



Energikonsumtionen i moderna mobilnät

Kevin Olenius

Lärdomsprov

Energi- och miljöteknik

2023

Lärdomsprov

(Författare) Kevin Olenius

Huvudtitel. Energikonsumtionen i moderna mobilnät.

Yrkeshögskolan Arcada: Energi- och miljöteknik

Identifikationsnummer:

9059

Uppdragsgivare:

Yrkeshögskolan Arcada

Sammandrag:

Fungerande mobilnät är väsentliga i dagens digitala värld. Datavolymer i de finska mobilnäten har mång dubblats under senaste 10 år och samma utveckling kommer sannolikt att fortsätta. Det här kräver också mycket energi. I det här examensarbetet behandlas mobilnäten och deras energikonsumtion samt orsaken varför energikonsumtionen inte stigit i takt med datavolymer. Arbetet grundar sig på information som finns tillgängligt på nätet samt finska trafik och kommunikationsverkets undersökningar inom branschen. Genom att kombinera data över mobilnätets energikonsumtion från olika källor gjordes en excel-tabell över energikonsumtionen under de senaste 11 år, denna information kombinerades med den förflyttade datavolymer i mobilnätet under samma tidsperiod. På det här sättet kunde det konstateras att energikonsumtionen varit relativt stabil trots de stora kapacitetsökningarna i mobilnätet. Denna utveckling har varit möjlig på grund av förbättringar i radioteknologin och nya effektivare teknologier med en mindre nominal energiförbrukning.

Nyckelord:

Mobilnät, Finland, energikonsumtion, effektivitet

Degree Thesis

(Author) Kevin Olenius

Title. Energikonsumtionen i moderna mobilnät

Arcada University of Applied Sciences: Energi- och miljöteknik

Identification number:

9059

Commissioned by:

Arcada University of Applied sciences

Abstract:

High quality mobile networks are essential in today's digital world. The data volumes in the Finnish mobile networks have increased many times over the past 10 years and the same trend will likely continue in the future. This thesis discusses the energy consumption in the mobile networks and the reason behind why the consumption has not increased with the same pace as the transmitted data volume. The thesis is based on publicly available data found on the internet but also on research done by the Finnish transport and communications agency. The results are provided by combining the energy consumption data from the past 11 years with the corresponding data volumes over same period to one graph. Surprisingly the energy consumption has remained relatively steady thorough time even though the data volumes and network quality has increased a lot. The reason for this development is due to new radio technologies and more efficient new generation mobile technologies.

Keywords:

Mobile networks, Finland, energy consumption, efficiency

Innehåll

Sammandrag
Abstract	
Innehåll
Förkortningar
Figurer
Förord
1 Inledning	8
2 Mobilnätets funktion	9
3 Mobilnätets historiska utveckling	11
3.1 GSM	12
3.2 3G	12
3.3 4G	13
3.4 5G	16
3.4.1 eMBB (Enhanced mobile broadband).....	17
3.4.2 URLLC (Ultra reliable, low latency communications).....	18
3.4.3 mMTC (Massive machine type communication)	18
4 Utbyggnad av mobilnätet i Finland	20
5 Mobilnätets energiförbrukning	23
5.1 Teknologins inverkan på mobilnätets energiförbrukning	23
5.2 Energiförbrukningen i framtidens mobila datakommunikation.....	24
5.3 Nya innovationer för att minska energiförbrukningen i mobilnätet.....	27
5.3.1 Utnyttjande av artificiell intelligens för optimeringen av energikonsumtionen i radionätet.....	27
5.3.2 Lokal energiproduktion vid basstationer och master	28
5.3.3 Fortsatt expansion av samnätet	29
5.3.4 Nerkörning av föråldrad mobilteknologi	30
6 Mobiloperatörernas koldioxidutsläpp	32
6.1 Miljörelaterad rapportering	32
6.2 Indirekt nytta av mobilnätet	33
6.3 Batterireserven.....	33
7 Sammanfattning	35
Källor	36

Förkortningar

GSM – Global system for mobile communication

NMT – Nordisk Mobiltelefon

ARP – Auto Radio Puhelin

UMTS - Universal mobile telecommunications system

HSPA - High Speed Packet Access

LTE - Long Term Evolution

RRU – Remote radio unit

MSR – Multi Standard Radio

UHD – Ultra High Definition

MHz – Megahertz

GHz – Gigahertz

Mbit/s – Megabit per sekund

IoT – internet of things

SYV – Suomen yhteisverkko

TB – TeraByte

GWh – Gigawattimme

CO₂ - Koldioxid

Figurer

Figur 1: Mobilnätets funktion.

Figur 2: Mobilteknologins evolution.

<https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/HSDPA>

Figur 3: Hastigheterna för olika bredbandslösningar.

[DNA VVK2011_verkkovuosisikertomus.pdf](#)

Figur 4: Bild av en typis basstation med och utan RRU.

[What is RRU, BBU and Antenna? - Equipment / Antennas - telecomHall Forum](#)

Figur 5: Mobildata användningen per abonnemang per land.

[tefficient-industry-analysis-3-2017-mobile-data-usage-and-revenue-1H-2017-per-country-24-January.pdf](#)

Figur 6: 5G triangeln.

[IoT: How 5G differs from LTE - 5G Technology World](#)

Figur 7: FWA fast mobiltbredband över 5G.

[Complete Guide to Home Signal Boosters for Cell Phones \(powerfulsignal.com\)](#)

Figur 8: Den globala FWA tillväxten i 5G.

[Laajakaistaliittymien määriä - FiCom](#)

Figur 9: Industriella och offentliga områden för utnyttjande av Iot.

[Cellular vs LPWAN: the battle heats up - Tracking The Internet of Things \(iotaustralia.org.au\)](#)

Figur 10: Karta över mobilnätens täckning i Finland.

[1]: [Mobiiliverkon kuuluvuuskartta | DNA](#)

[2]: [Kuuluvuuskartta \(elisa.fi\)](#)

[3]: [Mobiiliverkon kuuluvuus, häiriötilanteet ja parannustyöt | Asiakastuki | Telia](#)

Figur 11: Nationella frekvenslicenser, Åland exkluderat, och syften för mobila radionät.

[Matkaviestinverkkojen taajuudet ja luvanhaltijat | Traficom](#)

Figur 12: Energiförbrukningen och mängden förflyttad data per år.

Figur 13: Mobildata nominalelförbrukning KWh/GB 2014-2018.

[Digitalisaatio auttaa energitehokkuudessa – ja tarvitsee siihen sähköä - FiCom](#)

Figur 14: Samnätet SYV:s täckningsområde.

[Mikä on - Suomen Yhteisverkko](#)

Förord

Jag vill tacka min handledare Kim Rancken från Yrkeshögskolan Arcada för hjälpen och vägledningen jag har fått.

Jag vill även tacka min familj som stött och hjälpt mig under skrivprocessen.

Helsingfors 29.11.2023

Kevin Olenius

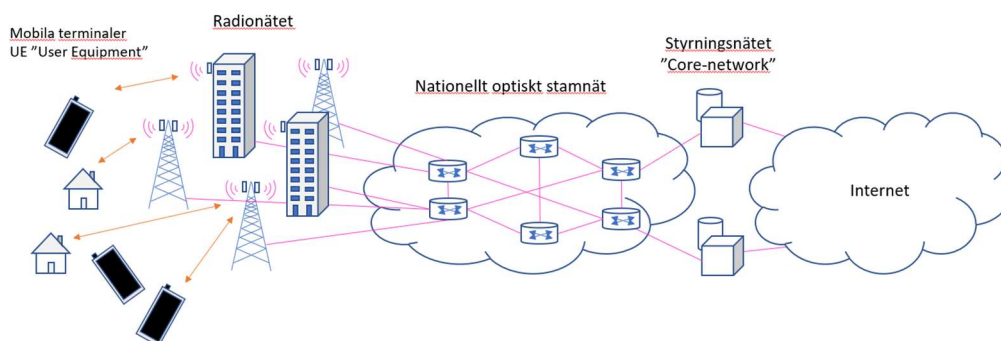
1 Inledning

I den moderna världen har den ökande användningen och beroendet av fossila bränslen i all form gett upphov till två ytterst negativa globala trender: de kraftigt stigande energikostnaderna och den globala klimatförändringen. Dessa två globala trender har en stor inverkan både på mobilnätets produktionskostnader och på mobiloperatörernas framtida koldioxidavtryck. På grund av den konstant ökande datakonsumtionen i dagens mobila bredband, ökar energibehovet i mobilnäten och därmed också nätets produktionskostnader och koldioxidavtryck. I det här examensarbetet behandlas de finska mobilnäten, samt undersöks med vilka åtgärder både energikonsumtionen och koldioxidavtrycket kan påverkas i framtiden.

2 Mobilnätets funktion

Mobilnätets grund består av ett stamnät byggt av optiska fiber kablar som kopplar ihop basstationer med mobilnätets kärna; styrningsnätet eller ”core nätet”. Core nätet ansvarar bl.a. för styrningen och uppkopplingen av alla trafik-förbindelser, både internt inom det egna nätet och mot externa kommunikationsnät (också internationellt) och internet. En viktig del av core nätets funktion är också kontrollen och hanteringen av mobilabonnemangens mobilitet och säkerhet [39]. Basstationen bildar radioförbindelser med terminaler UE (User Equipment), som till exempel mobiltelefoner eller WIFI-routers. Eftersom radiovågor breder ut sig i alla riktningar inom antennsektorn försvagas signalen snabbt ju längre distans det är mellan terminalen och basstationen. När distansen ökar måste därför basstationen och därtill kopplade terminaler höja sändarnas signalstyrka, för att göra radiomottagningen möjlig. När distansen mellan basstationen och terminalen blir för stor räcker inte höjningen av sändareffekten längre till för en mottagning av tillräcklig kvalitet. Nätet förflyttar därmed terminalen automatiskt till följande basstation med tillräckligt bra signalnivå (engelsk term ”handover”). Funktionen med en kontinuerlig övervakning av radioförbindelserna i nätet och automatisk överföring av förbindelserna mellan basstationerna i radionätet kallas för mobilitet. [40]

I basstationens mottagare ”dekodas” informationen från radiosignalerna och basbandsenheten konverterar den till en optisk signal genom stamnätet. Core nätet får informationen från stamnätet och kopplar förbindelsen vidare till vilka som helst valda telefonnummer eller IP adresser [1]. Figur 1 beskriver mobilnätets funktion på ett förenklat sätt och baserar sig på det som tidigare behandlats.



Figur 1. Mobilnätets funktion.

Basbandsenheterna bildar basstationens gränssnitt mot transmissionsnätet, dvs. konverterar och delar den optiska signalen från transmissionsnätet mot radioenheterna. Radioenheterna ansvarar för sändningen och mottagningen av radiosignalerna via antennerna. En basstation delas ofta upp i tre olika riktade sektorer, så kallade celler. En cell består av en antenn med ett visst antal radioenheter, beroende på teknologin som används. Basstationers täckningsområde är beroende av sändarnas frekvenser, sändareffekt och omgivningen i antenriktningen. På glesbebyggda områden med låg trafikvolym används en högre effekt med lägre frekvenser vilket ökar basstationens täckningsområde. I städer och tätorter med hög trafik används en lägre effekt med högre frekvenser, vilket möjliggör mindre celler och en betydligt högre radiokapacitet [5]. Radionätsplaneringen har därför stor betydelse då man vill uppnå en ekonomiskt optimal och effektiv nätstruktur av hög kvalitet, för områden med olika karakteristik såsom glesbygder, förorter, tätorter och industriområden.

3 Mobilnätets historiska utveckling

Utvecklingen från det historiska fasta kopparnätets telefoni till dagens mobila databredband har varit exceptionell. I kopparnätet kopplade man först manuellt (senare automatiskt) upp samtalen fysiskt i en växel och samtalet var i praktiken en elektrisk signal som gick genom dedikerad kabel från abonnent A till abonnent B. Energiförbrukningen var minimal och inga elavbrott störde kommunikationen. Ett problem var dock att man var bunden till platsen av den fasta telefonen, när man väntade ett samtal [35]. När biltrafiken ökade, växte också kraven på kommunikationsmöjligheter från bilen. Den första manuella ARP teknologin (Auto Radio Puhelin) kom till Finland redan i början på 1970-talet och möjliggjorde telefonsamtal från rörliga telefoner utan automatisk mobilitet [36].

Världens första internationella mobilnät grundade sig på den nordiska NMT – standarden (Nordisk Mobiltelefon). De första-NMT näten öppnades kommersiellt 1981 och fungerade endast mellan de nordiska länderna. NMT ersatte den manuella ARP teknologin i Finland som fungerade endast inrikes. NMT representerade den första generationens mobilnät. [2]

Efter introduktionen av GSM som den första digitala mobilteknologin i början av 1990-talet, har den teknologiska utvecklingen och standardiseringen förbättrat och effektiviserat de mobila nätens förmåga till datatransmission. I det här kapitlet går man steg för steg igenom det digitala mobilnätets utveckling mot en mera datainriktad framtida mobilkommunikation (se figur 2). Samtidigt beaktas den utmålade trendens inverkan på mobilnät-driftens energikonsumtion och koldioxidspår.

	1G	2G	3G	4G	5G
APPROXIMATE DEPLOYMENT DATE	1980s	1990s	2000s	2010s	2020s
THEORETICAL DOWNLOAD SPEED	2 Kbps	384 Kbps	56 Mbps	1 Gbps	10 Gbps
LATENCY	N/A	629 ms	212 ms	60-98 ms	< 1 ms

Figur 2. Mobilteknologins evolution. (HSDPA, Techtarjet)

3.1 GSM

Till GSM hänvisar man ofta med 2G, som den andra generationens mobilteknologi. GSM-teknologin som en internationell europeisk standard ersatte de analoga teknologierna såsom NMT (Norden), TACS (UK) och AMPS (Amerika). GSM fick sin början år 1982 när europeiska post- och teleförvaltningarnas konferens (CEPT) grundade en arbetsgrupp (Group Speciale Mobile) för att utveckla ett gemensamt digitalt mobilt system för alla länder i Europa. GSM introducerades kommersiellt år 1991 i Finland, som det första landet i världen. Den nya standarden adopterades snabbt globalt redan under slutet av 1990-talet. [3]

Inom GSM-standarderna utvecklades också en datakommunikationslösning, GPRS (General Packet Radio Service). GPRS-teknologin grundade sig på att man kunde definiera delar av radioenheternas tidsindelade kapacitet alternativt till tal- eller data-bruk. Det visade sig snabbt att GPRS-teknologin var otillräcklig för att förverkliga en datatjänst av tillräcklig kapacitet och kvalitet. En sk. EDGE-uppgradering av GPRS-plattformen möjliggjorde teoretiska datahastigheter upp till några 100 kbps. [37]

Med introduktionen av GSM i Finland öppnades också mobilnätet för konkurrens, när den statliga post och telestyrelsens monopol bröts och mobiloperatören Radiolinja startades av HTF (Helsingfors Telefon Förening). Med den ökande konkurrensen sjönk priserna och under 90-talet var samtal i Finland bland de billigaste i Europa.[2]

3.2 3G

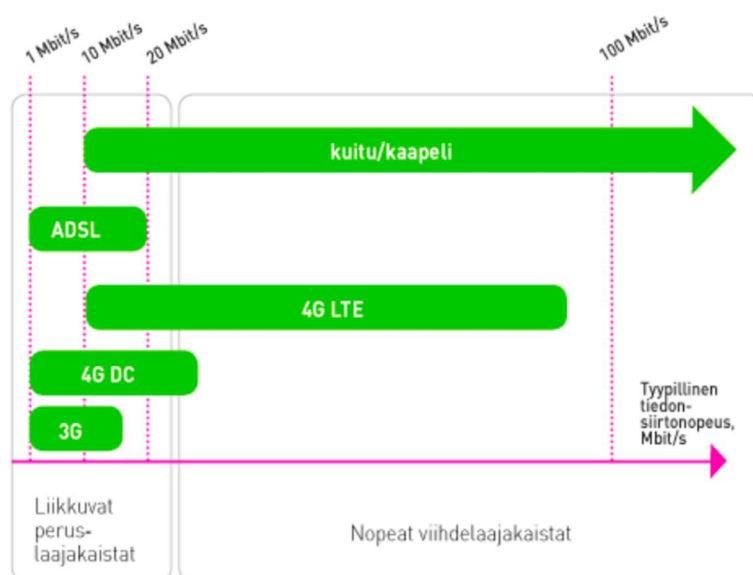
GSM-teknologins svaga stöd för datatransmission ledde till utvecklingen av den tredje generationens mobila teknologi UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) bättre känd som 3G. 3G togs i bruk i mitten av 2000 talet. Datatransmissionen var beaktad redan i planeringsskedet av UMTS vilket möjliggjorde snabbare hastigheter och mer kapacitet än GSM [2]. Trots detta blev det snabbt tydligt att kapaciteten och hastigheten inte kommer att räcka till i den snabbt utvecklande världen. Introduktionen av HSPA-teknologin (High Speed Packet Access) kom mot slutet av årtiondet att höja den teoretiska datahastigheten i 3G nätet upp till 42 Mbps. Som namnet visar var det alltså fråga om en

modernare datapaket-kopplad transmissions-teknologi, vars dataflöde betydligt förbättrades från GSM-tiden. [4]

Med de högre datahastigheterna ökade användningen av datarika tjänster så som video och filmer över internet. Streaming av videon och nerladdning av annan information över internet ledde till otrevliga finansiella överraskningar bland mobil-konsumenterna. Den datavolymbaserade prissättningen av de mobila datatjänsterna ledde ofta till höga telefonräkningar som överraskade kunderna. För att undvika fortsatt negativ publicitet introducerade de finska mobiloperatörerna nya abonnemang med en fast månatlig prissättning med gränslös datavolym [12]. Dessa nya abonnemang ökade igen datavolymer och mot slutet av årtiondet blev nätets överbelastning det största problemet.

3.3 4G

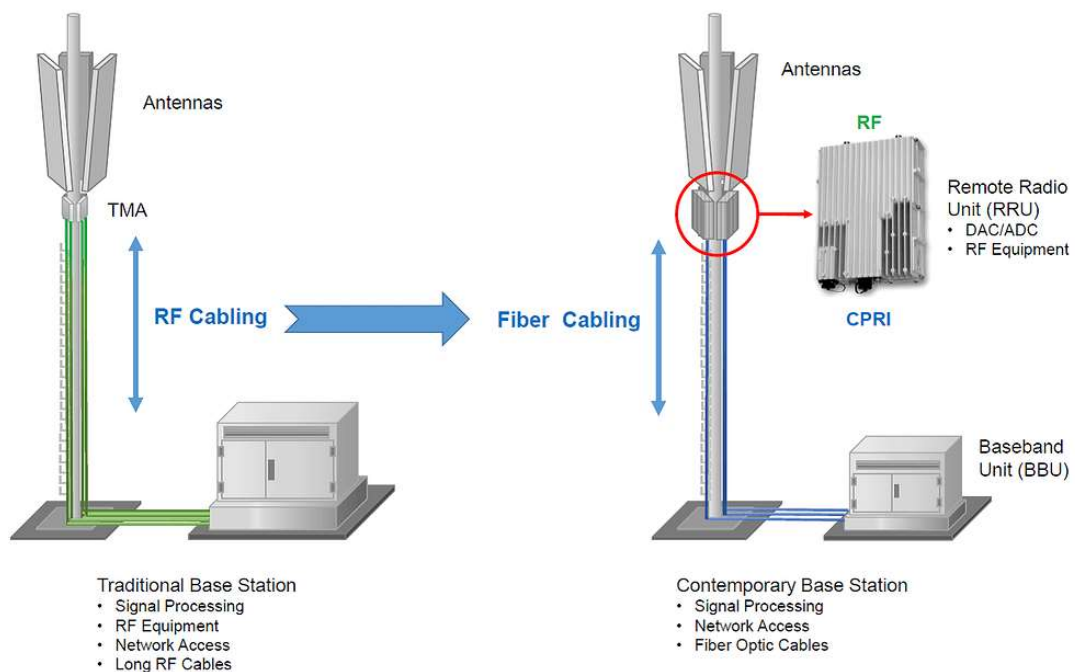
Med den fjärde generationens 4G standard, också hänvisad till som LTE (Long Term Evolution) löste man de största problemen med 3G. Nya frekvenser med bredare spektrum (<20 MHz) togs i bruk inom 800 MHz och 2,6 GHz frekvensbanden, vilket effektiviserade dataflödet och minskade på energibehovet per överförd datavolymerhet [25]. Figur 3 visar hur mobilnätets hastighet utvecklats med introduktionen av 4G.



Figur 3. Hastigheterna för olika bredbandslösningar. (DNA årsberättelse 2011)

4G bredbandsabonnemang med nya terminaler så som wifi-datarouters möjliggjorde för första gången kabelfria tv- och videotjänster (Netflix, HBO, Elisa Viihde, YLE Areena, DNA TV) av HD kvalitet över mobilt internet. Mobilt bredband blev nu en alternativ lösning till hemhushållets bredbandskrav, speciellt i områden där endast kopparnät och xDSL-tjänster fanns tillhanda.

Introduktionen av basstationer med s.k. fjärrradio-enheter RRU (Remote Radio Unit) hade en stor betydelse i förbättringen av 4G teknologins och hela mobilnätets energieffektivitet. Fjärrradio betyder att radioenheten inte längre behövde vara installerad inomhus i basstationsutrymmet, utan radioenheterna kunde placeras utanför byggnaderna på hustak eller uppe i radiomasterna. Detta betydde att värmebelastningen i tekniska utrymmen minskade betydligt och mindre luftkonditionering och avkylning behövdes. Dessutom betydde det att antenkablarna kunde förkortas, vilket betydligt minskade effektförlusterna i kablarna. Som en följd av detta kunde radiosändarnas uteffekter minskas, varvid också basstationernas energikonsumtion minskade betydligt. [26] Figur 4 visar hur basstationen ändrats med implementeringen av RRU.

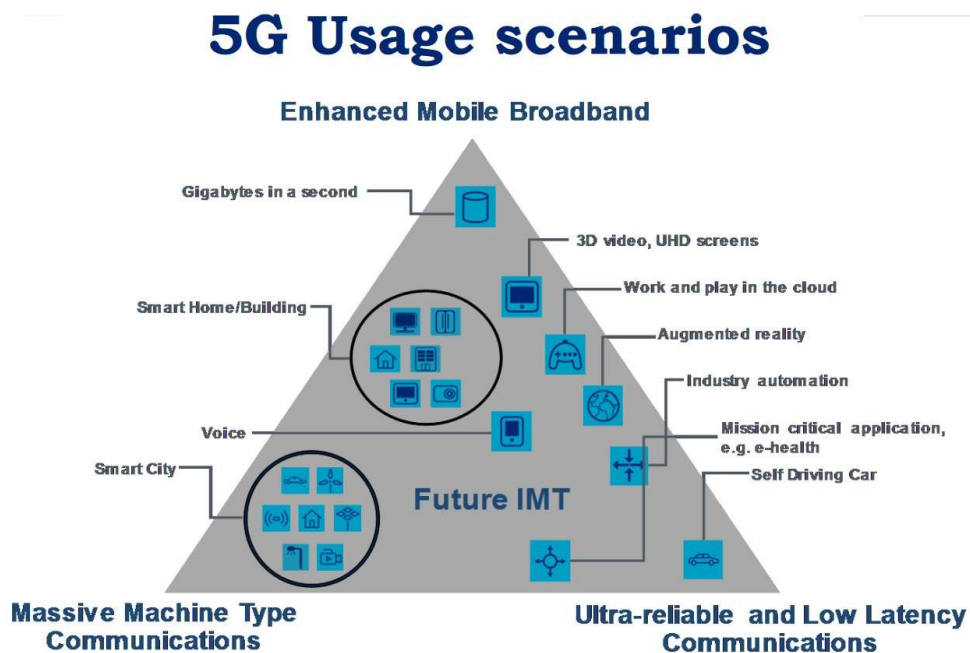


Figur 4. Bild av en typisk basstation med och utan RRU. (Rafael Caixeta, Telecomhall)

3.4 5G

Det blev snabbt klart att de växande 4G datavolymer kommer att kräva nya lösningar för att igen tillfredsställa kapacitetsbehovet i mobilnätet. År 2020 lanserades därför de första femte generationens mobilnäten i Finland. Med 5G teknologin stiger datakapaciteten mer än 10-faldigt jämfört med 4G. Samtidigt har trafik- och kommunikationsverket i Finland auktionerat ut nya frekvensband till mobiloperatörernas behov (700 Mhz, 3,5 GHz och 26 GHz). De högre frekvenserna med allt bredare radiospektrum möjliggör igen allt högre datahastigheter. [15]

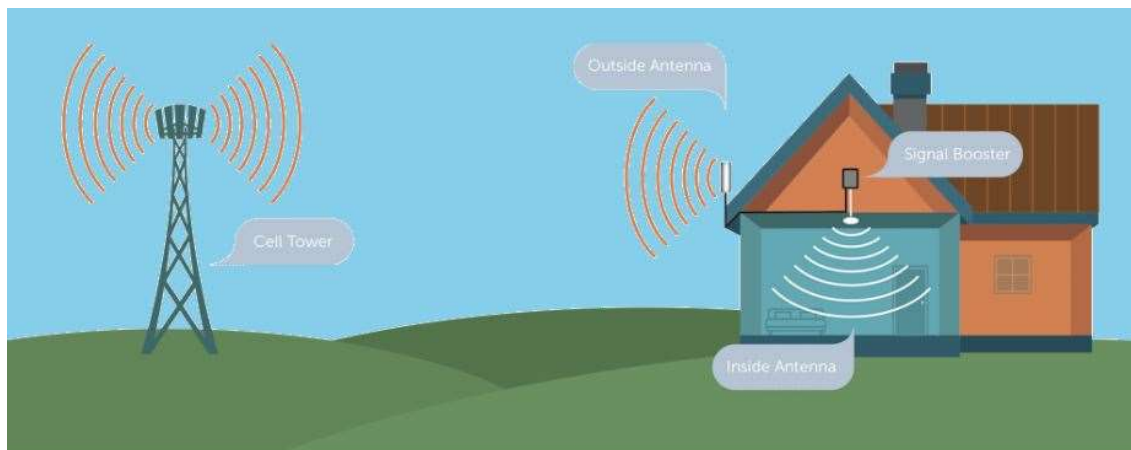
5G standarden bygger inte endast på en förbättring av 1) det mobila bredbandet (eMBB), utan man har också fokuserat på nya marknadsvisioner inom 2) maskinkommunikation (mMTC) och behov av 3) tekniska lösningar för ytterst pålitliga dataförbindelser med ytterst låg latens (URLLC) [19]. I figur 6 kan man se de tre scenarion 5G byggs på och som kommer behandlas noggrannare i kommande stycken.



Figur 6. 5G triangeln. (5G technology world, 2021)

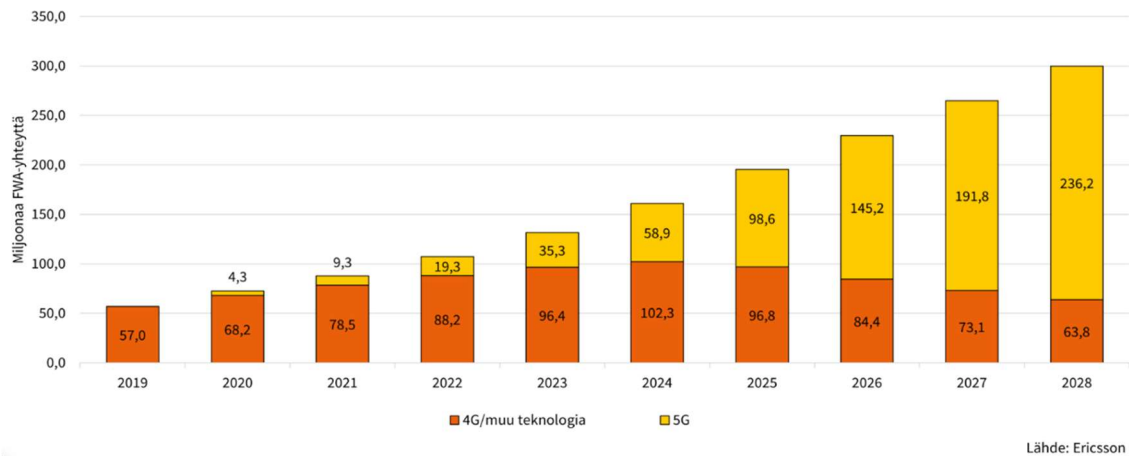
3.4.1 eMBB (Enhanced mobile broadband)

5G möjliggör över 100 Mbit/s medelhastigheter och en maximihastighet på 20 Gbit/s vilket dock kräver perfekta radiotekniska omständigheter. Med mobila data-abonnemang i utomhus 5G radiomodem kan man sälja hög garanterad datahastighet för hushåll och företag. Dessa nya 5G-produkter kallas fast mobilt bredband eller FWA (Fixed Wireless Access). I figur 7 kan man se hur ett fast mobilt bredband över 5G fungerar. [41]



Figur 7. FWA Fast mobilt bredband över 5G. (Powerfulsignal, 2023)

5G kommer att tillfredsställa kapacitetsbehovet för den ökande mängden konsumenter i framtiden. Dessutom kommer de växande 5G datahastigheterna att möjliggöra avancerade nya tjänster, bland annat TV tjänster av UHD videokvalitet samt nya datarika tjänster inom området av virtuell och artificiell realitet.[19] Enligt Ericssons analys kommer 5G FWA abonnemangen globalt att nå 236 miljoner år 2028 (se figur 8) och man kan anta att Finland proportionellt kommer att leda den här utvecklingen.



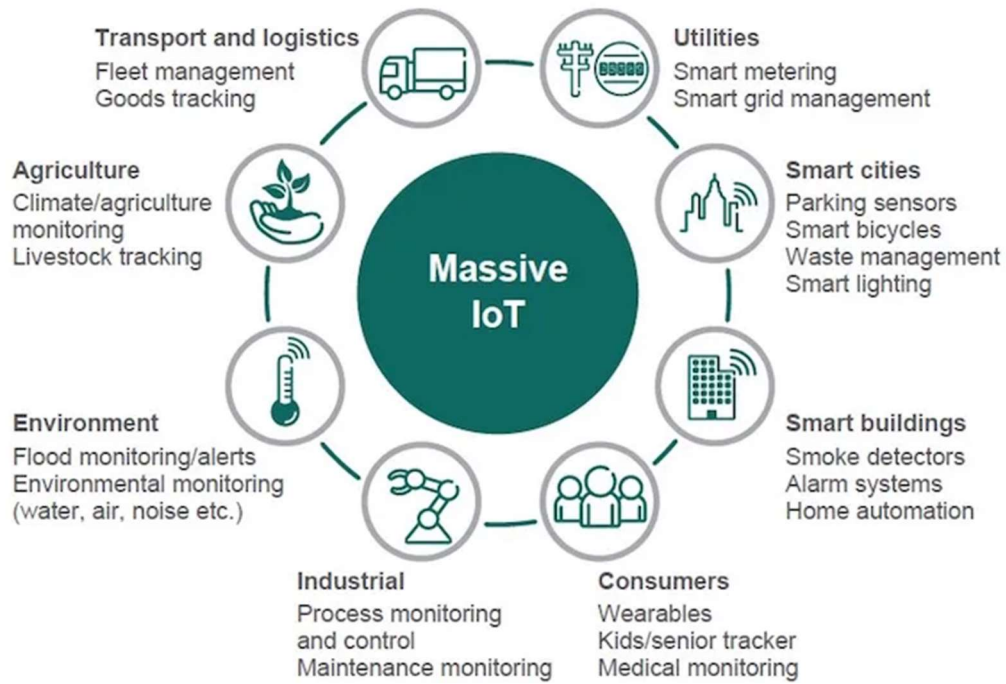
Figur 8. Den Globala FWA tillväxten i 5G enligt Ficom/Ericsson.

3.4.2 URLLC (Ultra reliable, low latency communications)

Det sattes hårda latens-krav (responstid för mobilnätet) på 5G nätet, redan från början av standardiseringen. Visioner om autonoma fordon, fjärrsjukvård och fjärr- och självstyrda produktionslinjer inom industrin krävde latenser på några millisekunder [19]. För att uppnå dessa krav innehåller 5G standarden en distribuerad arkitektur där databehandlingen förs närmare datakällorna vid utkanten av nätet, dvs. närmare basstationen. I samband med privatnät-lösningar för t.ex. företag kan operatören leverera en lokal 5G plattform innehållande både låg-latens radionät, dataförråd och datakalkylering. [29]

3.4.3 mMTC (Massive machine type communication)

Med mMTC menar man vanligtvis IoT, eller Internet of Things. IoT grundar sig på filosofin att allt som kan kopplas till internet kommer att bli kopplat till internet. Dessutom möjliggörs tusentals olika nätkopplade lågenergi-sensorer som t.ex. mäter olika processer och rapporterar över internet. Tanken är också att den uppsamlade datan blir en tillgång för massor av nya business möjligheter [19]. IoT har ingen större betydelse med tanke på nätproduktionens energieffektivitet eftersom dataöverföringen är så liten, men en betydligt större betydelse inom processtyrning och -effektivering inom olika områden. I figur 9 kan man se hur IoT kan utnyttjas inom olika industriella och offentliga områden.

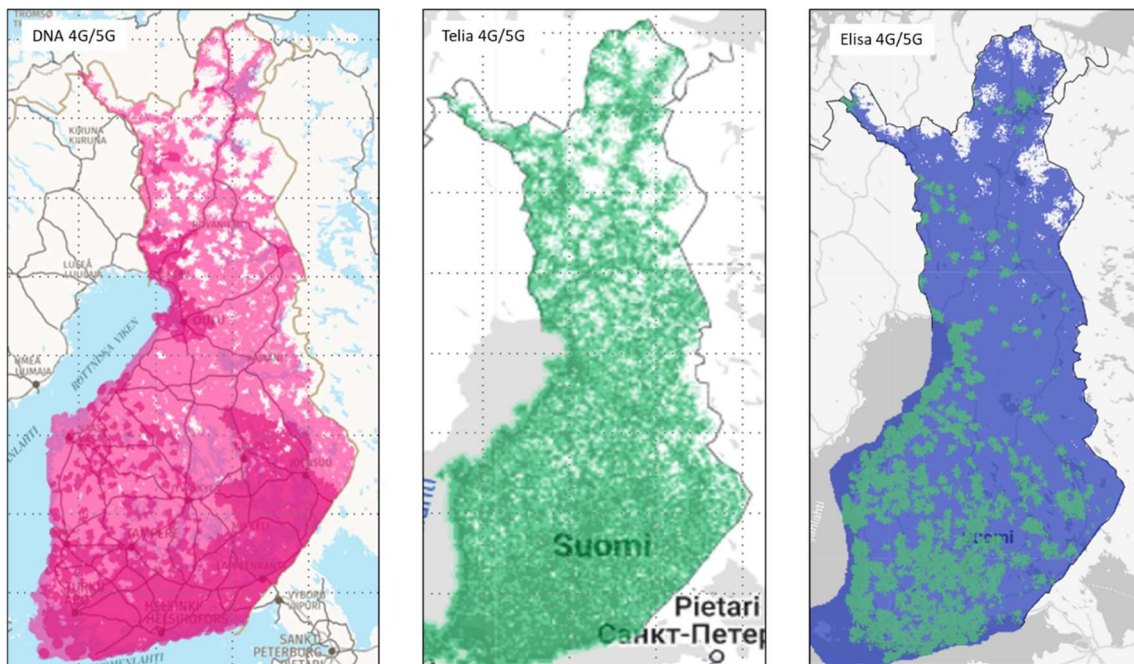


Source: Ericsson

Figur 9. Industriella och offentliga områden för utnyttjande av IoT i stor skala. (Ericsson)

4 Utbyggnad av mobilnätet i Finland

I dagens läge täcker mobilnätet i praktiken nästan hela landet. GSM och 3G har den bästa täckningen men 4G följer nära bakom med endast delar av Lappland utan täckning. I slutet av 2022 täckte 5G nätet redan 87% av den finska befolkningen. Men eftersom 5G nätet än så länge huvudsakligen är byggt i tätorter, täcker det geografiskt bara ungefär 12% av landets yta [16]. Figur 10 visar de olika operatörernas geografiska 4G och 5G täckning.



Figur 10. En karta över mobilnätets täckning i Finland. (DNA, Telia, Elisa)

Det finns inga större skillnader mellan de olika nätoperatörernas täckning av de färdigt utbyggda 2G- och 3G-näten. Under utbyggnaden av de nya 4G och 5G teknologierna kan det dock finnas betydliga skillnader, beroende på operatörernas olika utbyggnadsstrategier och investeringsbudgeter. Medan Elisa som man ser på kartan i figur 10 huvudsakligen byggt ut 5G nätet i västra Finland, har DNA och Telia bästa 5G-täckningen i östra Finland på grund av deras samarbete inom samnätet SYV (Suomen Yhteisverkko) som ansvarar för nätbyggnaden i de östra och norra delarna av landet. Kvalitetsmässigt kan det också finnas lokala skillnader i nätkvaliteten, beroende på hur mycket radiokapacitet man investerat i basstationerna. Här är det inte endast fråga om

investeringar utan i större grad om kostnader, då energiförbrukningen stiger proportionellt med den implementerade radiokapaciteten.

På glesbyggda områden vid landsvägar används oftast lägre frekvenser och högre effekt för att maximera den geografiska täckningen, på bekostnad av datahastigheten. Enligt Traficoms undersökning år 2020 kunde man i medeltal nå en teoretisk datahastighet på 30 Mb/s på 95,9 % av landsvägarna i Finland. I städer är planeringsprincipen oftast olika eftersom det krävs mera kapacitet och byggnader fungerar som hinder för radiovågor. I städer används oftast högre frekvenser för kapacitetsbehovet men också låga frekvenser för att de bättre penetrerar möjliga hinder såsom husväggar [5]. Trafik och kommunikationsverket i Finland (Traficom) har för 5G:s behov auktionerat ut nya frekvensband till mobiloperatörerna (700 Mhz, 3,5 Ghz och 26 Ghz) [25]. De höga 26 Ghz frekvenserna kommer att möjliggöra datahastigheter upp till 20 Gbit/s. Det är sannolikt att dessa frekvenser endast kommer användas i mindre områden där stor kapacitet behövs, såsom sportarenor, mässcenter eller industriområden. Figur 11 visar frekvenserna som används för mobilnäten i Finland samt deras huvudsakliga syften.

Frekvensband	Spectrum UL/DL	Mobil Teknologi	Lisens innehav	Huvudsakligt Syfte	Kommentar
700 MHz	10/10 MHz	5G	DNA, Elisa, Telia	<u>Täckning, Penetration</u>	
800 MHz	10/10 MHz	4G	DNA, Elisa, Telia	<u>Täckning, Penetration</u>	
900 MHz	11,4/11,4 MHz*	2G, 3G	DNA, Elisa, Telia	<u>Täckning, Penetration</u>	* DNA 11,6/11,6 MHz
1800 MHz	24,8/24,8 MHz	2G, 3G, 4G	DNA, Elisa, Telia	<u>Kapasitet, Täckning</u>	
2 GHz	19,8/19,8 MHz	3G, 4G, 5G	DNA, Elisa, Telia	<u>Kapasitet, Täckning</u>	
2,6 GHz	25/25 MHz*	4G, 5G	DNA, Elisa, Telia	<u>Kapasitet, Täckning</u>	* DNA 20/20 MHz
3,5 GHz	130/130 MHz	5G	DNA, Elisa, Telia	<u>Kapasitet, Täckning</u>	
26 GHz	800/800 MHz	5G	DNA, Elisa, Telia	<u>Kapasitet, hot spots</u>	

Figur 11. Nationella frekvenslicenser, Åland exkluderat, och syften för mobila radionät. (Traficom, 2023)

Det tog i praktiken 6-7 år att täcka 99 % av den finska befolkningen med 4G [38]. 5G täcker redan idag 92 % av befolkningen, vilket betyder att utbyggnaden av 5G kommer att vara betydligt snabbare än 4G. Det här är möjligt när man utnyttjar den existerande

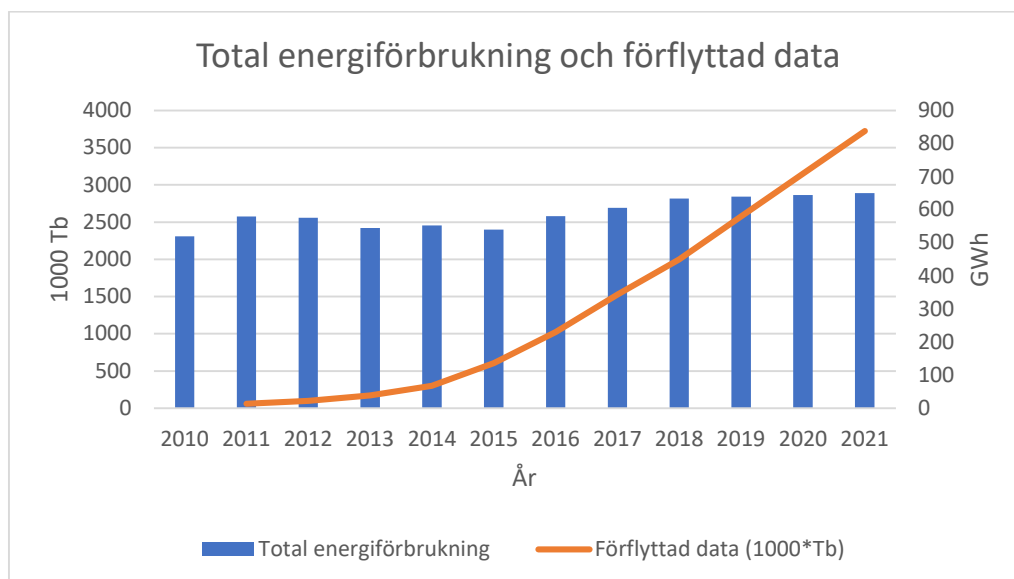
mast- och site-infrastrukturen från tidigare utbyggda teknologier. På glesbygden och i förorter är det vanligt att placera basstationerna i master, medan hyrda utrymmen i olika fastigheter utnyttjas i tätorter och städer. Lagen om sambyggande och samutnyttjande av nätinфраstruktur [18] kräver att operatörerna hyr ut mastutrymme med energiförsörjning till de andra operatörerna i masterna de äger. Det här är en både energieffektiv och miljövänlig lösning för glesbygdens nättäckning, men minskar samtidigt täckningskonkurrensen och ökar risken för gemensamma lokala avbrott i tjänsterna då alla nät samtidigt går ner, t.ex. under längre avbrott i energiförsörjningen till en gemensam mast.

5 Mobilnätets energiförbrukning

Datavolymer i det finska mobilnätet har ökat betydligt mellan 2011 och 2021. År 2021 förflyttades 3,725 miljarder Terabyte (TB) data genom det finska mobilnätet [7] vilket är över 60 gånger mer än 60 000 TB år 2011[8]. Trots att datavolymer stigit 60 gånger sen 2011 har energiförbrukningen stigit endast med 12 %. I följande kapitel analyseras de huvudsakliga orsakerna till denna positiva utveckling.

5.1 Teknologins inverkan på mobilnätets energiförbrukning

Figur 12 nedan visar den totala energiförbrukningen i de Finska telenäten. Energikonsumtionen för bl.a. datacenter och fasta stamnät är inkluderad, eftersom operatörerna inte publicerar detaljerad information om enbart mobilnätet. Enligt Traficoms undersökning från år 2022 står det mobila radionätet för ungefär 60 % av den totala energiförbrukningen. Energidata för tabellen i figur 12 har tagits från VTT:s undersökning år 2015[9], Ficoms (ICT branschens intressebevakare) undersökning år 2020[8] och Traficoms publicering år 2022[10]. Datavolymer fås från Traficoms undersökning år 2022[7].



Figur 12. Energiförbrukningen och mängden förflyttad data per år.

Som man ser i figur 12 har energiförbrukningen varit relativt jämn trots att datavolymer stigit 60 gånger sedan år 2011. Den största orsaken till detta är att de nya generationernas mobilteknologier är betydligt energieffektivare än de tidigare och samtidigt erbjuder en betydligt högre kapacitet. När effektiviteten i nätet ökar, stiger också datavolymer i nätet. År 2011 var 3G den dominerande mobilteknologin, medan 4G utbyggnaden just hade påbörjats. År 2021 var 4G nätet i stort sett färdigt medan utbyggnaden av 5G just börjat.

Från figur 12 kan man också avläsa att den totala energiförbrukningen minskade mellan 2013 och 2015 medan 4G nätet byggdes. En möjlig orsak till detta var den förnyade radioteknologin. Med 4G bytte man i praktiken ut all gammal basstationsteknologi mot en s.k. multistandard radioteknologi (MSR), som gjorde det möjligt att utnyttja samma radiohårdvara med alla tre generationers mobilteknologi. Detta betydde att man inte längre behövde installera skilda radion för olika teknologier och frekvensband [28]. Samtidigt minskade mängden installerade radioenheter och därmed även energiförbrukningen. En stor del av MSR-radioenheterna var av typ fjärrradio-enheter (RRU). Dessa kunde installeras utomhus, vilket minskade avkylningsbehovet i de tekniska utrymmena. Samtidigt kunde man sänka uteffekten hos sändarna eftersom längden på RF-kablarna till antennen blev betydligt kortare [26]. Med den ökade kapaciteten i 4G nätet ökade också den förflyttade datavolymer, när alltmer människor ville se högre kvalitets videon och filmer online.

5.2 Energiförbrukningen i framtidens mobila datakommunikation

Med 5G teknologin kommer effektiviteten igen att stiga och datavolymer kommer att mångfaldigas. Det här kommer att leda till en betydlig sänkning av den nominella energiförbrukningen per datavolymerhet (kWh/GB). Statistiken i figur 13 grundar sig på en undersökning gjord av Ficom och visar hur den nominella elförbrukningen per GB har minskat med introduktionen av 4G.



Figur 13. Mobildata nominalelförbrukning kWh/GB 2014–2018. (Ficom, 2020)

Som man ser i tabellen har elförbrukningen per förflyttad GB minskat tydligt sen 2014 när varje förflyttad GB använde 1,6 kWh energi. År 2018 hade energiförbrukningen redan minskat till ungefär 0,3 kWh per GB [8]. Enligt den senaste undersökningen gjort av Traficom har energieffektiviteten fortsatt förbättras och år 2021 var energiförbrukningen endast 0,12 kWh per GB [10].

Samma utveckling kommer sannolikt att fortsätta när 5G nätet byggs ut med det högre 3,5 GHz frekvensbandet. Även om den nya 5G-tekniken igen är energisnålare kommer det ökade behovet av mobila bredband att kräva nya 3,5 GHz 5G radioenheter i de existerande basstationerna, men också helt nya basstationer. Varje ny basstation och radioenhet kommer därmed att stegvis höja mobilnätets totala energiförbrukning.

Mängden basstationer i Finland är inte offentlig information men Traficoms undersökning inom den finska mast-marknaden uppskattar att det finns ungefär 24000 4G basstationer i Finland [17]. Enligt Traficom består mobilnätets totala energiförbrukning till 60 % av radionätet. Det här betyder att radionätets energikonsumtion är ca. 380 GWh/år. Man kan därmed räkna att en basstations medelkonsumtion är 15 800 kWh/år. Eftersom en framtida expansion av nätkapaciteten enligt ovan kommer kräva flera basstationer kommer också energikonsumtionen att stiga proportionellt.

Enligt en undersökning gjord av Nokia kommer nominalelfförbrukningen av 5G mobildata att minska nästan 90 % till 0,02 kWh/GB. Små celler byggda med 5G 26 GHz frekvenser kan minska den nominala elförbrukningen till en hundraedel jämfört med 4G. Detta beror till stor del på 5G basstationernas ökade radiobandbredd och därmed höjda kapacitet. I praktiken betyder det här att radionätets kapacitetsökning i framtiden inte höjer den totala energiförbrukningen lika mycket som motsvarande kapacitetsökning med de äldre teknologierna skulle ha gjort. De små 5G cellernas täckningsområde är ytterst begränsat och kommer endast att användas i mindre områden där stor kapacitet behövs [11].

Man kan härmed dra slutsatsen att den allt jämt växande datavolymen i Finland kommer att kräva nya energieffektivare mobilteknologier för att nätets totala energiförbrukning ska kunna begränsas. Samtidigt kommer optimeringen av radionätets infrastruktur och automatiseringen av nätets drift och underhåll att spela en ökande roll på vägen mot en hållbarare och klimat vänligare trådlös datakommunikation.

5.3 Nya innovationer för att minska energiförbrukningen i mobilnätet

På grund av de kraftigt fluktuerande elpriserna idag är operatörerna alltmer motiverade att minska energikostnaderna. Det betyder att utvecklingen av radionätet kommer göras allt energieffektivare. Tidigare nämnd utveckling av radioteknologier har redan minskat operatörernas energiförbrukning.

5.3.1 Utnyttjande av artificiell intelligens för optimeringen av energikonsumtionen i radionätet

Utnyttjandet av maskininlärning och artificiell intelligens (AI) är ett intressant nytt område inom utvecklingen av mobilnätets effektivitet. AI kan användas bl.a. inom radionätsplaneringen för att optimera nätinvesteringarna och möjliggöra den minsta energikonsumtionen utan att försämra kunderfarenheten. Enligt Ericsson kommer det att bli möjligt med hjälp av AI och tidbaserad trafik-data att optimera investeringarna i ny kapacitet, så som radioenheter eller helt nya basstationer. Med rätt AI algoritm kalkyleras de optimala valen av teknologier, frekvenser och radioenheter för att nå den bästa täckningen och datahastigheten enligt den insamlade informationen. AI kan alltså hjälpa radionätsplaneringen att identifiera sajter där mera 5G kapacitet borde implementeras. [24]

AI kan också användas för att effektivisera basstationerna genom att styra användningen av de installerade radioresurserna. På basstationen utförs en konstant mätning av nätets lokala belastning (per basstations sektor), vilka tjänster och teknologier som används och dess historiska trafikdata. AI-algoritmen använder denna data för att göra beslut om att stänga och öppna radioresurser efter behov [24]. Genom att optimera användningen av radioresurserna kan man minska basstationernas energiförbrukning.

AI kan också vara till nytta för att garantera en tillräckligt bra kunderfarenhet. Ännu idag sker en stor del av nätets kvalitetmätning genom körtester med bil. Med körtesten verifierar man nätets lokala prestanda genom att konstant ringa samtal och sända mobildata med mobila terminaler. På detta sätt kan nätverkets prestanda mätas och beräknas. Genom att utnyttja AI med verklig trafikdata från nätet kan denna väldigt manuella process automatiseras. Data som baserar sig på verklig radionätsstatistik används av AI-algoritmen

för att simulera ett körtest och estimeras dess resultat. På detta sätt kan man undvika onödigt körande och därmed minska biltrafikutsläppen. [24]

5.3.2 Lokal energiproduktion vid basstationer och master

Lokal energiproduktion vid basstationer är en möjlighet för operatören att minska kostnaden av den inköpta energin från elbolagen. Energikällor som vindkraft, solenergi och andra förnybara metoder att lokalt producera energi kan ha en varierande betydelse i mobiloperatörernas framtid.

Vindkraft har redan testats i praktiken på ett antal basstationer. DNA installerade redan 2013 en liten vindturbin i en basstationsmast, som matade den producerade energin till batterierna. Trots att DNA kommenterat att testet varit lyckat har ingen vidare information om ämnet kommit och inga fler test gjorts [22]. Elisa och Telia har gjort liknande test men även dessa har blivit på en prototypnivå. Troligtvis betyder det att investeringen och de växande underhållskostnaderna i dessa lokala energiproduktionslösningar varit för stora i förhållande till nyttan för att man skulle kunna starta en större implementering på tusentals basstationer.

Solpaneler på basstationen är också en möjlighet. De kan installeras på basstationens tak, i en egen ställning eller i masten. Problemet med solpaneler är dock att de i praktiken genererar el endast under sommarmånaderna. En stor del av basstationerna i Finland är placerade i skogsområden vilket orsakar skuggor över själva basstationen. På grund av detta skulle solpaneler huvudsakligen löna sig på öppna områden. Även här är underhållskostnaderna jämfört med lönsamheten sannolikt det största hindret att inga större investeringar i solpaneler har skett inom mobilnäten.

I Finland är majoriteten av basstationerna kopplade till elnätet. På grund av detta har det inte funnits behov av lokal energiproduktion och investeringar som skulle behövas för det. På platser där det inte finns tillräcklig energiinfrastruktur idag fungerar basstationerna ofta med dieselgeneratorer. På sådana områden finns det mera behov av en hållbar lösning som även betyder inbesparingar med mindre bränslekostnader och underhåll.

5.3.3 Fortsatt expansion av samnätet

Att operera 3 separata radionät inom samma geografiska område betyder i praktiken trippelkostnad och -elförbrukning. Med 4G/MSR radio-enheterna blev det möjligt att utnyttja ett bredare radiospektrum, tillräckligt för att flera operatörer kan utnyttja samma basstationer och radioenheter. Det här betyder att t.ex. 2 operatörers frekvenslicenser kan slås ihop och dynamiskt användas som ett dubbelt bredare frekvensband åt dessa operatörers kunder. Vid lägre belastning har därför de enskilda kunderna tillgång till betydligt mera kapacitet än i separata nät. Vid högre belastning minskar skillnaden till de separata näten. [31]

Den största nyttan av ett samnät för operatörerna ligger dock i energieffektiviteten då radioenheternas antal minskar och basbands- och kontrollenheterna blir gemensamma för mobiloperatörerna. Investeringarna per operatör blir också betydligt mindre då kostnaderna kan delas 50/50. Dessutom uppnås betydliga kostnads inbesparningar av hyresutrymmen och masthyror vilket är viktigt, speciellt ute på glesbygden där abonnemangpenetration är låg och lönsamheten lägre.

Telia och DNA ingick 2014 i ett samarbete att bygga samnätet SYV (Suomen Yhteisverkko Oy) i de glesast bebodda områdena i östra och norra Finland, med en geografisk täckning på 50 % av Finlands yta (13,5 % av populationen). Finansiella uppgifter om effektivitetsökningen finns inte tillhanda, men år 2020 kom man överens om att utöka samnätet till 65,2 % av Finlands geografiska yta (28,5 % av populationen), vilket tyder på att nyttan av nätsammanslagningen varit tillräckligt stor. [32] Figur 14 visar SYV nätets geografiska täckningsområde.



Figur 14. Samnätet SYV:s täckningsområde. (Yhteisverkko.fi)

För framtiden finns inga tekniska hinder att göra SYV-nätet nationellt heltäckande och köra ner de separata näten totalt. Det finns heller inga tekniska hinder att också ta med en tredje nätoperatör till SYV-nätet. Kostnads- och energi-inbesparningen skulle härmed igen bli större och den positiva miljönverkan betydlig. Det är dock anmärkningsvärt att problem i mobilnätet i SYV-områden kommer att påverka dubbelt mer människor när det är två operatörer i ett nät [32]. Anmärkningsvärt är också att varje utökning av samnätet i Finland kräver godkännande av konkurrens- och konsumentverket [33].

5.3.4 Nerkörning av föråldrad mobilteknologi

Alla tre mobiloperatörerna i Finland har bestämt sig för att köra ner 3G nätet. Detta beror på att användningen av 3G nätet minskat. Enligt DNA förflyttas endast 1,5 % av mobil-datan i 3G nätet. Största delen av kundernas terminaler så som mobiltelefoner fungerar redan i 4G och 5G näten. När 3G nätet stängs förflyttas de terminaler som fortfarande fungerar i 3G nätet till 2G nätet. Genom att stänga 3G nätet kan de frigjorda frekvenserna allokeras till de effektivare 4G och 5G teknologierna. [34]

De finska 2G näten kommer fortfarande att vara i bruk tills vidare, eftersom en stor mängd kritisk infrastruktur övervakas av olika sensorer och energi mätare i 2G nätet. De här

terminalerna har tagits i bruk före 3G teknologin kommersiellt varit tillgänglig och är inte uppåt kompatibla med nyare generationers mobilnät. Stängandet av 2G nätet skulle därför betyda att alla dessa terminaler slutar fungera och övervakningen av infrastrukturen slutar. Därför kräver också Traficom att 2G näten skall upprätthållas tills terminalerna ersatts med motsvarande 4G eller 5G terminaler [20].

6 Mobiloperatörernas koldioxidutsläpp

I följande kapitel behandlas mobiloperatörernas koldioxidutsläpp, hur de rapporteras och hur man kan minska på dem. Som källor har använts de tre finska mobiloperatörernas årsberättelser.

6.1 Miljörelaterad rapportering

Alla tre mobiloperatörer i Finland publicerar s.k. hållbarhetsrapporter där de går igenom sina utsläpp av växthusgaser. Operatörerna delar upp sina utsläpp i tre kategorier:

Scope 1: Direkta utsläpp, d.v.s. bilar och bränslet för reservkraft

Scope 2: Indirekta utsläpp, Radio- och transmissions nätets energiförbrukning

Scope 3: Andra indirekta utsläpp, bl.a. inköpta varor och tjänster av underleverantörer, arbetsresor och logistik.

Enligt DNA står ICT branschen för 4-10 % av elförbrukningen och 3-5 % av växthusgasutsläppen i världen [13]. Alla finska mobiloperatörer strävar efter att begränsa klimatuppvärmningen till 1,5 grad. Där utöver har Elisa ett mål att bli koldioxidneutral år 2040, medan DNA och Telia har en ambitiösare tidtabell på år 2030.

Enligt Telia beror största delen av företagets utsläpp på scope 3 delen inom logistiken och produktionen av produkterna de säljer (t.ex. telefoner och datorer). DNA's och Telias tolkning av utsläppen är helt olika och beror troligtvis på hur elkonsumtionen för basstationerna i hyrda utrymmen behandlas. DNA räknar sannolikt endast energin i de egna tekniska utrymmen som koldioxidfri (DNA årsberättelse 2022, sida 29) medan Telia troligtvis kompenserar energiförbrukningen i hyresutrymmen, eller antar att hyres-energin också är koldioxidfri. Alla tre största operatörerna i Finland köper endast energi producerat med förnybara energikällor.

De olika operatörernas hållbarhetsrapporteringar är inte jämförbara med varandra och alla rapporterar olika saker på olika sätt. Dessutom kompenserar man koldioxidemissioner från olika instanser, med betalningar till olika kompensationsstiftelser och -fonder, utan

att nämna exakta summor. Den viktigaste informationen från rapporteringen är därför uppgifterna om åtgärder som skall utföras för att målen skall kunna nås. Flera av dessa finns också nämnda i det här arbetet.

6.2 Indirekt nytta av mobilnätet

Trots att mobilnätet drar en hel del energi och står för stora mängder utsläpp medan nätet byggs upp och används så lönar sig ändå investeringarna också från en hållbarhetssynpunkt. De nya generationens mobilnät har möjliggjort flera nya innovationer och tjänster som kan minska de totala växthusgasutsläppen i vårt samhälle.

Med hjälp av IoT har man bland annat sensorer som kan mäta inomhus klimatet och därmed effektivisera ventilation och uppvärmningen i byggnader. Med hjälp av fjärrstyrd maskinkontroll kan vi undvika onödiga resor och sköta nödvändiga reparationer och underhåll snabbare. Ökade dataöverföringshastigheterna har möjliggjort stabila online möten och möjlighet till distansarbete som blev väldigt bekant för alla under Korona-pandemin. Flera företag har fortsatt erbjuda möjligheten till distansarbete vilket minskar på mängden arbetsresor och därmed trafiken. Effektiva online möten minskar också behovet för utlandsresor. Telia uppskattar att de ovannämnda sakerna minskat deras koldioxid avtryck med 330 000 ton CO₂ år 2022 [14]. Enligt en undersökning gjord av GSMA år 2018 har mobilteknologier möjliggjort minskande av totalt 2,1 miljoner ton CO₂.

6.3 Batterireserven

För att säkra kommunikationen i alla situationer överallt i Finland och speciellt nödsamtals funktion under strömavbrott och i krissituationer har Traficom reglerat tidsmässiga krav på en batterireserv i mobilnätets basstationer. Enligt lag behöver alla basstationer uppehålla en 2-3h batterireserv för lågbands radioenheterna (700 – 900 MHz) vilka huvudsakligen möjliggör mobilnätets grundtäckning. Kravet för högbandradion (>1800 MHz) är endast 15 min. Orsaken till detta är att basstationerna ska fortsätta fungera även då det blir strömavbrott. Eftersom lågbands-frekvenserna ger den nationella täckningen över hela landet används dessa till att garantera nödsamtal och annan kritisk kommunikation under längre strömavbrott. Högband radioenheterna är huvudsakligen kapacitetstillägg i tätorterna och är därför inte så kritiska som lågbandet med tanke på kritisk

kommunikation och nödsamtal [30]. För att nå reservkrafts kraven används idag 100–190 Ah / 12 V blybatterier som seriekopplas till 48 V batteripaket. En basstations batterireserv består oftast av två eller flera parallellkopplade batteripaket beroende på behovet [40].

Operatören Elisa har börjat ett projekt för att återförsälja batterireserven till elnätet vid behov. Systemet är helt automatiskt och återger batteriladdningen till elnätet i fall av störningar i elnätet. Det här kan göra flera av Elisas basstationer till ”reservkraftverk” som förbättrar det finska elnätets resistans mot störningar och tillfälliga överbelastningar. Batterireserven kan användas för att balansera elnätet när energiproduktionen från sol och vindkraftverk inte motsvarar det förväntade [21].

Enligt Elisas beräkningar kommer deras ”virtuella kraftverk” att minska elproduktionens koldioxidutsläpp med 20 000 ton CO₂ per år eftersom man kan minska användningen av de fossildrivna reservkraftverken [21]. För att uppehålla myndighetskraven för basstationen och samtidigt kunna sälja el vid behov måste Elisa överdimensionera batterireserven. Detta ökar också investeringskostnaderna för basstationen och kräver mera utrymme. Den höjda batterireserven har också en större miljöpåverkan och underhållskostnaderna ökar. För denna uppgift måste sannolikt blybatterierna bytas ut mot litiumbatterier vilka klarar repeterade laddningar och urladdningar bättre än de traditionella blybatterierna [40].

7 Sammanfattning

I detta examensarbete har man behandlat energikonsumtionen i moderna mobilnät. I tidigare kapitel har man sett att trots den massiva ökningen i kapacitet och datahastighet har energikonsumtionen stigit överraskande lite. Det här beror på effektivare nya generationers mobilteknologier med betydligt mindre nominell elförbrukning. Trots att nominella elförbrukningen av 5G är betydligt mindre än 4G kommer energiförbrukningen att öka med varje ny 5G radioenhet inom de nya frekvensbanden. Mobilnätets effektivisering måste därför fortsätta i de kommande teknologigenerationerna som 6G, för att säkra kostnadseffektiva mobila datatjänster också i framtiden.

Med tanke på framtiden skulle det vara viktigt att få exakt data på mobilnätets energikonsumtion. Trots att ICT-sektorn idag står för 4-10 % av den globala energiförbrukningen finns det ytterst begränsat information om speciellt mobilnätets energikonsumtion i Finland. Att exakt förutsäga utvecklingen av mobilnätets energiförbrukning i framtiden är därför svårt. I det här examensarbetet har den historiska utvecklingen analyserats med tillgänglig information liksom också 5G teknologins troliga inverkan på framtiden.

År 2022 publicerade Traficom första gången den totala energiförbrukningen i de finska mobilnäten under år 2021 och kommer att fortsätta göra det i framtiden. 5G teknologins inverkan på energitrenden i mobilnäten kommer därför att bli synbar inom några år. Det är inte endast nätets effektivitet som måste beaktas, eftersom olika industrier och tjänster betydligt kan effektiveras med utnyttjande av de nya mobiltjänsterna inom IoT. Troligtvis kommer de här nya mobilteknologierna att också möjliggöra helt nya innovationer och öppna nya marknader, där virtuell realitet och artificiell intelligens också kommer att ha en betydande roll. Detaljerna i detta arbete baserar sig på dagens krav och lagstiftning. I framtiden kommer vi sannolikt att se nya miljödrivna lagar och direktiv som kommer att påverka mobilnätets energikonsumtion och batterireserver.

Källor:

- [1] STUK. Matkapuhelinverkon toiminta ja tukiasemat.
[Matkapuhelinverkon toiminta ja tukiasemat - STUK](#)
- [2] Ficom 2018. Langattomat sukupolvet 1G,2G,3G,4G,5G
[Langattomat sukupolvet 1G, 2G, 3G, 4G, 5G... - FiCom](#)
- [3] DSTNY 2019. GSM
[Vad är GSM - Dstny förklarar! - Dstny](#)
- [4] Wireless logic. What is 3G
[What is 3G? | Wireless Logic](#)
- [5] Traficom 2020. Viestintäverkkojen kustannus selvitys
[Microsoft Word - Raporttiluonnos_2_0_final \(traficom.fi\)](#)
- [6] Elisa 2022. Vastuullisuusraportti
[Elisa – Vastuullisuus 2022](#)
- [7] Traficom 2020. Viestintäverkoissa siirretty tieto
[Viestintäverkoissa siirretty tieto | Tieto Traficom](#)
- [8] Ficom/Elomatic 2020. Suomen teleoperattoreiden sähkönkulutus
[Teleoperaattoreiden sähkönkulutuksen kehitys ja sähkövero \(ficom.fi\)](#)
- [9] VTT 2015. Esiselvitys matkaviestinverkkojen tukiasemien sähkökäytöstä ja energiatehokkuudesta. [VTT-CR-03348-15.pdf](#)
- [10] Traficom 2023. Viestintäverkkojen energiankulutuksesta ensimmäinen tutkimus
[Viestintäverkkojen energiankulutuksesta ensimmäinen tutkimus | Traficom](#)
- [11] Nokia. How 5G is bringing an energy efficiency revolution
[Nokia: Nokia 5G Energy Efficiency Revolution White Paper](#)
- [12] STT 2021.
[Kun 4G otettiin käyttöön, suomalaisille naureskeltiin maailmalla – DNA:n johtaja kertoo, kuinka nauru muuttui lopulta ihmettelyksi ja miksi Suomi on nyt 5G:n edelläkävijä – ja luopumassa vanhasta teknologiasta | DNA Oyj \(sttinfo.fi\)](#)
- [13] DNA 2022. Årsberättelse 2022
[DNA Oyj | Vuosikertomus 2022](#)
- [14] Telia 2022. Hållbarhetsrapport
[Annual and sustainability report 2022 \(teliacompany.com\)](#)

- [15] Traficom 2021. Tietoa 5G:stä
[Tietoa 5G:stä | Traficom](#)
- [16] Tarficom 2023. Käytetyn datan määrä mobiiliverkoissa jatkaa kasvuaan ja 5G verkot laajenevat
[Käytetyn datan määrä mobiiliverkoissa jatkaa kasvuaan ja 5G-verkot laajenevat | Traficom](#)
- [17] Traficom 2023b. Mastomarkkina selvitys
[Selvitysraportti \(traficom.fi\)](#)
- [18] Lag om sambyggnad och samutnyttjande av nätinfrastuktur. 22.4.2016/276
[Lag om sambyggnad och samutnyttjande av... 276/2016 - Uppdaterad lagstiftning - FINLEX ®](#)
- [19] Guillaume.V. 2021. 5Gtechnologyworld, IOT: how 5G differs from LTE
[IoT: How 5G differs from LTE - 5G Technology World](#)
- [20] Tuomas.L. 2024. Ilta-sanomat, ”olen hyvin huolissani” – asiantuntija kauhistelee 3G- verkkojen sulkemista
[3g-verkon sulkeutuminen voi vaarantaa joidenkin laitteiden toimivuuden, Traficom rauhoittelee - Digitoday - Ilta-Sanomat \(is.fi\)](#)
- [21] Elisa 2023. Virtuaalinen voimalaitos
[Virtuaalinen voimalaitos - Elisa](#)
- [22] Tuomas. L. 2013. Ilta-sanomat. DNA testaa tuulivoimaa tukiasemalla
[DNA kokeilee tuulivoimaa 3G-verkossa Lohjalla - Mobiili - Ilta-Sanomat \(is.fi\)](#)
- [23] DNA 2023. Onko 5G vastuullinen valinta? Vihreä sähkö ja energiatehokkaat ratkaisut hillitsevät 5G-verkon ympäristövaikutuksia
[Onko 5G vastuullinen valinta? Vihreä sähkö ja energiatehokkaat ratkaisut hillitsevät 5G-verkon ympäristövaikutuksia \(dna.fi\)](#)
- [24] Ericsson 2023. Intelligent sustainability: the role of AI in energy consumption and new revenues
[The role of AI in energy consumption - Ericsson](#)
- [25] Traficom 2023. Matkaviestinverkkojen taajuudet ja luvanhaltijat
[Matkaviestinverkkojen taajuudet ja luvanhaltijat | Traficom](#)
- [26] Rafael C. 2019. Telecomhall. What is RRU, BBU and antenna
[What is RRU, BBU and Antenna? - Equipment / Antennas - telecomHall Forum](#)

- [27] DNA 2011. Årsberättelse
[DNAVVK2011_verkkovuosikertomus.pdf](#)
- [28] Zahid. G. 2009. Multi-standards Radio Base Station (MSR-BS) in 3GPP Release 9
[The 3G4G Blog: Multi-Standards Radio Base Station \(MSR-BS\) in 3GPP Release 9](#)
- [29] Ericsson 2023. Edge computing – a must for 5G success
[What is edge computing and why it matters - Ericsson](#)
- [30] Traficom 2021. Määräys viestintäverkkojen ja palvelujen varmistamisesta sekä viestintäverkkojen synkronoinnista.
[Microsoft Word - asiakirja11193535.docx \(kyberturvallisuuskeskus.fi\)](#)
- [31] Paralell Wireless. Multi-operator core networks
[Multi-Operator Core Networks \(MOCN\) • Parallel Wireless](#)
- [32] Henrik. K. 2021. Ilta-sanomat. Telian ja DNA:n asiakkaat samaan puhelinverkkoon Oulussa, Kuopiossa ja Kouvolassa – operaattorit ajavat omat verkkonsa alas
[Telian ja DNA:n asiakkaat samaan puhelinverkkoon Oulussa, Kuopiossa ja Kouvolassa – operaattorit ajavat omat verkkonsa alas - Digitoday - Ilta-Sanomat \(is.fi\)](#)
- [33] KKV 2015. KKV:n päätös varmistaa kuluttajien hyötymisen DNA:n ja Soneran verkkoyhteistyöstä.
[KKV:n päätös varmistaa kuluttajien hyötymisen DNA:n ja Soneran verkkoyhteistyöstä – Kilpailu- ja kuluttajavirasto](#)
- [34] DNA 2022. 2G, 3G, 4G, 5G – mitä väliä IOT:ssä?
[2G, 3G, 4G, 5G – mitä väliä IoT:ssä? \(dna.fi\)](#)
- [35] DSTNY. PSTN
[PSTN - Public Switched Telephone Network - Vad är det? - Dstny](#)
- [36] TKK 1999. Matkapuhelinten sukupolvet
[Matkapuhelinten sukupolvet - 1. sukupolvi \(tkk.fi\)](#)
- [37] Andrew.Z. GPRS (General Packet Radio Services)
[What is GPRS \(General Packet Radio Services\)? \(techtaraget.com\)](#)
- [38] Elisa. Historia vuosikymmenittäin
[Historia vuosikymmenittäin - Elisa](#)

[39] Ville. H. 2022. DNA. 5G verkko koostuu kolmesta osasta – tiedätkö mikä on tietoturvakannalta kriittisin?

[5G-verkko koostuu kolmesta osasta – tiedätkö, mikä on tietoturvan kannalta kriittisin? \(dna.fi\)](#)

[40] Pekka. K. Sonepar. Televerkkojen tukiasemien akkuratkaisut.

[Televerkkojen tukiasemien akkuratkaisut | Sonepar Suomi Oy | sähkö | tele | automaatio](#)