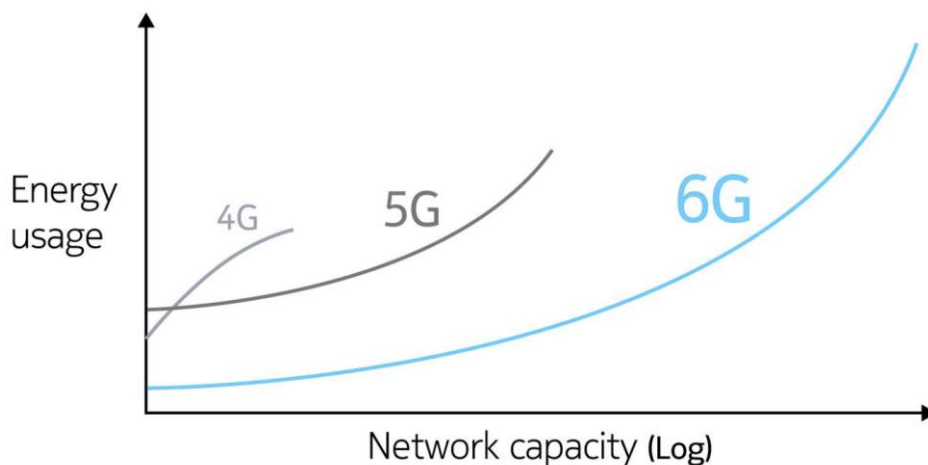
5G-mahdollistaa uudempien modulointien käytön ja entistä suurempien kaistanleveyksien käytön, myös verkon kapasiteetti voidaan viipaloida erilaisiin osiin, jotta saadaan taattua tietyn kapasiteetin kaista jopa yhdelle käyttäjälle. Aikaisemmissa sukupolvissa tämä ei ollut mahdollista, verkon käyttäjät käytännössä kilpailivat keskenään ja parhaalla signaalilla olevat päätelaitteet saivat eniten nopeutta.

JRC:n raportista ei löydy 5G:n osalta sähkönkulutustietoja, mutta oletin, että se kuluttaa sähköä saman verran kuin 4G, mutta tiedonsiirtonopeus on suurempi, näin saadaan 10,8 Wh/Gt. Laskelmassa ei ole mukana päätelaitteen osuutta.

2.5.5 6G

6G tekniikka suunnitellaan matalan tai keski-suuren kuorman tilanteisiin, jotta saadaan energiankulutusta laskettua alas. Verkko on vielä kehitteillä, mutta siinä tullaan todennäköisesti hyödyntämään entistä enemmän tekoäly ratkaisuja sammuttelemaan radioita ja käynnistämään niitä takaisin, kun kuorma verkossa kasvaa. Kuvassa 11 nähdään kuinka Nokia arvioi tulevan 6G:n kuluttavan huomattavasti vähemmän energiaa, jopa puolet vähemmän kuin 5G. (26)

Network capacity vs energy usage in 4G, 5G and 6G macro networks



KUVA 11. Verkon kapasiteetti suhteessa sähkönkulutukseen (4G, 5G, 6G) (26)

Tämän perusteella voidaan olettaa, että 6G:n sähkönkulutus on puolet 5G:n sähkönkulutuksesta eli 5,4 Wh/Gt. Tämän seurauksena 6G on mahdollisesti ensimmäinen matkapuhelinverkko, joka syrjäyttää kaapelimodeemi laajakaistan DOCSIS 3.0 sähkönkulutuksen osalta. Toisaalta tuleva DOCSIS 4.0 voi olla energiatehokkaampi ja mennä 6G:n edelle, mutta muita kiinteän verkon laajakaistaisia tekniikoita 6G ei todennäköisesti pääse edelle sähkönkulutuksessa.

2.6 WLAN (Wi-Fi)

WLAN (Wi-fi) löytyy lähes jokaisen kotoa, työpaikoilta ja julkisista paikoista. Se on yleistynyt nopeasti ja sen kehitys on yleensä mennyt samaan tapaan kuin matkapuhelinverkkojen eri sukupolvien. Kuvassa 12 nähdään Wi-Fi verkkojen kehitys, kuva on vuodelta 2016, joten uusin Wi-Fi 6 ei vielä silloin ollut valmis.

Wi-Fi-verkot poikkeavat matkapuhelinverkosta siitä, että ne toimivat lupavapailta taajuusalueilla ja kuka vain voi perustaa oman Wi-Fi-verkon. Myös Wi-Fi tekniikat ovat taaksepäin yhteensopivia eli kaikki vanhat (jopa yli 20 vuotta vanhat) laitteet voidaan yhdistää esimerkiksi Wi-Fi 6 -verkkoon (802.11ax) (27). Vanhaa laitetta yhdistäessä edellytetään, että käytetty taajuus on sama, sekä verkon salausta on asetettu joko pois päältä tai valittu yhteensopiva salaustekniikka.

	802.11 (Legacy)	802.11b (Legacy)	802.11a (Legacy)	802.11g (Legacy)	802.11n (HT)	802.11ac (VHT)	802.11ax (HE)
Year Ratified	1997	1999	1999	2003	2009	2014	2019 (Expected)
Operating Band	2.4 GHz/IR	2.4 GHz	5 GHz	2.4 GHz	2.4/5 GHz	5 GHz	2.4/5 GHz
Channel BW	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20/40 MHz	20/40/80/160 MHz	20/40/80/160 MHz
Peak PHY Rate	2 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	54 Mbps	600 Mbps	6.8 Gbps	10 Gbps
Link Spectral Efficiency	0.1 bps/Hz	0.55 bps/Hz	2.7 bps/Hz	2.7 bps/Hz	15 bps/Hz	42.5 bps/Hz	62.5 bps/Hz
Max # SU Streams	1	1	1	1	4	8	8
Max # MU Streams	NA	NA	NA	NA	NA	4 (DL only)	8 (UL & DL)
Modulation	DSSS, FHSS	DSSS, CCK	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM, OFDMA
Max Constellation / Code Rate	DQPSK	CCK	64-QAM, 3/4	64-QAM, 3/4	64-QAM, 5/6	256-QAM, 5/6	1024-QAM, 5/6
Max # OFDM tones	NA	NA	64	64	128	512	2048
Subcarrier Spacing	NA	NA	312.5 kHz	312.5 kHz	312.5 kHz	312.5 kHz	78.125 kHz

KUVA 12. Wi-Fi-verkkojen eri versiot ja tekniset tiedot (28)

JRC:n raportin mukaan erilaiset Wi-Fi tekniikat kuluttavat sähköä joutotilassa vähimmillään 0,7 wattia ja enimmillään 3 wattia. Kun verkossa on liikennettä, kulutus on vähimmillään 1 wattia ja enimmillään 3,2 wattia. (12)

Laskin JRC:n vuoden 2022 lukujen mukaan muutaman eri Wi-Fi-tekniikan sähkönkulutuksen. Sähkönkulutus vaikuttaa olevan energiatehokkainta uusilla Wi-Fi-tekniikoilla, teoreettisen maksiminopeuden mukaan noin 0,001 Wh/Gt (ilman päätelaitetta), mutta kun lasketaan todellisella verkon kuormituksella, saadaan pienin sähkönkulutus IEEE 802.11n-tekniikalla 0,156 Wh/Gt ja suurin IEEE 802.11g-tekniikalla 1,11 Wh/Gt. Wi-Fi-tekniikalla (IEEE 802.11ax) saadaan sähkönkulutukseksi 0,356 Wh/Gt. (LIITE 4)

2.7 Laitetilat

Laitetiloissa kuluu sähköä kiinteistötekniikkaa varten (valaistus, lämmitys, ilmanvaihto, viilennys). Valaistuksen osuus on monissa laitetiloissa todennäköisesti hyvin pieni, koska laitetiloissa yleensä tehdään vain tarvittavat asiat ja lähtiessä sammutetaan valot. Lämmityksen, ilmanvaihdon ja viilennyksen osuus voi olla merkittävä riippuen laitetilasta ja sen laitteistoista. Monissa laitetiloissa nykyään näkee vain puhaltimia hoitamassa viilennystä, suuremmissa tai täyteen ahdetuissa tiloissa näkee myös ilmalämpöpumppuja. Ilmalämpöpumput edut ovat, että sen avulla voidaan pitää laite tila sopivan lämpöisenä myös kesähelteillä ja tämän avulla saadaan laitteiden ja akustojen elinkaarta pidennettyä.

2.8 Varavoimajärjestelmät

Monet telelaitteet halutaan toimivan myös sähkökatkon aikana, joten tarvitaan erilaisia varavoimajärjestelmiä. Myös lainsäädäntö määrää tiettyjen telelaitteiden varavoiman vähimmäiskeston. Suurinta osaa telelaitteista syötetään 48 voltin tasasähköllä. Näin ollen akuston toteutus on helppoa ja erillistä inventteriä ei tarvita tekemään vaihtosähköä. Akustojen lisäksi on käytössä myös muita ratkaisuja esimerkiksi polttoainekäyttöinen generaattori.

48 voltin tasasähköjärjestelmässä yleensä akkujen varaaminen ja laitteiden syöttö tapahtuu samalla tehonlähteellä. Tehonlähteen hyötysuhteen voidaan olettaa olevan nykyään lähellä 90 % ja sen yli, mutta vanhempaa laitteistoa lienee paljon käytössä, joiden hyötysuhde ei välttämättä ole yhtä hyvä.

2.9 Verkon hallintajärjestelmät (monitorointi ja lakisääteisen tiedon tallennus)

Verkkoa ja sen laitteita pitää pystyä jotenkin hallitsemaan, sekä tarjoamaan verkon käyttäjille tarvittavia palveluita, jotta yhteyttä voi käyttää. Verkosta pitää myös tallentaa lakisääteistä tietoa ja lisäksi voidaan tallentaa tietoja esimerkiksi verkkolaitteiden hälytyksistä, asiakasmääristä ja liikennemääristä.

Datan määrä on yleensä matkapuhelinverkon osalta isompaa kuin kiinteän verkon osalta, koska kiinteässä verkossa on vähemmän muuttuvia asioita. Toisaalta kiinteässä verkossa tiedonsiirtoa tapahtuu enemmän, joten tallennettava määrä voi olla samaa luokkaa.

Näiden asioiden toteuttamiseen käytetään palvelimia. Palvelimien määrä vaihtelee kerättävän tiedon määrän mukaan ja käytettävien järjestelmien mukaan. Isolla teleyrityksellä, jolla on paljon asiakkaita, tarvitsee todennäköisesti moninkertaisen määrän palvelimia verrattuna pieneen teleyritykseen. Tekemässäni kyselyn vastauksissa arvioitiin palvelimien osuutta merkittäväksi (1).

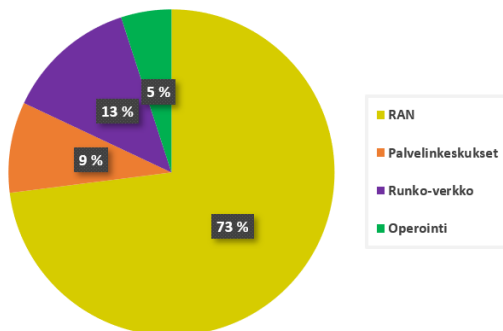
2.10 Laskutus, viankorjaus, asiakaspalvelu

Todennäköisesti samanlainen asiakaspalvelu ja laskutusjärjestelmä voisi olla käytössä eri tekniikoilla, joten osuudet sähkönkulutuksen osalta voisi olettaa samaksi kaikilla tekniikoilla. Vikatapauksien osalta voidaan olettaa samaa, kiinteän verkon laitteet yleensä ovat pitkäikäisiä verrattuna langattomiin, mutta kiinteässä verkossa voi esimerkiksi kaapeli katketa.

Matkapuhelinverkon laitteistoja uusitaan yleensä paljon tiuhempaan ennen niiden käyttöiän päättymistä, esimerkiksi uusien sukupolvien takia (2G, 3G, 4G ja 5G). Tukiasemia uusitaan jopa alle viiden vuoden välein, joista vikaantumisen takia uusintaan menee pieni murto-osa (29).

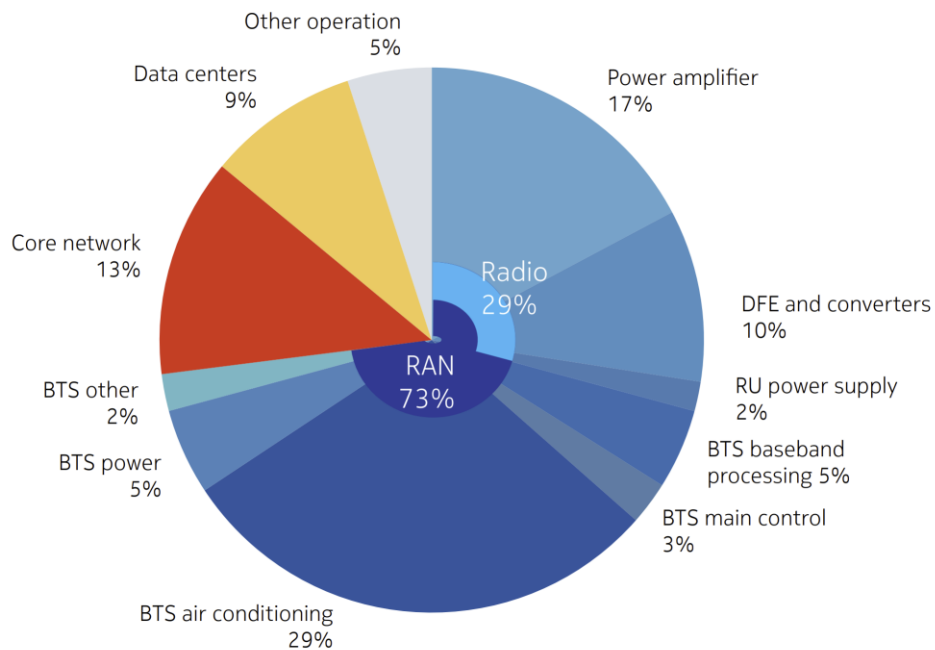
2.11 Sähkönkulutuksen jakautuminen

GSMA Intelligence:n vuoden 2021 tutkimuksen mukaan, seitsemän matkapuhelin teleoperaattorin, jotka toimivat 28 eri maassa, sähkönkulutus jakautuu keskimäärin kuvan 13 osoittamalla tavalla. Kuvasta nähdään, että radioverkot (RAN) vievät suurimman osuuden sähköstä ja palvelinsalien osuus on pieni, koska kyseessä on vain teleoperaattorien omat palvelinsalit ja operaattoreiden omat toiminnot. (30)



KUVA 13. Matkapuhelin teleoperaattoreiden sähkönkulutuksen jakautuminen (30)

Saman tutkimuksen pohjalta, Nokia on tehnyt oman version, jossa esitetään tarkemmin, miten eri matkapuhelinverkon komponenttien sähkönkulutus jakautuu edellä mainitussa jakaumassa (kuva 14).



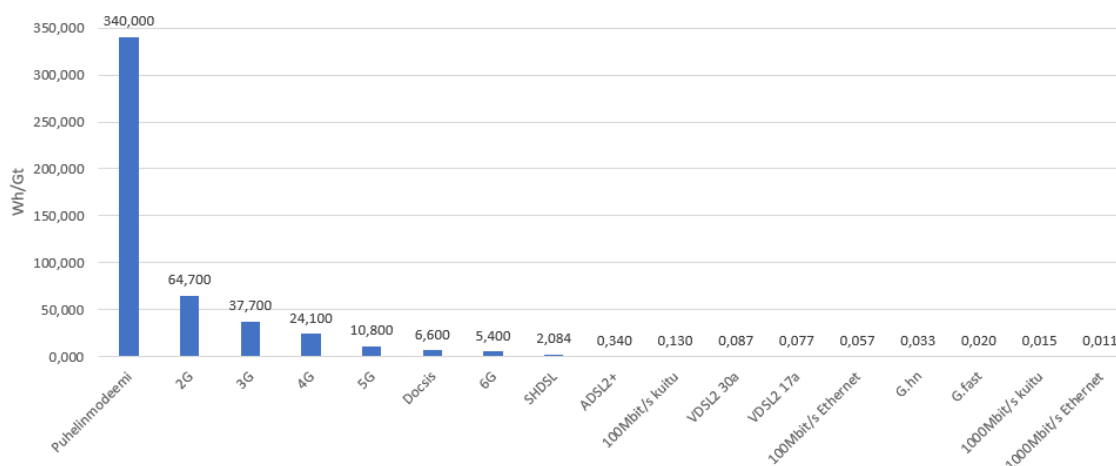
KUVA 14. Nokian versio GSMAn raportin pohjalta teleoperaattoreiden sähkönkulutuksen jakautumisesta (31)

Molempien osalta nähdään, että matkapuhelinverkot vievät paljon sähköä ja jäähdytys tarvitsema energiamäärä on myös merkittävä. Näiden perusteella pelkästään kiinteässä verkossa toimivan teleyrityksen sähkönkulutus voi olla yli 70 % pienempää kuin vastavan kokoisen teleyrityksen, joka tarjoaa palveluita matkapuhelinverkon kautta samankokoiselle asiakasmäärälle.

Kiinteässä verkossa todennäköisesti jakauma on muutoin aika vastaava (jos RAN-osuus poistetaan). Toki RAN-osuuden tilalla voisi olla tilaajalaitteistojen sähkönkulutus, jotka lienee suurempaa kuin runko-verkon laitteistojen osuus.

3 VERTAILU ERI TEKNIKOIDEN VÄLILLÄ

Edellä laskettujen kulutustietojen perusteella saadaan selville, että matkapuhelinverkossa tiedon siirtäminen kuluttaa eniten sähköä verrattuna muihin laajakaistaisiin tekniikoihin (kuva 15 ja taulukko 4). Vertailtavista tekniikoista lankapuhelinmodeemi kulutti selkeästi eniten sähköä gigatavun siirrossa ja 2G tekniikka osoittautui energiatehokkaammaksi. Tuleva 6G tekniikka voi olla kilpailija kaapelimodeemi tekniikalle sähkökulutuksen osalta.



KUVA 15. Sähkökulutus (Wh/Gt) erilaisten tekniikoiden välillä (energiatehokkain oikealla)

TAULUKKO 4. Sähkökulutus (Wh/Gt) erilaisten tekniikoiden välillä

Tekniikka	Wh/Gt	Tekniikka	Wh/Gt
Puhelinmodeemi	340,000	100Mbit/s kuitu	0,130
2G	64,700	VDSL2 30a	0,087
3G	37,700	VDSL2 17a	0,077
4G	24,100	100Mbit/s Ethernet	0,057
5G	10,800	G.hn	0,033
Docsis	6,600	G.fast	0,020
6G	5,400	1000Mbit/s kuitu	0,015
SHDSL	2,084	1000Mbit/s Ethernet	0,011
ADSL2+	0,340		

Nämä lukemat edustavat hyvin todellisuutta xDSL- ja G.hn-tekniikoiden osalta, niiden osalta laskennassa on käytetty myös laitevalmistajien ilmoittamia kulutuksia. Lankapuhelin verkon kautta toimivan puhelinmodeemin sähkökulutus voi olla mahdollisesti paljon pienempi, käyttäen oikeaa soittosarjan palvelinkonetta ja tietokoneeseen integroitua verkkokorttia, näiden sähkökulutustietoja en saanut selville.

Kaapelimodeemi (DOCSIS) tekniikka on periaatteessa vähän samankaltainen kuin matkapuhelinverkko, mutta ilman antennoja, niin itse voisin ajatella sen olevan aina hiukan matkapuhelinverkkoa energiatehokkaampaa. Matkapuhelinverkon osalta sähkönkulutus voisi olla kolmas osa, kun huomioidaan sektorit, mutta silloin lukemista tulisi liian epärealistiset. Lasketut lukemat lienevät siltikin liian alhaiset, koska ne on laskettu teoreettisen maksimikapasiteetin mukaan, vaikka sähkönkulutus oli annettu ruuhka tuntien ajalta, mutta toisaalta matkapuhelinverkon tekniikka kehittyy jatkuvasti eli se voi olla nykyään lähellä kyseistä tasoa.

Valokuidun ja Ethernetin osalta lukemat ovat JRC:n raportin mukaiset, niin ne todennäköisesti pitävät suunnilleen paikkansa, vaikkakin kuormitusaste on ollut JRC:n raportissa hyvin pientä, vaikka laskin maksimi nopeudella. Toisaalta havaitsin mittauksissani ja saamistani sähkönkulutusdatasta huomasin, ettei Ethernet-tekniikassa verkon kuorma vaikuta juurikaan sähkönkulutukseen.

Wi-Fi-tekniikka on selvästi matkapuhelinverkkoa energiatehokkaampi, etenkin sen lyhyen kantan vuoksi. Taulukossa 5 nähdään muutamien eri Wi-Fi-versioiden sähkönkulutuksia. Tuloksista nähdään, että sähkönkulutus on nykyään käytössä olevilla versioilla (IEEE 802.11n versiosta eteenpäin) enimmillään samaa luokkaa kuin ADSL2+ yhteydellä, mutta pääsee myös sen alapuolelle. Teoreettisia maksiminopeuksia (Wh/Gt Max) käytettäessä päästään liian alhaisiin sähkönkulutuksiin (jopa valokuidun alapuolelle), joten todellisen kuorman avulla laskettuna tulos on luotettava (Wh/Gt).

TAULUKKO 5. Muutamien eri Wi-Fi tekniikoiden sähkönkulutuksia Wh/Gt

Tekniikka	Wh/Gt Max	Wh/Gt
IEEE 802.11g	0,041	1,111
IEEE 802.11n	0,005	0,156
IEEE 802.11ac	0,001	0,211
EEE 802.11ax	0,001	0,356

3.1 Oletettu verkon käyttäjän vaikutus

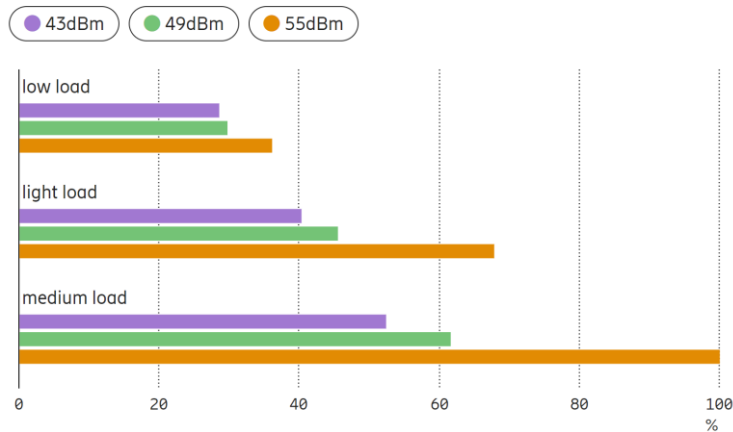
Laskelmissa nähtiin, että matkapuhelinverkon osalta sähkönkulutus on suurta, vaikkei verkossa kuormitusta juurikaan olisi, mutta kuormitus kasvattaa kulutusta. 2G:n osalta nähdään, että yksittäisen kanavan sähkönkulutus vaihtelee 2,2 W (ruuhkatunti – pienen kuorman-tila), joten yksittäisen käyttäjän osuus esim. puhelun soittaminen tai tiedonsiirto voi tämän verran nostaa sähkönkulutusta (noin 32 %). (Liite 4)

3G-verkossa vastaava ero (ruuhkatunti – pienen kuorman-tila) ero on 107,5 wattia, joten koko kaistan täydeltä tiedonsiirto voi nostaa kulutusta, jopa 30 %. 4G-verkossa sama ero on 140 wattia (noin 36%) 5 MHz kaistanleveydellä, Suomessa 4G-verkko on pääasiassa rakennettu 10 MHz ja 20 MHz kaistanleveyksillä, joten vaikutus voi olla huomattavasti suurempi. Toisaalta laajemman kaistanleveyden ylläpito kuluttaa vähemmän energiaa kuin useiden eri taajuusalueella olevien verkkojen ylläpito, esimerkiksi 100 MHz kaistanleveydellä toimiva 5G-verkko kuluttaa sähköä vähintään 25% vähemmän kuin olen laskelmissani käyttänyt (23). Lisäksi päätelaite voi tukea CA:ta, jolloin voidaan käyttää useampaa taajuutta yhtä aikaa eli käytössä voi olla vaikka 40 MHz kaistanleveys.

5G-verkossa ero on todennäköisesti entistä isompi ja siellä on mahdollisuus käyttää vieläkin isompia kaistanleveyksiä. Esimerkiksi Ericssonin julkaisussa kuva 16 nähdään, että 5G:ssä useiden eri energiansäästö toimenpiteiden avulla saadaan energiankulutus laskettua 36,1 prosenttiin pienen kuorman tilassa keskimääräisen kuorman tilanteesta (32). Tämä olisi jo 63,9 % vaikutus, todennäköisesti ero ei ole aivan yhtä suuri käytännössä.

Olen nähnyt testimittauksia 4G- ja 5G-verkon osalta, miten kuorma vaikuttaa sähkönkulutukseen ja niiden perusteella laskemani sähkönkulutuksen vaihteluvälit ovat mahdollisia. Suuresti vaikuttaa millä nopeudella ja signaalintasolla verkkoa kuormitetaan. Gigatavun siirto on energiatehokkainta tehdä mahdollisimman nopeasti (lyhytaikainen suuri sähkönkulutus). Pienellä tiedonsiirtonopeudella radioresurssit ovat varattuna pitempään ja sen vuoksi gigatavun siirtoon kuluu enemmän sähköä, vaikka sähkönkulutus kasvaa vähemmän, mutta ajallisesti siirto kestää kauemman. (33)

Energy consumption



KUVA 16. 5G:n energiansäästö potentiaali useiden energiansäästö mekanismien avulla (32)

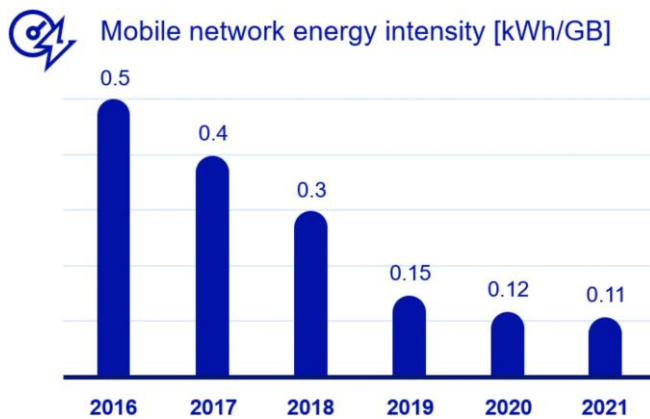
Wi-Fi-verkossa käyttäjän vaikutus vaihtelee suuresti eri versioissa. JCR:än raportin mukaan vaihtelua on joutotilan ja kuormitustilan välissä, joidenkin tekniikoiden osalta ero on hyvin suurta esimerkiksi seuraavissa kokoonpanoissa: IEEE 802.11a/h (30 dBm EIRP) ja IEEE 802.11n 5 GHz (30 dBm EIRP) ero on molemmissa tapauksissa 1,1 wattia (joutotila 0,7 W ja aktiivitila 1,8 W) eli käyttäjä saa yli tuplattua sähkönkulutuksen. Keskimäärin ero eri Wi-Fi-tekniikoissa vaikuttaa olevan lähellä 0,5 wattia. (12)

Kiinteässä verkossa en havainnut Ethernet ja G.hn tekniikoissa juurikaan sähkönkulutuksessa eroa, jos verkkoa kuormitettiin. G.hn tekniikassa en havainnut eroa aktiivisten porttien osalta, mutta ethernet-kytkimen osalta eroa pystyi havaitsemaan. Oletettavasti G.hn tekniikan mukaisesti käyttäytyvät muut xDSL-tekniikat ellei ole käytössä uusia virransäästö ominaisuuksia.

JRC:n raportissa, Ethernet-porttien osalta erot ovat pieniä, mutta suurempi nopeuksilla porteilla erot kasvavat. Esimerkiksi 1 Gbit/s Ethernet-portissa ero on 0,1 W, 2,5 Gbit/s 1,6 W, 10 Gbit/s 2 W. xDSL-tekniikoiden osalta erot ovat myös pieniä ADSL2+ 0,1 W, VDSL2 0,2 - 0,5 W. DOCSIS ja erilaiset valokuitutekniikat käyttäytyvät myös vastaavasti. (12)

3.2 Vertailu muihin julkisiin lukuihin

Traficomien tutkimuksen mukaan vuonna 2021 Suomessa kului sähköä keskimäärin 0,05 kWh/Gt kiinteässä verkossa siirretyn tiedon osalta ja 0,12 kWh/Gt matkaviestinverkossa (34). Elisan mukaan matkapuhelinverkossa vuonna 2021 sähköä kului 0,11 kWh/Gt (kuva 17) (35).

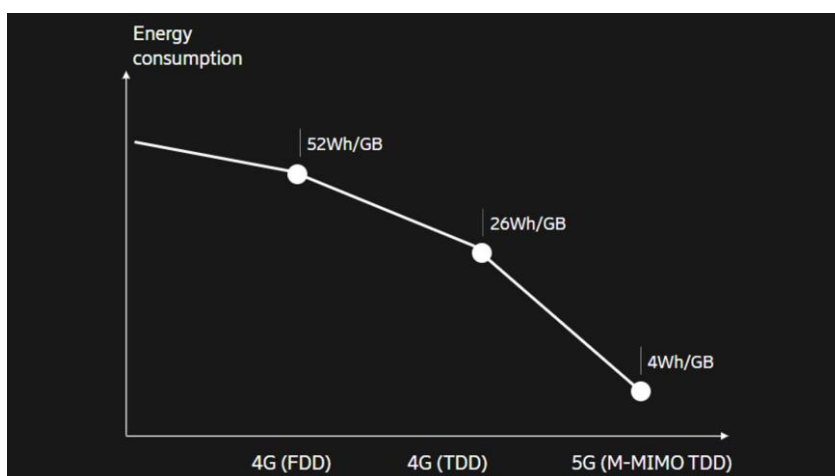


KUVA 17. Elisan matkapuhelinverkon sähkönkulutus kWh/Gt (35)

Internetin sähkönkulutuksen arviot ovat olleet todella vaihtelevia esimerkiksi vuodelle 2000 arvioitiin kuluvan 136 kWh/Gt ja vuodelle 2008 0,004 kWh/Gt. Arvio vuodelle 2015 on ollut 0,023 kWh/Gt ja 0,06 kWh/Gt. Todellisen lukeman selvitys on erittäin hankalaa useiden eri muuttujien takia. (36)

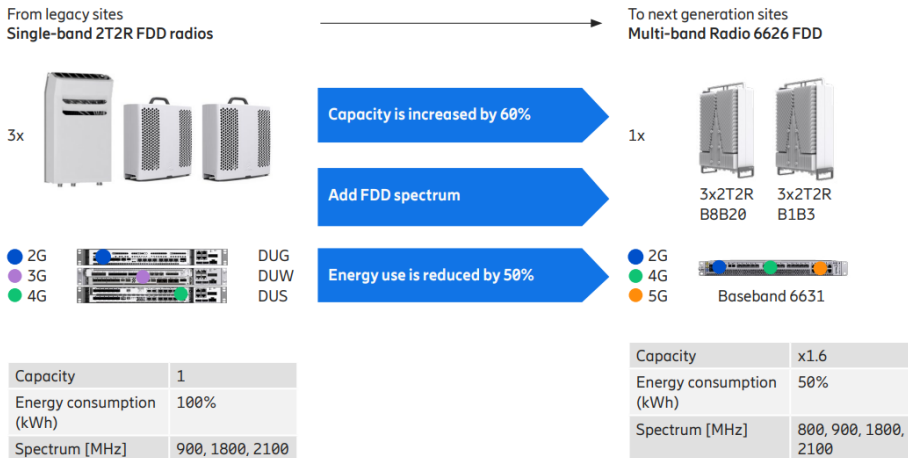
2013 vuonna 2G-verkon kautta siirretty gigatavu kulutti Ruotsissa sähköä 37 kWh/Gt, 3G-verkossa 2,9 kWh/Gt ja 4G-verkossa 0,4 – 0,8 kWh/Gt (37). Keskimäärin Suomen Telian vuoden 2022 4G-verkon sähkönkulutukseksi saadaan 0,117 kWh/Gt ja 5G:n osalta 0,501 kWh/Gt (38).

Ericsson esittelee uusien 5G Massive MIMO radioiden olevan 13 kertaa energiatehokkaampia kuin 4G-verkon radiot (kuva 18) (39). Myös Ericsson esittelee 50 % vähemmän kuluvan energiaa, kun kolme yhden taajuusalueen radiota vaihdetaan useita taajuusalueita tukevaan radioon, sekä samalla kapasiteetti nousee 60 % (kuva 19) myös 3G-verkko poistetaan (40).



KUVA 18. 4G:stä 5G:hen energiankulutus (39)

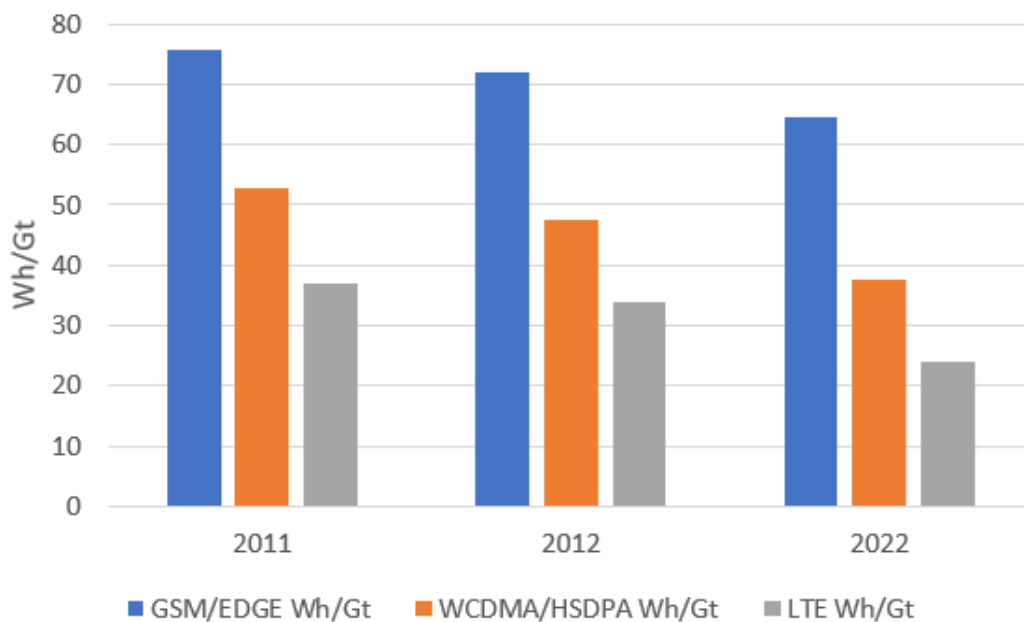
Figure 5: Site expansion and modernization – adding FDD spectrum



KUVA 19. Kolmen yksitaajuusalueisen radion korvaaminen uudella monitaajuisella radiolla (40)

GSMA Intelligence:n tutkimuksen mukaan vuonna 2020 matkapuhelinverkossa gigatavun siirtäminen kuluttaa keskimäärin 240 wattia ja yksi liittymä keskimäärin 14,8 kWh vuoden aikana. Näiden lukujen vaihtelu on erittäin suurta eri verkoissa, lämpimämmissä maissa jäähdytyksen tarve on suurempaa niin sähköä kuluu paljon enemmän. (30)

JRC:n ja VTT:n raporttien pohjalta saadaan selville, kuinka matkapuhelinverkkojen sähkönkulutus on kehittynyt vuosien saatossa (kuva 20) (Liite 5).



KUVA 20. Matkapuhelinverkkojen kehittyminen vuosien saatossa (Liite 5)

Prysmian Groupin tutkimuksesta nähdään, että valokuituyhteys GPON, tekniikalla kuluttaa vähiten sähköä, toiseksi vähiten VDSL2-tekniikka vektoroinnilla, kolmanneksi vähiten suora valokuituyhteys. Eniten sähköä vie kiinteän verkon tekniikoista HFC eli DOCSIS 3.0 (kuva 21). (41)

	VDSL2-Vectoring	HFC	FTTH – PtP	FTTH – GPON
Total energy consumption [MWh/year]	3,465	4,987	3,557	3,156
kWh/year per person	61	88	63	56
Compared to 4-person household [4,200 kWh/year]	6%	8%	6%	5%
CO ₂ Emission [tons/year]	1,850	2,663	1,899	1,685

KUVA 21. Prysmian Groupin selvitys tilaaja tietoverkkojen sähkönkulutuksesta (41)

Näiden eri lukemien perusteella nähdään, että omat laskelmani ovat paljon todellisuutta alempana, johtuen siitä, ettei verkoissa dataa kulje koko ajan maksiminopeudella (verkossa on paljon vapaata kapasiteettia) tai verkossa käytetään paljon vanhoja laitteita. Tietoverkot ovat kehittyneet vuosien saatossa ja samalla sähkönkulutus per siirretty gigatavu on vähentynyt, paitsi uuden tekniikan alkuvaiheessa sillä voi olla paljon suurempi kulutus (kuva 20 nähdään eri tekniikoiden sähkönkulutuksen laskevan), kun se on vielä kehitteillä ja käyttöaste on matala. Myös laitekoonpano vaikuttaa suuresti sähkönkulutukseen, joten ei ole ihme, jos saman tekniikan sähkönkulutus eroaa eri valmistajien laitteilla tai eri-ikäisillä laitteilla.

3.3 M2M tiedonsiirtotekniikat

M2M tiedonsiirtotekniikoita on useita erilaisia, yleensä niitä tarvitaan IoT-laitteille tai sitten laitteistolle, joka ei ole Internetissä. M2M-tiedonsiirtoa voidaan hyödyntää useissa eri käyttötarkoituksissa esimerkiksi mittareiden etäluennassa, laitteiden etäohjauksessa ja paikantamisessa.

M2M-laitteet voivat yhdistää esimerkiksi matkapuhelin verkkoon (2G, 3G, 4G, 5G) ja lisäksi matkapuhelinverkkoon on tehty IoT-laitteita varten optimoituja teknologioita (EC-GSM-IoT, LTE-M, NB-IoT). Näiden lisäksi todennäköisesti tulee lisää uusia teknologioita. (42)

LoRaWAN, Sigfox ja Wireless MBUS ovat muutamia verkkoja, jotka on suunniteltu pelkästään M2M-tiedonsiirtoon. Näiden lisäksi löytyy muita tekniikoita. Wi-Fi-verkkoja käytetään myös IoT-laitteille. Taulukossa 6 nähdään erilaisten tekniikoiden nopeuksia ja huomataan, että 2G:n nopeus riittää kattamaan monien M2M-laitteiden tiedonsiirrossa tarvittavat nopeudet.

TAULUKKO 6. Muutamien yleisten M2M-tiedonsiirtotekniikoiden nopeuksia (24; 43; 44)

Tekniikka	Nopeus
LTE-M	1 Mbit/s
2G (EDGE)	Normaali: 236,8 kbit/s Maksimi: 473,6 kbit/s
NB-IoT	20 – 250 kbit/s
LoRaWAN	0,3 – 50 kbit/s

4 TIETOVERKKOJEN PÄÄSTÖJEN LÄHTEET

Tietoverkoissa päästöjä syntyy verkon rakennuksesta, ylläpidosta ja purkamisesta. Rakentamisen päästöjä ovat esimerkiksi kaapelin asennus ja telemaston rakennus. Näiden osalta päästöihin voidaan vaikuttaa hyvällä suunnittelulla ja vähäpäästöisten komponenttien tai toteutustapojen valinnalla. Esimerkiksi samaan kaapelikaivantoon voidaan laittaa useita kaapeleita tai yhdistää kaapelointi vaikka sähkökaapeleiden kaivamisen yhteyteen.

Ylläpidon osalta päästöjä syntyy esimerkiksi laitteiden kuluttamasta sähköstä, laitteiden uusimisesta ja viankorjaamisesta. Näissäkin voidaan päästöihin vaikuttaa hyvällä suunnittelulla, säännöllisellä huollolla ja valitsemalla sopivimmat komponentit. Esimerkiksi huollossa suosimalla lähellä olevia asentajia, valitsemalla vähäpäästöiset tavat korjaukseen ja laitteiden uusimisessa hankkimalla energiatehokkaampia laitteita oikealla mitoituksella.

Verkon purkamisen osalta päästöjä syntyy varsinaisen purkamisen lisäksi esimerkiksi työmenetelmistä ja jätteiden hävityksestä. Verkon purkamisen päästöt voidaan välttää jatkamalla verkon käyttöä tai luovuttamalla verkko eteenpäin, niin että uusi omistaja jatkaa verkon käyttöä samassa tai uudessa tarkoituksessa. Purkamisen päästöjä voidaan vähentää niin, että purettavia materiaaleja säästetään mahdollisiin korjaustarpeisiin ja ylimääräiset materiaalit annetaan uudelleen käytettäväksi eteenpäin. Vasta sitten kun materiaalille ei löydy uudelleen käyttäjää ne voidaan toimittaa kierrätykseen tai muulla tavoin hävitykseen.

Elinkaaripäästöjä huomioidessa pitää kiinnittää huomiota suunniteltavan verkon tai käytössä olevien verkkojen koko elinkaaren päästöjä, niin että saadaan pienimmät päästöt verkon elinkaaren osalta. Esimerkiksi kallioisessa maastossa selvitetään kannattaako kaapelin louhimisen tilalle harakita ilmakaapelina laittoa, telemaston suunnittelussa selvitetään, voiko laitteet sijoittaa johonkin olemassa olevaan rakennelmaan.

Olemassa olevan verkon osalta elinkaaripäästöjä mietitään esimerkiksi niin että lasketaan millaiset laitteet palvelevat vähimmällä päästömäärällä (huomioituna energiankulutus, käyttöikä ja laitteen valmistuksen päästöt) kyseistä asiakasmäärää nyt ja arvioidun tulevaisuudenkehityksen mukaan. Jos verkon käyttöaste alkaa laskea, tehdään ajoissa uudelleen arviointeja ja tarvittavia muutoksia,

jos verkon purku näyttää olevan edessä, pyritään jatkamaan verkon käyttöikää tai luovutetaan verkko riittävän ajoissa toiselle omistajalle, joka näkee sille vielä käyttöä.

Lyhytaikaisten ja pitkäaikaisten päästöjen lisäksi kannattaa miettiä myös positiivisia vaikutuksia eli päästövähennyspotentiaalia (hiilikädenjälki). Positiivisia vaikutuksia voisivat olla esimerkiksi sellaiset, että tarjotaan asiakkaille heidän tarpeisiinsa nähden sopivinta ja vähäpäästöisintä liittymää, niin ettei asiakkaan tarvitse turhaan uusia laitteitaan, ellei se ole perusteltua elinkaaripäästöjen vuoksi.

Esimerkiksi poistuvan xDSL-yhteyden tilalle tarjotaan valokuitua tai annetaan mahdollisuus käyttää verkko yhteyttä siihen asti, kunnes korvaava yhteys löytyy. Kolmas vaihtoehto olisi, että verkko tarjotaan asiakkaan ylläpitoon (tai omistukseen) ja asiakas (tai esimerkiksi kyläyhdistys) vastaa verkosta (operaattori voisi kuitenkin tarjota yhteyden edullisemmalla kuukausimaksulla).

Toinen esimerkki voisi olla, että operaattori tarjoaa asiakkaalleen myös käytettyjä laitteita ja mahdollistaa myös asiakkaan vanhojen laitteiden käytön omassa verkossaan. Esimerkiksi asiakas tarvitsee nettiä vain perusasioiden hoitoon ja häneltä löytyy sopiva 10 vuotta vanha reititin, teleoperaattori voi laittaa palomuurin päälle ennen asiakkaan verkkoa niin asiakas voi käyttää 'huoletta' vanhaa laitettaan.

Tulevaisuudessa tulevan 2G-verkon alasajon osalta todennäköisesti hiilikädenjälki tulee vaikuttamaan suuresti. Tällä hetkellä 2G-verkossa on paljon erilaisia mittalaitteita ja järjestelmiä, joiden käyttöikä on pitkä, sekä uudempien verkkojen toimivuudessa on puutteita (45). Joten elektroniikkajätteen välttämiseksi todennäköisesti 2G-verkko kannattaa jättää kapealla taajuusalueella käyttöön pitkäksi aikaa.

Hiilikädenjäljen kasvattaminen luultavasti vaikuttaa positiivisesti myös yrityksen tulokseen vähentämällä kustannuksia ja asiakastyytyvyyttä lisäämällä. Se myös on eräänlainen tapa 'kompensoida' toiminnan päästöjä vähentämällä omien asiakkaiden päästöjä, jotka heille muuten syntyisivät uuteen teknologiaan siirtymisen vuoksi.

5 ESIMERKKILASKELMIA

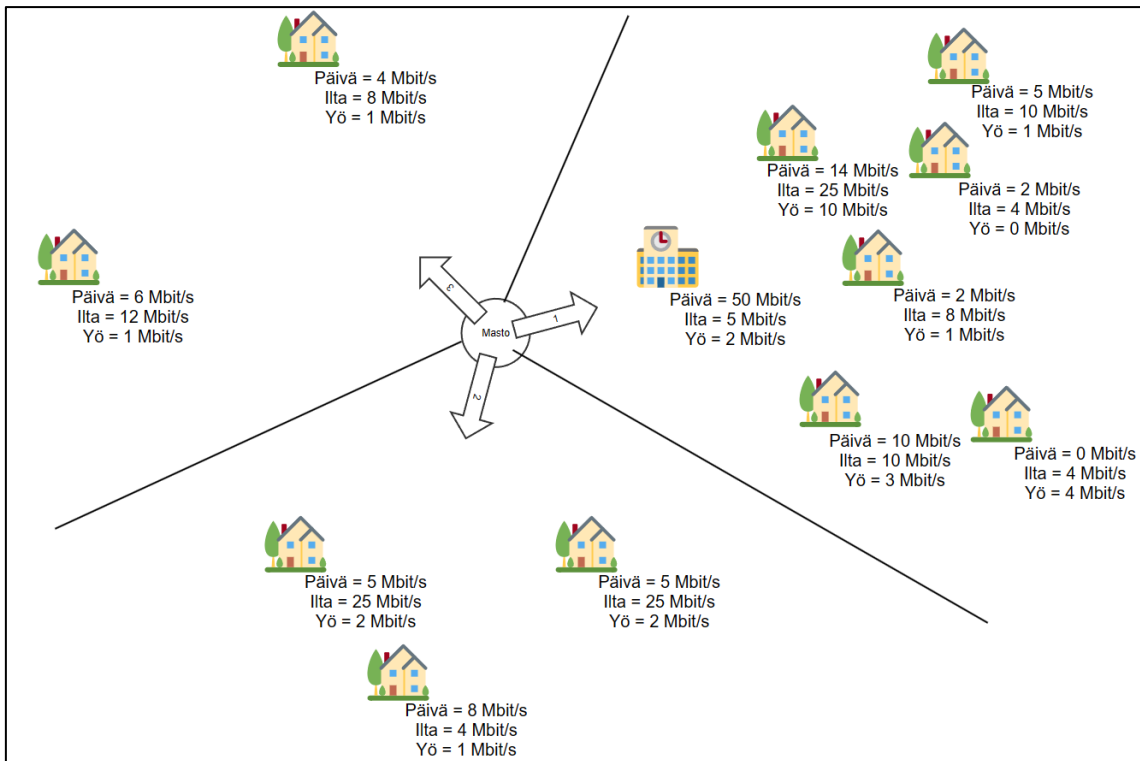
Seuraavat esimerkkilaskelmat pohjautuvat pääasiassa JRC:n raportin lukuihin, sekä liite 4 lukuihin matkapuhelinverkon osalta, samoin oletuksin kuin aikaisemmin kerrottu 5G:n osalta. Laskelmissa erikseen mainitaan, jos on käytetty jotain tiettyä laitetta. Laskelmissa ei ole huomioitu päätelaitteiden sähkönkulutusta, virransyötön hyötysuhdetta, varavoimaa, kiinteistötekniikan ja runkoverkkolaitteiden sähkönkulutuksia. Laskelmien tarkoitus on havainnollistaa todellisia tapauksia, mutta kapasiteettitarpeet ovat valistuneita arvauksia.

5.1 Harvaan-asuttu maaseutu alue (esimerkkilaskelma 1)

Maaseudun esimerkkilaskelman tarkoituksena on tutkia, miten paljon sähköä kuluu harvaan-asutulla seudulla, joissa ei ole tarvetta suurelle kapasiteetille. Kuvassa 22 nähdään kuvitteellinen tilanne, jonka keskellä on telemasto, jossa on kolme antennia (sektoria) ja jokaisella sektorilla on erilainen tarve. Sektorilta yksi löytyy kyläkoulu ja useita omakotitaloja, joiden kapasiteetin tarve vaihtelee. Kapasiteetin tarve kerrotaan megabitteinä sekunnissa, joka kuvastaa keskimääräistä tarvetta. Vuorokausi jaetaan kolmeen osaan: päivä on 8 tuntia, ilta 6 tuntia ja yö loput eli 10 tuntia.

Laskelman tavoitteena on saada tarjottua riittävä kapasiteetti kaikille käyttäjille erilaisien menetelmien avulla ja selvittää, mikä menetelmä kuluttaisi vähiten sähköä. Liikkuvia käyttäjiä ei huomioida laskelmissa. Laskelmissa ei käytetä teoreettisia maksiminopeuksia, vaan käytetään arvioitua käytännön maksiminopeutta, johon vaikuttaa alentavasti pitkät etäisyydet, runsas määrä käyttäjiä tai maastossa olevat esteet. Korkea taajuus kantaa lyhyemmän matkan, matala taajuus pidemmän matkan. Kiinteässä puhelinverkossa, vastaavasti oletetaan, että DSLAM sijaitsee telemaston laite-tilassa tai kohtu lähellä tiheintä asutusta ja linjojen pituus laskee nopeutta.

Matkapuhelinverkon tukiasemalle valitaan kapasiteetti, sen mukaan miten suuri nopeus tarvitaan yhteensä ja miten suuri on arvioitu käytännön nopeus. Jos molemmat ovat lähellä toisiaan käytin laskuissa ruuhkatunnin sähkönkulutusta, jos noin puolet niin silloin käytin keskitason sähkönkulutusta ja alhaisen tason sähkönkulutusta, kun tarve oli pientä. 2G:n osuus on aina maksimia ja siinä oletetaan kulkevan paljon puheluita, muutoin puhelujen osuutta ei huomioida.



KUVA 22. Karttakuva maaseudun esimerkkilaskelman kiinteistöistä ja kapasiteettitarpeista

Sektorilla 1 on lähellä telemastoa ja sillä on eniten taloja ja kyläkoulu, joten kapasiteettitarve on suurin. Sektorilla kaksi on kolme taloa ja kahdessa taloista on hyvin aktiivista käyttöä iltaisin. Sektorilla kolme on kaksi taloa, kaukana telemastosta ja maastossa on esteitä niin nopeudet laskevat.

Laskelmissa ensimmäinen ratkaisu ("2G, 4G ja 5G") on sellainen, jossa on 2G-, 4G- ja 5G-verkot, eikä kiinteää verkkoa lainkaan. Toisessa ratkaisussa ("4G ja 5G") on sama kuin ensimmäisessä, mutta ilman 2G-verkkoa, jotta nähdään 2G:n vaikutus. Kolmannessa ratkaisussa ("2G, 3G ja 4G") loppuu kapasiteetti kesken sektorilta 1 päivisin ja iltaisin, sekä sektorilta 3 iltaisin, joka näkyy liitteessä punaisella. Neljännessä ratkaisussa ("2G ja 4G") on otettu käyttöön 3G:ltä vapautuva taajuusalue ja saatu kapasiteetti riittämään. (LIITE 7)

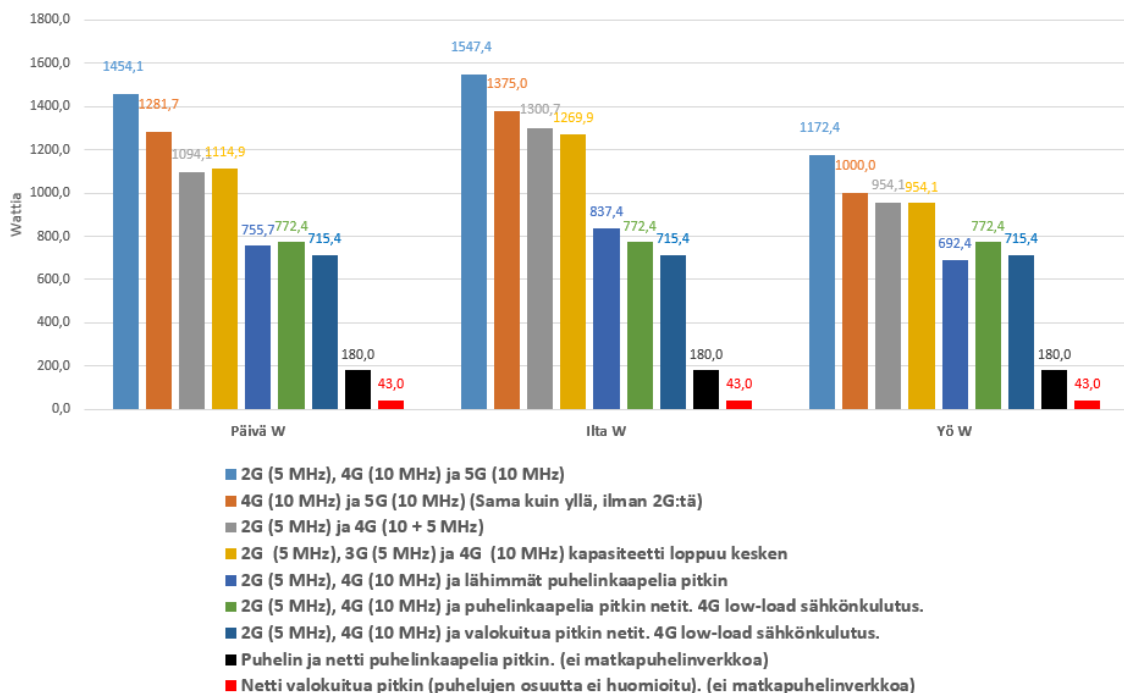
Viidennessä ratkaisussa ("2G, 4G ja lähimmät puhelinkaapelia pitkin") on jätetty tapauksesta yksi 5G-verkko pois ja tilalla on Nokia Siemens Networks hiX 5608, jossa voi olla maksimissaan 8 tilaajaa. Viisi rakennusta kuvitellaan olevan hiX:in kautta VDSL2 yhteydellä koulu, sekä neljä telemastoa lähintä olevaa omakotitaloa. Kuudennessa ratkaisussa ("2G, 4G ja puhelinkaapelia pitkin netit. 4G low-load sähkönkulutus") tulee kaikkiin rakennuksiin yhteys puhelinkaapeleita pitkin ZTE:n

ZXDSL 9806H mini-DSLAMin kautta. Mini-DSLAMissa on ADSL2+ ja VDSL2 kortit ja VDSL2 tilaajia ovat samat rakennukset kuin viidennessä ratkaisussa. Loput rakennukset käyttävät ADSL2+ yhteyttä ja 4G-verkon sähkönkulutus on alhaisimmalla tasolla. (LIITE 7)

Seitsemännessä ratkaisussa ("2G, 4G ja valokuidulla netit. 4G low-load sähkönkulutus") on vastaa tilanne kuin kuudennessa, mutta puhelinkaapeleiden tilalla on valokuituyhteys jokaiseen rakennukseen ja yhteyden jakavana laitteena toimii Mikrotik CRS328-4C-20S-4S+RM, joka mahdollistaa gigabitin yhteysnopeudet. Kahdeksannessa ratkaisussa ("Ei matkapuhelinverkkoa ja puhelinkaapeleita pitkin netti + puhelin") ei ole matkapuhelinverkkoa ollenkaan ja puhelinkaapeleita pitkin tulee yhteydet vastaavasti kuin kuudennessa ratkaisussa, mutta tässä on lisäksi mini-DSLAMissa puhekortti, joka mahdollistaa lankapuhelimen käytön. Yhdeksännessä ratkaisussa ("Netti valokuitua pitkin") on ainoastaan valokuitu kaikkiin kiinteistöihin. (LIITE 7)

Kuvassa 23 ja liite 7 nähdään sähkönkulutuksen vaihtelevan verkon kuorman mukaan. Suurin sähkönkulutus on matkapuhelinverkolla, kun muutamaan lähimpään kiinteistöön tarjotaan yhteys VDSL2 avulla, saadaan sähkönkulutus melkein puolitettua ja jos matkapuhelinverkkoa ei olisi, sähkönkulutus tippuisi reiluun kymmenesosaan ja valokuidun avulla vieläkin pienemmäksi.

Esimerkkilaskelma 1 harvaan asuttu maaseutu: Telelaitteiden sähkönkulutus

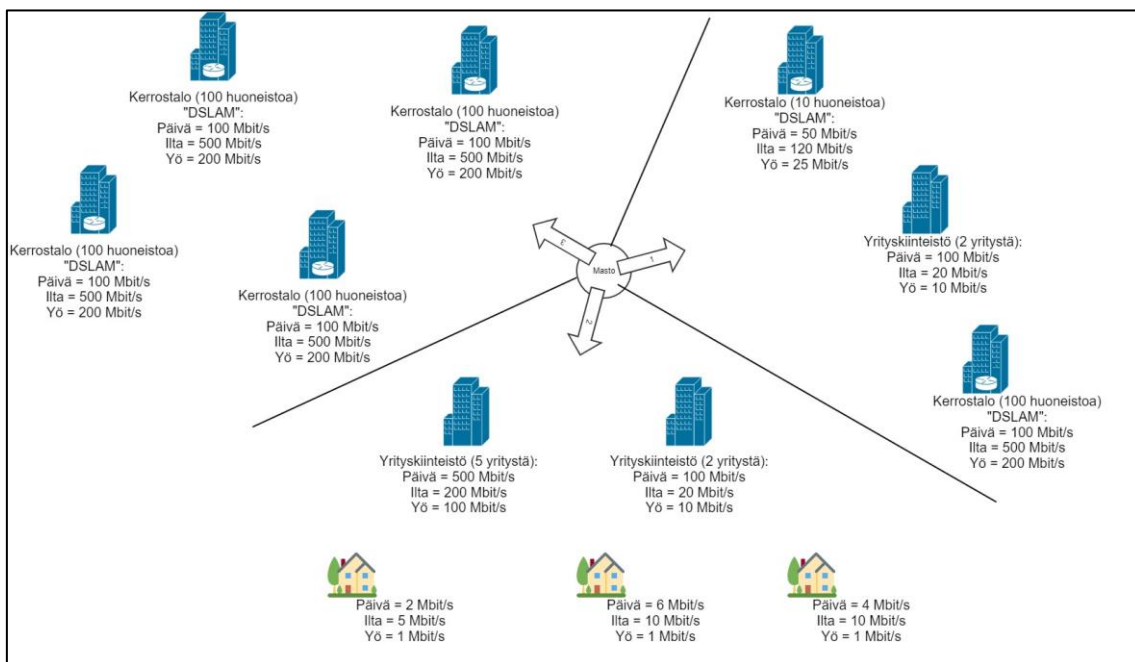


KUVA 23. Maaseudun esimerkkilaskelman telelaitteiden sähkönkulutus (LIITE 7)

Liitteestä 7 nähdään, että 2G-verkon sammutus ei suuresti vaikuta sähkönkulutukseen. 3G:n sammutus ja sen osalta vapaaksi jäävän taajuusalueen uudelleen käyttö 4G-verkossa ei varsinaisesti sähköä säästä, mutta nostaa kapasiteettia. Kiinteää verkkoa kun käytetään lisänä ei tarvita lisäkapasiteettia 4G-verkkoon, eikä 5G-verkkoa kapasiteetin vuoksi. Kiinteän verkon laitteet vievät vähemmän sähköä kuin matkapuhelinverkon tukiasema. (LIITE 7)

5.2 Kaupunkialue (esimerkkilaskelma 2)

Kaupunkialueen esimerkkilaskelma noudattaa samaa kaavaa kuin aikaisempi esimerkkilaskelma. Erona on huomattavasti suurempi kapasiteettitarve ja paljon enemmän käyttäjiä (kuva 24). Kaupunkialue ajatellaan esimerkissä vanhaksi alueeksi, jossa ei ole asuinkiinteistöihin tehty sisäverkon saneerausta, joten esimerkeissä yhteys huoneistoihin jaetaan puhelinkaapelointia pitkin. Antenni-kaapelointia pitkin yhteyden jakaminen voisi olla myös vaihtoehto esimerkiksi DOCSIS tai G.hn-tekniikan avulla, mutta antenniverkko oletetaan niin huonokuntoiseksi, ettei siinä nettiyhteys kulje kunnolla.

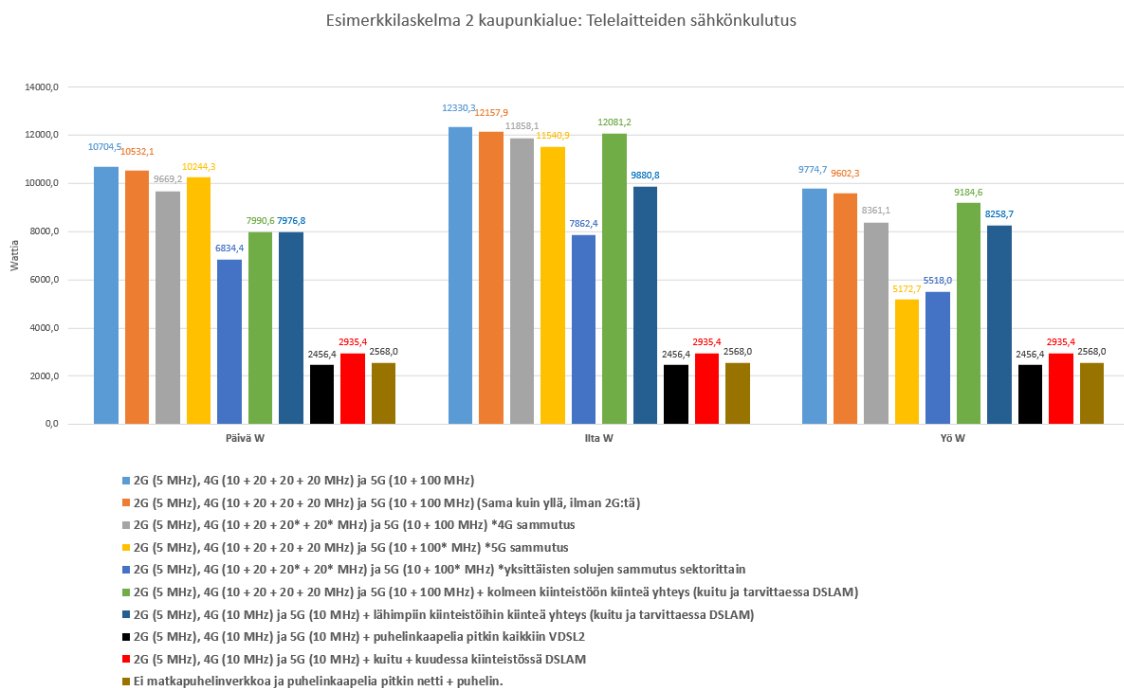


KUVA 24. Karttakuva kaupunkialueen esimerkkilaskelman kiinteistöistä ja kapasiteettitarpeista

Liitteestä 8 nähdään, että tarvitaan useita eri 4G ja 5G taajuusalueita ja siltikin sektorilla 3 iltaisin kapasiteetti loppuu kesken. Matkapuhelinverkon osalta kapasiteettia pitäisi vielä lisätä ja sitä kautta

sähkönkulutus kasvaisi vielä lisää, mahdollisesti yhteen kiinteistöön tukiaseman sijoittaminen riittäisi. Kapasiteettia on per käyttäjä käytännössä vain noin 7 Mbit/s ja kuidun avulla kapasiteetti kasvaa noin 50 Mbit/s, koska VDSL2 laitteistolla saavutettavaksi käytännön nopeudeksi arvioin 50 Mbit/s keskimäärin, vaikka kiinteistöissä voi olla, että saavutettaisiin VDSL2 suuremmatkin nopeudet ja olisi mahdollista käyttää G.fast tai G.hn tekniikkaa. (LIITE 8)

Kaupunkialueen laskelmassa on myös vertailtu 4G ja 5G taajuuksien sammuttelua (kuva 25), sähköä niiden avulla säästyy, etenkin yöaikana, mutta vasta silloin kun olisi mahdollisuus sammuttaa yksittäisiä soluja sektorilta niin sähkön kulutus tippuisi alle tilanteen, jossa olisi osassa kiinteistöissä kiinteä yhteys käytössä. Toki kapasiteettiongelman ratkaisee se, kun riittävän moneen kiinteistöön saadaan kiinteät yhteydet käyttöön ja silloin sähkönkulutus laskee, kun voidaan sammuttaa taajuuksia enemmän, useammin tai kokonaan. (LIITE 8)

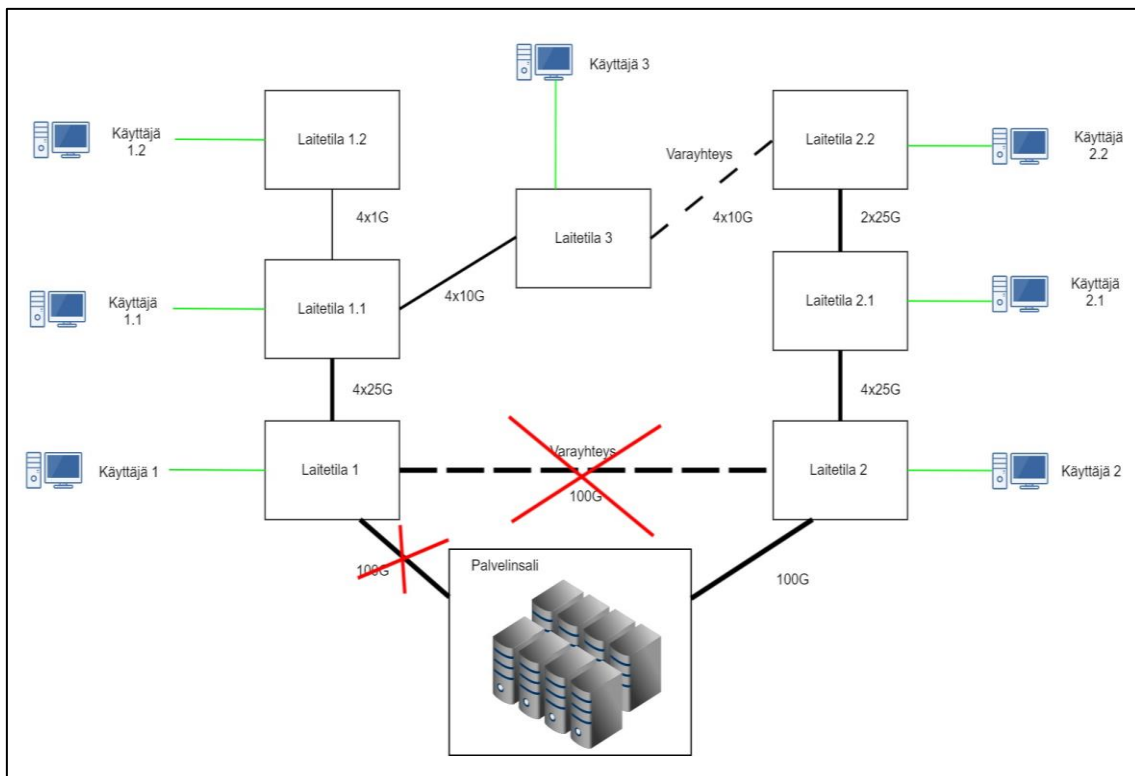


KUVA 25. Kaupunkialueen esimerkkilaskelman telelaitteiden sähkönkulutus (LIITE 8)

Sähkönkulutus tippuu kolmasosaan, kun kaupunkialueelle toteutetaan kiinteät yhteydet jokaiseen kiinteistöön ja matkapuhelinverkon kapasiteetti lasketaan samalle tasolle kuin maaseudulla. Jos matkapuhelinverkko maaseudun tasosta tiputetaan kokonaan pois, niin sähkönkulutuksessa ero on yllättävän pieni, koska kyseessä on kuitenkin paljon käyttäjiä. Parhaiten eron näkee, kun vertailee gigatavun siirtoon kuluva sähkönmäärää. (LIITE 8)

5.3 Runkoverkko (esimerkilaskelma 3)

Runkoverkon yksinkertaisessa esimerkilaskelmassa tutkitaan sähkönkulutuksen vaihtelua per laitetila runkoverkon portin sähkönkulutuksen mukaan. Esimerkilaskelmassa sammutetaan portteja sen mukaan, kun siihen on mahdollisuutta, sekä tutkitaan tilannetta, jos kaksi yhteyttä on poikki (punaiset ruksit) ja varayhteydet käytössä. Kuvassa 26 nähdään havainnekuva yksinkertaisesta laitetilojen välisestä runkoverkosta, jossa myös varayhteyksiä. Kuvassa olevat käyttäjät voisivat olla, vaikka kotitalouksia, mutta laskelmassa ei ole huomioitu tilaajayhteyksien osuutta.



KUVA 26. Runkoverkon esimerkin laitetilat, yhteydet ja käyttäjät

Liitteessä 9 nähdään, että porttien sammuttamisen avulla säästetään yllättävän paljon sähköä, jos siihen on mahdollisuutta ja kapasiteetti ei lopu kesken. Se täytyy huomioida, että monesti varayhteys on lisäksi vielä aina päällä (lähetin lähettää, mutta ei saa vastausta) ja mahdollista piikkikuormaa varten ylimääräistä kapasiteettia on riittävästi saatavilla. Kun kuvassa 26 näkyvät punaisen ruksin kohdalla olevat yhteydet katkeavat ja liikenne kulkee muita reittejä pitkin, nousee huomattavasti käyttäjien 1, 1.1 ja 1.2 runkoverkon sähkönkulutuksen osuus ja lisäksi myös muiden osuus, koska reitin kuorma kasvaa ja yhteyksiä ei voida niin montaa enää sammuttaa. Lisäksi yleensä

myös rikkinäiset yhteydet kuluttavat sähköä, ellei niitä erikseen sammuteta esimerkiksi viankorjauksen ajaksi. (LIITE 9)

Sähkönkulutus on runkoverkossa hyvin pieni osa, kun huomioidaan se, että yhteyksien nopeudet ovat suuria ja siirrettävä tiedonsiirtomäärä on yleensä suurta. Samaa runkoyhteyttä voi olla käyttämässä hyvin suuri määrä käyttäjiä, jopa miljoonia, niin jaettava sähkönkulutuksen osuus jää pieneksi.

6 YHTEENVETO

Matkapuhelinverkko kuluttaa paljon enemmän sähköä, kuin kiinteä verkko. Langaton verkko kehittyi jatkuvasti entistä energiatehokkaammaksi kaikkien sukupolvien osalta laitteiden muuttuessa entistä energiatehokkaammaksi. Erilaiset virransäästö ominaisuudet tulevat laskemaan matkapuhelinverkon sähkönkulutusta, etenkin kehitteillä olevan 6G-verkon osalta, mutta myös 4G- ja 5G-verkkojen osalta.

Uusien laiteratkaisujen myötä on mahdollisuus tulevaisuudessa pitää rinnakkain useita matkapuhelinverkko sukupolvia energiatehokkaasti ja automaattisesti muuttuvan kapasiteettitarpeen mukaisesti. Näin ollen esimerkiksi Ericssonin laitteistolla 2G-verkon ylläpito vie vain pienen osan sähköä muiden tekniikoiden rinnalla, sekä 2G:lle tarvittava kaistanleveys voidaan muokata automaattisesti sopivan kokoiseksi, jotta se ei varaa tarpeettoman isoa taajuusalueita ja sitä kautta kuluta sähköä turhaan (23). Tämä mahdollistaa asiakkailta 2G-verkkoon nojaavien laitteiden käytön, laitteiden käyttöänsä loppuun asti, 2G-yhteensopivia laitteita on valtavasti, koska lähes uudet laitteet ovat alaspäin yhteensopivia, esimerkiksi 5G-puhelin tukee myös 2G-verkkoa.

Uudet IoT-laitteet eivät välttämättä enää tue kuin yhtä tai kahta verkkoteknologiaa ja niissä harvemmin on enää 2G-verkon tukea rinnalla. Toki vieläkin valmistetaan uusia vain 2G-verkossa toimivia laitteita 2G-piirien edullisuuden ja verkon yleisyyden vuoksi. Tulevaisuudessa nähdään, tulee esim. LTE-M tekniikasta yhtä pitkään käytössä oleva kuin 2G-tekniikasta. Itse odottaisin teleoperaattoreilta ilmoitusta, kauanko aikovat mitään verkko tekniikkaa tukea verkossaan, jotta laitevalmistajat voisivat valita laitteelleen heti mahdollisimman pitkä elinkaarisen tekniikan käyttöön.

Toisaalta useimmat puhelinvalmistajat eivät vaikuta ajattelevan elinkaarta, esimerkiksi akku on harvoin vaihdettavaa mallia ja sen kuluessa hankitaan usein uusi puhelin tilalle. Puhelimessa runsaasti kuluttaa sähköä modeemi, joka hakee oletusasetuksilla jatkuvasti nopeinta verkkoteknologiaa, vaikka käyttäjälle riittäisi hitaampikin verkko. Tämän johdosta puhelin kuluttaa jatkuvasti akkua tarpeettomasti ja etenkin, jos puhelin jää roikkumaan siihen 'nopeaan' verkkoon, vaikkei siihen olisi kelvollista kuuluvuutta. Itse olen jo vuosia aina pakottanut puhelimen haluamaani verkkoon, esimerkiksi, jos haluan akun riittävän pitkään, pakotan 2G-verkkoon tai 3G-verkkoon. Jos tarvitsen nopeampaa yhteyttä vaihdan verkon 4G- tai 5G-verkkoon.

Harmiksi tästä verkkojen vaihdosta puhelimen käyttöjärjestelmän tekijät tekevät koko ajan vaikeampaa esimerkiksi Apple on Iphone-puhelimista poistanut kokonaan valinta mahdollisuuden 3G tai 2G verkkoon, myös Samsung on poistanut ne, mutta Android-käyttöjärjestelmässä ne voi vielä vaihtaa itse. Sopivan verkon valinnalla parhaillaan puhelimen akunkesto moninkertaistuu, sekä mahdolliset kuuluvuusongelmat vähenevät. Ehkä tulevaisuudessa puhelimen valmistajat voisivat huomioida myös päätelaitteen sähkönkulutuksen, sekä tarjota ”nopeimman” verkon sijasta toimintavarmimman verkon, pienimmällä sähkönkulutuksella. Tämä tarkoittaisi pääasiassa matalataajuuksien verkkojen käyttöä ja niissä parhaan signaalin laadun omaavan verkon käyttöä.

Suomessa on 2G-verkon toimiluvissa ehto, että toimilupakauden loppuun asti verkkoa pitää ylläpitää (45). Toimilupakausi loppuu vuonna 2033, mutta ehdoissa olevan uudelleen arvioinnin aikana päätettiin, että 2G-verkkoa on ylläpidettävä vähintään vuoden 2029 loppuun asti (46). Arvioinnin aikana keskusteltiin 2G-verkon sulkemisesta jo vuonna 2025 (45). Tästä olisi kuitenkin aiheutunut turhaa laitteiden uusimistarvetta esimerkiksi sähkönsiirtoyhtiöille (noin 3,7 miljoonaa mittaria, joista 76% käyttää 2G-verkkoa), joiden toiveena on 2G-verkon pysyminen ainakin vuoteen 2033 asti (45).

Ison-Britannian ja Pohjois-Irlannin teleoperaattoreista lähes kaikki sulkevat 3G-verkon vuonna 2024 ja yksi operaattori sulkee sen vasta vuonna 2033. 2G-verkon sulkeminen on tarkoitus tapahtua vuonna 2033. Ofcom (Yhdistyneen kuningaskunnan viestintäalan viranomainen) arvio vuonna 2022 asiakkailtaan olevan noin 5,5 miljoonaa vain 2G- ja 3G-verkkoa tukevia laitteita, joissa ei näyt loT-laitteiden määrää, koska moni loT-laite käyttää ulkomaalaisen operaattorin SIM-korttia. Lisäksi tästä määrästä uupuu etäluettavien mittareiden osuus. (47)

2G- ja 3G-verkon sulkeminen lopettaa autoissa käytettävän eCall-järjestelmän toimivuuden hätäpuheluille, jota on asennettu vuodesta 2018 lähtien. Myös haasteita tulee olemaan VoLTE yhteensopimattomien laitteiden kanssa, sekä ulkomaan matkaajilla, joiden operaattori ei ole solminut VoLTE verkkovierailu sopimusta. (47)

Työssäni sain laskettua mielestäni aivan realistiset teoreettiset minimikulutukset eri tekniikoille gigatavun tiedonsiirrossa. Haasteita toi tiedon löytäminen, laitevalmistajat, eivät selvästi mielellään julkaise lukuja watteina. Kiinteän verkon osalta, teknistä kehitystä ei tapahdu niin suuresti kuin langattomissa tekniikoissa, koska kiinteän verkon tekniikat ovat jo valmiiksi energiatehokkaampia ja laitteiden käyttöiät ovat tosi pitkiä. Matkapuhelinverkon osalta, kun verrataan esimerkkilaskelmissani olevia lukuja Elisan ja Telian lukuihin nähdään, että omissa laskelmissani ne ovat aika paljon

alhaisempia. Syy on todennäköisesti se, että teleoperaattoreilla on vielä paljon verkossa vajaakäyttöä, sekä vanhoja laitteistoja. Esimerkkilaskuissa kapasiteetin tarve oli suurta ja kohtu jatkuvaa niin, todellinen käyttöaste lienee paljon pienempää.

Päästöissä pitäisi huomioida sähkönkulutuksen lisäksi matkapuhelinverkon laitteiden lyhyt käyttöikä, yli 5 vuotta vanha tukiasema alkaa olemaan vanhentunutta tekniikkaa, toisaalta uuden laitteen valmistus aiheuttaa päästöjä, mutta se laskee sähkönkulutusta (23). Riittääkö se kompensoimaan sähkönkulutuksen osalta säästettyjä päästöjä? Mitä vanhoille laitteille tehdään, voisiko esimerkiksi samaa alumiini koteloa hyödyntää uudestaan? Kiinteässä verkossa elinkaari laitteilla on todella pitkä, helposti 15-vuotta, mutta nytkin on vielä paljon käytössä vanhempia laitteita, koska kiinteän verkon tekniikka on monelta osin edellä, esimerkiksi verkon viiveiden ja nopeuksien osalta.

LÄHTEET

1. Hautala, Sami 2023. Teleyrityksien näkemyksiä energiankulutukseen ja päästöihin tulokset. Hakupäivä 30.10.2023. <https://iki.fi/sami.hautala/2023/06/teleyrityksien-nakemyksia.html>.
2. Tilastokeskus 2007. Sentraalisantroista kännykkäkansaan - televiestinnän historia Suomessa tilastojen valossa. Hakupäivä 30.10.2023. <https://www.stat.fi/tup/suomi90/syyskuu.html>.
3. Kirja. P. O. Suramo 1940. Puhelintekniikan oppikirja. Osa 1 Puheensiirto. Helsinki: Valtioneuvoston kirjapaino.
4. Keskustelut Ilmajoenpuhelinmuseolla järjestetyssä keskusmiehien kokoontumispäivänä 6.6.2023.
5. Centre for Energy Policy and Economics & Swiss Federal Institutes of Technology 2003. Energy Consumption of Information and Communication Technology (ICT) in Germany up to 2010. Projektin numero 28/01. Karlsruhe/Zurich. Hakupäivä 2.11.2023. https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mtec/cepe/cepe-dam/documents/people/baebischer/ISI_CEPE_ICT_english.pdf.
6. Vskills, Cubezoid Solutions Pvt. Ltd. PSTN and analog modems. Hakupäivä 2.11.2023. <https://www.vskills.in/certification/certified-basic-network-support-professional-pstn-and-analog-modems>.
7. DCB SM-56 Security Dial-up Modem:in tekniset tiedot. Hakupäivä 6.11.2023. <https://www.dcbnet.com/datasheet/sm56ds.html>.
8. Helenius, Ville & Österman, Sauli & Nieminen, Tatu 2000. xDSL. Hakupäivä 9.11.2023. <https://www.netlab.tkk.fi/opetus/s38118/s00/tyot/16/>.
9. Versa technology 2015. The 11 Most Frequently Asked Questions About ADSL2 & ADSL2+ Answered. Hakupäivä 9.11.2023. <https://versatek.com/the-11-most-frequently-asked-questions-about-adsl2-adsl2+answered/>.

10. Cisco 2015. G.SHDSL HWICs for Cisco Integrated Services Routers. Hakupäivä 9.11.2023. https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/interfaces-modules/1800-2800-3800-8-wire-symmetric-high-speed-dsl-g-shdsl-high-speed-wan-interface-card/product_data_sheet0900aecd80581fa0.html.
11. Nokia Siemens Networks 2009. Multi-Service IP DSLAM SURPASS hiX 5622/25/5630/5635 Release 2.8. Hakupäivä 10.11.2023. <https://multimedia.3m.com/mws/media/13790490/access-msan-nokia-siemens-networks-hix5600.pdf>.
12. Bertoldi, Paolo & Lejeune, Andre 2021. JRC. Hakupäivä 22.11.2023. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC125961>.
13. Larry 2021. FS community. RJ45 vs SFP Port: Which Should Be Used to Connect Two Switches? Hakupäivä: 23.11.2023. <https://community.fs.com/article/rj45-vs-sfp-port-which-should-be-used-to-connect-two-switches.html>.
14. Nas Compares 2018. Should you Choose 10GBASE-T Copper Over SFP+ for 10G Ethernet. Hakupäivä 23.11.2023. <https://nascompares.com/2018/06/01/should-you-chose-10gbase-t-copper-over-sfp-for-10g-ethernet/>.
15. Hautala, Sami 2023. Ethernet RJ-45 verkkokytkimien sähkönkulutuksia. Hakupäivä 15.12.2023. <https://iki.fi/sami.hautala/2023/12/ethernet-rj-45-verkkokytkimien.html>.
16. Yrityksen sisäinen materiaali.
17. Van Heddeghem, Ward & Idzikowski, Filip 2012. Equipment power consumption in optical multilayer networks – source data. Hakupäivä 25.11.2023. https://www.researchgate.net/publication/272819245_Equipment_power_consumption_in_optical_multilayer_networks_-_source_data.
18. P. Reviriego & J. A. Maestro & J. A. Hernández & D. Larrabeiti 2021. Study of the potential energy savings in Ethernet by combining Energy Efficient Ethernet and Adaptive Link Rate. John Wiley & Sons, Ltd. Hakupäivä 2.12.2023. <https://core.ac.uk/download/pdf/29406673.pdf>.

19. Giga Copper Networks 2023. Laitteiden teknisiä tietoja. Hakupäivä 26.11.2023 <https://www.giacopper.net/wp/en/internet-distribution-and-networking-in-residential-complexes-incl-poe/>
20. CableLabs 2023. DOCSIS 4.0 Technology. Hakupäivä 27.11.2023. <https://www.cable-labs.com/technologies/docsis-4-0-technology>.
21. Quantifying the energy cost savings from 2G/3G network shutdowns. Alkuperäinen lähde: MTN Consulting, Huawei Technologies. Hakupäivä 6.11.2023. <https://www.mtn-c.com/quantifying-the-energy-cost-savings-from-2g-3g-network-shutdowns/>.
22. Johan von Perner & Vasilis Friderikos 2021. Green Future Networks, Network Energy Efficiency. NGMN Alliance. Hakupäivä 2.12.2023. <https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/211009-GFN-Network-Energy-Efficiency-1.0.pdf>.
23. Henkilö ei halua nimeään tai edustamansa yrityksen nimeä julkaistavan. Teams -keskustelu joulukuussa 2023.
24. Lehtinen, Knuutti 2013. Mobiiliverkkojen kehitys ja verkkojen kapasiteetin muuttuminen. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Tietotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 28.11.2023. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201304275318>.
25. Voice over LTE 2023. Wikipedia. Hakupäivä 2.12.2023. https://en.wikipedia.org/wiki/Voice_over_LTE.
26. Holma, Harri & Viswanathan, Harish 2022. In the 6G era, we won't need to sacrifice sustainability for the sake of performance. Nokia. Hakupäivä 3.12.2023. <https://www.bell-labs.com/institute/blog/in-the-6g-era-we-wont-need-to-sacrifice-sustainability-for-the-sake-of-performance/#gref>.
27. Finnsat 2021. Mikä on Wi-Fi 6 ja mitä hyötyä siitä on kotona? Hakupäivä 3.12.2023. <https://www.finnsat.fi/news/107/mika-on-wi-fi-6-ja-mita-hyotya-siita-on-kotona>.

28. Sankaran, Sundar 2016. Celebrating 25 Years of IEEE 802.11. Commscope. Hakupäivä 3.12.2023. <https://www.commscope.com/blog/2016/the-theory-of-wi-fi-evolution-and-ieee-802.11-selection/>.
29. Henkilö ei halua nimeään tai edustamansa yrityksen nimeä julkaistavan. Teams -keskustelu marraskuussa 2023.
30. Kolta, Emanuel & Hatt, Tim & Moore, Steven 2021. Going green: benchmarking the energy efficiency of mobile. GSMA Intelligence. Hakupäivä 3.12.2023. <https://data.gsmaintelligence.com/api-web/v2/research-file-download?id=60621137&file=300621-Going-Green-efficiency-mobile.pdf>.
31. Viswanathan, Harish & Wesemann, Stefan & Du, Jinfeng & Holma, Harri 2022. Energy efficiency in next-generation mobile networks. Nokia. Hakupäivä 3.12.2023. <https://www.bell-labs.com/institute/white-papers/energy-efficiency-in-next-generation-mobile-networks/#gref>.
32. Zhu, Xu 2023. Breaking the energy curve: Network energy consumption modeling and energy saving technologies. Ericsson. Hakupäivä 3.12.2023. <https://www.ericsson.com/en/blog/2023/8/breaking-the-energy-curve>.
33. Yrityksen sisäinen materiaali.
34. Traficom 2022. Viestintäverkkojen energiankulutuksesta ensimmäinen tutkimus. Hakupäivä 3.12.2023. <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/viestintaverkkojen-energiankulutuksesta-ensimmainen-tutkimus>.
35. Elisa 2023. Energy efficiency in Elisa. Hakupäivä 3.12.2023. <https://elisa.com/corporate/sustainability/energy-efficiency/>.
36. Aslan, Joshua & Mayers, Kieren & G. Koomey, Jonathan & France, Chris 2017. Electricity Intensity of Internet Data Transmission. Julkaisija Wiley Periodicals, Inc., Yale University. Hakupäivä 3.12.2023. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/jiec.12630>.

37. Editor, Enviro, julkaisuvuosi ei tiedossa. Does Your iPhone Use As Much Electricity As A Fridge? (No Way!). Hakupäivä 3.12.2023. <https://www.environment.co.za/eco-green-living/does-your-iphone-use-as-much-electricity-as-a-fridge-no-way.html>.
38. Huttunen, Jari & Pärssinen, Matti & Heikkilä, Tomi & Salmela, Olli & Manner, Jukka & Pongracz, Eva 2023. Base Station Energy Use in Dense Urban and Suburban Areas. Hakupäivä 3.12.2023. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=10005276>.
39. Frank, Li & Massimiliano, Fratini 2023. Embracing energy efficiency in Open RAN architecture. Hakupäivä 3.12.2023. <https://www.ericsson.com/en/blog/2023/7/open-ran-architecture-embracing-energy-efficiency>.
40. Ericsson 2022. On the road to breaking the energy curve. Hakupäivä 3.12.2023. <https://www.ericsson.com/4aa14d/assets/local/about-ericsson/sustainability-and-corporate-responsibility/documents/2022/breaking-the-energy-curve-report.pdf>.
41. Breide, Stephan & Helleberg, Sebastian & Schindler, Jan & Waßmuth, Andreas 2021. Energy consumption of telecommunication access networks. Hakupäivä 3.12.2023. <https://europacable.eu/wp-content/uploads/2021/01/Prysmian-study-on-Energy-Consumption.pdf>.
42. Kosonen, Harri & Nurmi, Pekka 2019. IoT-tekniikan hyödyntäminen sähköverkon mittaustiedon keräämisessä. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. Hakupäivä 6.12.2023. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2019051710391>.
43. DNA Oyj 2023. IoT-tekniikat. Hakupäivä 6.12.2023. <https://www.dna.fi/yriyksille/iot/iot-tekniikat>.
44. Digita Oy 2023. LoRaWAN-tekniikka. Hakupäivä 6.12.2023. <https://www.digita.fi/etusivu/palvelut-yriyksille/digitaan-iot-palvelut/lorawan-tekniikka/>.
45. Lausuntopyyntönsä yhteenveto: VN/15204/2023. 900 ja 1800 megahertsin verkkotoimilupien ns. 2G-toimilupaehdon välitarkastelu. Hakupäivä 6.12.2023. <https://www.lausuntopalvelu.fi/FI/Proposal/Participation?proposalId=aa7e7b1e-9948-441c-8228-ace34751b74a>.

46. Valtioneuvoston päätös: LVM/2023/22. Valtioneuvoston päätös toimilupaehtojen muuttamisesta. Liikenne- ja viestintäministeriö. Hakupäivä 18.12.2023. <https://valtioneuvosto.fi/maatokset/paatokset/decisionId=268>.

47. Krásová, Tereza 2023. Sunsetting 2G and 3G could leave IoT and roamers in the dark. LightReading. Hakupäivä 19.12.2023. <https://www.lightreading.com/broadband/sunsetting-2g-and-3g-could-leave-iot-and-roamers-in-the-dark#close-modal>.

LIITTEET

DSL-tekniikoiden sähkönkulutuksia eri laitteilla.	LIITE 1
Ethernet-tekniikoiden sähkönkulutuksia eri nopeuksilla.	LIITE 2
G.hn-tekniikan sähkönkulutuksia eri laitteilla.	LIITE 3
Matkapuhelinverkon sähkönkulutuksia eri kuormitusasteilla	LIITE 4
Erilaisten Wi-fi-tekniikoiden sähkönkulutuksia	LIITE 5
Matkapuhelinverkon sähkönkulutuksia eri vuosilta	LIITE 6
Esimerkkilaskelma 1 (harvaan-asuttu maaseutu)	LIITE 7
Esimerkkilaskelma 2 (kaupunkialue)	LIITE 8
Esimerkkilaskelma 3 (runkoverkko)	LIITE 9

DSL-TEKNIKOIDEN SÄHKÖNKULUTUKSIA ERI LAITTEILLA

Lähde	Malli	Malli	Kehikko	Korttipaikat	Tekniikka	Maksimi linjat	Maksimi W	W/per linja	lähde 2	W/per päätelaite	DL ~Mt/s per linja	UL ~Mt/s per lin	DL s/Gt	UL s/Gt	DL Wh/Gt per linja	UL Wh/Gt per linja
1; 2	hix	5635	M1100	16	ADSL2+	1080	1700	1,6	2,1	3,0	0,4	333,3	2424,2	0,34	2,47	
1; 2	hix	5635	M1100	16	VDSL2	768	1284	1,7	3,5	18,8	6,3	53,3	160,0	0,08	0,23	
1; 2	hix	5635	M1100	16	SHDSL	768	1300	1,7	9	1,4	1,4	701,8	701,8	2,08	2,08	
1; 2	hix	5635	M1100	16	VoIP	1152	1300	1,1	-	-	-	-	-	-	-	
3; 2	ZTE ZXDSL	9806H	mini-DSLAM	4	ADSL2+	96	180	1,9	2,1	3,0	0,4	333,3	2424,2	0,37	2,68	
3; 2	ZTE ZXDSL	9806H	mini-DSLAM	4	VDSL2	64	181	2,8	3,5	18,8	6,3	53,3	160,0	0,09	0,28	
4; 2	hix	5608		-	VDSL2	8	40	5,0	4	28,8	12,5	34,8	80,0	0,09	0,20	
5; 2	Zyxel	GES1116-FSA		-	G.fast	16	70	4,4	4,7	125,0	125,0	8,0	8,0	0,02	0,02	

$$W/per\ linja = \frac{Maksimi\ W}{Maksimi\ linjat}$$

$$DL\ Mt/s = \frac{DL\ Mbit/s}{8}$$

$$DL\ s/Gt = \frac{1000}{DL\ Mt/s}$$

$$UL\ Mt/s = \frac{UL\ Mbit/s}{8}$$

$$UL\ s/Gt = \frac{1000}{UL\ Mt/s}$$

laite	tekniikka	nopeus	kategoria	DL Mbit/s	UL Mbit/s
ZTE	VDSL2	17a		150	50
hix	VDSL2	17a		150	50
hix	SHDSL			11,4	11,4
hix	ADSL	ANNEX M		24	3,3
hix	VDSL2	30a		230	100
Zyxel	G.fast	noin		1000	1000

DL = Download = lataus
UL = Upload = lähetys

$$DL\ Wh/Gt\ per\ linja = \frac{DL\ s/Gt}{60} \cdot (W/per\ linja + W/per\ päätelaite)$$

$$UL\ Wh/Gt\ per\ linja = \frac{UL\ s/Gt}{60} \cdot (W/per\ linja + W/per\ päätelaite)$$

Lähdeluettelo	
1 Nokia Siemens Networks 2009	https://multimedia.3m.com/mws/media/1379049O/access-msan-nokia-siemens-networks-hix5600.pdf
2 JRC 2021	https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC125961
3 Uonelco.limited myynti ilmoitus	https://www.huaweitelecomequipment.com/sale-14074179-zte-zxdsi-9806h-mini-dslam-zte-9816-zte-9836.html
4 Nokia Siemens Networks 2010	https://telewell.fi/files/28580138.pdf
5 Senetic myynti ilmoitus	https://www.senetic.fi/product/GES1116-FSA-ZZ01V1F

G.HN-TEKNIIKAN SÄHKÖNKULUTUKSIA ERI LAITTEILLA

Malli	Maksimi linjat	Maksimi W	W/per linja (keskus)	Päätelaite W ("reititin")	Päätelaite W (muunnin)	Yhteensä W ("reititin" + keskus)	DL ~Mt/s per linja	DL s/Gt	DL Wh/Gt per linja
G4201(C/TM)	1	3	3,0	8	3	11,0	125,0	8,0	0,024
G4200C	6	40	6,7	8	3	14,7	125,0	8,0	0,033
G4200-8(C/T)	8	55	6,9	8	3	14,9	125,0	8,0	0,033
G4224T	24	80	3,3	8	3	11,3	125,0	8,0	0,025
Lähetysopeus on sama eli UL Wh/Gt per linja on sama kuin DL Wh/Gt per linja.									
DL nopeuksena käytän lukua 1000 Mbit/s							$DL\ Mt/s = \frac{1000\ Mbit/s}{8}$		
DL = Download = lataus							$DL\ s/Gt = \frac{1000}{DL\ Mt/s}$		
UL = Upload = lähetys							$DL\ Wh/Gt\ per\ linja = \frac{DL\ s/Gt}{60} \cdot (W/per\ linja + W/per\ päätelaite)$		
Lähteet:	Giga Copper Networks 2023 https://www.gigacopper.net/wp/en/internet-distribution-and-networking-in-residential-complexes-incl-poe/								

MATKAPUHELINVERKON SÄHKÖNKULUTUKSIA ERI KUORMITUSASTEILLA

JRC:n raportin perusteella seuraavat kulutukset on GSM tukiasemassa, jossa on kolme sektoria ja neljä operaattoria. Kanavia oletetaan olevan yhteensä 124 ja yhden leveys 0,2 MHz									
Lähde: Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment. Version 8.0 2021 JRC									
25 kanavaa *									
Yhteensä W / 124 = yksi kanava W =									
Tilanne	Yhteensä W	Ero % pienempi	Yksi kanava W	5 MHz W	Maksimi Mbit/s	Käytännön Mbit/s	DL Mt/s	DL s/Gt	DL Wh/Gt
GSM/EDGE busy-hour	855	vertailuarvo	6,9	172,4	11,84	5,92	0,7	1351,4	64,7
GSM/EDGE medium-load	700	18,13	5,6	141,1					76,4
GSM/EDGE low-load	585	31,58	4,7	117,9					85,1
Prosentuaalinen ero, oletetaan Wh/Gt luvun kasvavan prosentuaalisen sähkönkulutuksen laskun verran.									
DL = Download = lataus									
EDGE maksiminopeus (8 aikaväliä)	0,4736 Mbit/s								
EDGE käytännön nopeus	0,2368 Mbit/s								
$DL\ Mt/s = \frac{\text{käytännön Mbit/s}}{8}$ $DL\ s/Gt = \frac{1000}{DL\ Mt/s}$ $DL\ Wh/Gt = \frac{DL\ s/Gt}{60} \cdot (5\ MHz\ W)$									
Päätelaitteen osuutta ei ole laskuissa mukana.									
JRC:n raportin perusteella seuraavat kulutukset on WCDMA tukiasemassa, jossa on kolme sektoria ja 2 operaattoria. Oletetaan 5 + 5 MHz									
Lähde: Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment. Version 8.0 2021 JRC									
Tilanne	Yhteensä W	Ero % pienempi	Yksi operaattori W	5 MHz W	Maksimi Mbit/s	Käytännön Mbit/s	DL Mt/s	DL s/Gt	DL Wh/Gt
WCDMA/HSDPA busy-hour	715	vertailuarvo	357,5	357,5	21,1	21,1	2,6	379,1	37,7
WCDMA/HSDPA medium-load	595	16,78	297,5	297,5					44,0
WCDMA/HSDPA low-load	500	30,07	250	250					49,0
Prosentuaalinen ero, oletetaan Wh/Gt luvun kasvavan prosentuaalisen sähkönkulutuksen laskun verran.									
DL = Download = lataus									
3G:n käytössä oleva maksiminopeus	21,1 Mbit/s								
$DL\ Mt/s = \frac{\text{käytännön Mbit/s}}{8}$ $DL\ s/Gt = \frac{1000}{DL\ Mt/s}$ $DL\ Wh/Gt = \frac{DL\ s/Gt}{60} \cdot (5\ MHz\ W)$									
Päätelaitteen osuutta ei ole laskuissa mukana.									
JRC:n raportin perusteella seuraavat kulutukset on LTE tukiasemassa, jossa on kolme sektoria ja 10 MHz kaistanleveys.									
Lähde: Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment. Version 8.0 2021 JRC									
Tilanne	Yhteensä W	Ero % pienempi	10 MHz W	5 MHz W	Maksimi Mbit/s	Käytännön Mbit/s	DL Mt/s	DL s/Gt	DL Wh/Gt
LTE busy-hour	780	vertailuarvo	780	390	42,5	36	4,5	222,2	24,1
LTE medium-load	595	23,72	595	297,5					29,8
LTE low-load	500	35,90	500	250					32,7
Prosentuaalinen ero, oletetaan Wh/Gt luvun kasvavan prosentuaalisen sähkönkulutuksen laskun verran.									
DL = Download = lataus									
64QAM 1/1 (2x2 MIMO)	42,5 Mbit/s								
64QAM CQI 1	36 Mbit/s								
$DL\ Mt/s = \frac{\text{käytännön Mbit/s}}{8}$ $DL\ s/Gt = \frac{1000}{DL\ Mt/s}$ $DL\ Wh/Gt = \frac{DL\ s/Gt}{60} \cdot (5\ MHz\ W)$									
Päätelaitteen osuutta ei ole laskuissa mukana.									
JRC:n raportissa ei ole 5G:tä. Oletetaan että sähkönkulutus säilyy samana, mutta kapasiteetti kasvaa.									
Tilanne	Yhteensä W	Ero % pienempi	10 MHz W	5 MHz W	Maksimi Mbit/s	Käytännön Mbit/s	DL Mt/s	DL s/Gt	DL Wh/Gt
NR busy-hour	780	vertailuarvo	780	390	80,254	80,254	10,0	99,7	10,8
NR medium-load	595	23,72	595	297,5					13,4
NR low-load	500	35,90	500	250					14,7
Prosentuaalinen ero, oletetaan Wh/Gt luvun kasvavan prosentuaalisen sähkönkulutuksen laskun verran.									
DL = Download = lataus									
64QAM MIMO layers 4	80,254 Mbit/s								
$DL\ Mt/s = \frac{\text{käytännön Mbit/s}}{8}$ $DL\ s/Gt = \frac{1000}{DL\ Mt/s}$ $DL\ Wh/Gt = \frac{DL\ s/Gt}{60} \cdot (5\ MHz\ W)$									
Päätelaitteen osuutta ei ole laskuissa mukana.									

ERILAISTEN WI-FI-TEKNIIKOIDEN SÄHKÖNKULUTUKSIA

Lähteet:	JRC 2021	https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC125961											
Tekniikka	Max nopeus Mbit/s	Nopeus Mbit/s	dBm EIRP total	Idle-state (W)	ON-state (W)	Mt/s Max	Mt/s	s/Gt Max	s/Gt	Wh/Gt Max	Wh/Gt		
IEEE 802.11g	54	2	20	0,7	1,0	6,8		0,3	148,1	4000	0,041	1,111	
IEEE 802.11n	600	20	23	0,7	1,4	75,0		2,5	13,3	400	0,005	0,156	
IEEE 802.11ac	6800	20	23	1,6	1,9	850,0		2,5	1,2	400	0,001	0,211	
IEEE 802.11ax	10000	20	30	3	3,2	1250,0		2,5	0,8	400	0,001	0,356	
Wi-Fi 802.11g or 11a	Beacon on, 1 Wi-Fi client associated and 1-5m away from AP in the same room, avoid interference in the same band, with user traffic: concurrent 1 Mbit/s downstream and 1 Mbit/s upstream.					$Mt/s \text{ Max} = \frac{\text{Max nopeus Mbit/s}}{8}$		$s/Gt \text{ Max} = \frac{1000}{Mt/s \text{ Max}}$			$Wh/Gt \text{ Max} = \frac{s/Gt \text{ Max}}{\frac{60}{60}} \cdot (ON\text{-state } (W))$		
Wi-Fi 802.11n, 11ac or 11ax	Beacon on, 1 Wi-Fi client associated and 1-5m away from AP in the same room, avoid interference in the same band, with user traffic: concurrent 10 Mbit/s downstream and 10 Mbit/s upstream.					$Mt/s = \frac{\text{Nopeus Mbit/s}}{8}$		$s/Gt = \frac{1000}{Mt/s}$			$Wh/Gt = \frac{s/Gt}{\frac{60}{60}} \cdot (ON\text{-state } (W))$		
JCR 2021													

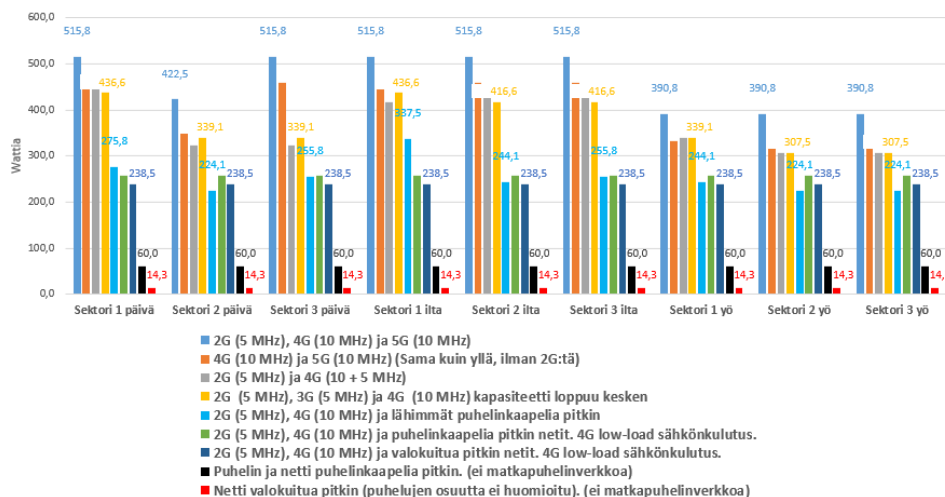
ESIMERKKILASKELMA 1 (HARVAAN-ASUTTU MAASEUTU)

Esimerkkilaskelma 1 harvaan-asuttu maaseutu													
Laskelmassa käytetty JRC:n lukuja, huomioitu sektorit. 5G:n osalta oletus, että kuluu saman verran sähköä kuin 4G, mutta suurempi nopeus. 2G:llä aina busy-hour sähkökulutus.													
Päivä on 8h, ilta 6h ja yö loput. Mbit/s luvut kuvaavat keskimääräistä nopeutta, joka pitäisi saada aina. Tukiaseman sähkönkulutus otetaan JRC:n busy, medium, low luvuista niin että kuormitusasteena huomioidaan käytännön ma													
$W_{2G}/Gt = \left(\frac{1000 \cdot \text{Mbit/s}}{60} \right) \cdot W$													
2G, 4G ja 5G													
Oletetaan 5G 45% osuus ja 4G 55% osuus tarpeesta													
	Tekniikka	Kaistanleveys MHz	Busy-hour Sähkönkulutus	Teoreettinen maksiminopeus	Teoreettinen Wh/Gt	Arvioitu käytännön maksiminopeus	Arvioitu Wh/Gt	Tarve päivä	Tarve ilta	Tarve yö Mbit/s	Sähkönkulutus päivä W	Sähkönkulutus ilta W	Sähkönkulutus yö W
Sektorit 1	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	50	11,6	47,85	36,3	9,4	260,0	260,0	166,7
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	80	7,2	39,15	29,7	7,7	198,3	198,3	166,7
Sektorit 2	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	50	11,6	9,9	29,7	2,8	198,3	260,0	166,7
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	80	7,2	8,1	24,3	2,3	166,7	198,3	166,7
Sektorit 3	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	25	23,1	5,5	16,5	1,1	260,0	260,0	166,7
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	50	11,6	4,5	13,5	0,9	198,3	198,3	166,7
Yhteensä	2G 900MHz										172,4	172,4	172,4
	4G 800MHz										718,3	780,0	500,0
	5G 700MHz										563,3	595,0	500,0
Yhteensä										1454,1	1547,4	1172,4	
4G ja 5G													
Sama kuin yllä, mutta 2G:n osuus vähennetty pois.													
2G, 3G ja 4G													
Oletetaan 3G osuus 1/10 ja loput 4G:lle Punaisella kapasiteetti loppuu kesken													
	Tekniikka	Kaistanleveys MHz	Busy-hour Sähkönkulutus	Teoreettinen maksiminopeus	Teoreettinen Wh/Gt	Arvioitu käytännön maksiminopeus	Arvioitu Wh/Gt	Tarve päivä	Tarve ilta	Tarve yö Mbit/s	Sähkönkulutus päivä W	Sähkönkulutus ilta W	Sähkönkulutus yö W
Sektorit 1	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	3G 900MHz	5	119,2	21,1	12,6	12	22,1	8,7	6,6	1,7	119,2	119,2	83,3
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	50	11,6	78,3	59,4	15,3	260,0	260,0	198,3
Sektorit 2	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	3G 900MHz	5	119,2	21,1	12,6	12	22,1	1,8	5,4	0,5	83,3	99,2	83,3
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	50	11,6	16,2	48,6	4,5	198,3	260,0	166,7
Sektorit 3	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	3G 900MHz	5	119,2	21,1	12,6	8	33,1	1,0	3	0,2	83,3	99,2	83,3
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	25	23,1	9,0	27	1,8	198,3	260,0	166,7
Yhteensä	2G 900MHz										172,4	172,4	172,4
	3G 900MHz										285,8	317,5	250,0
	4G 800MHz										656,7	780,0	531,7
Yhteensä										1114,9	1263,9	954,1	
2G ja 4G													
	Tekniikka	Kaistanleveys MHz	Busy-hour Sähkönkulutus	Teoreettinen maksiminopeus	Teoreettinen Wh/Gt	Arvioitu käytännön maksiminopeus	Arvioitu Wh/Gt	Tarve päivä	Tarve ilta	Tarve yö Mbit/s	Sähkönkulutus päivä W	Sähkönkulutus ilta W	Sähkönkulutus yö W
Sektorit 1	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 900MHz	5	119,2	50	5,3	37	7,2	37	20	5,0	130,0	99,2	83,3
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	50	11,6	50	46	12,0	260,0	260,0	198,3
Sektorit 2	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 900MHz	5	119,2	50	5,3	37	7,2	6	20	1,5	99,2	119,2	83,3
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	50	11,6	12	34	3,5	166,7	260,0	166,7
Sektorit 3	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 900MHz	5	119,2	50	5,3	18	14,7	4,0	8	1,0	99,2	130,0	83,3
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	25	23,1	6,0	12	1,0	166,7	260,0	166,7
Yhteensä	2G 900MHz										172,4	172,4	172,4
	4G 900MHz										328,3	348,3	250,0
	4G 800MHz										533,3	780,0	531,7
Yhteensä										1094,1	1300,7	954,1	

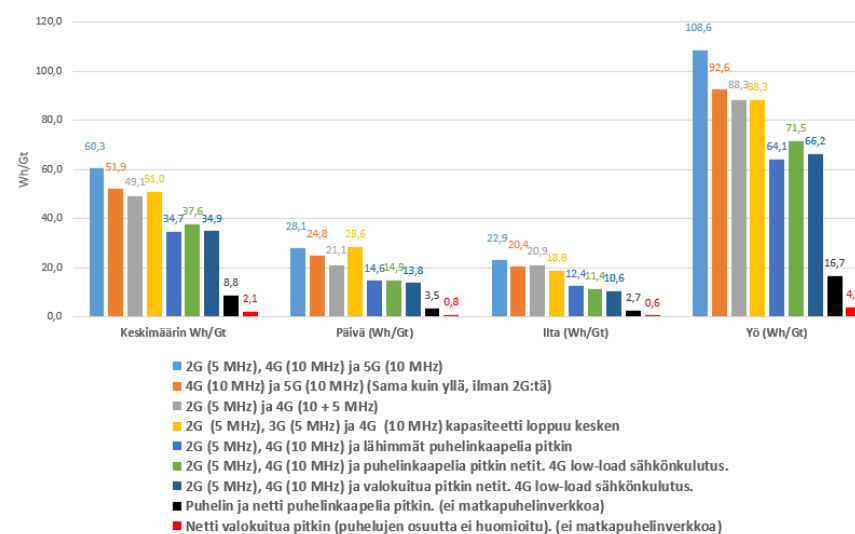
2G, 4G ja lähimmät puhelinkaapelia pitkin													
VDSL2 laskettu hIX 5608 (maksimissaan 8 tilaajaa) maksimi kulutuksella 40W. Tilaajia yhteensä 5kpl.													
Kiinteässä yhteydessä ei virransäästöjä käytössä.													
	Tekniikka	Kaistanleveys MHz	Busy-hour Sähkönkulu	Teoreettinen maksiminopeus	Teoreettinen Wh/Gt	Arvioitu käytännön maksiminopeus	Arvioitu Wh/Gt	Tarve päivä	Tarve ilta	Tarve yö Mbit/s	Sähkönkulutus päivä W	Sähkönkulutus ilta W	Sähkönkulutus yö W
Sektori 1	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	50	11,6	13	26	2,0	198,3	260,0	166,7
	VDSL2			100	-	50	-	74	40	15,0	1/2 DSLAM	1/2 DSLAM	1/2 DSLAM
Sektori 2	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	50	11,6	8	4	1,0	166,7	166,7	166,7
	VDSL2			100	-	50	-	10	50	4,0	1/2 DSLAM	1/2 DSLAM	1/2 DSLAM
Sektori 3	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	25	23,1	10,0	20	2,0	198,3	198,3	166,7
Yhteensä	2G 900MHz										172,4	172,4	172,4
	4G 800MHz										563,3	625,0	500,0
	VDSL2										40,0	40,0	40,0
Yhteensä											775,7	837,4	712,4
2G, 4G ja puhelinkaapelia pitkin netit. 4G low-load sähkönkulutus.													
ZTE ZXDSL 9806H mini-DSLAM ADSL2+ ja VDSL2 kortit. 5kpl VDSL2 tilaajaa ja loput ADSL2+													
Kiinteässä yhteydessä ei virransäästöjä käytössä.													
	Tekniikka	Kaistanleveys MHz	Busy-hour Sähkönkulu	Teoreettinen maksiminopeus	Teoreettinen Wh/Gt	Arvioitu käytännön maksiminopeus	Arvioitu Wh/Gt	Tarve päivä	Tarve ilta	Tarve yö Mbit/s	Sähkönkulutus päivä W	Sähkönkulutus ilta W	Sähkönkulutus yö W
Sektori 1	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	50	11,6				166,7	166,7	166,7
	ADSL2+			20	-	12	-	13	26	2,0	1/3 DSLAM	1/3 DSLAM	1/3 DSLAM
	VDSL2			100	-	50	-	74	40	15,0	1/3 DSLAM	1/3 DSLAM	1/3 DSLAM
Sektori 2	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	50	11,6				166,7	166,7	166,7
	ADSL2+			20	-	12	-	8	4	1,0	1/3 DSLAM	1/3 DSLAM	1/3 DSLAM
	VDSL2			100	-	50	-	10	50	4,0	1/3 DSLAM	1/3 DSLAM	1/3 DSLAM
Sektori 3	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	25	23,1				166,7	166,7	166,7
	ADSL2+			20	-	12	-	10,0	20	2,0	1/3 DSLAM	1/3 DSLAM	1/3 DSLAM
Yhteensä	2G 900MHz										172,4	172,4	172,4
	4G 800MHz										500,0	500,0	500,0
	mini-DSLAM										100,0	100,0	100,0
Yhteensä										772,4	772,4	772,4	
2G, 4G ja valokuidulla netit. 4G low-load sähkönkulutus.													
Sama laskelma kuin yllä, mutta mini-DSLAM:in tilalle vaihdetaan valokuitulaitteisto. Mikrotik CRS328-4C-20S-4S+RM max 43W													
Kiinteässä yhteydessä ei virransäästöjä käytössä.													
Ei matkapuhelinverkkoa ja puhelinkaapelia pitkin netti + puhelin.													
Sama kokoonpano ZTE ZXDSL 9806H mini-DSLAM:issa ja lisäksi POTS puhelinkortit. Oletetaan kuluttavan maksimimäärän sähköä 180W													
	Tekniikka	Sektori 1 päivä	Sektori 2 päivä	Sektori 3 päivä	Sektori 1 ilta	Sektori 2 ilta	Sektori 3 ilta	Sektori 1 yö	Sektori 2 yö	Sektori 3 yö	DSLAM	Kuitu	
	2G (5 MHz), 4G (10 MHz) ja 5G (10 MHz)	515,8	422,5	515,8	515,8	515,8	515,8	390,8	390,8	390,8	0	0	0
	4G (10 MHz) ja 5G (10 MHz) (Sama kuin yllä, ilman 2G:tä)	458,3	365,0	458,3	458,3	458,3	458,3	333,3	333,3	333,3	0	0	0
	2G (5 MHz) ja 4G (10 + 5 MHz)	447,5	323,3	323,3	416,6	436,6	447,5	339,1	307,5	307,5	0	0	0
	2G (5 MHz), 3G (5 MHz) ja 4G (10 MHz) kapasiteetti loppuu kesken	436,6	339,1	339,1	436,6	416,6	447,5	339,1	307,5	307,5	0	0	0
	2G (5 MHz), 4G (10 MHz) ja lähimmät puhelinkaapelia pitkin	275,8	224,1	255,8	337,5	244,1	255,8	244,1	224,1	224,1	40	0	0
	2G (5 MHz), 4G (10 MHz) ja puhelinkaapelia pitkin netit. 4G low-load sähkö	257,5	257,5	257,5	257,5	257,5	257,5	257,5	257,5	257,5	100	0	0
	2G (5 MHz), 4G (10 MHz) ja valokuitua pitkin netit. 4G low-load sähkönkulutus	238,5	238,5	238,5	238,5	238,5	238,5	238,5	238,5	238,5	0	43	0
	Puhelin ja netti puhelinkaapelia pitkin. (ei matkapuhelinverkkoa)	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	180	0	0
	Netti valokuitua pitkin (puhelin osuutta ei huomioitu). (ei matkapuhelinver	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	0,0	43	0

Tekniikka	Keskimäärin W			Päivä w	Iltä w	Y6 w	Vuorokausi w	Kapaseetti (Mbit/s)		Kapaseetti (Mbit/s) per kiinteistö		
	Päivä	Ilta (Wh/Gt)	Y6 (Wh/Gt)					Teoreettinen	Käytännön	teoreettinen	käytännön	
2G (5 MHz), 4G (10 MHz) ja 5G (10 MHz)	60,3	28,1	22,9	1454,1		1547,4	1172,4	32640,9	750	390	62,5	32,5
4G (10 MHz) ja 5G (10 MHz) (Sama kuin yllä, ilman 2G:tä)	51,9	24,8	20,4	1281,7		1375,0	1000,0	28503,3	750	390	62,5	32,5
2G (5 MHz) ja 4G (10 + 5 MHz)	49,1	21,1	20,9	1094,1		1300,7	954,1	26097,6	450	261	37,5	21,8
2G (5 MHz), 3G (5 MHz) ja 4G (10 MHz) kapasiteetti loppuu kesken	51,0	28,6	18,8	1114,9		1269,9	954,1	26079,3	363,3	186	30,3	15,5
2G (5 MHz), 4G (10 MHz) ja lähimmät puhelinlaajakaapelia pitkin	34,7	14,6	12,4	64,1	755,7	837,4	692,4	17994,3	800	400	66,7	33,3
2G (5 MHz), 4G (10 MHz) ja puhelinlaajakaapelia pitkin netit. 4G low-load sähkö	37,6	14,9	11,4	71,5	772,4	772,4	772,4	18537,6	940	484	78,3	40,3
2G (5 MHz), 4G (10 MHz) ja valokuitua pitkin netit. 4G low-load sähkönkulut.	34,9	13,8	10,6	66,2	715,4	715,4	715,4	17169,6	12300	12150	1025,0	1012,5
Puhelin ja netti puhelinlaajakaapelia pitkin. (ei matkapuhelinverkkoa)	8,8	3,5	2,7	16,7	180,0	180,0	180,0	4320,0	640	334	53,3	27,8
Netti valokuitua pitkin (puhelinlaajakaapelia ei huomioitu). (ei matkapuhelinverkkoa)	2,1	0,8	0,6	4,0	43,0	43,0	43,0	1032,0	12000	10800	1000,0	900,0

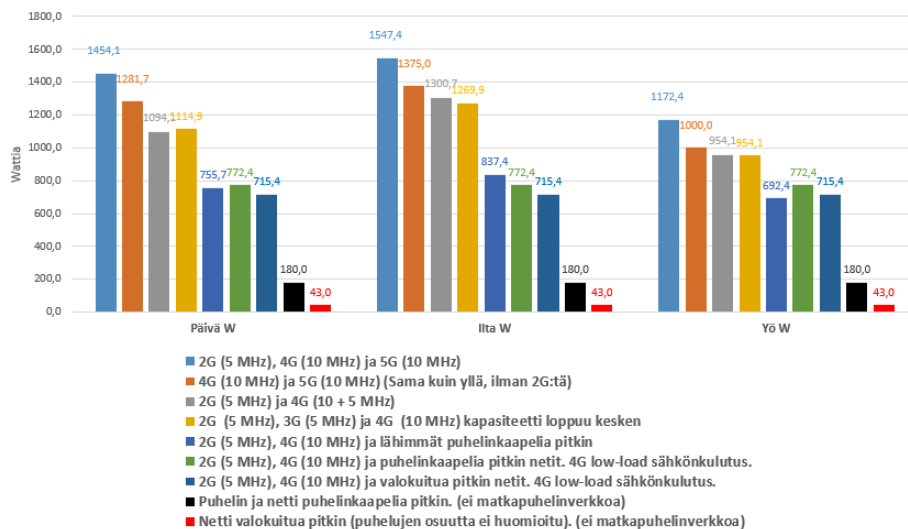
Esimerkilaskelma 1 harvaan asuttu maaseutu: Teleoperaattorin sähkönkulutus tilaajayhteisissä



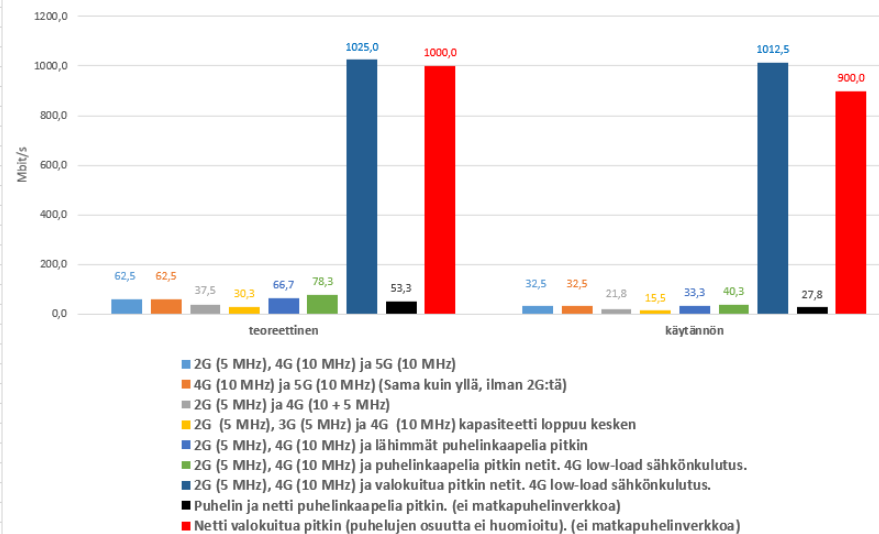
Esimerkilaskelma 1 harvaan asuttu maaseutu: Gigatavun siirtämiseen kuluva sähkö (tilaajayhteisissä)



Esimerkkilaskelma 1 harvaan asuttu maaseutu: Telelaitteiden sähkönkulutus



Esimerkkilaskelma 1 harvaan asuttu maaseutu: Kapasiteetti per kiinteistö



ESIMERKKILASKELMA 2 (KAUPUNKIALUE)

Esimerkki laskelma kaupunkialue

Laskelmassa käytetty JRC:n lukuja, huomioitu sektorit. 5G:n osalta oletus, että kuluu saman verran sähköä kuin 4G, mutta suurempi nopeus. 2G:llä aina busy-hour sähkönkulutus.

Päivä on 8h, ilta 6h ja yö loput. Mbit/s luvut kuvaavat keskimääräistä nopeutta, joka pitäisi saada aina. Tutkijajärjestön mukaan JRC:n busy, medium, low luvuista niin että kuormitusasteena huomioidaan käytännön maksiminopeus vs tarve.

$$W_{2G/Gt} = \frac{W}{Gt}$$

		Puuaisella kapasiteetilla loppu kesken												
		Tekniikka	Kaistanleveys MHz	Busy-hour Sähkökulutus	Teoreettinen maksiminopeus	Teoreettinen ca W/M/Gt	Arvioitu käyttöaika	Arvioitu W/M/Gt	Tarve päivä	Tarve ilta	Tarve yö	Sähkökulutus päivä	Sähkökulutus ilta	Sähkökulutus yö W
2G (5 MHz), 4G (10 + 20 + 20 + 20 MHz) ja 5G (10 + 100 MHz)														
Sektorit 1	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	50	11,6	20	40	20,0	198,4	260,0	198,4	
	4G 1800MHz	20	520	200	5,8	100	11,6	50	100	50,0	396,8	520,0	396,8	
	4G 2100MHz	20	520	200	5,8	100	11,6	25	100	25,0	396,8	520,0	333,3	
	4G 2500MHz	20	520	200	5,8	150	7,7	25	100	25,0	396,8	396,8	333,3	
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	150	3,9	30	40	15,0	166,7	198,4	166,7	
5G 3500MHz	100	2600	1300	4,4	600	9,6	100	260	100,0	1666,6	1983,8	1666,6		
Sektorit 2	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	30	19,3	6	15	2,0	166,7	198,4	166,7	
	4G 1800MHz	20	520	200	5,8	60	19,3	50	50	30,0	520,0	520,0	396,8	
	4G 2100MHz	20	520	200	5,8	100	11,6	50	50	20,0	396,8	396,8	333,3	
	4G 2500MHz	20	520	200	5,8	120	9,6	50	20	10,0	396,8	333,3	333,3	
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	70	8,3	6	10	1,0	166,7	166,7	166,7	
5G 3500MHz	100	2600	1300	4,4	500	11,6	450	100	50,0	2600,0	1983,8	1666,6		
Sektorit 3	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	30	19,3	10,0	30	20,0	166,7	260,0	198,4	
	4G 1800MHz	20	520	200	5,8	120	9,6	50,0	120	100,0	396,8	520,0	396,8	
	4G 2100MHz	20	520	200	5,8	150	7,7	25,0	150	50,0	333,3	520,0	333,3	
	4G 2500MHz	20	520	200	5,8	180	6,4	25,0	180	50,0	333,3	520,0	333,3	
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	90	6,4	40,0	90	80,0	166,7	260,0	198,4	
5G 3500MHz	100	2600	1300	4,4	900	6,4	250,0	900	500,0	1666,6	2600,0	1983,8		
Yhteensä												172,4	172,4	172,4
												531,7	715,4	563,4
												1313,5	1560,0	1190,3
												1126,8	1436,8	1000,0
												1126,8	1250,1	1000,0
												500,0	625,0	531,7
												5333,2	6567,6	5317,0
Yhteensä												10704,5	12330,3	9774,7
4G ja 5G														
Sama kuin yllä, mutta 2G:n osuus vähennetty pois.														
2G (5 MHz), 4G (10 + 20 + 20 + 20 MHz) ja 5G (10 + 100 MHz) *4G zammutus														
		Tekniikka	Kaistanleveys MHz	Busy-hour Sähkökulutus	Teoreettinen maksiminopeus	Teoreettinen ca W/M/Gt	Arvioitu käyttöaika	Arvioitu W/M/Gt	Tarve päivä	Tarve ilta	Tarve yö	Sähkökulutus päivä	Sähkökulutus ilta	Sähkökulutus yö W
Sektorit 1	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	50	11,6	20	40	40,0	166,7	260,0	260,0	
	4G 1800MHz	20	520	200	5,8	100	11,6	50	100	80,0	396,8	520,0	520,0	
	4G 2100MHz	20	520	200	5,8	100	11,6	50	100	0,0	396,8	520,0	0,0	
	4G 2500MHz	20	520	200	5,8	150	7,7	0	100	0,0	0,0	396,8	0,0	
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	150	3,9	30	40	15,0	166,7	166,7	166,7	
5G 3500MHz	100	2600	1300	4,4	600	9,6	100	260	100,0	1666,6	1983,8	1666,6		
Sektorit 2	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	30	19,3	6	15	12,0	166,7	198,4	198,4	
	4G 1800MHz	20	520	200	5,8	60	19,3	50	50	50,0	520,0	520,0	520,0	
	4G 2100MHz	20	520	200	5,8	100	11,6	100	50	0,0	520,0	396,8	0,0	
	4G 2500MHz	20	520	200	5,8	120	9,6	0	20	0,0	0,0	333,3	0,0	
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	70	8,3	6	10	1,0	166,7	166,7	166,7	
5G 3500MHz	100	2600	1300	4,4	500	11,6	450	100	50,0	2600,0	1666,6	1666,6		
Sektorit 3	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	30	19,3	10,0	30	30,0	166,7	260,0	260,0	
	4G 1800MHz	20	520	200	5,8	120	9,6	60,0	120	120,0	396,8	520,0	520,0	
	4G 2100MHz	20	520	200	5,8	150	7,7	40,0	150	0,0	333,3	520,0	0,0	
	4G 2500MHz	20	520	200	5,8	180	6,4	0,0	180	0,0	0,0	396,8	0,0	
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	90	6,4	40,0	90	80,0	166,7	260,0	260,0	
5G 3500MHz	100	2600	1300	4,4	900	6,4	250,0	900	500,0	1666,6	2600,0	1983,8		
Yhteensä												172,4	172,4	172,4
												500,0	715,4	718,4
												1313,5	1560,0	1560,0
												1250,1	1436,8	0,0
												0,0	1126,8	0,0
												500,0	593,3	593,3
												5333,2	6250,4	5317,0
Yhteensä												3669,2	11858,1	8361,1

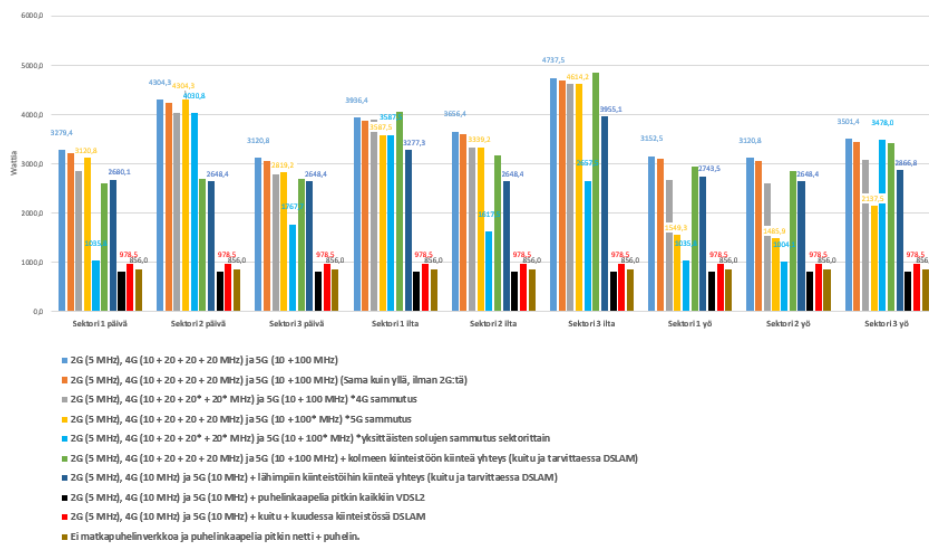
2G (5 MHz), 4G (10 + 20 + 20 + 20 MHz) ja 5G (10 + 100 MHz) *5G sammutus													
	Tekniikka	Kaistanleveys MHz	Busy-hour Sähkökulut	Teoreettinen maksiminopeus	Teoreettinen ca Wh/Gt	Arvioitu käyttöaika	Arvioitu Wh/Gt	Tarve päivä	Tarve ilta	Tarve yö	Sähkökulut ates päivä	Sähkökulut ates ilta	Sähkökulut ates yö W
Sektor 1	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	50	11,6	20	40	20,0	166,7	260,0	166,7
	4G 1800MHz	20	520	200	5,8	100	11,6	50	100	50,0	336,8	520,0	336,8
	4G 2100MHz	20	520	200	5,8	100	11,6	25	100	25,0	333,3	520,0	333,3
	4G 2500MHz	20	520	200	5,8	150	7,7	25	100	75,0	333,3	336,8	336,8
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	150	3,9	30	40	65,0	166,7	166,7	138,4
	5G 3500MHz	100	2600	1300	4,4	600	3,6	100	260	0,0	1666,6	1666,6	0,0
Sektor 2	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	30	13,3	6	15	2,0	166,7	138,4	166,7
	4G 1800MHz	20	520	200	5,8	60	13,3	50	50	30,0	520,0	520,0	336,8
	4G 2100MHz	20	520	200	5,8	100	11,6	50	50	20,0	336,8	336,8	333,3
	4G 2500MHz	20	520	200	5,8	120	3,6	50	20	20,0	336,8	333,3	333,3
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	70	8,3	6	10	41,0	166,7	166,7	138,4
	5G 3500MHz	100	2600	1300	4,4	500	11,6	450	100	0,0	2600,0	1666,6	0,0
Sektor 3	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	30	13,3	15,0	30	30	138,4	260,0	260,0
	4G 1800MHz	20	520	200	5,8	120	3,6	60,0	120	120	336,8	520,0	520,0
	4G 2100MHz	20	520	200	5,8	150	7,7	50,0	150	150	333,3	520,0	520,0
	4G 2500MHz	20	520	200	5,8	180	6,4	0,0	180	180	0,0	336,8	520,0
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	30	6,4	40,0	30	30	166,7	260,0	260,0
	5G 3500MHz	100	2600	1300	4,4	300	6,4	250,0	300	0,0	1666,6	2600,0	0,0
Yhteensä	2G 900MHz										172,4	172,4	172,4
	4G 800MHz										531,7	718,4	533,3
	4G 1800MHz										1313,5	1560,0	1313,5
	4G 2100MHz										1063,4	1436,8	1186,6
	4G 2500MHz										730,1	1126,8	1250,1
	5G 700MHz										500,0	533,3	656,8
	5G 3500MHz										5333,2	5333,2	0,0
Yhteensä											10244,3	11540,3	5172,7
2G (5 MHz), 4G (10 + 20 + 20 + 20 MHz) ja 5G (10 + 100 MHz) *yksittäisten solujen sammutus sektorittain													
	Tekniikka	Kaistanleveys MHz	Busy-hour Sähkökulut	Teoreettinen maksiminopeus	Teoreettinen ca Wh/Gt	Arvioitu käyttöaika	Arvioitu Wh/Gt	Tarve päivä	Tarve ilta	Tarve yö	Sähkökulut ates päivä	Sähkökulut ates ilta	Sähkökulut ates yö W
Sektor 1	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	50	11,6	30	40	30	138,4	260,0	138,4
	4G 1800MHz	20	520	200	5,8	100	11,6	30	100	30	520,0	520,0	520,0
	4G 2100MHz	20	520	200	5,8	100	11,6	0	100	0	0,0	520,0	0,0
	4G 2500MHz	20	520	200	5,8	150	7,7	0	100	0	0,0	336,8	0,0
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	150	3,9	130	40	115	260,0	166,7	260,0
	5G 3500MHz	100	2600	1300	4,4	600	3,6	0	260	0	0,0	1666,6	0,0
Sektor 2	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	30	13,3	6	25	12,0	166,7	260,0	166,7
	4G 1800MHz	20	520	200	5,8	60	13,3	50	60	50,0	520,0	520,0	520,0
	4G 2100MHz	20	520	200	5,8	100	11,6	100	100	0,0	520,0	520,0	0,0
	4G 2500MHz	20	520	200	5,8	120	3,6	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	70	8,3	6	60	51,0	166,7	260,0	260,0
	5G 3500MHz	100	2600	1300	4,4	500	11,6	450	0	0,0	2600,0	0,0	0,0
Sektor 3	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	30	13,3	20,0	30	30,0	260,0	260,0	260,0
	4G 1800MHz	20	520	200	5,8	120	3,6	80,0	120	120,0	336,8	520,0	520,0
	4G 2100MHz	20	520	200	5,8	150	7,7	100,0	150	70,0	336,8	520,0	336,8
	4G 2500MHz	20	520	200	5,8	180	6,4	120,0	180	0,0	336,8	520,0	0,0
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	30	6,4	80,0	30	80,0	260,0	260,0	260,0
	5G 3500MHz	100	2600	1300	4,4	300	6,4	0,0	300	500,0	0,0	520,0	1383,8
Yhteensä	2G 900MHz										172,4	172,4	172,4
	4G 800MHz										625,0	780,0	625,0
	4G 1800MHz										1436,8	1560,0	1560,0
	4G 2100MHz										316,8	1560,0	336,8
	4G 2500MHz										336,8	316,8	0,0
	5G 700MHz										686,7	686,7	780,0
	5G 3500MHz										2600,0	2186,6	1383,8
Yhteensä											6834,4	7862,4	5518,0

2G (5 MHz), 4G (10 + 20 + 20 + 20 MHz) ja 5G (10 + 100 MHz) + kolmea kiinteistöä kiitteesi yhteys (kuitu ja tarvittaessa DSLAM)														
Mikrotik CRS310-1G-5S-4S-IN (10G) max 20 W ja 2kpl ZTE 9806H YDSL2 64port 180 W ja 48 port 150 W.														
	Tekniikka	Kaistanleveys MHz	Busy-hour Sähkökulut	Teoreettinen maksiminopeus	Teoreettinen Wh/Gt	Arvioitu käyttöaika	Arvioitu Wh/Gt	Tarve päivä	Tarve ilta	Tarve yö	Sähkökulutus päivä	Sähkökulutus ilta	Sähkökulutus yö	
Sektor 1	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5	
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	50	11,6	20	40	20,0	198,4	260,0	198,4	
	4G 1800MHz	20	520	200	5,8	100	11,6	50	100	50,0	396,8	520,0	396,8	
	4G 2100MHz	20	520	200	5,8	100	11,6	0	100	40,0	0,0	520,0	333,3	
	4G 2500MHz	20	520	200	5,8	150	7,7	0	100	0,0	0,0	396,8	0,0	
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	150	3,9	30	40	15,0	166,7	198,4	166,7	
	5G 3500MHz	100	2600	1300	4,4	600	3,6	50	240	100,0	1666,6	1983,8	1666,6	
Kuitu			10000			300		100	20	10,0				
Sektor 2	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5	
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	30	19,3	6	11	2,0	166,7	166,7	166,7	
	4G 1800MHz	20	520	200	5,8	60	19,3	50	2	0,0	520,0	333,3	333,3	
	4G 2100MHz	20	520	200	5,8	100	11,6	0	2	0,0	0,0	333,3	333,3	
	4G 2500MHz	20	520	200	5,8	120	3,6	0	10	0,0	0,0	333,3	0,0	
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	70	8,3	6	10	1,0	166,7	166,7	166,7	
	5G 3500MHz	100	2600	1300	4,4	500	11,6	50	10	10,0	1666,6	1666,6	1666,6	
Kuitu			10000			300		500	200	100,0				
Sektor 3	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5	
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	30	19,3	7,5	30	15,0	166,7	260,0	198,4	
	4G 1800MHz	20	520	200	5,8	120	3,6	33,9	120	112,5	520,0	520,0	520,0	
	4G 2100MHz	20	520	200	5,8	150	7,7	0,0	150	37,5	0,0	520,0	333,3	
	4G 2500MHz	20	520	200	5,8	180	6,4	0,0	180	0,0	0,0	520,0	0,0	
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	30	6,4	30,0	30	60,0	166,7	260,0	198,4	
	5G 3500MHz	100	2600	1300	4,4	300	6,4	187,5	300	375,0	1666,6	2600,0	1983,8	
Kuitu/DSLAM						50		100,0	500	200,0				
Yhteensä	2G 900MHz										172,4	172,4	172,4	
	4G 800MHz										531,7	686,7	563,4	
	4G 1800MHz										1436,8	1373,3	1250,1	
	4G 2100MHz										0,0	1373,3	1000,0	
	4G 2500MHz										0,0	1250,1	0,0	
	5G 700MHz										500,0	625,0	531,7	
	5G 3500MHz										4393,8	6250,4	5317,0	
Kuitu										20,0	20,0	20,0		
DSLAM										330,0	330,0	330,0		
Yhteensä											7930,6	11731,2	8834,6	
2G (5 MHz), 4G (10 + 20 MHz) ja 5G (10 + 100 MHz) + 15kimpää kiinteistöä kiitteesi yhteys (kuitu ja tarvittaessa DSLAM)														
Mikrotik CRS328-4C-20S-4S-RM max 43W ja 2x (2kpl ZTE 9806H YDSL2 64port 180 W ja 48 port 150 W) ja Zyxel GES1116-FSA max 70 W.														
	Tekniikka	Kaistanleveys MHz	Busy-hour Sähkökulut	Teoreettinen maksiminopeus	Teoreettinen Wh/Gt	Arvioitu käyttöaika	Arvioitu Wh/Gt	Tarve päivä	Tarve ilta	Tarve yö	Sähkökulutus päivä	Sähkökulutus ilta	Sähkökulutus yö	
Sektor 1	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5	
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	50	11,6	20	50	20,0	198,4	260,0	198,4	
	4G 1800MHz	20	520	200	5,8	100	11,6	20	100	65,0	333,3	520,0	396,8	
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	150	3,9	30	100	15,0	166,7	198,4	166,7	
	5G 3500MHz	100	2600	1300	4,4	600	3,6	30	250	100,0	1666,6	1983,8	1666,6	
	Kuitu			10000			300		150	140	35,0			
	Sektor 2	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
4G 800MHz		10	260	100	5,8	30	19,3	6	11	2,0	166,7	166,7	166,7	
4G 1800MHz		20	520	200	5,8	60	19,3	0	2	0,0	333,3	333,3	333,3	
5G 700MHz		10	260	150	3,9	70	8,3	6	10	1,0	166,7	166,7	166,7	
5G 3500MHz		100	2600	1300	4,4	500	11,6	0	2	0,0	1666,6	1666,6	1666,6	
Kuitu				10000			300		600	220	110,0			
Sektor 3		2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	30	19,3	5,0	30	10,0	166,7	260,0	166,7	
	4G 1800MHz	20	520	200	5,8	120	3,6	37,5	100	75,0	333,3	520,0	520,0	
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	30	6,4	32,5	70	65,0	166,7	260,0	198,4	
	5G 3500MHz	100	2600	1300	4,4	300	6,4	125,0	800	250,0	1666,6	2600,0	1666,6	
	Kuitu/DSLAM						50		200,0	1000	400,0			
	Yhteensä	2G 900MHz										172,4	172,4	172,4
4G 800MHz											531,7	686,7	531,7	
4G 1800MHz											1000,0	1373,3	1250,1	
5G 700MHz											500,0	625,0	531,7	
5G 3500MHz											4393,8	6250,4	4393,8	
Kuitu											43,0	43,0	43,0	
DSLAM											730,0	730,0	730,0	
Yhteensä											7976,8	9880,8	8258,7	

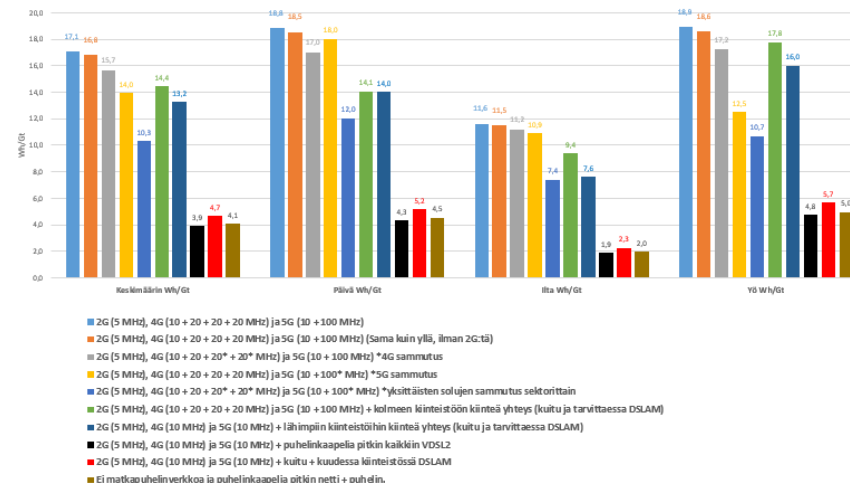
2G (5 MHz), 4G (10 MHz) ja 5G (10 MHz) + puhelinsovellus pitkin kaikkia VDSL2													
Nokia Siemens Networks hiX 5635 M1100 VDSL2 maksimi 1284 W													
	Tekniikka	Kaistanleveys MHz	Busy-hour Sähkötuntit	Teoreettinen maksiminopeus	Teoreettinen Wh/Gt	Arvioitu käyttöaika	Arvioitu Wh/Gt	Tarve päivä	Tarve ilta	Tarve yö	Sähkötuntit päivä	Sähkötuntit ilta	Sähkötuntit yö
Sektori 1	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	50	11,6	0	0	0,0	166,7	166,7	166,7
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	150	3,9	0	0	0,0	166,7	166,7	166,7
	DSLAM			100		50		250	640	235,0			
Sektori 2	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	30	19,3	0	0	0,0	166,7	166,7	166,7
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	70	8,3	0	0	0,0	166,7	166,7	166,7
	DSLAM			100		50		612	245	113,0			
Sektori 3	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	30	19,3	0	0	0,0	166,7	166,7	166,7
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	90	6,4	0	0	0,0	166,7	166,7	166,7
	DSLAM			100		50		400,0	2000	800,0			
Yhteensä	2G 900MHz										172,4	172,4	172,4
	4G 800MHz										500,0	500,0	500,0
	5G 700MHz										500,0	500,0	500,0
	DSLAM										1284,0	1284,0	1284,0
Yhteensä											2456,4	2456,4	2456,4
2G (5 MHz), 4G (10 MHz) ja 5G (10 MHz) + kuitu + kuudessa kiinteistöissä DSLAM													
Mikrotik CRS328-4C-20S-4S-RM max 43W ja 5x (2xpl ZTE 9806H VDSL2 64port 180 W ja 48 port 150 W) ja Zyxel GES1116-FSA max 70 W													
	Tekniikka	Kaistanleveys MHz	Busy-hour Sähkötuntit	Teoreettinen maksiminopeus	Teoreettinen Wh/Gt	Arvioitu käyttöaika	Arvioitu Wh/Gt	Tarve päivä	Tarve ilta	Tarve yö	Sähkötuntit päivä	Sähkötuntit ilta	Sähkötuntit yö
Sektori 1	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	50	11,6	0	0	0,0	166,7	166,7	166,7
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	150	3,9	0	0	0,0	166,7	166,7	166,7
	DSLAM			100,0		50		100	20	10,0			
Sektori 2	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	30	19,3	0	0	0,0	166,7	166,7	166,7
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	70	8,3	0	0	0,0	166,7	166,7	166,7
	DSLAM			100000		900		600	220	110,0			
Sektori 3	2G 900MHz	5	57,5	Riittävä nopeus	-	Riittävä nopeus	-	-	-	-	57,5	57,5	57,5
	4G 800MHz	10	260	100	5,8	30	19,3	0	0	0,0	166,7	166,7	166,7
	5G 700MHz	10	260	150	3,9	90	6,4	0	0	0,0	166,7	166,7	166,7
	DSLAM			100		50		400,0	2000	800,0			
Yhteensä	2G 900MHz										172,4	172,4	172,4
	4G 800MHz										500,0	500,0	500,0
	5G 700MHz										500,0	500,0	500,0
	DSLAM										43,0	43,0	43,0
Yhteensä											1720,0	1720,0	1720,0
Yhteensä											2935,4	2935,4	2935,4
Kiinteissä yhteyksissä ei virransäätöjä käytössä.													
Ei matkapuhelinverkkoa ja puhelinsovellus pitkin netti + puhelin.													
Nokia Siemens Networks hiX 5635 M1100 VDSL2 maksimi 1284 W ja toinen POTS kortilla maks 1284													
											2568	2568	2568
Tekniikka	Sektori 1 päivä	Sektori 2 päivä	Sektori 3 päivä	Sektori 1 ilta	Sektori 2 ilta	Sektori 3 ilta	Sektori 1 yö	Sektori 2 yö	Sektori 3 yö	DSLAM	Kuitu		
2G (5 MHz), 4G (10 + 20 + 20 + 20 MHz) ja 5G (10 + 100 MHz)	3273,4	4304,3	3120,8	3936,4	3656,4	4737,5	3152,5	3120,8	3501,4	0	0		
2G (5 MHz), 4G (10 + 20 + 20 + 20 MHz) ja 5G (10 + 100 MHz) (sama kuin edellä) + 4G sammu	3221,9	4246,8	3063,3	3878,9	3598,9	4680,0	3095,0	3063,3	3444,0	0	0		
2G (5 MHz), 4G (10 + 20 + 20 + 20 MHz) ja 5G (10 + 100 MHz) *5G sammu	2850,9	4030,8	2787,5	3904,7	3339,2	4614,2	2670,7	2609,1	3081,3	0	0		
2G (5 MHz), 4G (10 + 20 + 20 + 20 MHz) ja 5G (10 + 100 MHz) *5G sammu	3120,8	4304,3	2819,2	3587,5	3339,2	4614,2	1549,3	1465,9	2137,5	0	0		
2G (5 MHz), 4G (10 + 20 + 20 + 20 MHz) ja 5G (10 + 100 MHz) *yksittäisiä	1035,8	4030,8	1767,7	3587,5	1617,5	2657,5	1035,8	1004,1	3478,0	0	0		
2G (5 MHz), 4G (10 + 20 + 20 + 20 MHz) ja 5G (10 + 100 MHz) + kolmeen kiinteistöön	2602,5	2634,1	2634,1	4053,1	3174,0	4854,1	2935,9	2840,7	3408,0	330	20		
2G (5 MHz), 4G (10 MHz) ja 5G (10 MHz) + lähimpin kiinteistöihin kiinteistö	2680,1	2648,4	2648,4	3277,3	2648,4	3955,1	2743,5	2648,4	2866,8	730	43		
2G (5 MHz), 4G (10 MHz) ja 5G (10 MHz) + puhelinsovellus pitkin kaikkien VDSL2	818,8	818,8	818,8	818,8	818,8	818,8	818,8	818,8	818,8	1284,0	0		
2G (5 MHz), 4G (10 MHz) ja 5G (10 MHz) + kuitu + kuudessa kiinteistöissä kiinteistö	378,5	378,5	378,5	378,5	378,5	378,5	378,5	378,5	378,5	1720,0	43		
Ei matkapuhelinverkkoa ja puhelinsovellus pitkin netti + puhelin.	856,0	856,0	856,0	856,0	856,0	856,0	856,0	856,0	856,0	2568,0	0		

Tekniikka	Keskimäärin W/h	Päivä W/h/Gt	Kapasiteettivojot				Päivä W	Iltä W	Yö W	Vuorokausi W	Kapasiteetti (Mbit/s)		Kapasiteetti (Mbit/s) per kiinteä	
			Iltä W/h/Gt	Yö W/h/Gt	Teoreettinen	Käytännön					teoreettinen	käytännön		
2G (5 MHz), 4G (10 + 20 + 20 + 20 MHz) ja 5G (10 + 100 MHz)	17,1	18,8	11,6	18,9	10704,5	12330,3	9774,7	257364,6	6450	3500	12,4	6,7		
2G (5 MHz), 4G (10 + 20 + 20 + 20 MHz) ja 5G (10 + 100 MHz) (Sama kuin yllä, ilman 2G:tä)	16,8	18,5	11,5	18,6	10532,1	12157,9	9602,3	253227,0	6450	3500	12,4	6,7		
2G (5 MHz), 4G (10 + 20 + 20* + 20* MHz) ja 5G (10 + 100 MHz) *4G samm	15,7	17,0	11,2	17,2	9669,2	11858,1	8361,1	232112,9	6450	3500	12,4	6,7		
2G (5 MHz), 4G (10 + 20 + 20 + 20 MHz) ja 5G (10 + 100* MHz) *5G samm	14,0	18,0	10,3	12,5	10244,3	11540,9	5172,7	202926,8	6450	3500	12,4	6,7		
2G (5 MHz), 4G (10 + 20 + 20* + 20* MHz) ja 5G (10 + 100* MHz) *yksittäis	10,3	12,0	7,4	10,7	6834,4	7862,4	5518,0	157029,6	6450	3500	12,4	6,7		
2G (5 MHz), 4G (10 + 20 + 20 + 20 MHz) ja 5G (10 + 100 MHz) + kolmeen k	14,4	14,1	9,4	17,8	7990,6	12081,2	9184,6	228258,0	36450	5350	63,8	10,2		
2G (5 MHz), 4G (10 MHz) ja 5G (10 MHz) + lähimpiin kiinteistöihin kiinteä y	13,2	14,0	7,6	16,0	7976,8	9880,8	8258,7	205686,4	29250	15400	56,0	29,5		
2G (5 MHz), 4G (10 MHz) ja 5G (10 MHz) + puhelinkaapelia pitkin kaikkiin V	3,9	4,3	1,9	4,8	2456,4	2456,4	2456,4	58952,6	52950	26520	101,4	50,8		
2G (5 MHz), 4G (10 MHz) ja 5G (10 MHz) + kuitu + kuudessa kiinteistössä L	4,7	5,2	2,3	5,7	2935,4	2935,4	2935,4	70448,6	120750	28350	231,3	54,3		
Ei matkapuhelinverkkoa ja puhelinkaapelia pitkin netti + puhelin.	4,1	4,5	2,0	5,0	2568,0	2568,0	2568,0	61632,0	52200	26100	100,0	50,0		

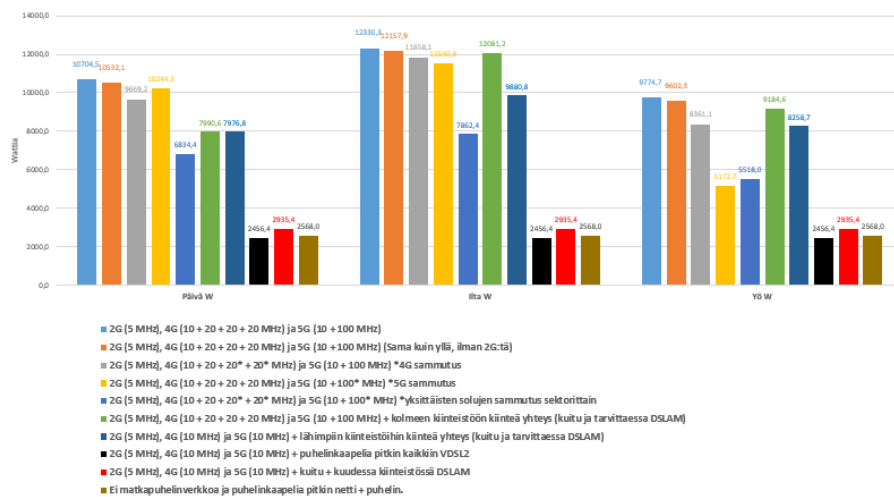
Esimerkkilaskelma 2 kaupunkialue: Teleoperaattorin sähkönkulutus tilaajayhteyksissä



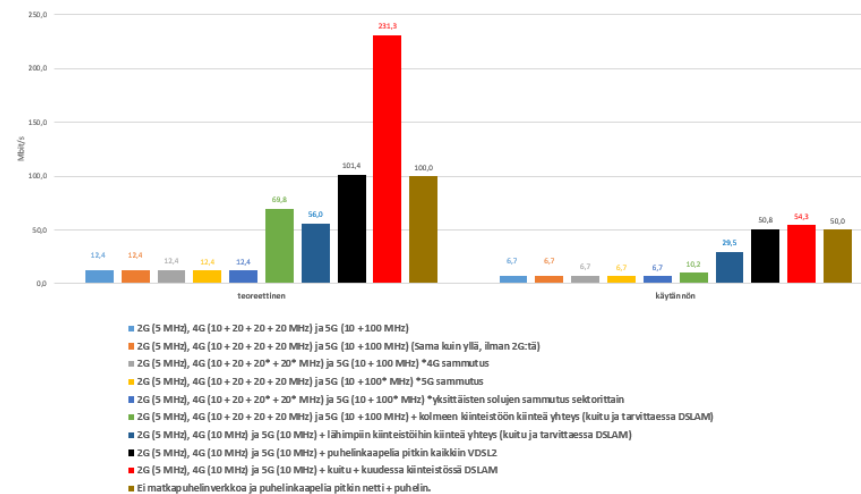
Esimerkkilaskelma 2 kaupunkialue: Gigatavun siirtämiseen kuluva sähkö tunnissa (tilaajayhteyksissä)



Esimerkkilaskelma 2 kaupunkialue: Telelaitteiden sähkönkulutus



Esimerkkilaskelma 2 kaupunkialue: Kapasiteetti per käyttäjä



ESIMERKKILASKELMA 3 (RUNKOVERKKO)

Esimerkki laskelma runkoverkko

Laskelmassa käytetty JRC:n uplink porttien sähkönkulutus lukuja.

Päivä on 8h, iltä 6h ja yö loput. Päivän tarve on 50% kapasiteetista, illan tarve 80% kapasiteetista ja yöllä 20%.

Lasketaan tilanteet paljonko sähköä kuluu eri kuormitusasteissa erikäyttäjän näkökulmista. Myös kun kaksi punaisella ruksilla merkattua yhteyttä on poikki.

Kaikki yhteydet toimivat (ilta) kaikki mahdolliset linkit käytössä

Käyttäjä	Laitetila 1 (W)	Laitetila 1.1 (W)	Laitetila 1.2 (W)	Laitetila 3 (W)	Laitetila 2 (W)	Laitetila 2.1 (W)	Laitetila 2.2 (W)	Yhteensä (W)
Käyttäjä 1	45							45
Käyttäjä 1.1	45	50						95
Käyttäjä 1.2	45	50	7,2					102,2
Käyttäjä 3	45	50		22				117
Käyttäjä 2					45			45
Käyttäjä 2.1					45	50		95
Käyttäjä 2.2					45	50	25	120

Kaikki yhteydet toimivat (päivä) puolet linkeistä päällä

Käyttäjä	Laitetila 1 (W)	Laitetila 1.1 (W)	Laitetila 1.2 (W)	Laitetila 3 (W)	Laitetila 2 (W)	Laitetila 2.1 (W)	Laitetila 2.2 (W)	Yhteensä (W)
Käyttäjä 1	45							45
Käyttäjä 1.1	45	25						70
Käyttäjä 1.2	45	25	3,6					73,6
Käyttäjä 3	45	25		11				81
Käyttäjä 2					45			45
Käyttäjä 2.1					45	25		70
Käyttäjä 2.2					45	25	12,5	82,5

Kaikki yhteydet toimivat (yö) viidesosa kapasiteetista käytössä (vähintään yksi linkki)

Käyttäjä	Laitetila 1 (W)	Laitetila 1.1 (W)	Laitetila 1.2 (W)	Laitetila 3 (W)	Laitetila 2 (W)	Laitetila 2.1 (W)	Laitetila 2.2 (W)	Yhteensä (W)
Käyttäjä 1	45							45
Käyttäjä 1.1	45	12,5						57,5
Käyttäjä 1.2	45	12,5	1,8					59,3
Käyttäjä 3	45	12,5		5,5				63
Käyttäjä 2					45			45
Käyttäjä 2.1					45	12,5		57,5
Käyttäjä 2.2					45	12,5	12,5	70

Merkatut yhteydet poikki ja varareitti käytössä (ilta) kaikki mahdolliset linkit käytössä

Käyttäjä	Laitetila 1 (W)	Laitetila 1.1 (W)	Laitetila 1.2 (W)	Laitetila 3 (W)	Laitetila 2 (W)	Laitetila 2.1 (W)	Laitetila 2.2 (W)	Yhteensä (W)
Käyttäjä 1	50	22		22	45	50	25	214
Käyttäjä 1.1		22		22	45	50	25	164
Käyttäjä 1.2		22	7,2	22	45	50	25	171,2
Käyttäjä 3					45	50	25	120
Käyttäjä 2					45			45
Käyttäjä 2.1					45	50		95
Käyttäjä 2.2					45	50	25	120

Merkatut yhteydet poikki ja varareitti käytössä (päivä) kaikki mahdolliset linkit käytössä koska muuten kapasiteetti loppuu kesken

Käyttäjä	Laitetila 1 (W)	Laitetila 1.1 (W)	Laitetila 1.2 (W)	Laitetila 3 (W)	Laitetila 2 (W)	Laitetila 2.1 (W)	Laitetila 2.2 (W)	Yhteensä (W)
Käyttäjä 1	50	22		22	45	50	25	214
Käyttäjä 1.1		22		22	45	50	25	164
Käyttäjä 1.2		22	7,2	22	45	50	25	171,2
Käyttäjä 3					45	50	25	120
Käyttäjä 2					45			45
Käyttäjä 2.1					45	50		95
Käyttäjä 2.2					45	50	25	120

Merkatut yhteydet poikki ja varareitti käytössä (yö) 2/3 riittää

Käyttäjä	Laitetila 1 (W)	Laitetila 1.1 (W)	Laitetila 1.2 (W)	Laitetila 3 (W)	Laitetila 2 (W)	Laitetila 2.1 (W)	Laitetila 2.2 (W)	Yhteensä (W)
Käyttäjä 1	37,5	16,5		16,5	45	37,5	12,5	165,5
Käyttäjä 1.1		16,5		16,5	45	37,5	12,5	128
Käyttäjä 1.2		16,5	5,4	16,5	45	37,5	12,5	133,4
Käyttäjä 3					45	37,5	12,5	95
Käyttäjä 2					45			45
Käyttäjä 2.1					45	37,5		82,5
Käyttäjä 2.2					45	37,5	12,5	95