



FFI Forsvarets
forskningsinstitutt

26/007

FFI-RAPPORT

Forsvarets fremtidige militære mobildekning med 5G og 6G

Agnius Birutis
Anders Mykkeltveit
Martin Damrath
Vegard Arneson
Wilhelm Kristiansen

Forsvarets fremtidige militære mobildekning med 5G og 6G

Agnius Birutis
Anders Mykkeltveit
Martin Damrath
Vegard Arneson
Wilhelm Kristiansen

Emneord

5G

6G

Mobilkommunikasjon

Satellittkommunikasjon

FFI-rapport

26/007

Prosjektnummer

1659

Online ISSN

2704-2383

Engelsk tittel

The Norwegian Armed Forces' future military mobile coverage with 5G and 6G

Godkjenner

Joakim Flathagen, *forskningsleder*

Trude Hafsøe Bloebaum, *forskningssjef*

Dokumentet er elektronisk godkjent og har derfor ikke håndskreven signatur.

Opphavsrett

© Forsvarets forskningsinstitutt (FFI). Publikasjonen kan siteres fritt med kildehenvisning.

Sammendrag

Femte generasjons mobilteknologi (5G) blir en viktig del av Forsvarets informasjons- og kommunikasjonsteknologi (IKT) innen taktisk, kampnær kommunikasjon. Forsvaret planlegger å anskaffe moderne kommersielle 5G-løsninger som er tilpasset militær bruk. Slike løsninger for militær mobildekning vil kunne gi operativ effekt med en gang, men vil også legge til rette for ny funksjonalitet etter hvert som den blir tilgjengelig, inkludert det som kommer med sjette generasjons mobilteknologi (6G), som forventes å nå markedet i 2030.

I denne rapporten belyser vi utvalgte løsninger som kan levere militær mobildekning, og som vi tror at Forsvaret vil kunne anvende de kommende årene. Disse løsningene er basert på kommersiell mobilteknologi, men innebærer noen tilpasninger for å kunne dekke militære behov. Vi belyser også ny funksjonalitet som kan komme med videreutviklet 5G og etter hvert 6G, og som kan gjøre militær mobildekning enda mer moderne og robust. Utvalget er basert på vår kunnskap om teknologien, innsyn i markedet og praktisk erfaring med de tekniske løsningene.

Blant de utvalgte løsningene for militær mobildekning har vi beskrevet 5G-løsninger som Forsvaret allerede eksperimenterer med og vurderer å anskaffe, som 5G militær nettverks-skive, 5G militær dekningsforlengelse (MDF) og militært autonomt 5G-nett. Vi anbefaler at Forsvaret både tar i bruk og fortsetter å videreutvikle disse løsningene.

Vi beskriver også nye løsninger som er på vei til markedet, som mobilkommunikasjon fra satellitter eller direkte kommunikasjon mellom brukerenheter. Vi anbefaler at Forsvaret følger utviklingen av disse løsningene og etter hvert vurderer integrasjon med resten av løsningene for militær mobildekning.

Hvorvidt nye løsninger realiseres i praksis, er i stor grad betinget av den økonomiske lønnsomheten for de kommersielle aktørene som er involvert. Det at Forsvaret som kunde viser interesse for mobilteknologi, gjør militære bruksområder attraktive for det kommersielle markedet.

Summary

Fifth-generation mobile technology (5G) is becoming a key component of the Norwegian Armed Forces' information and communication technology (ICT) within tactical, close-combat communication. The Norwegian Armed Forces plan to acquire modern commercial 5G solutions that have been adapted for military use. Such military mobile coverage solutions can deliver immediate operational benefits while also enabling new functionalities, including those anticipated with sixth-generation mobile technology (6G), expected to enter the market by 2030.

In this report, we highlight selected solutions that can provide military mobile coverage and that we believe the Norwegian Armed Forces may be able to utilize in the coming years. These solutions are based on commercial mobile technology but require certain adaptations to meet military needs. We also highlight new functionalities that may emerge with further development of 5G and gradually 6G, which could make solutions for military mobile coverage even more up-to-date and robust. The selection is based on our knowledge of the technology, insight into the market, and practical experience with the technical solutions.

Among the selected solutions for military mobile coverage, we have described 5G solutions that the Norwegian Armed Forces are already experimenting with and are considering for acquisition, such as 5G military slice, 5G military coverage extension (MDF), and autonomous military 5G network. We recommend that the Norwegian Armed Forces both adopt and continue to further develop these solutions.

We also describe new solutions that are soon reaching the commercial market, such as mobile communication via satellites or direct communication between user devices. We recommend that the Norwegian Armed Forces follow the development of these solutions and eventually consider integrating them with the rest of the military mobile coverage solutions.

Whether new solutions are realized in practice largely depends on the economic viability for the commercial actors involved. The Norwegian Armed Forces showing interest in mobile technology as a customer, would make military use cases attractive to the commercial market.

Innhold

Sammendrag	3
Summary	4
1 Innledning	7
2 Mobilnett	9
2.1 Overordnet arkitektur	9
2.2 Fra idé til mobilnett	10
2.3 5G i dag og fremover	13
3 Løsninger for militær mobildekning	15
3.1 Militær mobildekning gjennom 5G militær nettverksskive	15
3.2 Militær mobildekning gjennom 5G militær dekningsforlengelse (MDF)	22
3.3 Militær mobildekning gjennom militært autonomt 5G-nett	27
3.4 Militær mobildekning fra satellitter (NTN)	29
3.5 Militær mobildekning basert på direkte kommunikasjon mellom brukerenheter (sidelink)	38
4 Utvalgt 5G-funksjonalitet for militær mobildekning	46
4.1 5G på millimeterbølge	46
4.2 RedCap	47
4.3 5G LAN og Ethernet-tjeneste	48
4.4 Støtte for edge computing	49
4.5 Posisjonering gjennom mobilteknologi	51
5 Utvalgt 6G-funksjonalitet for militær mobildekning	55
5.1 6G på terahertz-frekvenser	56
5.2 6G på centimeterbølge	56
5.3 Lengre rekkevidde i 6G	57
5.4 Integrated Sensing and Communication	58
6 Oppsummering	60
Vedlegg	
A Liste over releaser	62
B Basestasjon	63
C Access Point Name (APN)	65

D	Beregninger av overføringskapasitet for NTN	67
E	Test av NB-IoT over NTN	70
F	Mobilteknologi og satellittjenesten OneWeb	73
G	Beregninger av rekkevidde for sidelink	75
H	Beregninger av overføringskapasitet for sidelink	76
I	Test av posisjoneringstjeneste gjennom radiomålinger og database	78
	Forkortelser	80
	Referanser	83

1 Innledning

Forsvaret er avhengig av informasjons- og kommunikasjonsteknologi (IKT) for å kunne utføre sine oppgaver i fred, krise og krig. Forsvaret benytter en rekke ulike teknologier for å etablere kommunikasjon mellom brukerenheter, sensorer, effektorer og servere som kjører tjenester. Én av teknologiene som benyttes av Forsvaret er kommersiell mobilteknologi.

Kommersiell mobilteknologi benyttes blant annet som én av flere måter å knytte mobile og deployerte enheter inn mot resten av Forsvarets IKT gjennom Forsvarets kommunikasjonsinfrastruktur (FKI). I tillegg jobbes det med å ta i bruk femte generasjons mobilteknologi (5G) på flere måter i Forsvaret, blant annet gjennom program Mime [1] som vurderer å anskaffe taktiske løsninger for militær mobildekning.

Kommersiell mobilteknologi har mange egenskaper som gjør den attraktiv for Forsvaret, slik som at den er lett tilgjengelig, den er enkel å bruke og den har forholdsvis høy overføringskapasitet som kan leveres i bevegelse. Samtidig er det flere utfordringer med dagens mobilkommunikasjon som setter begrensninger på Forsvarets bruk av teknologien. Utfordringene gjelder blant annet å kunne tilby dekning overalt der Forsvaret opererer og at teknologien skal fungere i hele krisespekteret.

Kommersiell mobilteknologi utvikler seg stadig gjennom nye generasjoner som tilbyr ny funksjonalitet. I dag er fjerde generasjons mobilteknologi (4G) og en foreløpig versjon av 5G de viktigste i mobilnettene i Norge. I de kommende årene vil 5G utvikles videre før sjette generasjons mobilteknologi (6G) blir tilgjengelig. I rammen av disse generasjonene standardiseres det ulike typer teknisk funksjonalitet som resulterer i løsninger for ulike typer bruk. Flere av disse løsningene er relevante for Forsvaret, slik som private mobilnett, dekning levert fra satellitter og direktekommunikasjon mellom brukerenheter.

Samtidig blir ikke all funksjonalitet som blir standardisert, tilgjengelige løsninger for brukerne. For at funksjonalitet skal bli tilgjengelig, er det blant annet en forutsetning at den kan gjøres tilgjengelig til en kostnad mange nok brukere er villig til å betale for. Det er derfor nødvendig å vurdere hvilken funksjonalitet som mest sannsynlig vil bli tilgjengelige løsninger.

Problemstillingen i denne rapporten er hvilke tekniske muligheter kommersiell mobilteknologi kan gi Forsvaret i de kommende årene. Formålet er å belyse relevans og tekniske egenskaper til aktuelle løsninger som kan levere militær mobildekning, og dermed danne et faglig grunnlag for videre planlegging, prioritering og utvikling av bruk av mobilteknologi i forsvarssektoren.

Vi har valgt ut fem tekniske løsninger som kan tilpasses til å levere militær mobildekning der Forsvaret opererer. Vi har også valgt ut teknisk funksjonalitet fra både dagens 5G-teknologi og fremtidens 6G-teknologi, som kan forbedre disse løsningene for militær mobildekning. Utvalget er basert på informasjon som vi har samlet inn fra krav til og standarder for 5G, øvrig litteratur fra åpne kilder, resultater fra egne eksperimenter samt direkte i dialog med industri og Forsvaret, spesielt gjennom program Mime. Vi har også deltatt i to arbeidsgrupper i NATO Science and Technology Organization (STO) samt prosjektet 5G COMPAD som ble finansiert av European Defence Fund (EDF) [2]. Den innsamlede informasjonen har vi bearbeidet gjennom en iterativ prosess der vi har diskutert oss frem til hva som kan være aktuelle løsninger for Forsvaret.

Rapporten er primært skrevet for personell som jobber med å bruke, utvikle eller anskaffe IKT i forsvarssektoren, men som ikke har ekspertkompetanse på mobilteknologi. Vi har forsøkt å holde

beskrivelsene på et enkelt og overordnet teknisk nivå for at rapporten skal være tilgjengelig for et bredt publikum.

Rapporten omhandler taktisk bruk av kommersiell mobilteknologi under militære operasjoner i fred, krise og krig. Rapporten omtaler ikke vanlig tjenestetelefoni. Rapporten omtaler ikke taktikk eller hvordan Forsvaret burde bruke teknologien. Rapporten omtaler ikke alle utfordringer ved militær anvendelse av kommersiell mobilteknologi. En del sårbarheter ved bruk av kommersiell mobilteknologi er omtalt i [3–5].

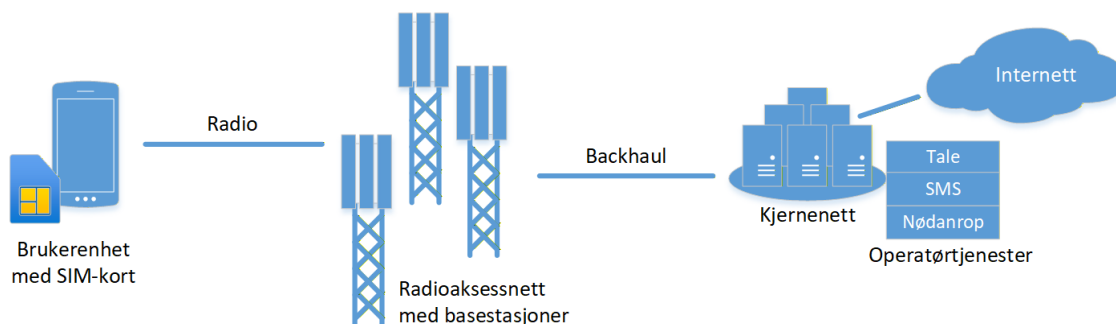
Kapittel 2 inneholder en overordnet beskrivelse av mobilnettenes arkitektur, utvikling og dagens status. Kapittel 3 beskriver fem løsninger som kan levere militær mobildekning til Forsvarets brukere. Kapittel 4 presenterer utvalgt 5G-funksjonalitet som vi mener er relevant for den militære mobildekningen. Kapittel 5 presenterer utvalgt 6G-funksjonalitet som, etter vår mening, kan nå markedet og være aktuell å innføre i løsningene for militær mobildekning. Kapittel 6 oppsummerer rapporten.

2 Mobilnett

I dette kapittelet gis en oversikt over hvordan kommersiell mobilteknologi er bygd opp og hvordan den utvikles. Den overordnede arkitekturen for mobilnett presenteres i kapittel 2.1. Deretter diskuteres hvordan funksjonalitet blir kravstilt, standardisert og til slutt hvordan den blir tilgjengelig for brukerne i kapittel 2.2. Til slutt diskuteres status for 5G i dag og utviklingen fremover i kapittel 2.3.

2.1 Overordnet arkitektur

Den overordnede arkitekturen for et mobilnett har ikke endret seg siden tidlig på 1990-tallet da annen generasjons mobilteknologi (2G) ble lansert. Arkitekturen forventes også å gjelde for fremtidige generasjoner mobilteknologi, slik som 6G. Mobilnettet består i stort av et kjernenett, et radioaksessnett med basestasjoner og brukerenheter med SIM-kort. Kjernenettet kan ses på som hjernen til mobilnettet som både autentiserer brukere, holder oversikt over hvor brukerne er, styrer radioaksessnettet og administrerer tilgang til mobiltjenester. Basestasjonene gir mobildekning i et geografisk område, hvor brukere kan bevege seg fritt mens brukerenhetene deres alltid har en trådløs (radio)forbindelse til en basestasjon¹. Brukerenheten må ha et SIM-kort som benyttes til å identifisere og autentisere brukeren for tilgang til et mobilnett. Alle basestasjoner har en forbindelse til kjernenettet kalt *backhaul*. Mobiltjenestene som tilbys gjennom mobilnettet, er enten tilgang til et eksternt nett, slik som Internett, eller tjenester som leveres av mobiloperatøren, kalt operatørtjenester. Operatørtjenestene inkluderer vanligvis telefonsamtaler, tekstmeldinger (SMS) og nødberedning. Den overordnede arkitekturen for et mobilnett er vist i figur 2.1.



Figur 2.1 Overordnet arkitektur for et mobilnett.

Selv om arkitekturen åpner for ulike størrelser og anvendelser av mobilnett, har mobilnettene tradisjonelt vært landsdekkende nett med basestasjoner på bakken som er eid av mobiloperatører som selger abonnementbaserte mobiltjenester til sine kunder. Siden alle kan kjøpe abonnement kalles denne typen mobilnett for *Public Land Mobile Network* (PLMN). I et PLMN, eller med andre ord et landsdekkende mobilnett, leveres backhaul av et transportnett som i de senere generasjonene mobilteknologi for det meste består av fiber, mens radiolinjer brukes for å nå basestasjoner hvor det er dyrt og/eller vanskelig å føre frem fiber. Kjernenettet og mobiltjenestene er etablert på flere

¹Vedlegg B beskriver komponenter i en basestasjon.

ulike geografiske lokasjoner slik at utfall av kjernenettet på en lokasjon ikke får konsekvenser for brukerne.

Arkitekturen til mobilnettene har en del implikasjoner det er viktig å være klar over:

- Siden kjernenettet styrer radioaksessnettet, vil mobiltjenestene bare fungere så lenge det finnes en forbindelse mellom basestasjonen (som en bruker er koblet til) og kjernenettet. Et utfall i transportnettet (backhaul) mellom en basestasjon og kjernenettet, eller en feil i kjernenettet vil dermed føre til bortfall av mobildekningen og at mobiltjenestene ikke fungerer. Forenklet kan vi si at et landsdekkende mobilnett ikke gir lokal autonomi siden mobiltjenestene vil slutte å fungere i et lokalt område som mister forbindelsen til sentrale lokasjoner som har kjernenett.
- Operatørtjenestene (altså tale, SMS og nødanrop) leveres fra servere i mobiloperatørens egen infrastruktur. Øvrige tjenester brukerne benytter befinner seg i eksterne nett, ofte satt opp som skytjenester på Internett eller i et datasenter som nås gjennom et privat nett.
- Overføring av data mellom to brukerenheter uten å gå via et eksternt nett støttes bare i spesielle tilfeller. I disse spesielle tilfellene overføres brukerdata alltid via kjernenettet, selv om de to brukerne skulle være koblet til samme basestasjon.
- Gjesting, ofte kalt *roaming*, er bruk av mobilkommunikasjon gjennom en annen mobiloperatør enn den man har abonnement hos, det vil si hjemmenettet. Gjesting brukes i all hovedsak i utlandet. Brukeren er da tilkoblet et gjestenett som samarbeider med hjemmenettet. Gjesting forutsetter at både kjernenettet i gjestenett, kjernenettet i hjemmenettet og transportnettet mellom disse nettene disse fungerer.
- Nasjonal gjesting vil si at man er i hjemlandet sitt og bruker et annet mobilnett enn det mobilnettet abonnementet hører til. Nasjonal gjesting er for de aller fleste brukere ikke tilgjengelig. Dette betyr at brukeren i hjemlandet til enhver tid er avhengig av å ha dekning fra sin egen mobiloperatør.
- Ett og samme mobilnett støtter normalt flere generasjoner mobilteknologi samtidig. Hver generasjon har sine egne radioaksessnett og flere har også eget kjernenett. Det er spesifisert hvordan teknologiene fungerer sammen slik at en bruker for eksempel kan bytte mellom 4G og 2G under et taleanrop.

2.2 Fra idé til mobilnett

Som vi nevnte i innledningen, er det ikke slik at all teknisk funksjonalitet som blir standardisert, blir tilgjengelige løsninger. Dette delkapittelet handler om hvordan funksjonalitet blir foreslått, standardisert og hva som skal til for at funksjonaliteten skal bli tilgjengelig for brukerne.

Formelt er det Den internasjonale teleunionens radioseksjon (ITU-R) som definerer krav til ulike versjoner av mobilteknologier, benevnt som *International Mobile Telephony* (IMT). ITU-R har siden 1990-tallet gitt ut ulike versjoner av IMT med omtrent ti års mellomrom. Kravene beskrevet i IMT kan oppfylles av ulike teknologier, og innen kommersiell mobilteknologi er det spesifikasjonene fra 3GPP som blir brukt. 3GPP er en global organisasjon som består av standardiseringsorganisasjoner for telekommunikasjon fra fem verdensdeler [6]. Disse standardiseringsorganisasjonene består av blant annet produsenter av nettverksutstyr og brukerutstyr samt mobiloperatører. For hver utgave av

IMT har 3GPP laget tekniske spesifikasjoner som oppfyller kravene [7], som de har kalt 3G, 4G og så videre. Tabell 2.1 viser sammenhengen mellom utgavene av IMT, generasjonene fra 3GPP, kommersielt lanseringsår, samt hva slags teknologiske videreutviklinger av generasjonene som 3GPP standardiserte innenfor samme generasjon mobilteknologi. For eksempel ble 3G videreutviklet med HSPA (High-Speed Packet Access) som ga høyere overføringskapasitet. Merk at 2G ble laget før 3GPP ble stiftet og før ITU startet å gi ut IMT.

IMT-versjon	3GPP-generasjon	Lanseringsår	Videreutvikling
IMT-2000 [8]	3G	2004	HSPA
IMT-Advanced [9]	4G (LTE)	2009	LTE-Advanced (4G+), LTE-Advanced Pro
IMT-2020 [10]	5G	2019	5G Advanced (5G-A)
IMT-2030 [11]	6G	forventes ca. 2030	

Tabell 2.1 Utvikling av mobilteknologien fra 3G til 6G.

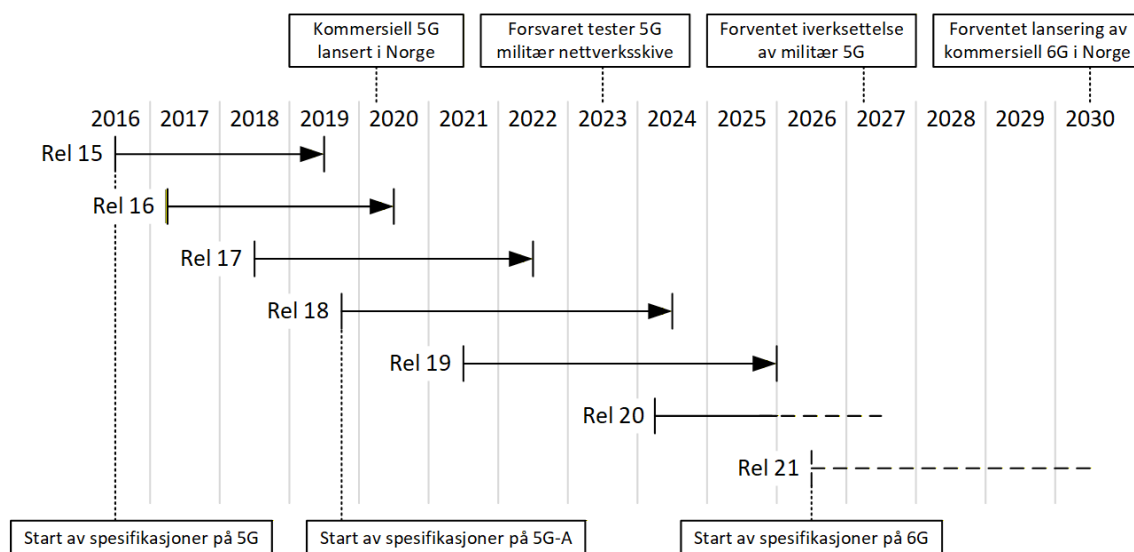
3GPP gir ut spesifikasjoner langt oftere enn det kommer en ny generasjon mobilteknologi. Disse spesifikasjonene deles inn i utgaver som kalles *Release* som ofte kommer med 1,5 til 2 års mellomrom. 3GPP arbeider med en release i omtrent tre år, i en prosess som har tre steg:

1. spesifisere krav for tjenester som skal leveres til brukeren
2. spesifisere teknisk arkitektur som oppfyller de definerte kravene
3. spesifisere implementasjon av arkitekturen ved å definere protokoller i detalj

Når en release er utgitt, så låses den for endringer. 3GPP jobber med flere releaser parallelt, så releasene overlapper med hverandre i tid. Releasene har fortløpende nummerering, og Release 15 som ble utgitt i 2016, var den første som spesifiserte 5G. Merk at en generasjon spenner over flere releaser, og tidligere generasjoner kan videreutvikles selv om en ny generasjon har kommet. Da 3GPP spesifiserte 5G, sluttet de ikke å utvikle 4G. 4G ble først definert i Release 8 som startet i 2006, og forbedres fremdeles i Release 19 i 2025. På samme måte kommer 5G til å bli videreutviklet i mange år framover. Release 18 definerte noen ny 5G-funksjonalitet som gjorde at fra denne releasen defineres 5G som *5G Advanced* (5G-A).

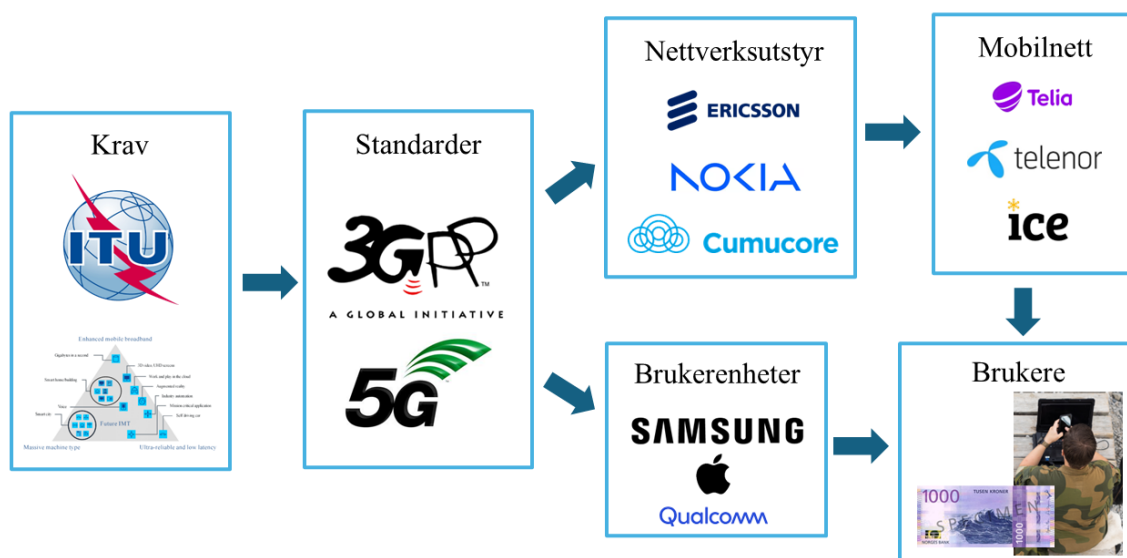
Det tar tid fra de tekniske spesifikasjonene er utgitt til funksjonalitet er tilgjengelig i markedet. Det tok for eksempel omtrent fire år fra arbeidet med å spesifisere 5G i Release 15 startet til 5G ble kommersielt lansert i Norge. I Release 21 som starter i 2026, kommer 3GPP til å definere de første tekniske spesifikasjonene for 6G. Dermed kan vi forvente at 6G lansering i Norge kommer til å skje omtrent fire år senere – rundt 2030. Figur 2.2 oppsummerer tidslinjen for releasene og når funksjonaliteten forventes å bli tilgjengelig for markedet. Vedlegg A inneholder en fullstendig liste over alle releaser siden 1998.

Siden teknologien er kommersiell, er det helt nødvendig at det er lønnsomt for de involverte aktørene i industrien å lage produkter som realiserer funksjonaliteten. Innen kommersiell mobilteknologi vil noen selskaper være produsenter av nettverksutstyr til kjernenett og radioaksessnett. Dette utstyret selges hovedsakelig til mobiloperatører som bruker utstyret i sine landsdekkende mobilnett. Mobiloperatørene får sine inntekter fra brukerne som tegner abonnement. Noen selskaper produserer brukerenheter som ender opp hos brukerne av mobilnettene. Vi kan se at de ulike aktørene som er



Figur 2.2 Tidslinjen for releaser i 3GPP. Laget basert på [12–15].

involvert i utviklingen av mobilteknologi utgjør en verdikjede. Forutsetningen for at funksjonalitet fra en standard skal komme på markedet er forenklet sett at det finnes mange nok brukere som er villige til å betale nok for løsningen til at både mobiloperatører og utstysprodusenter kan forvente å få overskudd ved å levere denne løsningen. Mobiloperatørene må se forventede inntekter fra abonnentene sine opp mot utgifter til utbygging, drift og vedlikehold, mens utstysprodusentene må se inntektene fra salg av nettverksutstyr opp mot utviklingskostnader og produksjonskostnader. Figur 2.3 viser en forenklet verdikjede for faktorer som påvirker utviklingen av mobilteknologien. Figuren er ikke komplett, for eksempel kan myndigheter finansiere utbygging av mobilnett der det ikke er kommersielt lønnsomt, eller myndighetene kan ha egne mobilnett.



Figur 2.3 Forenklet verdikjede for utviklingen av kommersiell mobilteknologi.

Forsvaret er en av mange brukere av mobilteknologi og Forsvarets bruk av kommersiell mobilteknologi er en relativt liten andel av den totale massen av brukere. Om det finnes behov for tilpasning av teknologien for militære anvendelser, er det ikke sikkert at militære anvendelser representerer et stort nok volum til at det er lønnsomt å realisere en slik tilpasning. Dette innebærer at Forsvaret må forventes å basere sin bruk av kommersiell mobilteknologi på tekniske løsninger som kommer på markedet uavhengig av Forsvarets behov, eller der markedet er styrt av flere brukere enn bare forsvar.

2.3 5G i dag og fremover

Det var relativt stor entusiasme for 5G da teknologien ble lansert i 2019. Visjonene ITU-R hadde for IMT-2020, altså 5G, var store. 5G skulle levere [16]

- *Enhanced Mobile Broadband* som innebærer høye overføringskapasiteter og sømløs dekning for å støtte multimedia-innhold, tjenester og data for mennesker
- *Massive Machine type Communications* som innebærer at et veldig høyt antall brukerenheter, som bruker lite strøm og overfører små mengder data, skal kunne være koblet til nettet i et gitt område
- *Ultra-Reliable and Low Latency Communications* som innebærer støtte for tjenester med høye krav til tidsforsinkelse og pålitelighet, slik som roboter i fabrikker, kontroll over strømmnett og transportsikkerhet

Da 5G kom, ble teknologien markedsført som noe revolusjonerende. Den høye overføringskapasiteten skulle gjøre det mulig å laste ned flere sesonger av en TV-serie på noen få sekunder. Selvkjørende biler skulle kommunisere med hverandre og omverden gjennom lynrask 5G-mobilkommunikasjon. En lege skulle kunne operere en pasient fra hvor som helst i verden ved å fjernstyre robotarmer via 5G. [16]

I dag, noen år etter lanseringen, leverer 5G gigabit-hastighet enkelte steder i Norge under visse omstendigheter, men selvkjørende biler og fjernkirurgi gjennom 5G har foreløpig ikke blitt realisert. En gjennomsnittlig bruker merket ikke så stor forskjell i mobiltjenesten da 5G-ikonet dukket opp i øverste høyre hjørne på smarttelefonen, men la kanskje mer merke til at batteritiden til smarttelefonen gikk ned med 5G skrudd på. Faktisk er mange brukere fornøyde med det dagens 4G klarer å levere. [17, 18]

Mobiloperatørene var ikke helt fornøyde med 5G heller, siden det var dyrt å investere i 5G-infrastruktur, samtidig som fortjenesten per bruker gikk ned. Innføring av 5G gjorde det dessuten nødvendig med flere basestasjoner, noe som førte til høyere strømkregninger [19].

Grunnen til at 5G ga et skuffende inntrykk, var alt for store forventninger til det 5G skulle levere, samt en forestilling om at all funksjonalitet skulle leveres fra starten. Som beskrevet i kapittel 2.2, utvikles mobilteknologi i iterasjoner. Mobilteknologi forbedres kontinuerlig, og etter et visst antall iterasjoner, blir det et skift i benevnning av mobilgenerasjon. Det kan innføres relativt store endringer i den tekniske arkitekturen til enkelte komponenter i mobilnettet, men dette fører ikke nødvendigvis til en revolusjonerende effekt med det første. Det at den nye tekniske løsningen er designet til å være

skalerbar og er tiltenkt å dekke alle mulige bruksområder, betyr ikke at alt kommer i markedet med en gang eller i det hele tatt. Det tar også relativt lang tid å implementere nye funksjoner i mobilnettet. Nye løsninger og produkter må først produseres, og så kan produsentene og mobiloperatørene begynne å gradvis rulle nye 5G-funksjoner og tjenester ut til sluttbrukere.

Norske mobiloperatører lanserte 5G i en foreløpig versjon i 2020. De oppgraderte da radioaksessnettet til 5G med nye antenner, men det var fortsatt det gamle 4G-kjernenettet som ble brukt. Denne foreløpige versjonen av 5G kalles for 5G *Non-Stand Alone* (NSA) og gir muligheten til smidig overgang fra 4G til 5G. Den endelige versjonen av 5G vil være uavhengig av 4G og kalles derfor 5G *Stand Alone* (SA) eller frittstående 5G. Med 5G SA er både radioaksessnettet og kjernenettet oppgradert til 5G, men per januar 2026 er 5G SA ikke tilgjengelig for vanlige mobilkunder. Det er heller ikke slik at kundene kommer til å merke en stor forskjell når 5G SA blir tilgjengelig. Med kombinasjonen av 4G og 5G NSA leverer mobilnettene allerede høy overføringskapasitet med god dekning, som kanskje er det viktigste for brukere med smarttelefon.

De største forskjellene mellom 4G og 5G SA gjelder egenskapene relatert til sikkerhet og garantert tilgjengelighet, noe som gjør 5G SA relevant for flere industriaktører. Bedrifter som driver med jordbruk, gruver, fabrikker eller logistikk, samt nødetater og Forsvaret, er interessert i sikre 5G-løsninger som er basert på en standardisert kommersiell teknologi. Mobiloperatørene er naturligvis også interessert i å levere disse sikre 5G-løsningene til industrien, noe som åpner for nye markeder og kan øke deres fortjeneste per kunde. Både industriaktører og Forsvaret er i gang med å teste 5G SA-baserte løsninger [12, 20, 21], men per i dag er ikke 5G SA kommersielt lansert i Norge.

3 Løsninger for militær mobildekning

Dette kapittelet beskriver fem løsninger som kan levere militær mobildekning til Forsvaret. De ulike løsningene bygger på funksjonalitet som er standardisert av 3GPP for frittstående 5G (5G SA) samt aktuelle tilpasninger for militær bruk. For hver løsning beskriver vi kort hva de består av, hvorfor vi mener løsningen er relevant for Forsvaret og til slutt beskriver vi tekniske aspekter ved løsningen.

I kapittel 3.1 presenterer vi militær mobildekning gjennom 5G militær nettverksskive, som er en måte å benytte et landsdekkende mobilnett på. I kapittel 3.2 presenterer vi militær mobildekning gjennom 5G militær dekningsforlengelse (MDF), som er en flyttbar 5G basestasjon som Forsvaret kan benytte til å lage egen dekning som har samme egenskaper som nettverksskiven. I kapittel 3.3 presenterer vi militær mobildekning gjennom militært autonomt 5G nett, som er et eget nett Forsvaret kan etablere for å skape dekning i et område uavhengig av nettverksskive eller annen infrastruktur. I kapittel 3.4 presenterer vi militær mobildekning fra satellitter. I kapittel 3.5 presenterer vi militær mobildekning som er basert på direkte kommunikasjon mellom brukerenheter.

3.1 Militær mobildekning gjennom 5G militær nettverksskive

5G militær nettverksskive er en løsning som gir mobildekning gjennom et landsdekkende mobilnett tilpasset Forsvarets behov. Løsningen bygger på teknologien skivedeling, eller *slicing*, som gjør det mulig å tilpasse en del funksjonalitet i mobilnettet slik som prioritet og sikkerhet. En militær nettverksskive er basert på prinsippene for skivedeling som 3GPP har spesifisert og tilpasset Forsvarets behov.

Det er også mulig å ha flere 5G militære nettverksskiver hos flere ulike mobiloperatører. Ved å ta i bruk flere nettverksskiver hos én mobiloperatør er det mulig å tilpasse nettverksskivene til forskjellige brukerbehov i Forsvaret. Flere mobiloperatører som tilbyr hver sine 5G militære nettverksskiver, skaper redundans og gir bedre mobildekning til sluttbrukeren.

3.1.1 Relevans

Forsvaret er i dag kunde av de norske mobiloperatørenes landsdekkende mobilnett gjennom rammeavtaler for mobiltelefoni. Disse avtalene gjelder i hovedsak 4G og den hybride versjonen av 5G som operatørene tilbyr i dag, som kalles 5G NSA.

Både ulike bedrifter og Forsvaret kan i dag benytte seg av en sikret tilgang til egen IKT-infrastruktur, for eksempel et privat datasenter. Et slikt oppsett kalles Access Point Name (APN) og tilbys i både 4G og i 5G NSA. APN vil bli videreført i en 5G militær nettverksskive. APN er beskrevet i vedlegg C.

Med 5G SA kan norske landsdekkende mobilnett brukes til å implementere en 5G militær nettverksskive, slik at Forsvaret kan få sikker tilgang til landsdekkende 5G-mobildekning som igjen gir tilgang til egne militære tjenester som er koblet til for eksempel Forsvarets kommunikasjonsinfrastruktur (FKI).

En 5G militær nettverksskive gir Forsvaret mulighet til å legge til ytterligere sikkerhet ut over det som er innebygget i 5G SA. Generelt har sikkerheten i mobilnettene blitt forbedret med hver generasjon mobilteknologi. For eksempel var krypteringen i 2G svak [22], mens den har blitt forbedret i senere generasjoner. Et annet eksempel er beskyttelse av brukerens identitet. Denne lagres i SIM-kortet i form av et såkalt *International Mobile Subscriber Identity* (IMSI) og har i tidligere generasjoner mobilteknologi (2G, 3G og 4G) blitt sendt ukryptert over radiogrensesnittet [23]. Dette kan gi en angriper mulighet for å kunne spore hvilke brukere som befinner seg i et område. I 5G SA kan denne identiteten være kryptert og en militær 5G nettverksskive kan konfigureres slik at kryptering alltid finner sted. Det er derfor viktig at Forsvarets brukere benytter 5G SA fremfor tidligere generasjoner mobilteknologi med lavere grad av sikkerhet. For å få til dette er det nødvendig å legge inn konfigurasjon i brukerenheten som låser den til 5G SA. Dette vil også gi beskyttelse fra falske SMS-er og anrop gjennom falske 2G-basestasjoner [24].

Et annet viktig aspekt med sikkerheten i 5G militær nettverksskive vil være å fjerne funksjonalitet som ikke er nødvendig for Forsvaret. Et eksempel kan være å kun tillate at brukerenhetene kobles til et privat nettverk, og ikke til Internett. Dette vil redusere antall angrepsflater. En annen funksjon som har innvirkning på sikkerheten er gjesting som medfører tilkobling mot utenlandske mobilnett. Det er mulig å konfigurere en nettverksskive slik at den ikke har noen slik tilkobling i det hele tatt, eller så kan nettverksskiven kun være sammenkoblet med utvalgte utenlandske operatører dersom disse også får en tilsvarende nettverksskive. Dette innebærer at 5G militær nettverksskive fra begynnelsen av ikke vil fungere i nettene til utenlandske operatører.

For å sikre Forsvarets tilgang til mobilnettet, kan en 5G militær nettverksskive konfigureres til å garantere at brukere av 5G militær nettverksskive har prioritet over andre brukere i mobilnettet. Høyere prioritet er mest aktuelt på radiogrensesnittet og i tilfeller hvor mange brukere er koblet til samme basestasjon slik at basestasjonen ikke har nok radioressurser til alle brukerne. Trolig kommer prioritet bare til å være aktivert i utvalgte geografiske områder og bare under øvelser, krise eller krig siden kapasiteten i mobilnettene som regel er god i fredstid.

En viktig egenskap ved 5G militær nettverksskive er at den kan brukes som basis for å innføre nye tekniske løsninger som for eksempel dekning fra satellitter (som blir omtalt i kapittel 3.4) eller annen teknisk funksjonalitet (som blir omtalt i kapittel 4 og 5), noe som kan bidra til enda bedre militær kommunikasjon i framtiden.

Forsvarssektoren ved program Mime planlegger å anskaffe 5G militær nettverksskive som en tjeneste fra norske mobiloperatører. Siden det høyst trolig vil være et tjenestekjøp, er det mobiloperatørene som kommer til å drifte nettverksskivene. Tjenesten er ment å kunne benyttes i hele krisespekteret (fred, krise og krig).

3.1.2 Teknisk beskrivelse

Dette kapittelet beskriver tekniske aspekter ved 5G militær nettverksskive.

3.1.2.1 Arkitektur

Skivedeling eller *slicing* er en ny teknologi som først ble definert for 5G i Release 15 for både brukerenheter, radionett og kjernenett. Nettverksskiver er derfor bare tilgjengelig på 5G SA og

antakeligvis senere generasjoner mobilteknologi som 6G, men er ikke tilgjengelig med tidligere generasjoner mobilteknologi, slik som 4G.

Skivedeling gjør det mulig å etablere mange logiske nettverk i det samme fysiske mobilnettet. En 5G-nettverksskive er et slikt logisk nettverk som er tilpasset behovene til én type brukere eller én enkelt bruker, slik som en bedrift. Tilpasninger kan gjelde ulike ting som overføringskapasitet, dekningsområde, forsinkelse, prioritet, tjenestetilgjengelighet og sikkerhet [23].

3GPP har definert flere typer nettverksskiver. Tre av disse er like de typene tjenester 5G skulle levere i følge visjonen fra ITU-R som vi beskrev i kapittel 2.3. Én type nettverksskive er tilpasset høy overføringskapasitet, en annen er tilpasset tingenes internett (IoT) og en tredje er tilpasset industriprosesser [25]. Den første av disse typene nettverksskiver tilsvarer «vanlige» mobiltjenester som benyttes på smarttelefoner og PC-er. En første versjon av en 5G militær nettverksskive for Forsvaret vil basere seg på denne typen og vi holder oss til denne typen 5G militær nettverksskive i denne rapporten. Dette gjør at en første 5G militær nettverksskive i utgangspunktet vil ligne på mobiltelefoni som vi er vant med fra 4G og 5G NSA.

Det er i utgangspunktet mulig å tildele egne ressurser til en nettverksskive i alle deler av mobilnettet, det vil si i radioaksessnettet, i transportnettet som leverer backhaul og i kjernenettet.

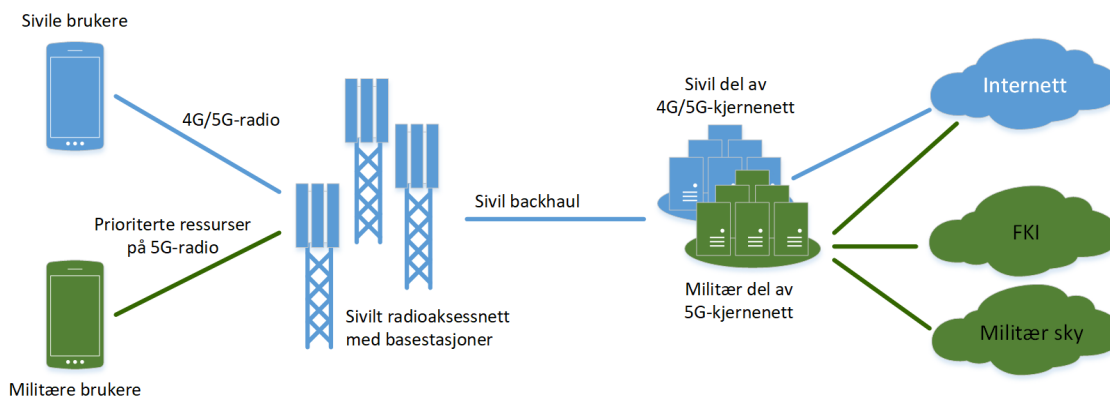
I radioaksessnettet vil en 5G militær nettverksskive trolig dele infrastrukturen med andre (sivile) brukere da det vil bli uforholdsmessig kostbart å tilegne egne antenner for en nettverksskive. Imidlertid kan man tilpasse behandlingen av en nettverksskive basert på hvordan radioressurser fordeles og prioriteres mellom brukere. Det vil si at 5G skivedeling kan sørge for at Forsvarets trafikk blir prioritert over øvrige brukere dersom en basestasjon på radioaksessnettet skulle bli overbelastet.

I alle mobilnett kringkaster basestasjonene en identifikator som heter PLMN-kode. Koden identifiserer hvilken mobiloperatør basestasjonen tilhører. En 5G militær nettverksskive vil benytte samme PLMN-kode som mobiloperatørens øvrige brukere. Når en brukerenhet som tilhører en 5G militær nettverksskive kobler seg til en basestasjon, vil den utveksle informasjon om hvilken nettverksskive den tilhører. Denne informasjonen kan krypteres slik at det ikke er mulig å fange opp hvilken nettverksskive en brukerenhet kobler seg til via avlytting av radiogrensesnittet.

Transportnettet som leverer backhaul mellom basestasjonene i radioaksessnettet og kjernenettet kan støtte skivedeling ved å etablere egne virtuelle transportnettverk for en nettverksskive eller ved å prioritere trafikk ut fra hvilken nettverksskive den tilhører. Vi er ikke kjent med at virtuelle transportnett benyttes i forbindelse med skivedeling per i dag.

I kjernenettet er det mange ulike prosesser, kalt nettverksfunksjoner, som er involvert i å levere en tjeneste. Kjernenettet i 5G bygger på virtualisering, som innebærer at nettverksfunksjonene består av programvare og ikke av egen dedikert maskinvare, som i tidligere generasjoner mobilteknologi. Virtualisering gjør det enklere og rimeligere enn tidligere å etablere egne dedikerte nettverksfunksjoner for en nettverksskive. Egne nettverksfunksjoner til en nettverksskive kan benyttes både til å sikre at mobilnettet møter behovene til brukerne og til å sikre en form for isolasjon mellom ulike brukere. Når vi skriver denne rapporten er det ikke kjent i hvor stor grad det er ønskelig å ha dedikerte nettverksfunksjoner til Forsvaret i en 5G militær nettverksskive, da både kost og nytte må vurderes ved en anskaffelse.

Figur 3.1 viser en overordnet arkitektur for et mobilnett med en 5G militær nettverksskive. Her indikerer fargen grønt at det er utstyr som benyttes eksklusivt av Forsvaret.



Figur 3.1 Overordnet arkitektur av en 5G militær nettverksskive.

3.1.2.2 Frekvensbånd

3GPP definerer frekvensbånd som kan brukes til mobilkommunikasjon mellom basestasjoner og brukerenheter. Frekvensbåndene som gjelder 5G er spesifisert i [26]. Frekvensbåndene fordeles mellom to såkalte frekvensområder – frekvensområde 1 (*Frequency Range 1*, FR1), som går fra 410 MHz til 7125 MHz, og frekvensområde 2 (*Frequency Range 2*, FR2), som går fra 24,25 GHz til 71 GHz.

I Norge er det Nasjonal kommunikasjonsmyndighet (NKOM) som bestemmer hvilke deler av frekvensspektrumet som blir tildelt og solgt til norske mobiloperatører. Fullstendig oversikt over dagens eierskap av frekvensbånd som brukes til mobilkommunikasjon i Norge, finnes på [27].

Siden den stasjonære delen av 5G militær nettverksskive bruker kommersielle basestasjoner, er frekvensbånd også kommersielle og eid av mobiloperatørene. De fleste kommersielle frekvensbånd brukes fortsatt til 4G. Det er tre frekvensbånd som brukes til kommersiell 5G-dekning på NSA i Norge. Disse ligger på 700 MHz, 2100 MHz og 3600 MHz og disse kan samtidig brukes på SA for å gi dekning på 5G militær nettverksskive. Tabell 3.1 oppsummerer alle frekvensbånd som brukes til kommersiell mobilkommunikasjon på 2G, 4G og 5G i Norge. Tabellen inneholder også båndbredde, men merk at denne varierer avhengig av mobiloperatør.

I prinsippet kan alle frekvensbånd som i dag benyttes på 2G og 4G benyttes til 5G og eventuelt 6G i framtiden, og det er opp til mobiloperatørene å bestemme hva som er mest kostnadseffektiv bruk av frekvensspektrumet som de eier. Det kommer fortsatt til å være hensiktsmessig å bruke noen av båndene til 4G i mange år framover. Det er en stor jobb for mobiloperatørene å bytte fra 2G eller 4G til 5G, siden de fysisk må bytte ut og oppgradere alle basestasjoner i et bestemt frekvensbånd.

Det er stadig nye frekvensbånd som vurderes for tildeling til mobilkommunikasjon. NKOM ønsker å tildele 90 MHz av båndbredden i 1500 MHz-frekvensområdet. Dette frekvensbåndet kan brukes til 4G eller 5G. NKOM kommer også til å tildele frekvensspektrum i 26 GHz-frekvensområdet som i 5G-markedet er også kjent som millimeterbølge. Det er totalt 2400 MHz båndbredde som kommer til å bli fordelt mellom mobiloperatørene i 26 GHz-båndet [29]. Dette frekvensbåndet (n258) kan brukes til 5G og eventuelt også til 6G. Kapittel 4.1 omtaler bruk av millimeterbølge for 5G-mobilkommunikasjon.

Frekvensbånd	Båndbredde	Dagens bruk	3GPP-benevning
450 MHz	10 MHz	4G	Band 31
700 MHz	20 MHz	4G/5G	Band 28/n28
800 MHz	20 MHz	4G	Band 20
900 MHz	10/20 MHz	2G/4G	GSM-900/Band 8
1800 MHz	40/50/60 MHz	4G	Band 3
2100 MHz	40 MHz	4G/5G	Band 1/n1
2600 MHz	50/60/80 MHz	4G	Band 7
3600 MHz	100/120/180 MHz	5G	Band n78

Tabell 3.1 Frekvensbånd og båndbredde på dagens kommersielle mobilkommunikasjon i Norge. 5G-frekvensbånd kan brukes på 5G militær nettverksskive. Basert på [26–28].

3.1.2.3 Brukerenheter

En 5G-brukerenhet må inneholde et SIM-kort (fysisk eller eSIM), en 5G-modul med antenner som sender og mottar 5G-radiosignaler, og en prosesseringsenhet som kobler alt sammen og leverer standard datatjeneste videre til brukerens applikasjoner. En smarttelefon, nettbrett, eller bærbar PC som har alle disse komponentene innebygd og bruker 5G for datatjenester, kan anses som en 5G-brukerenhet. En nettverksruter som har 5G innebygd, er også en 5G-brukerenhet. I tillegg til en 5G-modul har en slik 5G-nettverksruter ofte flere konfigurerbare nettverksporter og støtte for Wi-Fi. En enhet som støtter 5G (inneholder SIM, 5G-modul og prosesseringsenhet) og leverer standard datatjeneste til sluttbrukeren gjennom en nettverkskabel uten noen særlig ytterligere rutingsfunksjonalitet, definerer vi som et 5G-modem.

Videre i rapporten bruker vi hovedsakelig begrepene smarttelefon og 5G-modem når vi beskriver to forskjellige typer 5G-brukerenheter. Det som gjelder for smarttelefon, gjelder også for nettbrett, bærbar PC, smartklokke eller annen lignende type bærbar 5G-brukerenhet med innebygd 5G uten eksterne antenner. Det som gjelder for 5G-modem, gjelder også for 5G-ruter, IoT-enhet eller annen lignende type monterbar 5G-brukerenhet med innebygd 5G ofte med mulighet for eksterne antenner.

5G-brukerenheter har lav sendeeffekt (typisk under én watt) sammenlignet med sendeeffekten på basestasjoner som kan sende med flere hundre watt. Den lave sendeeffekten i opplink (fra brukerenhet til basestasjon) er ofte grunnen til at både rekkevidde og overføringskapasitet er begrenset i 5G [30]. 3GPP spesifiserer maksimal utgangseffekt som brukerenheter får lov til å sende med. Utgangseffekten er effekten levert til antenneporten(e), eller med andre ord utgangen(e), der signalet sendes ut på luft. Utgangseffekten tilsvarer et mål for utsendt effekt, som heter *Total Radiated Power* (TRP). Det er ulike grenseverdier for utgangseffekt som gjelder smarttelefon og 5G-modem. Tabell 3.2 oppgir den spesifiserte maksimale utgangseffekten på alle relevante frekvensbånd. I praksis kan utgangseffekten være lavere enn det som er maksimalt lovlig, siden det er produsentene til brukerenheter som bestemmer hvor høy utgangseffekt det er hensiktsmessig å implementere med tanke på blant annet strømforbruk.

Frekvensbånd (3GPP-benevning)	Frekvensbånd (beskrivende benevning)	Maks utgangseffekt smarttelefon	Maks utgangseffekt 5G-modem
n31	450 MHz	23 dBm (0,2 W)	31 dBm (1,26 W)
n28	700 MHz	26 dBm (0,4 W)	26 dBm (0,4 W)
n20	800 MHz	23 dBm (0,2 W)	23 dBm (0,2 W)
n8	900 MHz	26 dBm (0,4 W)	26 dBm (0,4 W)
n3	1800 MHz	26 dBm (0,4 W)	26 dBm (0,4 W)
n1	2100 MHz	26 dBm (0,4 W)	26 dBm (0,4 W)
n7	2600 MHz	26 dBm (0,4 W)	31 dBm (1,26 W)
n78	3600 MHz	29 dBm (0,8 W)	31 dBm (1,26 W)
n258	26 GHz	23 dBm (0,2 W)	35 dBm (3,16 W)

Tabell 3.2 Maksimal utgangseffekt som 5G-brukerenheter får lov til å sende med i følge 3GPP-standarden [26, 31]. Frekvensbåndene som er oppgitt i tabellen, er aktuelle for 5G militær nettverksskive.

I tillegg til at et 5G-modem vanligvis har lov til å sende med mer effekt enn smarttelefon, kan modemene også brukes med eksterne, direktive antenner som gir antennegevinst i en bestemt retning. Direktive antenner kan dermed øke både rekkevidden og overføringskapasiteten, men mobilitet kan bli noe redusert siden antennen må peke mot en bestemt basestasjon [30]. En smarttelefon kan antas å ha ubetydelig antennegevinst siden det vanligvis brukes rundstrålende eller tilsvarende antenner.

Utgangseffekten og antennegevinsten utgjør til sammen en sendeeffekt som er den utstrålte effekten i en gitt retning. Sendeeffekten tilsvarer et mål for utsendt effekt, som heter *Effective Isotropic Radiated Power* (EIRP).

Sendeeffekten er ikke regulert av 3GPP på frekvensbånd som ligger i FR1 (410–7125 MHz). Men på frekvensbånd som ligger i FR2 (24,25–71,00 GHz), spesifiserer 3GPP maksimal sendeeffekt som en brukerenhet får lov til å oppnå. På frekvensbåndet n258 kan smarttelefoner og 5G-modemer ha en maksimal sendeeffekt på henholdsvis 43 dBm og 55 dBm [31]. Dette kan oppnås med maksimal utgangseffekt og antennegevinst på 20 dBi ved bruk av for eksempel innebygde passive direktive antenner.

3.1.2.4 Dekning

Alle 5G-basestasjoner i et kommersielt mobilnett kan brukes til å gi dekning for 5G militær nettverksskive. Forsvaret kan ha nettverksskiver hos alle norske mobiloperatører. Dermed kan en 5G militær nettverksskive oppnå en arealdekning² som tilsvarer samlet arealdekning på kommersiell 5G fra alle tre mobiloperatørene (Telenor, Telia og ICE).

NKOM har utgitt en rapport som kartlegger tilgang til mobildata i Norge ved utgangen av 2024 [32]. Rapporten inneholder blant annet statistikk for arealdekning for 5G. Arealdekning på 5G var 99 % i Oslo, 63 % i Nordland, 68 % i Troms, og 52 % i Finnmark. På landsbasis var 5G-dekningen omtrent

²Med arealdekning mener vi basisdekning som NKOM definerer som dekning med signalstyrke høyere enn -107 dBm (RSRP) for alle 5G-frekvensbånd.

69 % av arealet. 5G-arealdekningen kommer trolig til å øke i Norge, blant annet fordi Regjeringen har satt som mål at 5G-dekningen i løpet av 2025 skal være like bra som 4G-dekningen var i 2020, som var omtrent 84 % av arealet.

Spesielt i Nord-Norge kan dekning på 5G militær nettverksskive være en utfordring. Det er sannsynlig at alle tettsteder og de fleste veiakser etterhvert får 5G-dekning. I ubebygde og avsidesliggende områder er det derimot som regel ikke kommersielt lønnsomt for en mobiloperatør å bygge ut mobildekning. Det er heller ikke alle steder det samfunnskritisk å ha mobildekning, slik at utbyggingen kan (delvis) finansieres av staten. Dermed er det urealistisk å tro at bakkebasert 5G kommer til å oppnå en arealdekning på 100 % i Norge. I tillegg kan dekningen være dårlig innendørs, spesielt i tunneler, fjellanlegg og kjellere. Dette kan være utfordrende for Forsvaret som skal kunne operere hvor som helst uansett om det er på land i skog, vidde, fjell eller innendørs, midt i havet eller oppe i lufta. Ideelt sett har Forsvaret behov for mobildekning overalt. Det er derfor relevant å forlenge og forsterke dekningen til 5G militær nettverksskive med løsninger som MDF (kapittel 3.2), mobilkommunikasjon på satellitter (kapittel 3.4) og direkte kommunikasjon mellom smarttelefoner (kapittel 3.5).

3.1.2.5 Overføringskapasitet

5G-radiokommunikasjon mellom basestasjoner og brukerenheter kan levere høy overføringskapasitet på grunn av høy båndbredde, støtte for høy modulasjons- og kodingsrate³, og utnyttelse av moderne antennteknologier. Tilgjengelig båndbredde er avhengig av frekvensbånd. Frekvensbånd under 1 GHz (ofte kalt dekningsbånd) har relativt lav båndbredde, men gode dekningsegenskaper på grunn av relativt lav frekvens, som har både lavere frittromstap og mindre demping i vegetasjon enn høyere frekvenser. Basestasjoner i disse frekvensbåndene gir god arealdekning, mens overføringskapasiteten ligger typisk på noen få titalls megabit per sekund (*Mbps*). Mer båndbredde er tilgjengelig på frekvensbånd over 1 GHz (ofte kalt kapasitetsbånd), noe som kan gi overføringskapasiteten på flere hundre Mbps. Imidlertid vil høyere frekvenser føre til kortere rekkevidde på grunn av at signaltapet øker. 5G-mobilkommunikasjon har mekanismer for å bruke flere frekvensbånd samtidig (*carrier aggregation*) slik at brukerenheten får mer båndbredde og enda høyere overføringskapasitet.

Selv om 5G-mobilkommunikasjon som teknologi støtter høy overføringskapasitet, vil den faktiske overføringshastigheten være avhengig av signalforholdet mellom basestasjon og brukerenhet. Lang avstand eller fysiske hindringer mellom basestasjon og brukerenhet fører til lavt signal-til-støy-forhold (SNR) på grunn av økt signaltap. For å kompensere for dette, kan man benytte en lavere ordens modulasjons- og kodingsrate som overfører mindre mengde informasjon per tidsenhet, men har lavere krav til SNR. Selv om robustheten øker, reduseres imidlertid overføringshastigheten ned til noen få Mbps. For å balansere dette justerer brukerenheten og basestasjonen kontinuerlig transmisjonsparametrene som modulasjon og koding, noe som fører til at overføringshastigheten automatisk går opp og ned avhengig av oppnåelig SNR.

³Modulasjon og koding er beskrevet i FFI-rapport [5].

3.2 Militær mobildekning gjennom 5G militær dekningsforlengelse (MDF)

5G militær dekningsforlengelse (MDF) er en løsning som inneholder en flyttbar basestasjon som Forsvaret selv kan etablere for å forlenge, forsterke eller gjenopprette dekningen til 5G militær nettverksskive. MDF er ikke en autonom løsning. MDF er en del av 5G militær nettverksskive og krever en forbindelse (backhaul) til tilhørende 5G-kjernenett. MDF som konsept og produkt ble utviklet av Forsvaret i program Mime i samarbeid med norske mobiloperatører. Selv om MDF består av kommersielt utstyr laget for sivil mobilkommunikasjon, tilpasses hele løsningen (spesielt formfaktor og brukergrensesnitt) til militær, taktisk bruk.

3.2.1 Relevans

Som beskrevet i kapittel 3.1.2.4, kommer det alltid til å finnes områder uten 5G-mobildekning. Det kan også forekomme et utfall i mobilnettet av ulike årsaker som for eksempel ekstremvær, uhell og menneskelige feil. I tillegg er basestasjoner utsatt for fysiske, cyber- eller elektromagnetiske angrep. For å sørge for at Forsvaret har dekning der de opererer er det derfor behov for flyttbare taktiske basestasjoner som Forsvaret kan sette opp selv. Med MDF skal operative styrker raskt og enkelt kunne forlenge, forsterke eller gjenopprette dekningen fra 5G militær nettverksskive. Brukere i dekningsområdet til MDF vil kunne få tilgang til militære tjenester på samme måte som gjennom den stasjonære infrastrukturen til 5G militær nettverksskive. MDF kommer til å benytte dedikerte frekvensbånd, noe som betyr at operative brukere får garantert tilgang til nettverksskiven.

MDF kan være bærbar eller monteres på et kjøretøy eller fartøy. Teknisk sett kan MDF også brukes til å gi kommersiell dekning til sivil befolkning ved et uhell eller naturkatastrofe. I prinsippet kan MDF også brukes under operasjoner i utlandet. MDF er designet slik at den ikke inneholder sensitiv informasjon og ikke skal kunne brukes til å få tilgang til kjernenettet eller brukerenheter. Det antas derfor ikke å være behov for fysisk vakt og sikring av MDF. Trusselaktører som eventuelt får tak i MDF, skal ikke kunne utføre cyberangrep eller få tilgang til sensitiv informasjon.

3.2.2 Teknisk beskrivelse

Dette kapittelet beskriver tekniske aspekter ved MDF.

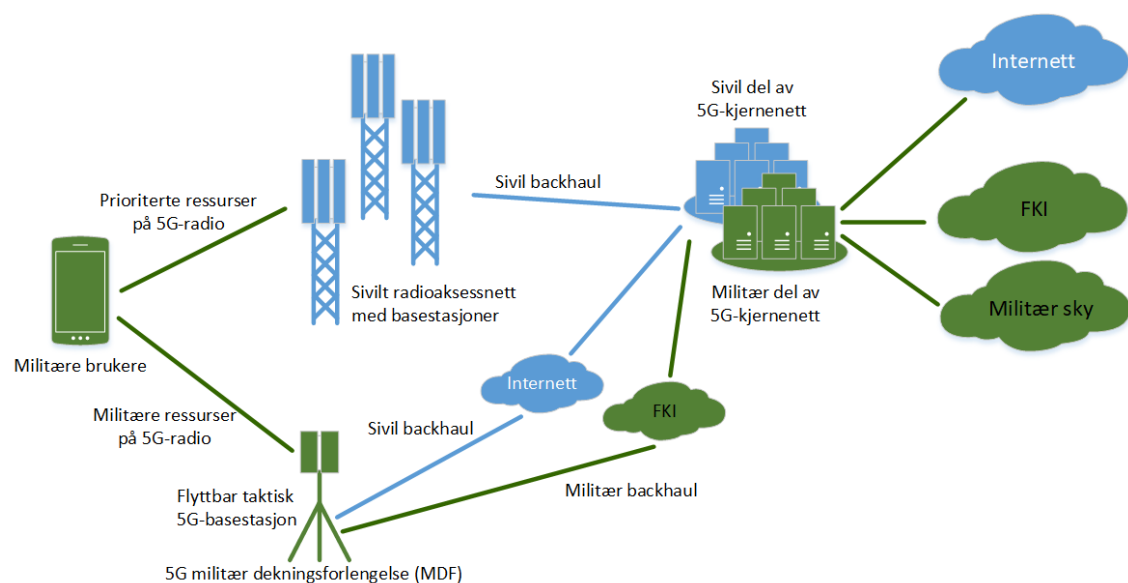
3.2.2.1 Arkitektur

I tillegg til et landsdekkende mobilnett (Public Land Mobile Network, PLMN), er det i 5G-spesifikasjonene også definert *Non-Public Network* (NPN). NPN er et mobilnett som har ikke-offentlige komponenter og som skaper lokal mobildekning for privat bruk. Et NPN som på en eller annen måte er integrert med et landsdekkende mobilnett, kalles *Public Network Integrated NPN* (PNI-NPN). Det finnes mange mulige konfigurasjoner av PNI-NPN, og MDF er én av dem.

Som vi har beskrevet tidligere må alle basestasjoner være koblet til et kjernenett, og all datatrafikk i mobilnettet må gå gjennom dette kjernenettet. Landsdekkende sivile basestasjoner bruker et lukket

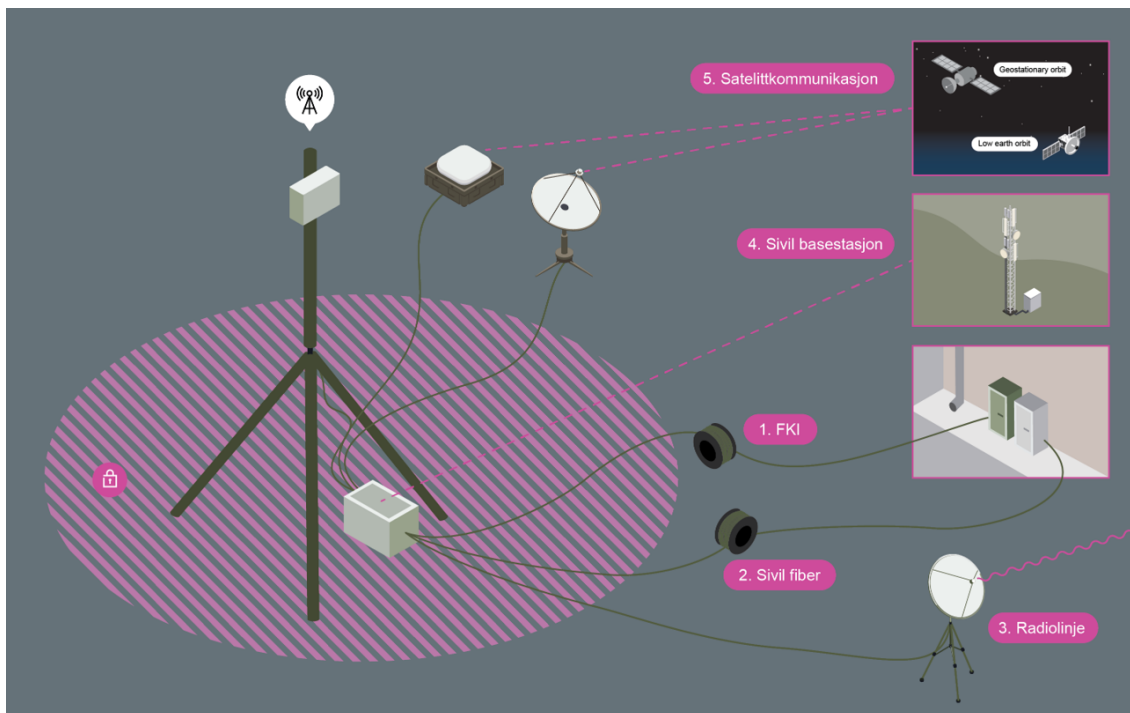
transportnett som backhaul, som stort sett er basert på fast fiberinfrastruktur som mobiloperatøren har kontroll på. Tanken med MDF er at så lenge den flyttbare 5G-basestasjonen har en eller annen tilkobling til den militære delen av 5G-kjernenettet, leverer basestasjonen dekning til 5G militær nettverksskive. I spesifikasjonene for mobilnett er det i tillegg til de «vanlige» basestasjonene spesifisert en type basestasjon som normalt er brukt for innendørsdekning og som kan bruke andre transportnett til backhaul enn de som mobiloperatøren ikke har kontroll på, som for eksempel Internett. Det er denne typen tilkobling til kjernenettet som benyttes av MDF. Der mobiloperatøren ikke har kontroll over backhaul benyttes det en kryptert (IPsec) forbindelse mellom basestasjonen og kjernenettet.

På radiogrensesnittet oppfører en MDF seg hovedsaklig som en annen basestasjon i det landsdekkende mobilnettet som MDF tilhører. En brukerenhet skal kunne bytte sømløst mellom dekningen fra MDF og dekningen fra landsdekkende mobilnett. Byttingen baseres på signalstyrke slik at brukerenheten alltid er koblet til den basestasjonen som leverer sterkest signal. MDF kommer til å operere under den samme PLMN-koden som tilhørende nettverksskive. MDF-en opererer imidlertid som regel på frekvensspektrum som er dedikert til militær bruk. Figur 3.2 viser en overordnet arkitektur av MDF som en del av 5G militær nettverksskive.



Figur 3.2 Overordnet arkitektur av MDF som en del av 5G militær nettverksskive.

Det finnes flere kommunikasjonsløsninger som kan brukes til å levere backhaul til MDF. Det vil naturligvis være situasjonsavhengig hvilke kommunikasjonsløsninger for backhaul som er tilgjengelig i felt. Figur 3.3 illustrerer noen mulige backhaul-løsninger for MDF. MDF skal kunne kobles direkte til FKI, slik at MDF kan bruke FKI til å finne veien til kjernenettet. For en slik direkte tilkobling til FKI kan det brukes statisk kablet infrastruktur (fiber, kobber) eller trådløse militære kommunikasjonsløsninger som transportabel radiolinje, satellittkommunikasjon eller taktisk mobilt bredbånd (TMB) [33]. Hvis direkte tilkobling til FKI ikke er tilgjengelig, kan hvilken som helst form for tilgang til Internett brukes som backhaul. Dette kan for eksempel være sivil fiberinfrastruktur, kablet Internett «hjemme», kommersiell mobilkommunikasjon eller kommersiell satellittkommunikasjon.



Figur 3.3 Noen mulige backhaul-løsninger for MDF.

3.2.2.2 Tekniske utfordringer

Det er noen tekniske utfordringer med å benytte 5G-teknologien på den måten som vi har beskrevet over. En av utfordringene gjelder tidssynkronisering. Slik 5G er designet må alle basestasjoner i radionettet være synkronisert mot en felles klokke for å unngå interferens og oppnå sømløse overleveringer (handovers). Spesielt basestasjoner som opererer på *Time Division Duplex* (TDD), har høye krav for synkronisering for å ha et felles tidspunkt på når de skal begynne å sende og motta radorammer i nedlink og opplink⁴. Alle basestasjoner i samme geografiske område trenger å sende samtidig og «lytte» samtidig, slik at det utsendte signalet i nedlink på den ene basestasjonen ikke forstyrrer signalet som mottas i opplink på en annen basestasjon. Vanligvis får basestasjoner i et mobilnett tidssynkronisering gjennom transportnettet som benyttes til backhaul.

Med MDF er det komplisert å få tidssynkronisering gjennom backhaul, siden backhaul-løsningen kan ha lang og uforutsigbar forsinkelse. Derfor bruker MDF vanligvis globalt navigasjonssatellittsystem (*Global Navigation Satellite System*, GNSS) for å oppnå tidssynkronisering. Det kan være en utfordring å motta GNSS-signaler i områder der det foregår jamming eller *spoofing* av GNSS-signaler. Én av løsningene på dette problemet kan være å deaktivere tidssynkronisering på MDF. Så lenge en MDF ikke er i nærheten av andre basestasjoner på samme eller naboliggende frekvensbånd, er det uproblematisk å bruke en usynkronisert intern klokke. Er det flere usynkroniserte MDF-er i samme geografiske område, kan det oppstå interferens mellom disse basestasjonene. Hvor stor interferens som oppleves er avhengig av avstanden mellom basestasjonene, effekten de sender med og avstanden til brukerenhetene. Interferens kan føre til redusert rekkevidde og overføringskapasitet.

⁴Radorammer og TDD er beskrevet i FFI-rapport [5].

En annen teknisk utfordring gjelder kapasiteten på backhaul-løsningen, som i noen tilfeller kan bli en begrensende faktor. Som vi beskriver i 3.2.2.6 vil overføringskapasiteten tilgjengelig på en MDF kunne være begrenset av kapasiteten på backhaul-løsningen. Denne kapasiteten kan være langt lavere enn kapasiteten på radiogrensesnittet til MDF. Det at MDF kan ha begrenset overføringskapasitet innebærer at det er nødvendig at Forsvaret har kontroll på hvilke brukere som kobler seg til en MDF. Slik kontroll kan sikres ved at en MDF konfigureres slik at bare brukere tilkoblet 5G militær nettverksskive får lov å benytte MDF-en, mens øvrige brukere blir avvist. I noen situasjoner, slik som etter ekstremvær der dekningen har falt ut, kan det imidlertid være ønskelig at Forsvaret tilbyr andre brukere å koble seg til mobilnettet gjennom MDF. MDF kan da omkonfigureres av mobiloperatør. Dekningen vil i utgangspunktet bare være tilgjengelig for brukere med abonnement hos samme mobiloperatør som Forsvarets MDF er levert av.

3.2.2.3 Frekvensbånd

Selv om det er mulig å bruke kommersielle frekvensbånd på MDF, er det ønskelig å ha dedikert frekvensspektrum. For det første trenger brukeren av MDF ikke å ta hensyn til interferens med kommersielle basestasjoner. For det andre vil dedikerte radioressurser sørge for garantert tilgjengelighet for militære brukere. Det kan også være enklere å samvirke med allierte hvis Forsvaret har egen frekvensspektrum til mobilkommunikasjon. Hvilke frekvensbånd som eventuelt blir allokert for MDF, er ikke bestemt ennå, men det finnes noen aktuelle alternativer. NKOM vurderer å allokere 2,3 GHz-frekvensbåndet til mobilkommunikasjon for beredskapsformål, hvor Forsvaret kan være én av aktørene som kan benytte dette[34]. Frekvensbåndet 4400–5000 MHz tilhører allerede Forsvaret (forvaltet av National Allied Radio Frequency Agency Norway, NARFA) og kan også teknisk sett brukes på MDF. Tabell 3.3 oppsummerer de to 5G-frekvensbåndene som kan allokere til MDF-bruk. Begge frekvensbåndene er spesifisert i 3GPP-standarden (som n40 og n79), og det finnes kommersielt utstyr i markedet som støtter disse. Frekvensbåndet n40 er et populært frekvensbånd og støttes av de aller fleste brukerenheter. Frekvensbåndet n79 er mindre brukt i Europa, men kommersielt brukes mye i blant annet Asia, og dermed finnes det en god del brukerenheter som støtter dette båndet. MDF kan operere med båndbredde på minst 20 MHz, men kan også konfigureres for høyere båndbredde gitt at frekvensspektrumet er tilgjengelig.

5G-frekvensbånd	Mulig frekvensområde	Mulig båndbredde
n40	2300–2390 MHz	20–90 MHz
n79	4400–5000 MHz	20–200 MHz

Tabell 3.3 Mulige 5G-frekvensbånd som kan allokere til MDF-bruk i Forsvaret.

3.2.2.4 Brukerenheter

De vanlige brukerenhetene for 5G som vi beskrev i kapittel 3.1.2.3 kommer til fungere på MDF så lenge de støtter 5G SA og de frekvensbåndene som MDF-en opererer på. Tabell 3.2 oppgir maksimal utgangseffekt til en standard smarttelefon og 5G-modem på frekvensbånd aktuelle for MDF.

5G-frekvensbånd	Maks utgangseffekt smarttelefon	Maks utgangseffekt 5G-modem
n40 (2300 MHz)	29 dBm (0,8 W)	31 dBm (1,26 W)
n79 (4800 MHz)	29 dBm (0,8 W)	29 dBm (0,8 W)

Tabell 3.4 Maksimal utgangseffekt som 5G-brukerenheter får lov til å sende med i følge 3GPP-standard [26]. Frekvensbåndene som er oppgitt i tabellen, er aktuelle for MDF.

Det finnes 5G-modem med antenneporter som gjør det mulig å koble til eksterne antenner. For å øke rekkevidden og overføringskapasiteten, er det mulig å bruke en direktiv antenne og peke den mot en basestasjon. Dette er spesielt relevant for MDF, siden brukeren oftest vet posisjonen til MDF-en og dermed kan peke antennen mot den. Siden frekvensområdet en MDF benytter også er kjent, kan passende antenner anskaffes som en del av Forsvarets IKT. Det er også mulig å bruke noen av antennene som Forsvaret allerede har. Direktive antenner kan være av typen sektorantenne som har relativt stor åpningsvinkel (over 60 grader) og antennegevinst på 6–10 dBi. En annen type direktiv antenne er parabolantenn, som har liten åpningsvinkel og krever nøyaktig justering, men som på den andre side kan gi antennegevinst på 20 dBi eller mer. Ulempen med direktive antenner er redusert mobilitet, siden antennen må stå i ro når den er i bruk. FFI har testet og dokumentert bruk av parabolantenn med et 5G-modem [30].

3.2.2.5 Dekning

Basestasjonen til MDF har som regel en antenne som gir dekning i en sektor på 120 grader. Rekkevidden er blant annet avhengig av egenskapene til antennene på MDF og på brukerenheten samt hvordan terrenget og vegetasjonene er mellom disse.

Frekvensbåndene n40 og n79 ligger relativt høyt i frekvens, noe som øker signaltapet, spesielt uten frisikt. Dersom det er frisikt mellom MDF-en og brukerenheten vil man kunne oppnå en rekkevidde på flere kilometer. Dagens MDF som Forsvaret tester, har en logisk grense på rekkevidde på 15 km på grunn av tidslukekonfigurasjon i TDD-rammestrukturen⁵. Denne begrensningen vil trolig være løst i fremtiden, siden produsentene av kommersielt basestasjonsutstyr kun trenger å endre tidslukekonfigurasjonen i programvare for å tillate lengre rekkevidde. Dersom slike endringer implementeres vil MDF kunne levere rekkevidde opptil omtrent 100 km i frisikt. Begrensningen på 100 km bestemmes blant annet av prosedyren til forbindelsesetablering og er dermed en generell øvre grense for rekkevidde for bakkebaserte basestasjoner.

Uten frisikt (blokkering fra skog, fjell, bygninger, osv.) vil rekkevidden for en MDF typisk være under 1 km. Dermed er det viktig at Forsvaret har gode radioplanleggingsverktøy for å kunne finne optimale plasseringer av basestasjoner og brukerenheter, noe som vil øke den operative nytten av MDF. FFI-rapporten «Dekning, rekkevidde og kapasitet for et 5G-radiosystem» [30] beskriver tekniske og praktiske aspekter ved 5G-rekkevidde med ulike oppsett av basestasjoner og brukerenheter i forskjellige typer terreng.

⁵TDD (Time Division Duplex) og hvilke konsekvenser dette har for rekkevidde, er beskrevet i FFI-rapport [30].

3.2.2.6 Overføringskapasitet

I kapittel 3.1.2.5 beskrev vi hvilke faktorer som begrenser overføringskapasiteten til 5G-radio-kommunikasjon. Disse faktorene gjelder også for MDF. Imidlertid kan backhaul til MDF begrense overføringskapasiteten som er tilgjengelig for brukere som er koblet til MDF. Siden all brukertrafikk går gjennom backhaul, blir den tilgjengelige overføringskapasiteten som backhaul-løsningen leverer, fordelt mellom brukere på MDF.

3.3 Militær mobildekning gjennom militært autonomt 5G-nett

Militært autonomt 5G-nett er en løsning som inneholder et komplett fysisk mobilnett som Forsvaret kan benytte lokalt helt uavhengig av sentralisert infrastruktur. I det kommersielle markedet kalles en slik løsning for privat 5G-nett (eller Standalone Non-Public Network, SNPN) og er kun tilgjengelig for en lukket brukergruppe, slik som en bedrift. På samme måte er militært autonomt 5G-nett også kun tilgjengelig lokalt. Tjenestene som brukerne benytter må også kjøre på et lokalt datanettverk. Militære brukere må ha dedikerte SIM-kort som tilhører dette nettet. Det autonome 5G-nettet består av kommersielt utstyr som er satt sammen og tilpasset militær bruk. Et slikt mobilnett kan være både stasjonært, flyttbart eller montert på kjøretøy eller fartøy. Et militært autonomt 5G-nett kan eies og driftes av Forsvaret selv. Dette vil følge samme modell som en del tradisjonelle militære radiosystemer.

Mange land har vist interesse for militære autonome 5G-nett, blant annet i IST-grupper i NATO STO og EDF-prosjektet 5G COMPAD [2]. Forsvaret gjennomfører noen pilotprosjekter for bruk av militære autonome 5G-nett. FFI har også eksperimentert med slike 5G-nett, og etter vår erfaring er kompleksiteten relativt høy og modenheten relativt lav på produkter som er tilgjengelige i dag. Imidlertid tror vi at på grunn av eksisterende etterspørsel i markedet, kommer produktene framover til å være mer brukervennlige og pålitelige.

3.3.1 Relevans

Et militært autonomt 5G-nett kan bli utplassert der det er behov for lokal dekning. Siden tjenestene som brukerne benytter er tilgjengelige lokalt, vil nettet kunne fungere hvor som helst uten at det trengs noen annen infrastruktur. Militære autonome 5G-nett kan ha flere anvendelser. Et stasjonært nett kan for eksempel dekke en av Forsvarets baser og brukes til tjenester som er interne. Et militært autonomt 5G-nett kan være deloyerbart eller fastmontert på et kjøretøy eller fartøy.

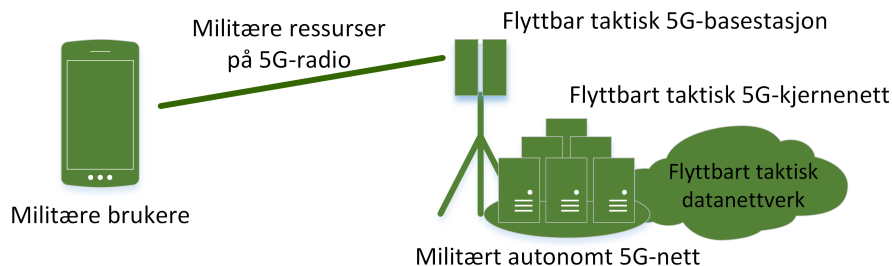
3.3.2 Teknisk beskrivelse

Dette kapittelet beskriver tekniske aspekter ved militært autonomt 5G-nett.

3.3.2.1 Arkitektur

I motsetning til 5G militær nettverksskive og MDF, er et militært autonomt 5G-nett helt uavhengig av sentralisert infrastruktur. Både basestasjon og kjernenett er en del av det taktiske utstyret

som plasseres ut i felt og driftes av Forsvaret selv. Tjenestene kan også kjøre lokalt på et taktisk datanettverk. Brukere må ha dedikerte SIM-kort som er registrert på det militære autonome 5G-nettet. Nettet har som regel egen PLMN-kode som er ulik fra kommersielle mobilnett og 5G militær nettverksskive. Den taktiske basestasjonen benytter som regel frekvenser som er dedikert til militær bruk. Arkitekturen til militært autonomt 5G-nett er illustrert i figur 3.4.



Figur 3.4 Overordnet arkitektur av militært autonomt 5G-nett.

Dersom tjenestene som brukerne skal benytte befinner seg et annet sted enn 5G-nettet vil 5G-nettet måtte kobles til datanettverk (Internett, FKI, osv.) med en såkalt *reachback*-forbindelse. Reachback-forbindelsen kan realiseres på ulike måter, tilsvarende som en backhaul-forbindelse for en MDF. Det finnes noen tekniske muligheter til å integrere det autonome nettet med 5G militær nettverksskive eller koble flere autonome nett sammen. Det kan blant annet brukes gjesting mellom ulike 5G-nett.

3.3.2.2 Tekniske utfordringer

Det er en utfordring å oppnå forsvarlig sikkerhetsnivå i et militært autonomt 5G-nett som er ute i felt og kan være eksponert for fiendtlige aktører. Det er fare for å kompromittere informasjon om brukere og brukerdata hvis aktøren får fysisk tilgang til kjernenettet. Kjernenettet inneholder blant annet en database med alle registrerte abonnementer. Dermed er det viktig at kjernenettet til militært autonomt 5G-nett er tilstrekkelig sikret både fysisk og logisk.

Det å drifte et eget kjernenett kan kreve høy teknisk kompetanse. Det kan også være praktiske utfordringer med forvaltning av SIM-kort når forskjellige 5G-nett krever egne dedikerte SIM-kort. Et SIM-kort kan riktignok være registrert på flere 5G-nett, men dette kan føre til økt kompleksitet og gi sikkerhetsutfordringer. Gjesting i flere 5G-nett vil også føre til økt kompleksitet og økt risiko for potensielle sårbarheter mot cyberangrep.

Det er også teknisk utfordrende å få en brukerenhet til å sømløst bytte mellom flere autonome 5G-nett eller mellom et autonomt 5G-nett og landsdekkende mobilnett.

Utfordringene med tidssynkronisering, som var beskrevet i kapittel 3.2.2.2, vil også gjelde militære autonome 5G-nett hvis det er flere nett (eller basestasjoner) på samme eller nærliggende frekvensbånd i samme geografiske område.

3.3.2.3 Frekvensbånd

De samme frekvensbåndene som er aktuelle for MDF, og som var beskrevet i kapittel 3.2.2.3, er også aktuelle for et militært autonomt 5G-nett.

3.3.2.4 Brukerenheter

Brukerenheter til 5G militær nettverksskive og MDF, som var beskrevet i kapittel 3.1.2.3 og 3.2.2.4, gjelder også militært autonomt 5G-nett. For at brukerenheten skal kunne koble til et autonomt 5G-nett, må den støtte og ikke sperre for PLMN-koden som det autonome nettet bruker.

3.3.2.5 Dekning

Dekningen til militært autonomt 5G-nett vil ha samme egenskaper som dekingen til MDF, som var beskrevet i kapittel 3.2.2.5.

3.3.2.6 Overføringskapasitet

Overføringskapasiteten til 5G-radiokommunikasjon, som var beskrevet i kapittel 3.1.2.5, gjelder også for et militært autonomt 5G-nett.

3.4 Militær mobildekning fra satellitter (NTN)

Siden Release 14, som startet i 2014, har 3GPP studert muligheter med og scenarioer for å flytte noen av mobilnettets komponenter opp i lufta eller ut i verdensrommet. Et mobilnett (eller deler av et mobilnett) som inneholder ikke-bakkebaserte (flygende) komponenter og muliggjør mobilkommunikasjon gjennom disse komponentene, kalles *Non-Terrestrial Network* (NTN) i 3GPP-standarden [35]. NTN kommer til å tilby vanlige kommersielle mobiltjenester, men kan teknisk sett også brukes til å levere militær mobildekning.

Den ikke-bakkebaserte komponenten i NTN kan være en flygende plattform som et romfartøy (satellitt) i hvilken som helst bane eller et luftfartøy⁶ som UAV eller ballong. Satellitten eller luftfartøyet vil bære en basestasjon (eller deler av en basestasjon) som gir dekning til brukerenheter på bakken. Den flygende plattformen og basestasjonen vil bli styrt av og koblet til en bakkestasjon. Bakkestasjonen vil bli koblet videre til et kjernenett som blant annet sørger for autentisering og ruter datatrafikken til brukere.

De første tekniske spesifikasjonene for NTN kom i Release 17. Selv om NTN er spesifisert med tanke på 5G, antok 3GPP at mesteparten av funksjonaliteten også kunne bli tilpasset og gjenbrukt på 4G [35]. Spesifikasjonene beskriver tilpasninger som er nødvendige for at mobilkommunikasjonen skal kunne fungere med blant annet satellitter som har stor høyde eller høy fart. 3GPP spesifiserer parametere innenfor kjernenett, basestasjoner, brukerenheter, radiogrensesnitt og kontrollsignaler, som må være tilpasset for at mobilkommunikasjonen skal kunne fungere optimalt [36]. Det er bare den mobilkommunikasjonsløsningen som er designet med hensyn til 3GPP sine NTN-spesifikasjoner som kan kalles NTN. NTN som er basert på 5G-mobilteknologi vil bli kalt 5G-NTN.

⁶Også kjent som HAPS (*High-Altitude Platform Station*, *High-Altitude Pseudo-Satellite* eller *High-Altitude Platform Systems*).

Hovedformålet med NTN er å utvide dekningsområdene til dagens bakkebaserte mobilnett. NTN gjør det mulig å dekke store fysiske områder og gjøre mobilkommunikasjon tilgjengelig overalt på hele jordkloden.

Det finnes allerede fungerende satellittjenester som er tilgjengelige gjennom vanlige smarttelefoner. Noen tjenesteleverandører gjør egne tilpasninger på eksisterende bakkebasert mobilkommunikasjon for å få det til å fungere gjennom satellitter. Et eksempel på dette er Starlink sin *Direct-to-Cell*-løsning som tilbyr SMS-tjeneste og i noen grad vanlig datatjeneste på vanlige smarttelefoner som støtter 4G. Selv om Starlink sin løsning er basert på 3GPP sin 4G-standard, gjør Starlink enge tilpasninger som er utenfor standarden, og dermed oppfyller løsningen ikke helt kravene til NTN. Dette kan føre til en suboptimal ytelse og tungvint integrasjon med bakkebaserte mobilnett [37]. Starlink sin *Direct-to-Cell*-løsning er tilgjengelig for utprøving i enkelte land gjennom samarbeid med mobiloperatørene, men ikke i Norge. Andre operatører velger, eller er i en tidlig fase av, standardisert NTN.

Noen tjenesteleverandører velger å implementere egne løsninger basert på sine eksisterende økosystem. Et eksempel på dette er Apple som, siden lansering av iPhone 14 i 2022, tilbyr mulighet for nødmeldinger gjennom Globalstar sine satellitter i lav bane. I 2024 utvidet Apple tjenesten ved å tillate å sende vanlige iMessage-meldinger via satellitt dersom brukerenheten befinner seg i et område uten dekning. Dette er imidlertid kun tilgjengelig i USA, Canada og Mexico, mens nødmeldinger er tilgjengelig flere steder i verden, inkludert noen land i Europa, men ikke Norge [38]. Apple bruker Globalstar sin proprietære løsning for satellittkommunikasjon som ikke er basert på NTN-standard [39].

Det finnes også tjenesteleverandører som satser på standardisert NTN. Et eksempel på dette er smarttelefonprodusentene Google, Samsung og CAT som tilbyr meldingstjenester gjennom satellittjenesten fra Skylo. Satellittkommunikasjonen baserer seg på geostasjonære satellitter (GEO) og bruker 3GPP-standard for Narrowband IoT (NB-IoT) over NTN. Overføringskapasiteten på noen få kbps begrenser tjenesten til korte spesifikke meldinger. Vi har testet løsningene fra Google og CAT som er tilgjengelig i Norge. Erfaringene fra disse testene, og en generell beskrivelse av NB-IoT over NTN, er gjengitt i vedlegg E.

Tidlige løsninger for satellittkommunikasjon på smarttelefoner hos de store markedsaktørene tyder på at det er en stor interesse for slike tjenester i markedet. Dette indikerer også at en fullstendig NTN-løsning kan forventes å være tilgjengelig til sluttbrukere i løpet av noen få år. Vi mener at når en mer utbredt bruk av en standardisert løsning som 5G-NTN (og etter hvert 6G-NTN) kommer til markedet, vil den være relevant og nyttig for militær bruk. Brukeren vil få mulighet for en vanlig datatjeneste på et bredt utvalg av kommersielle brukerenheter, noe som vil gjøre integrasjonen mot Forsvarets IKT enklere.

Det er høyst sannsynlig at de store leverandørene av satellittkommunikasjonstjenester kommer til å satse på standardisert NTN i samarbeid med brukerutstyrprodusentene og mobiloperatørene. Satellittkonstellasjonen OneWeb tilbyr Internett-tilgang med relativt høy overføringskapasitet over store deler av verden, inkludert Norge. OneWeb fungerer på spesialdesignede satellitterterminaler med eget proprietært radiogrensesnitt, men inneholder flere komponenter fra mobilteknologi. I vedlegg F beskriver vi i mer detalj hvordan OneWeb og mobilteknologi henger sammen. Utviklingen av satellittkonstellasjonen IRIS² er også særlig aktuelt å følge med på. IRIS² er et europeisk initiativ og står for *Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security by Satellite*. Prosjektet skal

etter planen ha en operasjonell satellittkonstellasjon tidligst i 2030, og konstellasjonen kommer til å støtte 5G-NTN [40].

Videre i kapittelet beskriver vi relevans og tekniske muligheter med militær mobildekning levert fra satellitter. Satellittbasert mobilkommunikasjon som vi beskriver er basert på 3GPP sin NTN-standard og som vil være i stand til å levere vanlig datatjeneste til sluttbrukeren.

3.4.1 Relevans

Hovedformålet med NTN er å levere mobiltjenester på steder hvor det enten mangler eller er dårlig bakkebasert mobildekning. 3GPP beskriver følgende bruksområder der NTN kan være nyttig [36, 41]:

- kunder som bor eller reiser utenfor tett befolkede områder
- reisende med båt, fly eller tog
- industrielle aktiviteter, som jordbruk, gruvedrift og skogbruk, offshore-plattformer og skipsfart
- tingenes internett (IoT) for overvåking av eiendeler som skip, tog, lastebiler og containere, eller infrastruktur som veier, strøm (produksjon og forbruk) og jernbanespor
- kritisk kommunikasjon til nødetatene
- kringkasting av videostrømmer eller nødvarsler

3GPP diskuterer to typer tjenester som vil ha ulik overføringskapasitet [41]:

- Mobiltjenester med overføringskapasitet under 2 Mbps som baserer seg på brukerenheter med rundstrålende eller mindre direkte antenner som opererer i frekvensområdet under 10 GHz (typisk smarttelefon).
- Mobiltjenester med overføringskapasitet over 50 Mbps som baserer seg på spesialdesignede satellitterterminaler som opererer i frekvensområdet over 10 GHz og bruker direkte antenner.

I tillegg til utvidet dekning, kan NTN i teorien levere en posisjoneringstjeneste som supplement til eller som erstatning for posisjonering fra GNSS. Dette vil bli beskrevet nærmere i kapittel 4.5.3.

Både utvidet mobildekning og posisjoneringstjeneste er høyst aktuelt for Forsvaret. NTN har muligheten til å utvide dekningen til 5G militær nettverksskive, slik at tjenester som tilbys i nettverksskiven er tilgjengelig overalt i Norge og i prinsippet andre steder i verden. Det er spesielt nyttig i nordområdene eller til sjøs der dekningen ikke finnes fra før eller i tilfeller hvor den bakkebaserte infrastrukturen har blitt satt ut av drift på grunn av naturkatastrofer, strømbrudd eller feil i nettverk. Bakkebaserte basestasjoner kan også være utsatt for sabotasjeangrep, fysiske angrep, cyberangrep eller jamming. Mobilkommunikasjon fra satellitter kan være en viktig og nyttig ressurs som vil øke redundans til Forsvarets kampnære IKT. En posisjoneringstjeneste gjennom NTN kan gi økt redundans i områder der tradisjonelt GNSS-signal er påvirket av jamming eller spoofing.

3.4.2 Teknisk beskrivelse

Dette kapittelet beskriver tekniske aspekter og utfordringer ved NTN.

3.4.2.1 Arkitektur

3GPP har studert mulige nettverksarkitekturer til et mobilnett som inneholder både bakkebaserte og ikke-bakkebaserte basestasjoner [41]. I dette kapittelet diskuterer vi flere mulige måter for å realisere NTN.

En satellitt kan bære en komplett basestasjon som prosesserer 5G-radiosignaler og bruker forbindelsen til en bakkestasjon som backhaul til et kjernenett. Basestasjonen på satellitten kan også ha en del av kjernenettets funksjonalitet⁷ som muliggjør datautveksling mellom to brukerenheter gjennom satellitten uten behov for å sende all datatrafikk gjennom et kjernenett på bakken [42]. Satellitten kan også fungere som et «relé» som mottar radiosignaler og videresender dem (helst på en annen frekvens) til en bakkestasjon. I et slikt tilfelle er basestasjonens funksjonalitet plassert i bakkestasjonen.

Både bakkebaserte og satellittbaserte basestasjoner kan være koblet til et felles kjernenett og tilhøre det samme mobilnettet, men de kan også være koblet til forskjellige kjernenett og tilhører da separate mobilnett. Det er fortsatt mulig å koble disse mobilnettene sammen ved hjelp av gjesting, slik at brukeren kan få mobiltjenesten fra både det bakkebaserte og det satellittbaserte mobilnettet. Bakkestasjoner til satellitter kan også være koblet til flere kjernenett samtidig. Det betyr at en satellitt danner en forbindelse til et kjernenett som tilhører det landet og den mobiloperatøren som satellitten leverer dekning over. Slik kan én satellitt fly over flere land og betjene forskjellige mobiloperatører.

I figur 3.5 har vi tegnet en skisse av én mulig arkitektur på hvordan kombinasjonen av 5G-NTN og 5G militær nettverksskive ideelt sett kan se ut. Vi ser for oss at brukerenheter bruker 5G-radiogrensesnittet og er koblet til LEO-satellittkonstellasjon (*Low Earth Orbit*). Vi antar at satellittene fungerer som fullstendige 5G-basestasjoner og støtter intersatellittlinker (ISL). Bakkebaserte og satellittbaserte basestasjoner er koblet til et felles kjernenett som tilhører 5G militær nettverksskive.

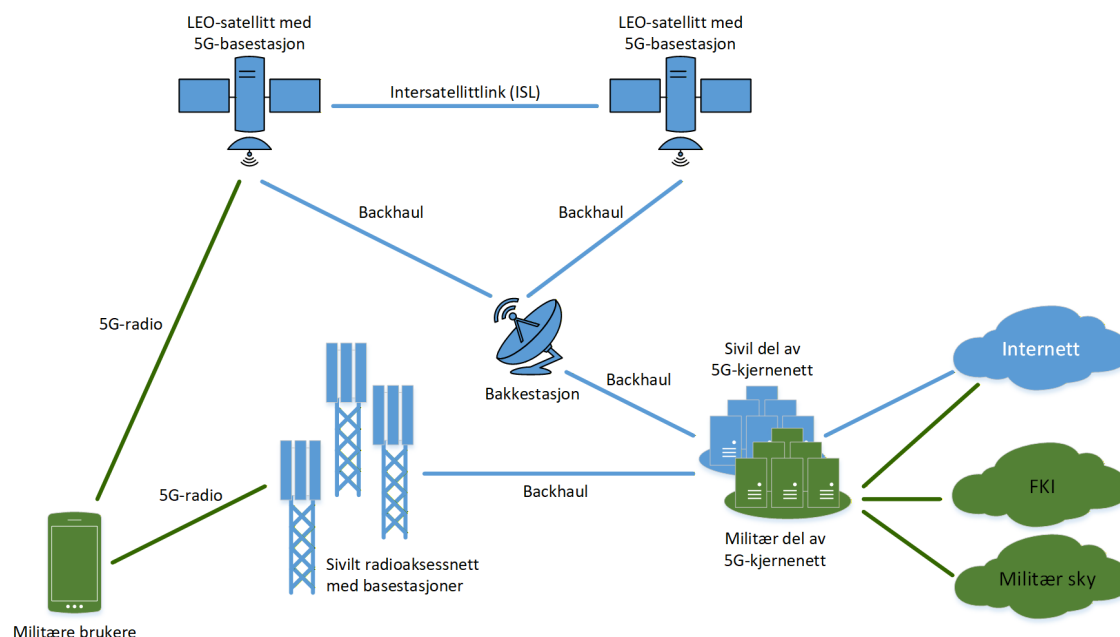
3.4.2.2 Tekniske utfordringer

Fram til NTN ble introdusert, var mobilkommunikasjon kun standardisert og optimalisert for bakkebasert radioinfrastruktur. Siden NTN introduserer basestasjoner med stor høyde og leverer dekning over relativt store områder, kreves det noen justeringer og tilpasninger i 3GPP-standard. I det følgende beskriver vi noen av de utfordringene med NTN som 3GPP har identifisert [41]. Vi omtaler også de tilpasningene som 3GPP har innført eller vurderer å innføre for å løse disse utfordringene. En detaljert teknisk beskrivelse av utfordringene med NTN finnes også i [43].

En radiokanal mellom en brukerenhet og en satellitt har andre egenskaper enn en radiokanal mellom en brukerenhet og en bakkebasert basestasjon. På grunn av lang avstand til satellitten, vil tidsforsinkelsen med NTN være lengre enn tidsforsinkelsen til en basestasjon på bakken. Satellitten vil også være i bevegelse relativt til brukerenheten (bortsett fra for GEO satellitter), noe som introduserer økt dopplerskift⁸. For å håndtere lengre forsinkelse og større dopplerskift, kreves det mest justeringer på det fysiske laget (*Physical layer*). Det vil være innført større fleksibilitet på blant

⁷User Plane Function (UPF) flyttet til basestasjonen på satellitten. UPF er forklart i 4.4.

⁸Endring av frekvens på grunn av relativ hastighetsforskjell mellom en sender og en mottaker



Figur 3.5 Overordnet arkitektur av 5G-NTN som en del av 5G militær nettverksskive.

annet referansesignaler, tidsluker, mellombæreravstand, syklisk prefiks, adaptive modulasjons- og koderingsprosedyrer og synkronisering i opplink og nedlink. På datalinklaget vil tilpassinger innføres på blant annet initiell aksessprosedyre (*Random Access*) og retransmisjoner. Noen tilpasninger blir også introdusert på signalering (SIB1, SIB2, SIB19, SIB25) på det lavere nettverkslaget for å oppnå effektiv forbindelsesetablering med satellitter.

Radiosignaler fra en basestasjon dekker et visst område på bakken. Området der basestasjonen gir mobildekning kalles en celle. En basestasjon på en satellitt skaper også en celle som gir mobildekning i et gitt område på bakken. Dekningsområdet til en satellitt som fungerer som en basestasjon er stort. Stor cellestørrelse fører til at brukerenheter som er ulike steder i cellen, er i ulik avstand til en basestasjon, og vil dermed oppleve forskjellige tidsforskinkelser, noe som radiosystemet må ta hensyn til. En løsning kan være at dekningsområdet fra satellitten deles inn i flere celler. Satellitten kan bruke flere små dekningsstråler der hver dekningsstråle er en separat celle. Slik kan ulike brukerenheter betjenes av den samme satellitten, men fortsatt være i separate celler upåvirket av hverandre. Forskjellene i tidsforskinkelse mellom brukere må også håndteres i det fysiske laget og datalinklaget, spesielt med tanke på *Timing Advance* (TA).

En annen utfordring med stort dekningsområde er at satellittdekningen vil overlappe med dekning på bakken. Mobilnett på bakken har mange basestasjoner, og hver basestasjon lager egne dekningsområder (celler). Når brukeren ferdes mellom disse forskjellige dekningsområdene, blir brukerens forbindelse overlevert mellom tilsvarende basestasjoner. Overleveringen heter *handover* i 3GPP og skjer sømløst slik at brukeren ikke opplever noen brudd i forbindelsen. Alle basestasjoner er koblet sammen enten direkte eller gjennom et kjernenett for å kunne koordinere overleveringer mellom hverandre. Når det gjelder NTN, så skal forbindelsen overleveres mellom celler i en satellitt, mellom satellitter, og mellom en satellitt og en bakkebasert basestasjon. Sømløs overlevering mellom satellitt og bakkebasert basestasjon blir vanskelig å få til uten tidsriktig koordinering. For å fortsatt opprettholde

kontinuitet i mobiltjenesten når brukerenheten veksler mellom bakkeinfrastruktur og NTN, foreslår 3GPP to alternative løsninger – hard overlevering og multikonnektivitet. En hard overlevering vil si at radioforbindelsen brytes ned før den settes opp igjen, noe som kan føre til tapte datapakker og en kort nedetid for brukeren. Multikonnektivitet vil si at brukerenheten har aktive forbindelser med både bakkebasert og satellittbasert infrastruktur samtidig. Overleveringsprosedyrer for NTN vil kreve tilpasninger i signalering og koordinering på flere nivå i mobilnettet.

Maksimal sendeeffekt er regulert i standarden og kan være en begrensende faktor på radiosystemets ytelse i opplink, spesielt ved bruk av smarttelefon. Satellittene må være utstyrt med store, gjerne fasestyrte antenner for å kompensere for lav sendeeffekt på brukerenheter. 3GPP anbefaler derfor å innføre modulasjons- og kodingsrate som håndterer meget lavt signal-støy-nivå (SNR). 3GPP påpeker også viktigheten av fleksibel båndbredde og diskuterer muligheten for overføring over et veldig smalt frekvensbånd (15–120 kHz).

For at en brukerenhet skal kunne fungere med NTN, må den først vite sin posisjon. Grunnen til dette er at den må vite hvilken satellitt den kan koble seg til og kompensere for dopplerskift forårsaket av at satellitten beveger seg raskt over himmelen. I tillegg er det viktig å kjenne posisjonen til brukerenheten for å kunne vite hvilke nasjonale myndighetskrav innenfor frekvensbruk som gjelder. I Release 17 er det spesifisert at alle NTN-brukerenheter må bruke GNSS for finne sin posisjon [44]. Dette kan være en utfordring i tilfeller hvor GNSS ikke er tilgjengelig. Dersom en NTN-brukerenhet er stasjonær og posisjonen er kjent, vil det være mulig å oppgi denne posisjonen manuelt. Det vil fortsatt være en utfordring for mobile brukerenheter. Med videreutvikling av NTN forventes det at det blir mulig å få posisjonen gjennom NTN-satellittsystemet uavhengig av GNSS.

3.4.2.3 Frekvensbånd

Det er mange parter som må være enige for at et frekvensbånd skal kunne brukes til NTN. En mobiloperatør eier som regel frekvensbåndene som brukes til bakkebasert mobilkommunikasjon. Det er opp til operatørene å tildele et gitt frekvensbånd til NTN istedenfor bakkebasert mobilkommunikasjon. Frekvensbånd som brukes til dagens satellittkommunikasjon kan også allokere til NTN-bruk av leverandørene til satellittjenester. Satellittoperatører må dessuten implementere basestasjonsutstyr på satellitter i relevante frekvensbånd og produsenter av brukerenheter må implementere støtte for NTN på brukerenheter. Frekvensbruk må koordineres med nasjonale og internasjonale myndigheter for at frekvensspektrum brukes mest effektivt, og eventuell interferens mot andre radiosystemer må være kontrollert. Så lenge alle parter er enige om et frekvensbånd, og utstyret støtter det, kan i prinsippet hvilket som helst frekvensbånd bli brukt til NTN.

5G-NTN vil benytte det standardiserte radiogrensesnittet 5G New Radio (NR) for kommunikasjon mellom satellitt og brukerenhet. 3GPP forsøker å finne noen aktuelle og tilgjengelige frekvensbånd og spesifisere dem for NTN-bruk. Det er utfordrende å finne felles frekvensbånd som er ledige eller kan dedikeres til NTN på ulike kontinenter og land. 3GPP har kommet med forslag til NTN-frekvensbånd, men frekvensene må koordineres i hvert enkelt land og harmoniseres mellom naboland og regioner. Listen med frekvensbånd oppdateres fortløpende, og det er sannsynlig at 3GPP kontinuerlig legger til nye forslag til frekvensbånd som kan være egnet for NTN-bruk. Frekvensbåndene som 3GPP har spesifisert for NTN-bruk så langt er oppsummert i tabell 3.5. Alle disse frekvensbåndene brukes til satellittkommunikasjon i dag.

Frekvensbånd (3GPP-benevning)	Frekvensområde (IEEE-benevning)	Frekvens i opplink [MHz]	Frekvens i nedlink [MHz]
n256	S	1980–2010	2170–2200
n255	L	1626,5–1660,5	1525–1559
n254	L og S	1610–1626,5	2483,5–2500
n253	L	1668–1675	1518–1525
n252	S	2000–2020	2180–2200
n251	L	1626,5–1660,5	1518–1559
n250	L	1668–1675	1518–1559
n249	L	1616–1626,5	1616–1626,5
n248/n509	Ku	14000–14500	10700–12750
n247/n508	Ku	13750–14000	10700–12750
n512	Ka	27500–30000	17300–20200
n511	Ka	28350–30000	17300–20200
n510	Ka	27500–28350	17300–20200

Tabell 3.5 3GPP-frekvensbånd spesifisert til NTN-bruk [45, 46].

3.4.2.4 Brukerenheter

Støtte for NTN kan være integrert i en vanlig brukerenhet for bakkebasert mobilkommunikasjon som smarttelefon, IoT-enhet eller 5G-modem. Denne typen brukerenheter vil typisk operere i frekvensområdet 1–3 GHz og ha relativt lav utgangseffekt til kommunikasjon med satellitter. Smarttelefoner antas å ha rundstrålende antenner uten noen antennegevinst av betydning. Et 5G-modem eller en IoT-enhet kan ha en mulighet for en ekstern direktiv antenne med en viss antennegevinst i en gitt retning. Båndbredden én vei (opplink eller nedlink) for smarttelefon eller 5G-modem vil typisk ligge mellom 5 og 20 MHz.

Brukerenheter som opererer i frekvensområdet 10–30 GHz vil være spesialdesignet for NTN-kommunikasjon. Denne typen brukerenhet kalles VSAT (Very Small Aperture Terminal). VSAT kan sende med relativt høy utgangseffekt og ha relativt høy antennegevinst, noe som fører til relativt høy maksimal sendeeffekt. Den høye sendeeffekten vil kompensere for høyt signaltap på så høy frekvens. VSAT kan ha mekanisk eller elektronisk styrt panelantenne, slik at terminalens signal kan sikte mot og følge satellitten. VSAT vil ligne på eksisterende terminalløsninger fra eksempelvis Starlink eller OneWeb. Båndbredden én vei (opplink eller nedlink) for VSAT vil typisk ligge mellom 50–2000 MHz.

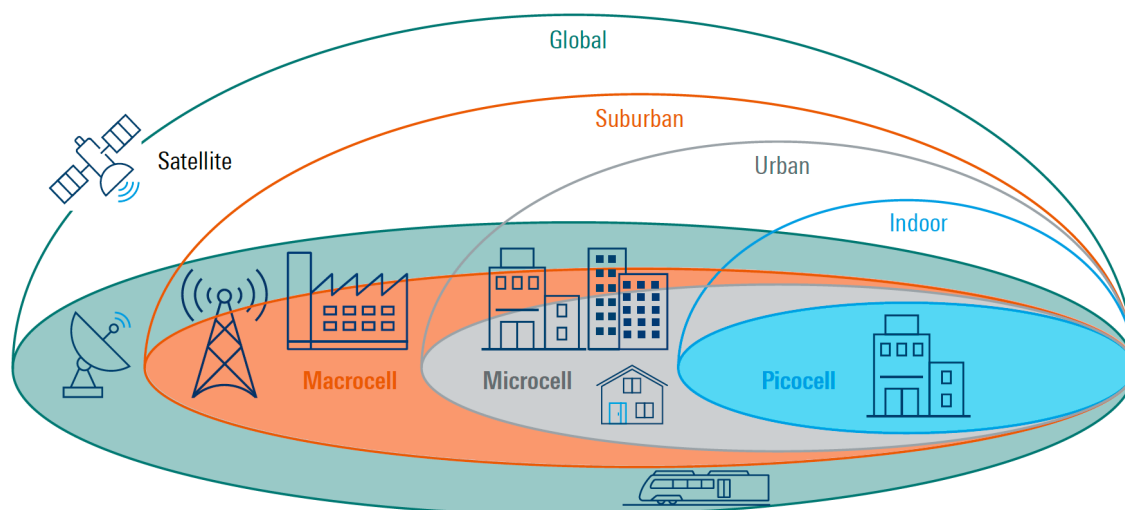
Tabell 3.6 oppsummerer noen av egenskapene til utvalgte typer brukerenheter. Maksimal utgangseffekt i frekvensområdet 1–3 GHz gjelder frekvensbåndene n256 og n255. Eksempelet på VSAT som er angitt i tabellen er en mobil terminal som kun kommuniserer med LEO-satellitter og bruker en elektronisk fasestyrt panelantenne.

Type brukerenhet	Frekvensområde	Maksimal utgangseffekt (TRP)	Antennegevinst	Maksimal sendeeffekt (EIRP)	Typisk båndbredde
Smarttelefon	1–3 GHz	26 dBm (0,4 W)	0 dBi	26 dBm	5–20 MHz
5G-modem eller IoT-enhet		31 dBm (1,26 W)	Avhengig av ekstern antenne	31 dBm + antennegevinst	
Mobil VSAT (LEO)	10–30 GHz	40 dBm (10 W)	Opptil 36,6 dBi (ved maks TRP)	76,6 dBm	50–2000 MHz

Tabell 3.6 Egenskaper til forskjellige typer brukerenheter som 3GPP har spesifisert for NTN-bruk [45].

3.4.2.5 Dekning

NTN vil kunne gi mobildekning overalt og vil være et supplement til bakkebasert mobildekning. NTN er mest aktuelt i områder uten bakkebasert mobildekning eller i tilfeller der bakkebasert infrastruktur er utilgjengelig på grunn av naturkatastrofer, strømrødd eller feil i nettverk. Bakkebasert mobildekning kommer fortsatt til å være relevant i bebodde områder siden det gir høyere overføringskapasitet og mye bedre innendørsdekning enn NTN. Figur 3.6 illustrerer sammensetningen av bakkebasert mobildekning og NTN-dekning levert fra en satellitt.



Figur 3.6 Illustrasjon av NTN-dekning levert fra en satellitt som supplement til bakkebasert mobildekning. Illustrasjonen er hentet fra [43].

Selv om satellittene er i høy fart rundt jorda, vil cellene (definert i kapittel 3.4.2.2) oppleves som statiske for brukerenheter på bakken. En geostasjonær (GEO) satellitt går i bane over ekvator slik at satellitten står på samme punkt på himmelen sett fra jorda. En GEO-satellitt kan lage en celle som dekker en stor del av jorden (teoretisk opptil 40%). En satellitt i LEO-bane vil dekke et mye mindre område enn en satellitt i GEO-bane. LEO-satellitten vil i tillegg være i bevegelse sett fra jorda. LEO-satellittene kan fortsatt levere dekning i statiske celler ved bruk av fasestyrte antenner og automatiserte overleveringer fra en satellitt til en annen. En LEO-satellitt vil da dekke et fastsatt område på bakken, altså en celle, i det satellitten flyr over dette området. Når satellitten har passert området, vil en ny satellitt automatisk ta over og forsette å gi dekning i cellen. En satellitt kan skape mange celler ved hjelp av fasestyrte antenner for å generere mange dekningsstråler. Det vil

kreve et relativt stort antall LEO-satellitter for å kunne gi overlappende dekning på bakken. For eksempel består Iridium av 66 LEO-satellitter i 781 km høyde, noe som er tilstrekkelig for å gi global dekning [47].

Når det gjelder Norge, så befinner de største områdene uten bakkebasert mobildekning seg i Nord-Norge, på Svalbard og på sjøen. NTN kan løse en del av kommunikasjonsutfordringene i disse områdene, men det er fortsatt uklart hvilke typer og antall satellitter som eventuelt kommer til å gi NTN-dekning i Norge eller hvor langt nord NTN-tjenester eventuelt kommer til å dekke. NTN-dekning er i prinsippet ikke forskjellig fra vanlig satellittdekning, og det finnes flere ulike satellittjenester som er tilgjengelige i nordlige områder og havet i dag. Om NTN-dekning kommer til Norge, hvilke satellittsystemer det eventuelt blir implementert på og hvilke områder som får NTN-dekning vil bli styrt av behovet i markedet, tilnærming til norske mobiloperatører, samarbeid med satellittleverandører og koordinering og kravstilling fra norske myndigheter.

3.4.2.6 Overføringskapasitet

Overføringskapasiteten som en sluttbruker kan forvente å få gjennom NTN, er avhengig av både brukerenheten og satellittsystemet. Brukerenhetene vil ha ulik størrelse, frekvensområde, sendeeffekt, båndbredde og strømforbruk. På grunn av relativt lav sendeeffekt vil bredbåndtjenester gjennom satellitt være noe begrenset for en smarttelefon. Derimot vil VSAT, som har relativt høy sendeeffekt, kunne utnytte betydelig større båndbredde og oppnå høyere overføringskapasitet enn en smarttelefon. Egenskapene til satellittsystemene, slik som banehøyden, sendeeffekten og antennegevinsten vil også påvirke overføringskapasiteten. Brukerens tilgjengelige overføringskapasitet vil også være avhengig av antall aktive brukere i et gitt dekningsområde (celle), fordi båndbredden og den tilgjengelige sendeeffekten til satellitten deles av alle brukerne i den aktuelle cellen, noe som kan føre til redusert overføringskapasitet per bruker.

3GPP setter mål for forventet overføringskapasitet som NTN bør kunne klare å oppnå på forskjellige bruksområder. Forskjellige bruksområder kan realiseres med ulike typer brukerenheter og satellittsystemer. Målsettingen for overføringskapasiteten er angitt i tabell 3.7.

Bruksområde	Overføringskapasitet i nedlink	Overføringskapasitet i opplink
Fotgjenger	1 Mbps	0,1 Mbps
Nødkommunikasjon	3,5 Mbps	3,5 Mbps
Kjøretøy	50 Mbps	25 Mbps
Fly	360 Mbps	180 Mbps
Stasjonær	50 Mbps	25 Mbps
Videoovervåkning	0,5 Mbps	3 Mbps
NB-IoT	2 kbps	10 kbps

Tabell 3.7 3GPP sin målsetting for overføringskapasitet gjennom NTN [48].

Vi har utført beregninger for finne ut hvor realistisk disse forventede overføringskapasitetene er og hvordan det i så fall er mulig å oppnå det. Beregningene gjelder en typisk smarttelefon

som kommuniserer med en satellitt som går i lav bane (LEO) og leverer 5G-NTN med en fullstendig basestasjon integrert i satellitten. Dette betyr at prosesseringen og konverteringen mellom digitale datapakker og 5G-radiosignal gjøres i satellitten (ikke på bakkestasjonen), som igjen betyr at beregningene gjelder én vei for enten nedlink (satellitt til brukerenhet) eller opplink (brukerenhet til satellitt). En dekningsstråle fra satellitten lager en celle på bakken som gir dekning i et bestemt fysisk område. En satellitt kan ha mange dekningsstråler. Antennegevinsten på satellitten og cellestørrelsen henger sammen. En høyere antennegevinst gir mindre cellestørrelse, men høyere ytelse for radiokommunikasjon. Vi har valgt å basere beregningene våre på både en cellestørrelse på 70 km, som er typisk på OneWeb-satellitter, og en cellestørrelse på 17,5 km, som er mulig med dagens Starlink-satellitter. Smarttelefonen antas å være den eneste brukerenheten i cellen, slik at overføringskapasiteten ikke er delt med andre brukerenheter. Når det gjelder 5G-radiokommunikasjon, har vi valgt å bruke NTN-frekvensbåndet n256 (1980–2010 MHz i opplink og 2170–2200 MHz i nedlink).

Tabell 3.8 oppsummerer beregnet overføringskapasitet i nedlink og opplink for de to cellestørrelsene vi valgte. Beregningene gjelder for en båndbredde på 10 MHz (én vei). Beregningene viser at 3GPP sin målsetning om 0,1 Mbps fra og 1 Mbps til en fotgjenger er realiserbart, selv med en cellestørrelse på 70 km. Nærmere beskrivelse av beregningene og parameterverdiene som ble brukt, er angitt i vedlegg D.

Cellestørrelse til satellitt	Overføringskapasitet i nedlink	Overføringskapasitet i opplink
70 km (EIRP 56,2 dBm)	1,9 Mbps	0,3 Mbps
17,5 km (EIRP 73,7 dBm)	13,3 Mbps	4,6 Mbps

Tabell 3.8 Beregnet overføringskapasitet som en typisk smarttelefon koblet til en LEO-satellitt kan forvente å få gjennom 5G-NTN.

Overføringskapasitet til en typisk VSAT vil være tilsvarende det som er mulig å oppnå på dagens terminaler levert av satellittjenester som OneWeb eller Starlink. Overføringskapasiteten til disse ligger typisk rundt 10–20 Mbps i opplink og rundt 100–500 Mbps i nedlink.

3.5 Militær mobildekning basert på direkte kommunikasjon mellom brukerenheter (sidelink)

Direkte kommunikasjon mellom brukerenheter, kalt *sidelink*, gjør det mulig for brukerenheter som smarttelefoner, modemer, sensorer eller droner å kommunisere direkte med hverandre uten mobildekning fra en basestasjon. Brukerenheter kan kommunisere med hverandre lokalt ved bruk av 5G-radiokommunikasjon (NR) uavhengig av radioaksessnett, transportnett og kjernenett, det vil si uten den stasjonære infrastrukturen i et mobilnett. Dette vil kunne gi lokal autonomi og redusere forsinkelser siden datatrafikken ikke trenger å gå gjennom et sentralt kjernenett. Lokal militær mobildekning realisert gjennom sidelink mellom to eller flere brukerenheter utenfor annen statisk infrastruktur kan være en aktuell løsning for taktisk kommunikasjon.

Sidelink kan også brukes som et nettverksrelé, der en brukerenhet utenfor dekning fra en basestasjon

kan få tilgang til denne dekningen via andre brukerenheter. Dette kan utvide dekningsområdet til eksisterende mobildekning fra for eksempel 5G militær nettverksskive.

Direkte kommunikasjon mellom brukerenheter ble studert av 3GPP for 4G allerede i 2011 til Release 12 og har blitt kontinuerlig videreutviklet siden da. Med Release 16 ble direkte kommunikasjon mellom brukerenheter introdusert i 5G under det nåværende navnet *5G-sidelink* [49].

Nytt nødnett [50] og annen kritisk kommunikasjon er mulige bruksområder for 5G-sidelink. Qualcomm har allerede demonstrert en praktisk implementering av *push-to-talk*-applikasjoner over 5G-sidelink [51], og jobber videre med å utvikle en markedsrettet løsning for både nødkommunikasjon og militær bruk [52]. Den første implementasjonen er basert på en modul som kobles til en smarttelefon eller et 5G-modem, og forventes å kunne bli tilgjengelig fra 2028.

Selv om 3GPP-standardiseringen av 5G-sidelink allerede har kommet langt, finnes det ingen kommersielle løsninger på markedet per i dag. Hele realiseringen av sidelink i 5G (og etter hvert 6G) avhenger av at markedet har nok etterspørsel til å gjøre det kommersielt lønnsomt for produsenter. Det er derfor viktig at potensielle brukere, som Forsvaret, viser interesse for løsningen overfor produsentene. Vi mener at velfungerende direkte kommunikasjon mellom brukerenheter er svært relevant for militær bruk. Videre i kapittelet beskriver vi militær relevans og tekniske muligheter av 5G-sidelink.

3.5.1 Relevans

Sidelink muliggjør direkte kommunikasjon mellom brukerenheter uten at brukerenhetene nødvendigvis har en forbindelse til infrastrukturen i mobilnettet. Sidelink kan gi kommunikasjon i områder uten mobildekning eller brukes til å forlenge eksisterende mobildekning. 3GPP beskriver følgende bruksområder der 5G-sidelink kan være nyttig [48, 53]:

- kjøretøy-til-alt⁹ (*Vehicle-to-Everything*, V2X) for å øke situasjonsforståelsen, redusere responstid og assistere, fjernstyre og automatisere (selv)kjøring
- tingenes internett (IoT) for å utvide kommunikasjonsmuligheter til små fysiske enheter som smartklokker, enheter til smarthus, industrielle maskiner eller sporingsbrikker på logistikkvarer
- kritisk kommunikasjon til nødetatene for å redusere avhengigheten av statisk infrastruktur, øke redundansen og utvide dekningsområdet

Direkte kommunikasjon mellom brukerenheter er veldig aktuelt for Forsvaret og kan dekke mange behov. 5G-sidelink mellom smarttelefoner vil kunne gi en kapabilitet som ligner på den Forsvaret får fra tradisjonelle militære håndholdte radioer. FFI har beskrevet hvordan et nettverksoppsett med 5G-sidelink kan brukes med stridsledelsessystemet ATAK [55]. 5G-sidelink kan også implementeres i 5G-modemer slik at to taktiske noder som støtter sidelink kan kommunisere direkte gjennom 5G-radiokommunikasjon. Direkte kommunikasjon med 5G-sidelink kan også brukes av diverse sensorer eller ubemannede kjøretøy, slik som droner som skal samarbeide i en sverm. Flere brukerenheter kan også kobles sammen i et *mesh*-nettverk.

⁹Mye av 3GPP-standardisering innen 5G-sidelink er motivert av V2X [54], en funksjonalitet som skal kunne koble sammen kjøretøy med alt som finnes rundt dem, som for eksempel andre kjøretøy, transportinfrastruktur, fotgjengere eller mobilnett.

Direkte kommunikasjon mellom brukerenheter er spesielt nyttig der mobildekning fra 5G militær nettverksskive eller MDF ikke finnes eller er satt ut av drift på grunn av for eksempel naturkatastrofer, nettverksfeil eller fiendtlig aktivitet som jamming. Kommunikasjon uten basestasjon kan også være vanskelig å oppdage på grunn av lav sendeeffekt. Reléfunksjonalitet i 5G-sidelink kan gi mobildekning til brukerenheter som ligger rett utenfor dekningsområdet til 5G militær nettverksskive eller MDF.

I tillegg til mobilkommunikasjon, kan 5G-sidelink også levere en posisjoneringstjeneste som supplement eller erstatning til posisjonering fra GNSS. Dette vil bli beskrevet nærmere i kapittel 4.5.4.

3.5.2 Teknisk beskrivelse

Dette kapittelet beskriver tekniske aspekter og utfordringer ved 5G-sidelink.

3.5.2.1 Arkitektur

Det finnes flere mulige nettverksoppsett som kan realiseres med 5G-sidelink. 3GPP har studert nettverksarkitekturer til et mobilnett som inneholder 5G-sidelink [56, 57]. Det er hovedsakelig tre mulige nettverksoppsett:

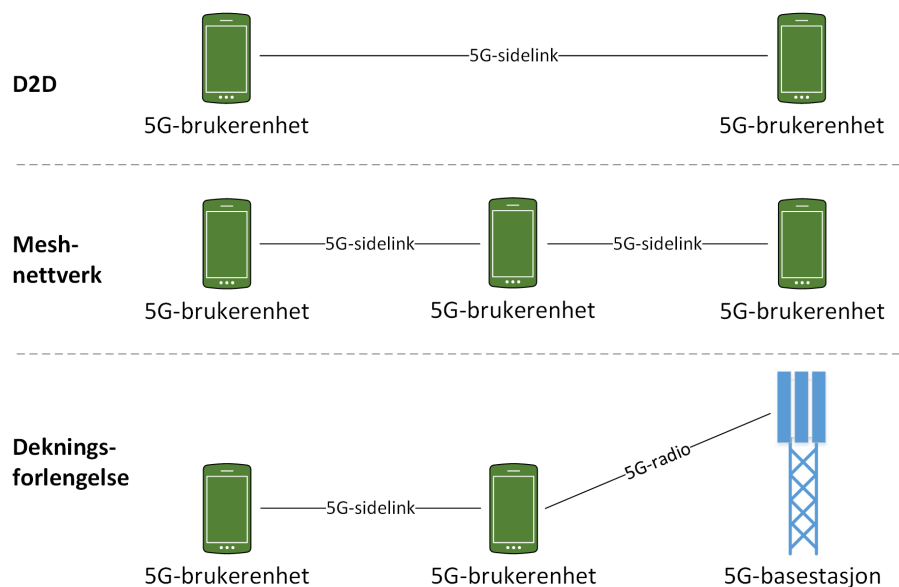
- direkte kommunikasjon mellom to brukerenheter uten basestasjon (*Device-to-Device*, D2D)
- direkte kommunikasjon mellom flere brukerenheter uten basestasjon, der brukerenheter kan fungere som relé og danne et mesh-nettverk
- direkte kommunikasjon mellom to brukerenheter, der en av brukerenhetene er koblet til en basestasjon og fungerer som en relé for at 5G-sidelink skal kunne styres av mobilnettet og mobildekningen kan forlenges

I det sistnevnte oppsettet kan en brukerenhet som er utenfor dekningsområdet til et mobilnett, få tilgang til dekningen fra dette mobilnettet gjennom en annen brukerenhet (relé) samtidig som brukerenhetene kan kommunisere med hverandre direkte. De tre nettverksarkitekturene med 5G-sidelink er skissert i figur 3.7.

I et mesh-nettverk støtter 5G-sidelink både kommunikasjon mellom to brukerenheter (unikast), kommunikasjon fra én brukerenhet til alle (kringkasting) og kommunikasjon fra én brukerenhet til flere tilkoblede brukerenheter (multikast) [58]. Antallet direkte sidelink-forbindelser som én brukerenhet kan ha samtidig, er en systemparameter, men det anbefales per i dag ikke mer enn åtte forbindelser [59]. En brukerenhet kan også kommunisere med en annen brukerenhet gjennom andre brukerenheter som fungerer som reléer. Ifølge tekniske spesifikasjoner frem til Release 18, støtter 5G-sidelink bare ett enkelt hopp i et mesh-nettverk eller dekningsforlengelsesscenario. Men 3GPP har også definert scenarier med opptil 15 hopp [48]. Dermed er det sannsynlig at en implementasjon som støtter flere hopp vil bli spesifisert i kommende releaser.

3.5.2.2 Tekniske utfordringer

Mobilkommunikasjon er hovedsakelig standardisert og optimalisert for en cellebasert radioinfrastruktur, der basestasjonen fungerer som et sentralt tilkoblingspunkt som administrerer og styrer alle



Figur 3.7 Skisse av mulige nettverksoppsett med 5G-sidelink. Det øverste oppsettet illustrerer direkte kommunikasjon mellom to brukerenheter (D2D), det midterste oppsettet illustrerer direkte kommunikasjon mellom flere brukerenheter (mesh-nettverk), det nederste oppsettet illustrerer direkte kommunikasjon mellom to brukerenheter og mobilnett (dekningsforlengelse).

forbindelser. Det at en brukerenhet vil koble seg direkte til en annen brukerenhet via 5G-sidelink, krever justeringer og tilpasninger i 3GPP-standard. På fysisk lag gjenbraker 5G-sidelink de fleste konsepter og teknikker fra 5G-radiogrensesnittet NR, som numerologi, frekvensbånd, kanalstruktur, modulasjon og koding og romlig multipleksing (opptil 2×2 MIMO [60]). Selv om 5G-sidelink bygger på vanlig 5G-radio, må standarden utvides betydelig. Vi presenterer noen av utfordringene som følger med direkte kommunikasjon mellom brukerenheter, og omtaler tiltak 3GPP har innført eller vurderer å innføre for å overkomme disse.

Radioressurstildeling er en utfordring i 5G-sidelink. 3GPP har derfor spesifisert to forskjellige moduser for radioressurstildeling [58]. Hvis brukerenheter har en tilkobling til basestasjonen via vanlig 5G-radio, kan basestasjonen styre radioressurstildeling. Hvis brukerenheter ikke er tilkoblet en basestasjon, må brukerenhetene tildele radioressursene selv. I dette tilfellet vil en brukerenhet først lytte på hvilke frekvenskanaler som er ledige, og deretter velge en ledig frekvenskanal tilfeldig. Det tilfeldige valget av frekvenskanaler kan bli et problem med mange brukere, siden sannsynligheten for at flere brukere velger de samme frekvenskanalene samtidig øker, noe som kan skape interferens. For å minimere tiden og energien som kreves for å velge ut frekvenskanaler, kan de utvalgte frekvenskanalene reserveres for en bestemt tidsperiode. Det er også mulig at brukerenheter utveksler anbefalinger om tilgjengelige frekvenskanaler.

For en effektiv og fungerende radiokommunikasjon er det avgjørende å definere overføringen av data og kontrollinformasjon gjennom sidelink. 3GPP sin definisjon av kanalstrukturen og signaler i 5G-sidelink er basert på en vanlig OFDM-bølgeform¹⁰ som består av ressursblokker og tidsluker

¹⁰Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) er beskrevet i FFI-rapport [5].

(12 eller 14 OFDM-symboler). I 5G-sidelink ble det introdusert nye kanaler på det fysiske laget. Sammen med synkroniseringssignaler kringkastes det informasjon om sidelink-konfigurasjonen i såkalt *Physical Sidelink Broadcast Channel*. Data blir overført i såkalt *Physical Sidelink Shared Channel*. Sidelink-kontrollinformasjon, inkludert radioressurstildeling i datakanalen, sendes over *Physical Sidelink Control Channel*. I 5G-sidelink har 3GPP også innført en valgfri kanal, kalt *Physical Sidelink Feedback Channel*, som kan gi tilbakemeldinger om mottak av data slik at eventuelle retransmisjoner kan tilpasses.

En annen utfordring med sidelink er å oppdage andre brukerenheter i nærheten som støtter sidelink, og deretter etablere en forbindelse samt foreta autentisering. Derfor utveksler brukerenheter, som er tilgjengelige for sidelink-kommunikasjon, oppdagelsesmeldinger. Etter oppdagelsen sender brukerenheten en forespørsel om å etablere en sidelink-forbindelse til den andre brukerenheten. Den andre brukerenheten forsøker å etablere en sikker forbindelse og vil enten akseptere eller avslå tilkoblingen [61]. Brukerenheten identifiseres enten av 5G-kjernenettet [62] eller gjennom forhåndsdelte nøkler hvis de er utenfor mobildekning [63].

Synkronisering mellom brukerenheter, med andre ord felles referanseklokke, er avgjørende for å bestemme de riktige tidspunktene for å sende og motta signaler via sidelink. For å adressere dette har 3GPP definert mulighetene for synkronisering gjennom GNSS, basestasjon, andre brukerenheter, eller enhetens egen klokke [58].

Det ligger også noen utfordringer på applikasjonslaget. I de tilfellene man kommuniserer gjennom D2D eller mesh-nettverk, må tjenestene som ligger på brukerenheter også være tilpasset å kunne fungere uten en ekstern server, gjerne basert på unikast, multikast eller kringkasting.

3.5.2.3 Frekvensbånd

Generelt kan 5G-sidelink brukes i alle 3GPP-definerte frekvensbånd, både i frekvensområde 1 (FR1, 410–7125 MHz) [26] og frekvensområde 2 (FR2, 24,25–71 GHz) [31]. Som beskrevet i kapittel 3.4.2.3, er det opp til mobiloperatører, produsenter, nasjonale og internasjonale myndigheter å avgjøre hvilket frekvensbånd som kan brukes til 5G-sidelink i hvilken geografisk region.

3GPP kommer med en fortløpende liste over forslag til frekvensbånd, som sannsynligvis vil bli utvidet med nye forslag over tid. Tabell 3.9 oppsummerer frekvensbåndene som er spesifisert av 3GPP per i dag [26]. Dette omfatter for tiden bare frekvensbånd fra FR1, men kan over tid bli utvidet til å omfatte frekvensbånd fra FR2. I tillegg til lisensierte frekvensbånd omfatter listen også frekvensbånd fra det ulisensierte spekteret. Lisensierte frekvensbånd er som regel eid av mobiloperatøren. Mobiloperatøren har god kontroll over eget radioaksessnett og koordinerer frekvensbruk med andre mobiloperatører, noe som fører til pålitelig kommunikasjon med minimal interferens. Ulisensierte frekvensbånd er åpne for alle, men medfører visse forbehold for å ha kontroll over og redusere interferens mellom mange brukerenheter. I henhold til 3GPP-spesifikasjonen tilbyr det ulisensierte spekteret større båndbredde, men lavere tillatt sendeeffekt enn det lisensierte spekteret. Som vi har vært inne på tidligere i denne rapporten vil ulike båndbredder og sendeeffekter naturlig nok påvirke både overføringskapasiteten og rekkevidden.

	Frekvensbånd	Frekvensområde	Båndbredde	Maks sendeeffekt
Lisensiert	n14	788–798 MHz	5–10 MHz	31 dBm
	n38	2570–2620 MHz	10–40 MHz	23 dBm
	n47	5855–5925 MHz	10–40 MHz	26 dBm
	n79	4400–5000 MHz	10–40 MHz	23 dBm
Ulisensiert	n46	5150–5925 MHz	20–100 MHz	20 dBm
	n96	5925–7125 MHz	20–100 MHz	20 dBm
	n102	5925–6425 MHz	20–100 MHz	20 dBm

Tabell 3.9 3GPP-spesifiserte frekvensbånd i FR1 for 5G-sidelink [26].

3.5.2.4 Brukerenheter

Brukerenheter med støtte for 5G-sidelink er ikke kommersielt tilgjengelige per i dag, men Qualcomm utvikler en løsning der de første produktene kan bli tilgjengelige fra 2028 [52]. For at en smarttelefon skal få en integrert støtte for sidelink, kreves det tilpasninger i de innebygde 5G-modulene. Men tilpasningene virker overkommelige og vil stort sett gjelde programvare og signalprosessering. Det vil også være mulig å koble til en ekstern modul som gir støtte for 5G-sidelink. Modulen kan kobles til en smarttelefon (med for eksempel USB-C) eller 5G-modem (for eksempel M.2).

Smarttelefoner og IoT-enheter har vanligvis en relativt lav utgangseffekt og rundstrålende antenner uten betydelig antennegevinst. Med en ekstern modul eller 5G-modem med integrert støtte for 5G-sidelink kan det forventes en mulighet for eksterne antenner som gir noe antennegevinst.

3.5.2.5 Dekning

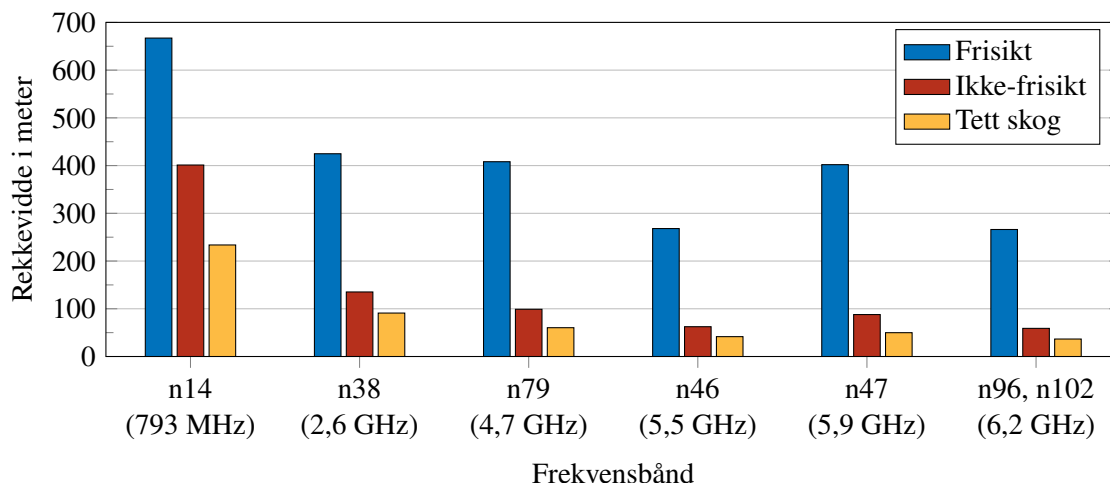
5G-sidelink kan brukes som støtte eller alternativ til bakkebasert mobildekning. Hvis minst én brukerenhet har tilgang til en basestasjon, kan sidelink brukes som en forlengelse av mobildekning for andre brukerenheter via reléfunksjonen. Men den store fordelen med sidelink er evnen til å kommunisere helt uten 5G-dekning fra basestasjoner. Dette er mest aktuelt i områder uten bakkebasert (eller satellittbasert) mobildekning, eller i tilfeller der mobildekningen har falt bort på grunn av utilsiktede hendelser som naturkatastrofer, strømbrudd eller nettverksfeil samt tilsiktede hendelser utført av trusselaktører.

Når det gjelder Norge, så er de største områdene uten bakkebasert mobildekning i Nord-Norge, Svalbard og på sjøen. 5G-sidelink kan løse en del av kommunikasjonsutfordringene i disse områdene ved å muliggjøre direkte kommunikasjon mellom brukerenheter i nærområdet, men det vil ikke gi tilgang til sentraliserte tjenester som for eksempel avhenger av FKI.

Rekkevidde mellom to brukerenheter på 5G-sidelink er avhengig av scenariet og valgte systemparametre. Terreng, topografi, vegetasjon, bygninger og tilgjengelig friskt påvirker rekkevidden betydelig. Viktige systemparametre inkluderer frekvensbånd, mellombæreravstand, sendeeffekt,

modulasjon, koderate og antall retransmisjoner. Det mangler fortsatt praktiske målinger på 5G-sidelink, men i [64] estimerer en simulering at rekkevidden for 5G-sidelink kan variere mellom 100 og 2500 m, avhengig av omgivelsene og systemparametrene.

Vi utførte egne beregninger for forventet rekkevidde mellom to brukerenheter som kommuniserer direkte uten basestasjon. Beregningene gjelder ulike typer terreng og er beskrevet i vedlegg G. Resultatene er oppsummert i figur 3.8.



Figur 3.8 Beregnet estimert rekkevidde for 5G-sidelink (D2D) i frisikt, ikke-frisikt og tett skog på aktuelle frekvensbånd.

Med frisikt kan man forvente en rekkevidde på flere hundre meter, mens uten frisikt og spesielt i en tett skog kan rekkevidden forventes å ligge på noen titalls til noen få hundre meter avhengig av frekvensbånd.

3.5.2.6 Overføringskapasitet

Overføringskapasiteten som én bruker kan forvente å få gjennom 5G-sidelink, er avhengig av type brukerenheter, avstand mellom dem og valgte systemparametre. Overføringskapasiteten vil avhenge av frekvensbånd, båndbredde og sendeeffekt. Systemparametrene som påvirker overføringskapasiteten inkluderer carrier aggregation, romlig multipleksing (MIMO), modulasjon, koderate, tilgjengelige ressursblokker, retransmisjoner og overhead. Kapasiteten påvirkes også av antallet aktive brukere i et område som deler de samme sidelink-radioressursene.

3GPP setter mål for forventet overføringskapasitet som 5G-sidelink bør kunne klare å oppnå for forskjellige bruksområder. Målsettingen for overføringskapasiteten er gitt i tabell 3.10.

Bruksområdet for nødkommunikasjon dekker godt et bruksområde som er aktuelt for militær bruk. I dette bruksområdet er kravene for overføringskapasitet definert med hensikt å kunne støtte tale, videosamtaler og andre tjenester som utveksler data som bygger situasjonsforståelse.

Vi utførte egne beregninger for forventet overføringskapasitet mellom to brukerenheter (D2D), basert på båndbreddeverdier som varierer fra 5 til 100 MHz (se tabell 3.9). Beregningene er

Bruksområde		Overføringskapasitet		Hopp	
		Nedlink	Opplink	Typisk avstand	Maks antall
Deknings- forlengelse	Multimedia	1 Gbps	500 Mbps	10 m	3
	Nødkommunikasjon	12 Mbps	12 Mbps	50 m	4
	Bærbare enheter	10 Mbps	10 Mbps	10 m	2
	Smart måling	$\frac{100 \text{ byte}}{15 \text{ min}}$	$\frac{100 \text{ byte}}{15 \text{ min}}$	100 m	5
	Godsvogner	$\frac{100 \text{ byte}}{15 \text{ min}}$	$\frac{100 \text{ byte}}{15 \text{ min}}$	100 m	15
Mesh-nettverk	Nødkommunikasjon	12 Mbps	12 Mbps	50 m	6

Tabell 3.10 3GPP sin målsetting for overføringskapasitet for en gitt typisk avstand mellom hopp og maksimalt antall hopp mellom flere brukerenheter i ulike bruksområder for 5G-sidelink [48].

beskrevet i vedlegg H. Beregningene viser at den teoretiske maksimale overføringskapasiteten via 5G-sidelink kan ligge på omtrent 1 Gbps ved 100 MHz båndbredde, noe som tilsvarer det maksimale 3GPP-kravet for multimedia-strømming (f.eks. høyoppløselige TV-er, VR-briller). For direkte kommunikasjon mellom to smarttelefoner i nødkommunikasjon er det avgjørende med energieffektiv og robust kommunikasjon som gir lang rekkevidde og støtte for flere brukere ved tjenester med lavt databehov. Slike egenskaper fremmes av bruk av lav båndbredde. Derfor antar vi at båndbredden i nødkommunikasjon vil ligge mellom 5 og 20 MHz. Våre beregninger viser at overføringskapasiteten ved minste båndbredde (5 MHz) varierer mellom 400 kbps og 50 Mbps, avhengig av kvaliteten på kanalen (det vil si varierende avstand eller hindringer mellom brukerenheter). Dette viser at 5G-sidelink teoretisk sett kan oppfylle 3GPP sin målsetting for nødkommunikasjon, som ligger på 12 Mbps.

4 Utvalgt 5G-funksjonalitet for militær mobildekning

3GPP definerer stadig nye ulike teknologier, funksjoner, egenskaper eller mekanismer som bidrar til utvikling av mobilnettene. Vi bruker begrepet *funksjonalitet* til å beskrive en (eller summen av flere) teknologi, funksjon, egenskap eller mekanisme som allerede er eller antakelig blir en del av 3GPP-standarder.

I kapittel 3 presenterte vi løsninger som kan skape militær mobildekning. Dette kapittelet presenterer fem utvalgte nye funksjonaliteter som kan være relevante å innføre i disse løsningene. Det finnes flere nye 5G-funksjonaliteter (eller gamle 4G-funksjonaliteter som ikke ble realisert) som vi valgte å utelukke på grunn av mindre relevans for Forsvaret eller lav sannsynlighet for at produkter når det norske markedet i nærmeste framtid.

Kapittel 4.1 beskriver 5G-radiokommunikasjon på høye frekvenser i det såkalte millimeterbølgeområdet. Kapittel 4.2 presenterer ny 5G-funksjonalitet kalt RedCap. Kapittel 4.3 omtaler muligheter med 5G LAN og Ethernet-tjeneste. Kapittel 4.4 presenterer *edge computing* og hvordan det kan støtte løsninger for militær mobildekning. Kapittel 4.5 beskriver dagens funksjonalitet som brukes i kommersielle mobilnett, og ny funksjonalitet som eventuelt kan brukes av fremtidige løsninger for militær mobildekning, for å finne posisjon til en brukerenhet ved hjelp av mobilteknologi.

4.1 5G på millimeterbølge

Med lanseringen av 5G i Release 15 ble det introdusert et nytt frekvensområde, frekvensområde 2 (FR2), som strekker seg fra 24 GHz til 71 GHz [31]. Frekvensområdet ble også kalt *millimeterbølge* med en engelsk forkortelse *mmWave*. Sammenlignet med frekvensbånd under 7 GHz (FR1) som brukes i 4G og som er utbredt i 5G, tilbyr de høyere frekvensene betydelig større båndbredde og dermed høyere overføringskapasitet, men fører også til høyere signaltap, noe som gir kortere rekkevidde. Den korte bølgelengden gjør det mulig å bruke kompakte antenner med mange fasestyrte antenneelementer, noe som er nødvendig for å kunne utnytte *massive MIMO*-teknologi¹¹. Denne teknologien muliggjør bruk av *beamforming*, noe som kompenserer for høyt signaltap. 5G på millimeterbølge er spesielt egnet for lokal kapasitetsøkning i områder med mange brukere og behov for mye datatrafikk, som under konserter, i bykjerne eller i industrielle miljøer.

En brukerenhet med 5G på millimeterbølge kan benytte relativt høy båndbredde som kan ligge på opptil 2000 MHz [31]. Dette muliggjør overføringskapasitet på opptil flere Gbps i nedlink og flere hundre Mbps i opplink. Fasestyring av mange antenneelementer og avansert signalbehandling fører imidlertid til økt kompleksitet i maskinvaren og høyere strømforbruk sammenlignet med 5G-radioutstyr som opererer under 7 GHz.

5G-basestasjoner må være utstyrt med antenner som støtter millimeterbølger og kan kombinere frekvensbånd i både FR1 og FR2 for å oppnå bedre ytelse og dekning. Det er også mulig å

¹¹Massive MIMO er beskrevet i FFI-rapport [5].

aktivere frekvensbånd på millimeterbølge dynamisk etter behov. Maksimal praktisk rekkevidde på 5G-radiokommunikasjon på millimeterbølge forventes å ligge på rundt 7 km. Kommunikasjonen i dette frekvensområdet er meget sensitiv til allslags hindringer mellom basestasjon og brukerenhet (terreng, skog, vær, kropp) og kan ansees som en løsning som hovedsakelig fungerer i friskt.

Det finnes allerede mobiltelefoner og basestasjoner på markedet som støtter 5G med millimeterbølge, men foreløpig er det kun noen få land – som USA og Japan – hvor mobiloperatører tilbyr denne funksjonaliteten kommersielt. 5G-basestasjoner på millimeterbølge installeres vanligvis i områder med høy befolkningstetthet, som bykjerner, kjøpesentre og store arenaer. I Norge tilbyr ingen av mobiloperatørene 5G på millimeterbølge kommersielt ennå. Det pågår imidlertid testing for å bruke 5G på millimeterbølge som trådløs bredbåndsløsning [65, 66].

Det er flere fordeler med 5G på millimeterbølge som kan være godt egnet for spesifikke militære bruksområder. På grunn av relativt høy frekvens og beamforming er synligheten i det elektromagnetiske spektrumet noe redusert. Radiokommunikasjon på høyere frekvenser kan være vanskeligere å jamme på grunn av direktivitet i radiokommunikasjon og høyt signaltap, noe som betyr at jammeren må være relativt nærme dekningsområdet. 5G på millimeterbølge kan være nyttig der det er behov for lokal kommunikasjon med høy overføringskapasitet. Sammenlignet med tradisjonell radiolinje, har 5G på millimeterbølge kortere rekkevidde, men gir høyere mobilitet siden brukerenheten kan være i bevegelse i dekningsområdet til basestasjonen. Basestasjoner på 5G militær nettverksskive, MDF eller militært autonomt 5G-nett kan benytte antenner som støtter millimeterbølge.

4.2 RedCap

RedCap står for *Reduced Capability* og beskriver en type brukerenhet som har redusert funksjonalitet sammenlignet med et vanlig 5G-modem for mobilt bredbånd. Likevel har et RedCap-modem bedre ytelse enn en vanlig IoT-enhet som opererer på NB-IoT. RedCap er en del av 5G-standarden og ble for første gang spesifisert av 3GPP i Release 17. Et RedCap-modem er ment til å være enklere og billigere enn et vanlig 5G-modem, men skal fortsatt klare å levere nok overføringskapasitet for blant annet industrielle sensorer, videoovervåkning og smartklokker [67].

En brukerenhet med RedCap-egenskaper får redusert kompleksitet ved å bruke få antenner (maks én i opplink, det vil si ingen MIMO, og to i nedlink, det vil si 2×2 MIMO), lav båndbredde (maks 20 MHz i FR1 og 100 MHz i FR2) og noe lavere modulasjon (maks 64QAM) [68]. Dette fører til redusert behov for prosesseringskapasitet, noe som igjen gir noe lavere strømforbruk. Et RedCap-modem med båndbredde på 20 MHz vil typisk klare å levere overføringskapasitet rundt 120 Mbps i nedlink og 20 Mbps i opplink.

Basestasjoner som har høyere båndbredde enn det et RedCap-modem har, må ha en spesialkonfigurasjon for å støtte RedCap. For eksempel kan en basestasjon som har båndbredde på 100 MHz dedikere en kanal på 20 MHz til RedCap innenfor denne kanalen av 100 MHz. Dette gjøres av en 5G-funksjonalitet som heter *Bandwidth Parts* (BWP). Både vanlig bredbånd og RedCap får egne BWP-er med ulike båndbredder. BWP for RedCap kan aktiveres dynamisk ved behov i det øyeblikket et RedCap-modem kobler seg på en basestasjon. Basestasjonen kringkaster instruksjoner (i SIB1) på hvordan RedCap-modemet skal koble seg til basestasjonen [69]. Basestasjoner som er satt opp med like høy båndbredde som et RedCap-modem støtter, krever ikke noen spesiell konfigurasjon.

RedCap-modemer er allerede tilgjengelig i markedet, og kommersielle basestasjoner har som regel muligheten til å støtte RedCap. FFI har et autonomt 5G-nett som brukes for testing og eksperimentering. Vi har satt opp, testet og verifisert at RedCap fungerer som forventet.

Det kan være nyttig med RedCap implementert i Forsvarets 5G militær nettverksskive. En taktisk brukerenhet med støtte for RedCap kan levere vanlig datatjeneste til sluttbrukeren. En slik RedCap-brukerenhet kan være en hensiktsmessig løsning med tanke på ytelse, strømforbruk og kostnader. På grunn av redusert kompleksitet kan RedCap også være en praktisk løsning for NTN.

4.3 5G LAN og Ethernet-tjeneste

I kravene til 5G er det fra Release 16 definert at 5G skal levere en tjeneste som tilsvarer lokalnett (*Local Area Networks*, LAN) eller virtuelle private nett (VPN). 3GPP kaller denne tjenesten *5G LAN-type service*, men den omtales ofte bare som 5G LAN. Et 5G LAN er et lukket virtuelt nett for et sett med brukerenheter der disse brukerenhetene kan nå hverandre og sende data seg i mellom uten at data må gå gjennom et eksternt nett. 5G LAN er ment å gi høy ytelse, tilgang over lang avstand, mobilitet og sikkerhet. [48]

Når brukerenheter kobler seg til mobilnettene, får de en IP-forbindelse. Denne forbindelsen støtter imidlertid ikke alle tjenester man har på et kablet eller trådløst (Wi-Fi) lokalnett, slik som multikast og kringkasting eller tidssynkronisering. Disse tjenestene leveres normalt over *Ethernet*, men dette benyttes ikke i mobilnett. For å kunne tilby disse typene tjenester har 3GPP innført støtte for Ethernet kalt *Ethernet PDU* fra Release 15 [48].

5G LAN og Ethernet PDU er tjenester som trolig ofte vil bli levert sammen slik at brukerne får et lukket lokalnett som støtter multikast og kringkasting.

5G LAN kan realiseres både i et landsdekkende mobilnett og i et privat 5G-nett. Som for annen funksjonalitet i mobilnettene er tjenesten avhengig av at det er forbindelse fra basestasjonene og inn til kjernenettet. Når 5G LAN realiseres i et landsdekkende mobilnett, kan kjernenettet befinne seg langt unna brukerenhetene. 5G LAN vil dermed ikke gi lokal autonomi i et landsdekkende mobilnett.

Det kan være aktuelt å benytte 5G LAN og Ethernet PDU for å gi dekning med lav forsinkelse til avgrensede områder som en fabrikk, et sykehus eller et havneanlegg [70]. 5G LAN med støtte for Ethernet kan da benyttes i stedet for kablet nettverk eller Wi-Fi. I disse tilfellene virker det mest aktuelt å etablere et privat 5G-nett med tilhørende lokale kjernenett, siden kort avstand fra basestasjoner til kjernenett og tjenester er nødvendig for å gi lav forsinkelse.

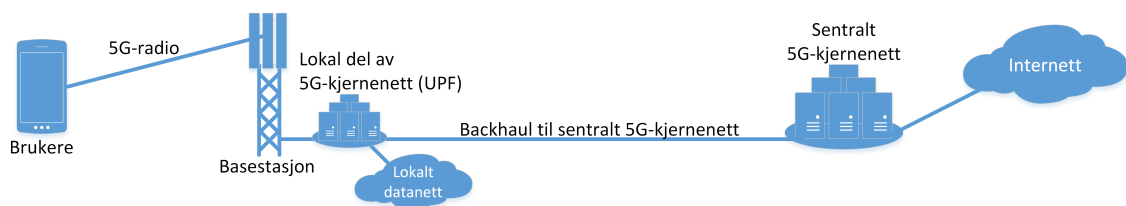
For Forsvaret vil 5G LAN realisert i en 5G militær nettverksskive kunne være nyttig for å la en gruppe brukerenheter kommunisere seg imellom gjennom mobilnett, uten å trenge å kommunisere via en server med tilhørende tjenester. Kommunikasjon mellom brukerenheter kan ha flere anvendelser som er aktuelle for Forsvaret. Dette kan for eksempel gjøre det mulig for en gruppe militære nettradioer å benytte 5G LAN til å utvide det geografiske området disse radioene dekker. 5G LAN kan også gjøre det mulig for rutere slik som Taktisk kommunikasjonsnode (TKN) å finne hverandre uavhengig av gatewayer ved hjelp av multicast som støttes av Ethernet.

Per i dag kjenner vi bare til et fåtall tilfeller der 5G LAN er tatt i bruk. De få kjente implementasjonene av 5G LAN ser ut til å være rettet mot private 5G-nett med liten geografisk utstrekning, det vil si lokalnett [71]. Det finnes noen få 5G-modem som støtter 5G LAN.

4.4 Støtte for edge computing

Som beskrevet i kapittel 2.1, går brukernes trafikk fra radioaksessnettet, via kjernenettet og til et eksternt datanettverk der tjenestene brukerne benytter befinner seg. Edge computing dreier seg om å levere tjenester i kanten av nettet, nær der brukerne befinner seg [72]. 3GPP har inkludert støtte for edge computing i 5G SA for å kunne redusere forsinkelse på dataoverføringen og for å kunne redusere kapasitetsbruken i transportnettene [25].

Figur 4.1 viser hvordan støtte for edge computing er definert i standardene til 3GPP. En bruker befinner seg her langt unna kjernenettet og Internett hvor tjenestene normalt befinner seg. En del av kjernenettet, kalt *User Plane Function* (UPF) etableres nær basestasjonen som brukeren får dekning fra. Denne UPF-en sender brukertrafikken til et lokalt datanett hvor tjenestene som skal være nær brukeren kjører fra.



Figur 4.1 Edge computing i et mobilnett. Brukerdata sendes til lokalt datanett.

I henhold til standarden etableres bare den delen av funksjonaliteten fra kjernenettet som er nødvendig for å styre brukertrafikken, altså UPF, lokalt. Øvrig funksjonalitet fra kjernenettet, slik som brukerdatabase etableres ikke i kanten av nettet, men befinner seg i et sentralt 5G-kjernenett. For at tjenesten skal fungere, forutsettes det som beskrevet tidligere i rapporten at det eksisterer en forbindelse inn til dette kjernenettet via backhaul. Edge computing vil dermed ikke gi lokal autonomi i et mobilnett.

3GPP inkluderte støtte for edge computing i sine spesifikasjoner fra og med Release 15 mens funksjonaliteten fortsetter å videreutvikles i senere releaser [23]. I Release 18 er det spesifisert tre alternative måter å realisere støtte for edge computing på i følge [73]:

1. Alle data fra en bruker sendes til et lokalt datanett. Dersom noe trafikk skal til Internett må det lokale datanettet sende trafikken dit. Dette er den enkleste måten å realisere edge computing i et 5G-nett.
2. Mobilnettet filtrerer ut trafikk som skal sendes til lokalt datanett mens øvrig trafikk sendes til sentralt kjernenett og Internett.
3. Brukerenheten styrer hvilken trafikk som skal sendes til lokalt datanett og hvilken trafikk som skal sendes til sentralt kjernenett og Internett. I dette tilfellet følger mobilnettet anvisningene fra brukerenheten. Dette er den mest kompliserte måten å realisere støtte for edge computing i et 5G-nett.

I tillegg til at et 5G-nett må støtte edge computing, må tjenestene kunne etableres nær brukerne, i tilknytning til lokalt datanett. ETSI¹² har laget spesifikasjoner for *Muliti-access Edge Computing* (MEC). MEC er et «system som tilbyr et IT-tjenestemiljø og skytjenester i kanten av et aksessnettverk [...] i umiddelbar nærhet av brukerne» [74]. MEC dreier seg altså om å kunne etablere og flytte skytjenester ut til i kanten av for eksempel et mobilnett. 3GPP og ETSI har samarbeidet om å definere sammenhengen mellom 5G og MEC [75].

For å utnytte edge computing er det også et poeng at selve tjenestene må være egnet til formålet. Dersom tjenesten innebærer å kommunisere med andre brukerenheter andre steder i landet, så hjelper det ikke med edge computing lokalt.

Fra diskusjonen over er det klart at edge computing i et landsdekkende mobilnett krever både at funksjonalitet fra kjernenettene og skytjenester eller datasentre etableres geografisk nær brukerne. Å etablere en slik infrastruktur mange steder i landet vil kreve store investeringer fra mobiloperatører og eventuelt leverandører av lokale datasentre. Per i dag ser det ikke ut til å være lønnsomt for mobiloperatørene å bygge ut støtte for edge computing i mobilnettene sine da det foreløpig ikke er identifisert noen tjenester som kan rettferdiggjøre disse investeringene.

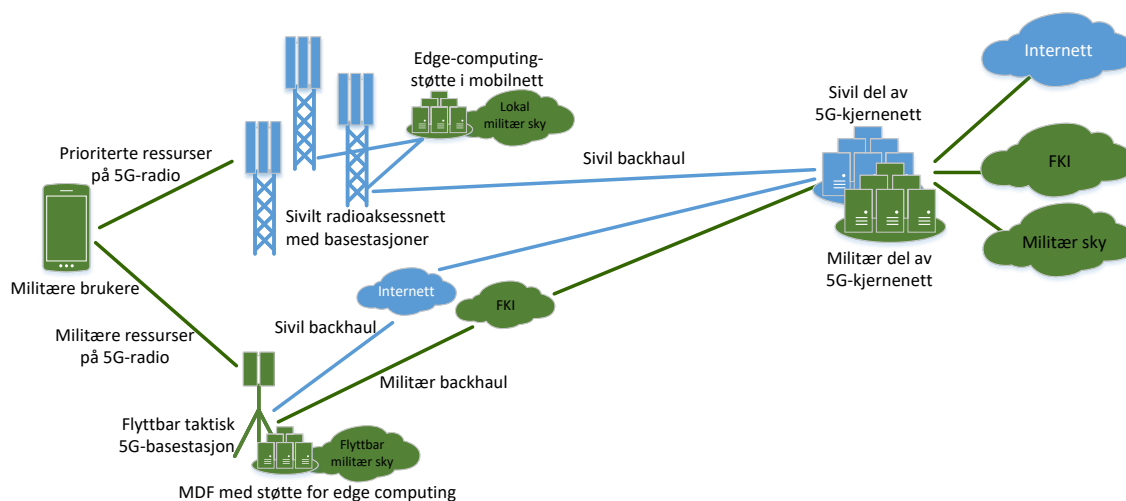
De første anvendelsene av edge computing i mobilnettene kan muligens komme hos industriaktører som ønsker å benytte mobildekning på sitt eget område og som ønsker at tjenestene plasseres lokalt for å oppnå lav forsinkelse eller ha kontroll på dataene sine selv. Dekningen kan leveres av det offentlige mobilnettet eller med dedikerte frekvenser og egen PLMN-identifikator. Det kan installeres en lokal del av kjernenettet med støtte for edge computing i bedriftens lokaler, noe som gir bedriftens brukerstyr tilgang til et lokalt datasenter. Noen implementasjoner av edge computing for industrien har vært offentliggjort der industriaktøren ønsker 5G-dekning i en fabrikk, på et havneanlegg eller lignende [76, 77], men foreløpig ser implementasjonene ut til å være på et pilot-stadium.

Som vi har beskrevet tidligere overføres alle data fra en MDF over backhaul-forbindelsen. Overføringskapasiteten er da avhengig av kapasiteten på denne backhaul-forbindelsen, som ofte kan være langt lavere enn kapasiteten på 5G-radiogrensesnittet. Ved å benytte edge computing vil backhaul-forbindelsen avlastes og lokale tjenester kan dermed overføre mer data. Figur 4.2 viser prinsippet for edge computing benyttet både i en 5G militær nettverksskive og sammen med MDF.

Støtte for edge computing i 5G-arkitekturen innebærer å flytte en UPF nærmere brukerne. Litt av det samme kan oppnås dersom mobiloperatørene har mange kjernenett og distribuerer disse ut over landet, samtidig som tjenestene brukerne benytter seg av etableres i de samme områdene. Da vil både tjenestene og kjernenettene befinne seg nærmere en del av brukerne. I tillegg til at forsinkelsen kan reduseres, vil et kjernenett distribuert ut over landet kunne gi en regional autonomi, det vil si at så lenge et kjernenett og tjenestene er tilgjengelige i en region vil tjenesten fungere, uavhengig av andre regioner.

Med et autonomt taktisk 5G-nett vil tjenestene som brukerne benytter måtte etableres lokalt der brukerne befinner seg. I dette tilfellet er det ikke nødvendig for 5G-nettet å realisere støtte for edge computing da fordelene med edge computing uansett vil oppnås.

¹²ETSI er en europeisk organisasjon som lager standarder for telekommunikasjon og er en del av 3GPP.



Figur 4.2 En skisse av edge computing integrert i en MDF og et mobilnett som støtter 5G militær nettverksskive.

4.5 Posisjonering gjennom mobilteknologi

I denne rapporten bruker vi begrepet posisjonering for å beskrive bestemmelse av geografisk posisjon til en brukerenhet. Brukeren kan logge sin posisjon over tid eller benytte posisjonsinformasjon til navigering. Mobilapplikasjoner bruker enhetenes posisjon til å levere diverse tjenester til sluttbrukeren (Google Maps, Strava osv.). Posisjonen kan også deles med andre brukere eller sentrale noder for å kunne spore egne ressurser, noe som med militær terminologi er kjent som blåprikk.

Vanligvis brukes et *Global Navigation Satellite System* (GNSS), slik som *Global Positioning System* (GPS) fra USA eller Galileo fra Europa, til å bestemme posisjonen til en brukerenhet. Selv om dette fungerer godt i mange tilfeller, kan brukerenheten også ta i bruk andre kilder for å finne eller øke nøyaktighet på posisjonsbestemmelsen. Slike kilder kan være mobilnett, Wi-Fi, Bluetooth, trykksensor eller bevegelsesensor som brukes i tillegg til eller istedenfor GNSS dersom GNSS ikke er tilgjengelig for eksempel på grunn av dårlig satellittdekning eller jamming.

Dette kapittelet omtaler hvordan mobilteknologi kan bli brukt til posisjonering. I kapittel 4.5.1 beskriver vi hvordan mobilnettet kan vite posisjonen til brukerenheter, inkludert en funksjonalitet kalt 5G-posisjonering, og hvordan denne informasjonen er håndtert i mobiloperatørens kjernenett. I kapittel 4.5.2 beskriver vi posisjonering gjennom en database med registrerte radiomålinger. I kapittel 4.5.3 og 4.5.4 beskriver vi kort fremtidige muligheter for å posisjonere brukerenheter gjennom henholdsvis NTN og sidelink.

4.5.1 Posisjonering i kjernenett

Radioaksessnettet i et vanlig mobilnett består av fastmonterte basestasjoner. Mobiloperatøren har informasjon om nøyaktig lokasjon, høyde og pekeretning til alle basestasjonene. Kjernenettet har

også kontroll over hvilken basestasjon brukerenheten til enhver tid er koblet til. Slik kan geografisk posisjon til brukerenheten estimeres sentralt i kjernenettet. Denne mekanismen er tilgjengelig (og obligatorisk å støtte) i 4G siden Release 8 fra 2009. Mekanismene er deretter videreutviklet for å kunne estimere posisjon med høyere nøyaktighet. I 5G-standarden heter det 5G-posisjonering. På dagens 4G og 5G er det mulig å utnytte radiomålinger som brukerenheten utfører på flere basestasjoner (ikke bare den basestasjonen som brukerenheten er koblet til, men alle basestasjoner som brukerenheten søker og oppdager). Målingene inneholder blant annet [78]

- identifikator på basestasjon (Cell ID)
- estimert propagasjonstid for signal mellom basestasjon og brukerenhet (*Timing Advance*, TA), noe som kan oversettes til avstand mellom basestasjon og brukerenhet
- estimert retning/vinkel for signal mellom basestasjon og brukerenhet (*Angle of Arrival*, AoA)

Alle disse målingene sendes fortløpende til kjernenettet som bruker denne informasjonen til å estimere posisjonen til brukerenheten. Mekanismen som bruker informasjonen fra flere basestasjoner for å lokalisere brukerenheten, kalles triangulering. I 4G-kjernenett finnes det en funksjon som heter *Enhanced Serving Mobile Location Centre* (E-SMLC) som estimerer posisjonen og håndterer posisjonsdata [79]. En tilsvarende tjeneste i 5G-kjernenettet kalles *Location Management Function* (LMF) [80].

Nøyaktigheten på dagens posisjonering i mobilnettene er cirka mellom 10 og 100 meter. Det er vanskelig å estimere avstand til en brukerenhet uten at det er frisikt mellom basestasjonen og brukerenheten. Estimering av vinkelen for signaler fra brukerenhet er også vanskelig dersom signalet kan reflekteres fra flere objekter (*multipath*).

I 5G Release 16 er det spesifisert nye mekanismer som utnytter fasestyrte antenner (massive MIMO), beamforming, høy frekvens (FR2) og høy båndbredde til å kunne levere enda høyere grad av nøyaktighet på posisjon (ned til 10 cm). Det brukes spesifikke referansesignaler som, i kombinasjon med beamforming, muliggjør nøyaktig estimering av retning for signal mellom basestasjon og brukerenhet. I nedlink kan det brukes *Positioning Reference Signal* (PRS) for å beregne *Angle of Departure* (AoD), mens *Sounding Reference Signal* (SRS) kan brukes i opplink for å beregne AoA. Signalene som mottas på ulike basestasjoner vil dessuten være ulike, og denne forskjellen kan utnyttes til å øke presisjonen på posisjonsberegningen [80].

Posisjonsdata som er tilgjengelig i kjernenettet til en mobiloperatør, er godt beskyttet og er ikke tilgjengelig for selve brukerenheten eller dens mobilapplikasjoner. Posisjonsdata kan imidlertid på en lovregulert måte deles med nødetater eller sikkerhetstjenester dersom det er nødvendig å lokalisere eller analysere posisjonshistorikk til et bestemt abonnement. Mobiloperatørene bruker anonymisert posisjonsdata til å beregne statistikk på for eksempel bevegelser av store mengder kunder for å kunne optimalisere radioaksessnettet. I industrirelaterte bruksområder (fabrikk, logistikk) er det aktuelt med 5G-posisjonering på private 5G-nett, der posisjonen kan bli videresendt til egne datanettverk for automatisering, sporing eller analyse.

Når det gjelder 5G militær nettverksskive, blir posisjonen til alle brukerenheter også kjent og godt sikret i kjernenettet. Forsvaret bestemmer selv hvordan de utnytter posisjonsdata operativt. Posisjonering vil kun fungere på stasjonære basestasjoner. Det vil i praksis være vanskelig å få til posisjonering ved bruk av MDF, siden MDF er en mobil løsning som ikke nødvendigvis har en fast og bestemt lokasjon.

4.5.2 Posisjonering basert på radiomålinger og database

En annen metode for å finne posisjonen til brukerenheten er å benytte radiomålinger på basestasjoner og sammenligne denne informasjonen med en database som inneholder store mengder målehistorikk. Google har for eksempel en løsning som innebærer at enheter med Android-operativsystem anonymt rapporterer inn sin posisjon fra GNSS sammen med radiomålinger som inneholder blant annet Cell ID og TA. All innrapportert data blir lagret i en database. Neste gang en annen brukerenhet er i samme område, utfører den radiomålinger på nærliggende basestasjoner og sammenligner disse med databasen som, basert på tidligere innrapporterte målinger, kan oppgi et estimat på omtrentlig posisjon til brukerenheten. Dette brukes som regel kun som supplement for posisjonering gjennom GNSS for å gjøre posisjoneringsprosessen raskere. En smarttelefon som får sin omtrentlige posisjon gjennom mobilnettet og denne databasen, kan raskere finne mer nøyaktig posisjon gjennom GNSS-satellitter. Dette øker brukeropplevelsen for mobilapplikasjoner som bruker lokasjonsdata.

Det finnes spesielle enheter som kan finne sin posisjon kun ved bruk av radiomålinger og en slik database uten at det er behov for GNSS. FFI har testet en slik enhet (nærmere beskrivelse av testen er gitt i vedlegg I). Nøyaktigheten varierte og var rundt 100–200 meter, men kunne i noen tilfeller bli flere kilometer.

Denne typen posisjonering vil være tilgjengelig i 5G militær nettverkskive kun dersom det er tillatt å overføre trafikken mot databasen gjennom Internett. I tillegg er det kun stasjonære basestasjoner som kan benyttes til denne tjenesten. Det vil si posisjonering gjennom MDF ikke kommer til å fungere, siden MDF er en mobil løsning som ikke nødvendigvis har en fast og bestemt lokasjon.

4.5.3 Posisjonering gjennom NTN

De første NTN-brukerenhetene (Release 17) kommer til å kreve posisjon fra GNSS for å kunne finne satellitter og fungere med NTN. En relevant egenskap for Forsvaret vil være at brukerenheten får sin posisjon gjennom NTN helt uten bruk av GNSS. I Release 18 diskuteres det et behov for å kunne bruke signalene fra NTN-satellitter til å estimere posisjonen til brukerenhetene innenfor en nøyaktighet på 5–10 km, men implementasjonen er ikke spesifisert i Release 19 [44, 81]. Det finnes flere forskningsartikler som beskriver mulige teknikker for å estimere posisjonen til brukerenheten gjennom NTN-signaler fra satellitter med nøyaktighet på ca. 10-200 meter avhengig av situasjon [82–84]. Selv om det ikke er mulig å bruke NTN til posisjonering i dag, forventes det at en slik tjeneste kommer i fremtiden.

4.5.4 Posisjonering gjennom sidelink

Posisjonering gjennom 5G-sidelink ble introdusert i Release 18 [85]. Posisjonering er basert på radiomålinger av tid (TA) og vinkel (AoA) på samme måte som posisjonering gjennom bakkebasert mobilnett som vi har beskrevet i kapittel 4.5.1. Det er mulig å estimere både absolutt geografisk posisjon og relativ posisjon i forhold til en annen brukerenhet. Som ved sidelink-kommunikasjon, må brukerenheter som støtter sidelink-posisjonering, først oppdage hverandre og konfigurere forbindelsen. Deretter kan de sende og måle referansesignaler, estimere posisjon, og dele resultatene

med hverandre. Dersom en brukerenhet samtidig har forbindelse med en basestasjon, kan denne benyttes for å forbedre posisjonsestimatet ytterligere.

Avhengig av scenario, stiller 3GPP-spesifikasjonen krav til posisjonsnøyaktighet fra 50 m til 10 cm [48]. Det er imidlertid forventet at flere praktiske utfordringer må løses for å oppnå slik presisjon i sidelink-posisjonering. Faktorer som begrenset båndbredde, antall og plassering av tilgjengelige brukerenheter, manglende frisikt, synkroniseringsfeil og interferens kan i betydelig grad påvirke nøyaktigheten [86].

5 Utvalgt 6G-funksjonalitet for militær mobildekning

Som beskrevet i kapittel 2.2 forventes det at 6G lanseres rundt år 2030. 3GPP har per nå ikke startet å standardisere 6G, og ITU-R har ikke offentliggjort kravene som 6G vil basere seg på, altså IMT-2030. 3GPP starter med de første tekniske spesifikasjonene av 6G i 2026. ITU-R har imidlertid publisert et rammeverk for IMT-2030 som viser forventningen til hva 6G skal inneholde. 6G skal i følge rammeverket tilby følgende bruksområder [11]:

- *Immersive Communication* som innebærer enda høyere overføringskapasitet enn 5G for å støtte tjenester som utvidet virkelighet og hologram-kommunikasjon
- *Massive Communication* som innebærer støtte for enda flere tilkoblede brukerenheter og sensorer i et område enn 5G
- *Hyper Reliable and Low-Latency Communication* som innebærer støtte for enda flere kritiske tjenester enn 5G, for å støtte bruksområder innen automasjon, interaksjon mellom maskiner og telemedisin
- *Integrated Sensing and Communication* som innebærer at mobilnettene skal få evne til å oppdage og spore objekter som ikke er koblet til mobilnettet.
- *Artificial Intelligence and Communication* som innebærer at mobilnettene skal støtte distribuert databehandling og applikasjoner som benytter kunstig intelligens for å støtte en rekke tjenester innen medisin og assistert selvkjørende kjøretøy samt at nettverket kan avlaste brukerenhetene med prosessering av data
- *Ubiquitous Connectivity* som innebærer at det skal være dekning overalt

De tre første punktene i lista over er videreutvikling av de tre første punktene i lista for 5G gjengitt i kapittel 2.3. Det vil si at 6G kommer til å være i stand til å levere enda høyere ytelse i allerede etablerte 5G-bruksområder for vanlige mobildatatjenester, IoT-tjenester og kritiske tjenester innen automasjon. De øvrige punktene er nye for IMT-2030, noe som forteller at 6G har ambisjoner om å dekke nye bruksområder og levere nye typer tjenester.

Flere løsninger som ikke har blitt realisert i praksis med 5G får en ny mulighet til å nå markedet med 6G. Løsninger som NTN og sidelink kan for eksempel bidra til Ubiquitous Connectivity. Det er sannsynlig at en løsning som sidelink eller hvilke som helst andre funksjonaliteter¹³ som opprinnelig var definert for 4G eller 5G, men som ikke ble utbredt i markedet, blir markedsført som en del av 6G.

Vi har valgt ut funksjonalitet som ikke er en del av 5G-standarden i dag, men som det spekuleres i at vil komme med 6G. Funksjonaliteten vi har valgt ut kan være aktuell å anvende på løsningene for militær mobildekning (presentert i kapittel 3) og fremstår som å være sannsynlig å kunne bli til reelle produkter. Kapittel 5.1 og 5.2 beskriver radiokommunikasjon på nye frekvensområder sammenlignet med det som var definert for 5G. Kapittel 5.3 omtaler forbedringer som kan bidra til lengre rekkevidde i 6G. Kapittel 5.4 presenterer i mer detalj hva Integrated Sensing and Communication innebærer.

¹³Begrepet funksjonalitet ble definert i innledingen til kapittel 4.

5.1 6G på terahertz-frekvenser

Terahertz-kommunikasjon refererer til trådløs kommunikasjon basert på frekvenser i terahertzbåndet (0,1–10 THz, det vil si 100–10000 GHz) [87]. Disse frekvensene ligger mellom mikrobølger og optiske bølger, og er betydelig høyere enn dagens 5G-frekvenser på millimeterbølge. Terahertz-kommunikasjon muliggjør vesentlig økt båndbredde (opptil flere GHz) og overføringskapasitet i Tbps-området. Høy båndbredde gjør det også mulig å ha enda kortere OFDM-symboler, noe som teoretisk kan gi forsinkelse i 6G-systemet på under 1 ms. Samtidig vil kommunikasjonen oppleve stort signaltap, noe som vil kunne gi begrenset rekkevidde med mindre man bruker meget direkte antenner. Mulige bruksområder inkluderer erstatning for fiber i punkt-til-punkt-kommunikasjon, kommunikasjon under store arrangementer, intern kommunikasjon mellom komponenter i en maskinvareenhet (erstatte tradisjonelle kobberbaserte koblinger for raskere kommunikasjon mellom prosessorer, minne eller andre moduler), direkte kommunikasjon mellom roboter eller kjøretøy, samt telemedisin [88].

Terahertz-kommunikasjon har flere utfordringer. Det krever spesialtilpassede antenner i både brukerenheter og basestasjoner. Det er dessuten teknisk utfordrende å lage komponenter som forsterkere, modulatorer og antenner som fungerer på terahertz-frekvenser [87]. Videre fører de høye frekvensene til høyt signaltap som må kompenseres med digital beamforming eller direkte parabolantenner for å oppnå tilstrekkelig rekkevidde.

6G-basert terahertz-kommunikasjon kommer til å operere i kombinasjon med lavere frekvensbånd, noe som vil sikre både god dekning og overføringskapasitet.

Terahertz-kommunikasjon befinner seg fortsatt i forsknings- og utviklingsfasen, og er i dag basert på simuleringer, eksperimentelle laboratorieoppsett og teoretiske analyser. Det er tenkelig at lavere terahertz-frekvenser (rundt 100 til 300 GHz) kan bli introdusert i 6G. Om utviklingen lykkes og det foreligger et behov, kan også høyere terahertz-frekvenser tas i bruk etter hvert.

6G-radiokommunikasjon på terahertz-frekvenser kan være interessant for noen spesifikke militære bruksområder der det er behov for en punkt-til-multipunkt-forbindelse med veldig høy overføringskapasitet på relativt kort avstand. Høy direktivitet og stort signaltap vil gjøre kommunikasjonen meget vanskelig å detektere og jamme. I tillegg til vanlig radiokommunikasjon mellom en basestasjon og brukerenheter, kan terahertz-kommunikasjonen brukes på sidelink til å muliggjøre lokal kommunikasjon mellom ubemannede plattformer som befinner seg i nærheten av hverandre.

5.2 6G på centimeterbølge

Radiokommunikasjon på centimeterbølge referer til radiosystemer som benytter frekvenser fra 7 til 15 GHz [89] som uoffisielt også blir omtalt som frekvensområde 3 (FR3). Disse frekvensene ligger mellom dagens FR1 og FR2, og representerer dermed et kompromiss mellom overføringskapasitet, som er høy i FR2, og rekkevidde, som er lengst med FR1. De høye frekvensene på centimeterbølge muliggjør høy båndbredde, noe som kan bidra til å møte de høye kapasitetskravene forventet i 6G. Det økte signaltapet ved høyere frekvenser må imidlertid kompenseres med fasestyrte antenner som inneholder enda flere antenneelementer enn antenner som benyttes i FR1. Brukerenheter må naturlig nok også være utstyrt med antenner som støtter centimeterbølger.

Bruken av centimeterbølge i mobilkommunikasjon er fortsatt under utforskning og diskusjon. For eksempel utvikler Ericsson en testplattform basert på centimeterbølger [89], og i USA er et frekvensbånd i dette området inkludert i den nasjonale spektrumstrategiens implementeringsplan [90]. Likevel er frekvensområdet 7–15 GHz allerede tildelt ulike tjenester og brukes for eksempel mye for satellittkommunikasjon. Derfor er sameksistens og håndtering av interferens en viktig utfordring som må løses før frekvensområdet kan brukes til bakkebasert 6G i praksis.

6G-radiokommunikasjon på centimeterbølge kan gi en gunstig balanse mellom rekkevidde og overføringskapasitet, noe som gjør det egnet for noen militære applikasjoner. På grunn av beamforming og direktivitet, reduseres synligheten i det elektromagnetiske spektrumet. Effektiv jamming vil kreve at jammeren befinner seg i relativ nærhet til kommunikasjonsområdet. Brukerenheter som er innenfor dekningsområdet til basestasjonen kan være i bevegelse, samtidig som det leveres høy overføringskapasitet. En slik funksjonalitet kan være egnet for mobile kommandoplasser eller autonome systemer. Basestasjoner som støtter centimeterbølge kan benyttes på militære nettverksskiver, MDF-er eller militære autonome nett.

5.3 Lengre rekkevidde i 6G

Med økende behov for høy overføringskapasitet, er det nødvendig for radioaksessnettet å gå opp i frekvens for å få tilgang til større båndbredder og dermed økt overføringskapasitet. Med høyere frekvens er det mer utfordrende for mobiloperatører å oppnå god arealdekning og lang rekkevidde. Det å få god arealdekning i et mobilnett har også vært viktig i alle mobilgenerasjoner. Mobiloperatører må ha flere basestasjoner og bygge dem stadig tettere, noe som øker utgifter. Derfor er det alltid aktuelt med tekniske egenskaper som kan forbedre rekkevidde, slik at mobiloperatørene kan øke arealdekning med minst mulig investering i oppbygging av infrastruktur. Dekning og rekkevidde er også meget relevant for militær mobildekning, spesielt for MDF og militært autonomt 5G-nett. Vi beskriver noen egenskaper som vi tror kan bidra til bedre rekkevidde i 6G enn i 5G.

I 5G ble massive MIMO-teknologi introdusert for å muliggjøre effektiv bruk av beamforming, noe som kompenserer for kortere rekkevidde ved høyere frekvens [5]. Antennegevinsten som oppnås med beamforming på en basestasjon utstyrt med en massive MIMO-antenne gir bedre rekkevidde i både nedlink og opplink. I 6G kommer massive MIMO-teknologien til å bli videreutviklet, noe som kan forbedre rekkevidden. I følge Nokia [19] bør 6G sikte mot massive MIMO som gir enda bedre ytelse enn dagens massive MIMO-løsninger, samtidig som løsningen bør være mer praktisk, standardisert og strømsparende.

Lav sendeeffekt fra brukerenheter (opplink) er ofte grunnen til begrenset rekkevidde [30]. Blant forslagene som kan forbedre rekkevidden i opplink i 6G, nevner Nokia [19] en mulighet som innebærer å heve utgangseffekten på en standard effektklasse for brukerenheter fra dagens 23 dBm til 26 dBm. En annen egenskap som 3GPP diskuterer, og som kan øke sendeeffekten på brukerenheter, er beamforming i opplink [91]. Med beamforming i opplink mener vi at brukerenheter vil være utstyrt med en fasestyrt antenne med flere antenneelementer som muliggjør digital beamforming for å automatisk peke signalet i opplink i den beste retningen mot en tilhørende basestasjon.

Aktiv beamforming i opplink vil ikke bare gi økt sendeeffekt, men vil også bidra til å redusere interferens mot nærliggende basestasjoner. Denne typen interferens oppstår særlig når luftfartøy som

droner eller helikoptre benytter mobilkommunikasjon og flyr over et sted med mange basestasjoner. Luftfartøyet er som regel utstyrt med en rundstrålende antenne, slik at mobilsignalet som er ment til å sendes til én basestasjon, blir mottatt på flere basestasjoner og oppleves som interferens. Dersom luftfartøyet er utstyrt med et 6G-modem som retter mobilsignalet mot én basestasjon om gangen, vil interferensen mot andre basestasjoner bli minimert. Det å rette signalet mot en basestasjon vil også bidra til en redusert synlighet i det elektromagnetiske spektrumet utenfor retningen til signalet, slik at brukerenheten blir vanskeligere å oppdage.

Aktiv beamforming i opplink vil kreve endringer i spesifikasjonene siden radiogrensesnittet til 5G kun har støtte for aktiv beamforming i nedlink. Økt sendeeffekt, beamforming eller andre teknikker som forbedrer rekkevidden i opplink, vil forhåpentligvis bli inkludert i 6G-standardene. Lang rekkevidde er som regel blant de viktigste egenskapene til taktiske basestasjoner.

5.4 Integrated Sensing and Communication

Integrated Sensing and Communication (ISAC) er en ny funksjonalitet som bruker mobilnett, og spesielt radiogrensesnitt, for å innhente informasjon om de fysiske omgivelsene i basestasjonenes dekningsområde. ISAC vil i prinsippet fungere på samme måte som en radar. En typisk radar bruker antenner til å sende ut radiobølger, som delvis reflekteres fra objekter i omgivelsene og deretter mottas av antennene igjen. Ved å analysere de reflekterte signalene kan man estimere ulike objekters avstand, posisjon og hastighet innenfor dekningsområdet. Med ISAC vil 6G-radiosignaler fra basestasjoner bli brukt for å oppnå radar-type funksjonalitet, eller med andre ord, *sensing*.

I motsetning til posisjonering gjennom mobilteknologi, som er beskrevet i kapittel 4.5, krever ikke ISAC at objektene er koblet til mobilnettet. Hensikten med ISAC er å gjenbruke eksisterende mobilinfrastruktur – inkludert antenner, radiosignaler og nettverksressurser – for samtidig kommunikasjon og sensing. Dermed kan en basestasjon kommunisere med brukerenheter samtidig som den oppdager for eksempel droner. Det er også mulig å bruke kunstig intelligens til å analysere signalene og sette resultatene i sammenheng [92]. ISAC er ennå ikke realisert, men 3GPP har begynt å studere bruksområder og krav for dette i både 5G i Release 19 [93, 94] og for 6G i den kommende Release 20 [95]. Den forventede nøyaktigheten av posisjonsmålingen ligger mellom noen få titalls centimeter og ti meter. Noen av de første bruksområdene for ISAC kan være deteksjon av droner ved kritisk infrastruktur, innbruddsvarsling eller oppdagelse av hindringer på sporvei eller bilvei. Mer avanserte bruksområder inkluderer kartlegging av omgivelser, værovervåkning, helseovervåkning, bevegelsesgjenkjenning og kollisionsforebygning.

Hvordan ISAC konkret realiseres, og hvor dypt den integreres i kommunikasjonsinfrastrukturen, er ennå ikke spesifisert. Sannsynligvis vil ISAC være en del av basestasjonens nedlink-signal for å unngå interferens på opplink. Det utsendte målesignalet kan for eksempel spres over flere OFDM-symboler i både frekvens og tid, der større båndbredde gir bedre nøyaktighet i avstandsmåling, og lengre tidsvarighet gir bedre nøyaktighet i hastighetsmåling. Mottakeren av det reflekterte målesignalet kan enten være den samme basestasjonen eller en annen.

Det er flere utfordringer med dette konseptet. Dersom en basestasjon skal bruke samme antenne til både utsending og mottak av målesignalet, kreves enten en full-dupleks antenne eller en antenne som raskt kan veksle mellom sending og mottak. En annen utfordring er at dersom det skal benyttes

flere basestasjoner må disse være nøyaktig synkronisert i tid. I tillegg til dette kan interferens mellom basestasjonene utgjøre en utfordring på grunn av det svake mottatte målesignalet. I noen scenarier vil friskt ikke være garantert, og dette må tas hensyn til i beregningene.

ISAC finnes ikke på markedet per i dag, men det pågår omfattende forskning og det er stor interesse fra industrien. Qualcomm har for eksempel demonstrert flere ganger at det er mulig å detektere og spore objekter ved hjelp av ISAC [96]. Det er lite sannsynlig at ISAC vil bli kommersielt tilgjengelig i løpet av 5G-livssyklusen, men funksjonaliteten kan bli en nøkkelkomponent ved lanseringen av 6G.

ISAC vil ha stor relevans for Forsvaret og kan bidra til økt situasjonsforståelse. Funksjonaliteten gir i teorien mulighet til å bruke militær nettverksskive som en landsdekkende sensor til overvåkning. Som tidligere nevnt er det spesielt oppdagelse av autonome luftfartøy som kan være et viktig bruksområde.

6 Oppsummering

Forsvaret har behov for taktisk kommunikasjon mellom brukerenheter, sensorer, effektorer og servere med tjenester som fungerer i fred, krise og krig. Én av teknologiene som benyttes av Forsvaret i dag er kommersiell mobilteknologi. Mobilteknologi kan bidra til at Forsvarets IKT er moderne, robust og tilgjengelig med tanke på både skalerbarhet, produksjon av utstyr og dekning. Mobilkommunikasjon gir god overføringskapasitet under bevegelse, noe som muliggjør et bredt spekter av datatjenester for både intern informasjonsflyt mellom enheter i Forsvaret og ekstern samvirke med totalforsvaret og allierte. Formålet med denne rapporten er å belyse hvilke tekniske muligheter kommersiell mobilteknologi kan gi Forsvaret i de kommende årene.

Vi har presentert fem utvalgte tekniske løsninger som kan levere militær mobildekning som kan brukes til sikker taktisk kommunikasjon. Løsningene er hovedsakelig basert på kommersiell mobilteknologi, men innebærer noen tilpasninger for å kunne dekke militære behov. Løsningene er oppsummert i tabell 6.1.

Løsning for militær mobildekning	Relevans for Forsvaret	Teknologiske forutsetninger og begrensninger	Markedsmessige forhold
5G militær nettverksskive	Sikret nasjonal mobildekning og tilknytning til sentrale tjenester	Avhengig av kommersiell infrastruktur og sentrale kjernenett. Manglende dekning i aktuelle områder	Tilgjengelig, men ikke lansert i Norge ennå, Forsvaret piloterer og vurderer anskaffelse
5G militær dekningsforlengelse (MDF)	Forsvaret kan selv etablere en basestasjon med mobildekning fra 5G militær nettverksskive	Backhaul må etableres på egen hånd, avhengighet av sentrale kjernenett, dekning i lokalt område	Tilgjengelig, militære tilpasninger under utvikling, Forsvaret piloterer og vurderer anskaffelse
Militært autonomt 5G-nett	Eget flyttbart mobilnett for tjenester lokalt helt uavhengig av sentral infrastruktur	Dedikerte SIM-kort, kjernenett må sikres på egen hånd, dekning i lokalt område, ingen sentrale tjenester	Produkter finnes, men modenheten er lav, Forsvaret piloterer
Mobilkommunikasjon fra satellitter (NTN)	Utvidet mobildekning utendørs for 5G militær nettverksskive	Avhengig av ekstern (muligens kommersiell) infrastruktur, inkludert satellittkonstellasjon	Noen tidlige løsninger begynner å bli tilgjengelige
Direkte kommunikasjon mellom brukerenheter (sidelink)	Lokal kommunikasjon mellom Forsvarets enheter uavhengig av sentral infrastruktur	Dekning i lokalt område, ingen sentrale tjenester	Foreløpig ukjent tilgjengelighet av utstyr, teknologien er på prototypestadiet

Tabell 6.1 Oppsummering av tekniske løsninger for militær mobildekning.

Ikke all funksjonalitet som er spesifisert i 5G-standardene blir anvendt i løsninger som blir tilgjengelige for sluttbrukerne. Siden mobilteknologien er kommersiell, er det helt nødvendig at ny funksjonalitet er lønnsomt å produsere og levere for de involverte aktørene – produsentene av brukerenheter, leverandørene av nettverksutstyr og mobiloperatørene. For at det skal være lønnsomt, må det være et stort nok marked. 5G militær nettverksskive, militær dekningsforlengelse og militært autonomt 5G-nett er til en viss grad allerede tilgjengelige kommersielle løsninger. Implementering av NTN vil trolig fortsette i markedet slik at vanlig datatjeneste etterhvert blir

tilgjengelig gjennom satellitter på vanlige kommersielle brukerenheter som en smarttelefon. Vi har også tro på at sidelink blir kommersielt tilgjengelig i de kommende årene. NTN og sidelink vil dermed med stor sannsynlighet kunne bli tatt i bruk i løsninger som kan tilpasses militær bruk.

Mobilteknologi utvikles kontinuerlig, og alle forbedringene standardiseres og spesifiseres i iterasjoner. På dagens iterasjon er det fortsatt 4G og 5G som blir forbedret, mens mulighetene med 6G kun undersøkes. I 2026 kommer de første tekniske spesifikasjonene av 6G, og det forventes at de første kommersielle 6G-produktene når markedet i 2030. Siden mobilteknologi utvikles gradvis, blir det ikke nødvendigvis en revolusjonerende effekt når 6G kommer, på samme måte som at 5G ikke medførte noen stor revolusjon når teknologien først ble lansert.

Vi anbefaler at Forsvaret både tar i bruk og fortsetter å videreutvikle dagens løsninger for militær mobildekning – 5G militær nettverksskive, 5G MDF og militært autonomt 5G-nett. Sikker utnyttelse av disse løsningene innen kommersiell mobilteknologi kan gi operativ effekt allerede i dag, samtidig som det legger til rette for ny funksjonalitet som trolig kommer gitt den raske utviklingen av mobilteknologien.

Vi anbefaler at Forsvaret følger den kommersielle utviklingen innen mobilkommunikasjon fra satellitter (NTN), direkte kommunikasjon mellom brukerenheter (sidelink) samt vårt utvalg av øvrig 5G-funksjonalitet (millimeterbølge, RedCap, 5G LAN, edge computing og posisjonering) og 6G-funksjonalitet (nye frekvensområder, tiltak for lengre rekkevidde og integrert sensing). Når disse løsningene er modne og tilgjengelige, bør de testes, tilpasses og integreres med resten av løsningene for militær mobildekning, slik at den taktiske mobilkommunikasjonen er enda mer moderne og robust.

A Liste over releaser

Tabell A.1 lister alle 3GPP-releaser siden 1998 med oppstarts- og sluttår. Det var ikke relevant å ta med Releasene før Release 4 siden de hadde en annen systematisering, benevning og nummerering.

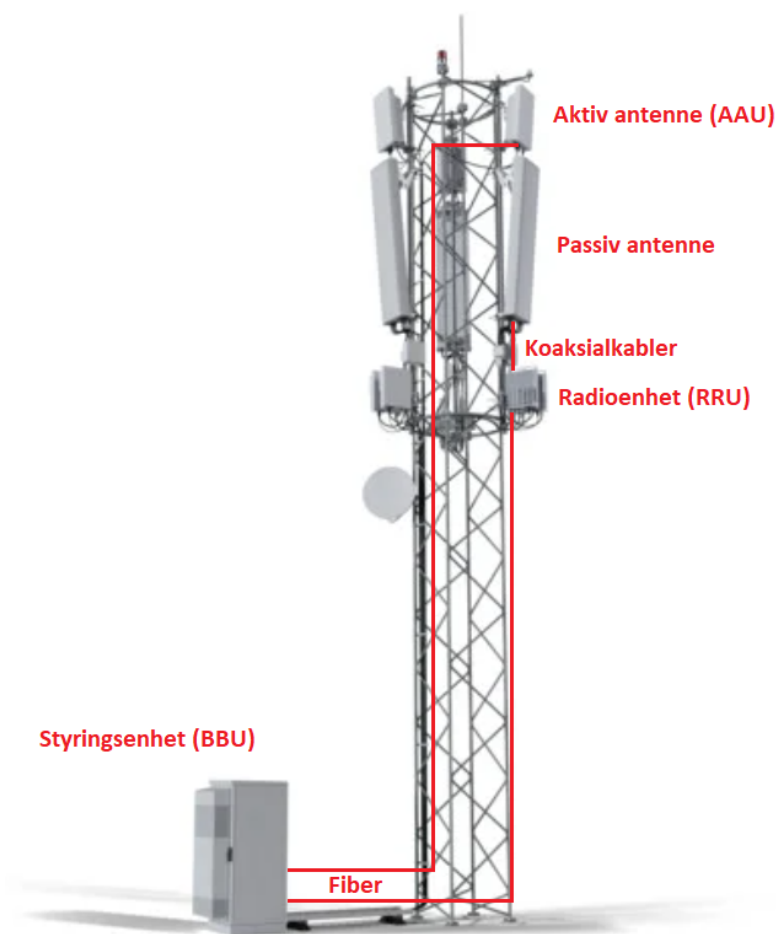
Release	Oppstartsår	Sluttår
Release 4	1998	2001
Release 5	2000	2002
Release 6	2000	2005
Release 7	2003	2008
Release 8	2006	2009
Release 9	2008	2010
Release 10	2009	2011
Release 11	2010	2013
Release 12	2011	2015
Release 13	2012	2016
Release 14	2014	2017
Release 15	2016	2019
Release 16	2017	2020
Release 17	2018	2022
Release 18	2019	2024
Release 19	2021	2025
Release 20	2024	ikke kjent ennå
Release 21	2026	ikke kjent ennå

Tabell A.1 3GPP-releaser med oppstarts- og sluttår [14, 15].

B Basestasjon

Radioaksessnettverk (*Radio Access Network*, RAN) i et mobilnett består av basestasjoner som gir mobildekning til brukerenheter. En basestasjon består hovedsakelig av en styringsenhet (*Baseband Unit*, BBU), radioenheter (*Remote Radio Unit*, RRU) og antenner. Styringsenheten setter opp backhaul-forbindelse til kjernenett, prosesserer og ruter signalering og brukerdata, styrer alle radioenheter og inneholder cellekonfigurasjoner. Radioenheten konverterer mellom digitale datastrømmer og analoge signaler som sendes og mottas på antennen. Styringsenheten og radioenheten er vanligvis koblet sammen med en fiberkabel, mens radioenheten og antennen er koblet sammen med koaksialkabler. Antennen som brukes med en radioenhet, beskrives som passiv, fordi den ikke har noen aktive elementer (elektronikk, effektforsterkere) som krever strøm.

Med 5G ble bruk av en aktiv antenne (*Active Antenna Unit*, AAU) mer utstrakt, spesielt på høyere frekvenser (over 2 GHz). I en AAU er radioenheten (RRU) og aktive antennekomponenter og antennen med mange antenne elementer slått sammen i én fysisk enhet. AAU kobles direkte til styringsenheten med en fiberkabel. AAU kan styre retningen til radiosignaler (beamforming) ved bruk av teknologien kalt massive MIMO. Figur B.1 illustrerer en basestasjon med forskjellige typer radioer.



Figur B.1 Eksempel på en basestasjon som har en styringsenhet (BBU) og både aktive antenner (AAU) og radioenheter (RRU) med passive antenner [97].

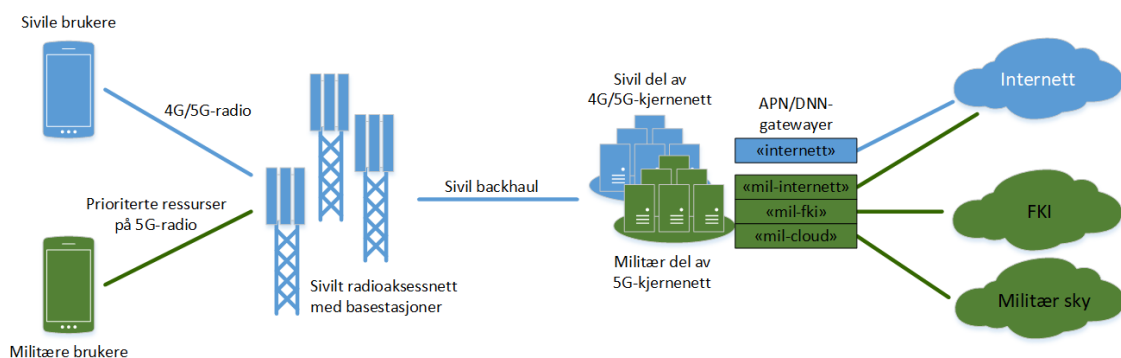
C Access Point Name (APN)

Access Point Name (APN) er navnet på en overgang, ofte kalt *gateway*, mellom kjernenett i et mobilnett og et eksternt datanettverk. APN brukes for å styre trafikken mot ulike eksterne nett eller tjenester. Vanlige mobiltelefoner er ofte koblet mot internett og mot mobiloperatørens tjenester for telefoni. Et APN for Internett kan for eksempel hete «internett» mens APN for telefoni ofte kalles «ims» etter funksjonaliteten som brukes for å levere 4G tale. I tillegg finnes det ofte et eget APN for MMS-meldinger som ofte kalles «mms». Disse APN-ene er konfigurert både i brukerdatabasen i kjernenettet og på brukerenhetene. I noen tilfeller må brukeren skrive inn APN manuelt på brukerenheten, men ofte er innstillingene av APN på plass i SIM-kortet.

Når brukerenheten skal sende data til et APN, for eksempel en MMS fra Meldinger-appen på en mobiltelefon, settes det opp en forbindelse mellom telefonen og APN-gatewayen. Mellom basestasjonen og APN-gatewayen består denne forbindelsen av en tunnel som bruker protokollen *GPRS Tunnelling Protocol* (GTP). Mobilnettet sikrer at forbindelsen mot et APN bare benyttes av riktig type trafikk og kan sørge for at den får tildelt tjenestekvalitet i nettet. Et eksempel på tjenestekvalitet er telefonsamtaler som har høyere prioritet enn datatrafikk som går til og fra Internett.

APN-ene nevnt over er felles for alle brukere i et landsdekkende mobilnett. I tillegg kan et landsdekkende mobilnett også inneholde *private* APN som er satt opp for en bedrift eller annet foretak, slik som Forsvaret. Private APN brukes av bedrifter til å gi tilgang til bedriftens interne nettverk gjennom mobilnettet. Mobilnettet sørger for at et privat APN bare kan benyttes av de kundene som tilhører den aktuelle bedriften og ikke andre brukere. Bedriftens interne nett vil ofte være tilkoblet Internett gjennom bedriftens egne brannmurer slik at bedriften selv kan kontrollere sikkerheten mot Internett.

Figur C.1 viser noen APN som kan være satt opp i et mobilnett der det benyttes en 5G militær nettverksskive. Sivile brukere har tilgang til APN-gatewayen «internett», mens bare militære brukere har tilgang til de tre gatewayene «mil-internet», «mil-fki» og «mil-cloud». De tre militære APN-ene er eksempler som kan benyttes til å dekke ulike behov Forsvarets brukere har - om de skal nå Internett, tjenester inne i FKI eller i en militær sky.



Figur C.1 Eksempel på ulike APN som kan være satt opp i et mobilnett ved bruk av 5G militær nettverksskive.

Alle APN fungerer ved gjesting i andre nett og er dermed tilgjengelig i utlandet. Et APN og et Data

Network Name (DNN) er ekvivalente. APN er terminologien brukt fra 2G til 4G mens DNN brukes i 5G [98].

Det fulle navnet på APN-et er ofte skjult fra brukeren. Det fulle navnet brukes til å slå opp i mobiloperatørens DNS for å få IP-adressen til APN-gatewayen og er på formen *internet.mnc001.mcc242.3gppnetwork.org* der 001 er operatørkode og 242 er landkode for det landsdekkende mobilnettet som APN-et hører til [98].

D Beregninger av overføringskapasitet for NTN

Vi beregner overføringskapasiteten som en sluttbruker kan forvente å få på en typisk smarttelefon som får 5G-mobildekning rett fra en LEO-satellitt. Som beskrevet i kapittel 3.4 kalles mobildekning fra satellitter Non-Terrestrial Network (NTN).

Beregninger av overføringskapasitet for NTN omfatter mange parametere og egenskaper som ikke er kjent og som i beregningene er basert på antakelser. Tabell D.1 oppsummerer alle parameterne og egenskapene som vi antar i våre beregninger. Vi antar at satellitten har en fullstendig 5G-basestasjon som prosesserer, modulerer og demodulerer 5G-signalene. I beregningene holder vi oss innenfor det lineære området til forsterkeren i satellitten. Modulasjon og koding er hentet fra 3GPP-spesifikasjoner [99]. Det er antatt at den tilgjengelige effekten i en celle er begrenset til 5 W, mens det er gjort beregninger for 5, 10, 15 og 20 MHz båndbredde for hver celle. Brukerenheten antas å være den eneste brukeren i cellen slik at sendeeffekten og båndbredden til satellitten i cellen ikke er delt med andre brukere i den samme cellen. Det er videre antatt at linken mellom satellitten og bakkestasjonen har så god ytelse at den ikke vil være begrensende for kommunikasjonen, blant annet fordi antennen i bakkestasjonen er stor og kraftig.

I følge våre beregninger vil signaltap (frittromtap og atmosfærisk tap) mellom satellitten og brukerenheten ligge på 154,7 dB for opplink og 155,4 dB for nedlink (forskjellen skyldes ulik frekvens på opplink og nedlink). Tapet på grunn av flat fading (8 dB) vil komme i tillegg. På grunn av forventet fading må man forvente store variasjoner i mottatt signalnivå, noe som vil kunne begrense den tilgjengelige overføringskapasiteten. Dette gjelder spesielt mottakeren til en smarttelefon som på grunn av rundstrålende antenner vil være utsatt for flerveisrefleksjoner. En brukerenhet med en direktiv antenne vil oppleve flerveisrefleksjoner i mye mindre grad.

E_b/N_0 står for *Energy per bit to Noise Power Spectral Density ratio* og er en sentral parameter for å estimere nødvendig signalstyrke som et radiosystem må ha for en gitt overføringshastighet. Vi bruker E_b/N_0 for å kunne estimere hvilken modulasjon og koding det er mulig å oppnå i hver beregning. En gitt modulasjon og koding kan videre oversettes til faktisk overføringskapasitet i Mbps. For å etablere en sammenheng mellom E_b/N_0 og modulasjon og koding i et 5G-radiosystem brukte vi *Sionna*-simulatoren [100]. Vi utvidet simulatoren til å også støtte de laveste koderatene i henhold til 3GPP. Simuleringen er basert på 5G-radiokommunikasjon i opplink over en AWGN-kanal med perfekt kanalestimering, men gjelder også i nedlink. I simuleringen velger vi BLER på 10^{-2} .

Basert på de antatte egenskapene til både brukerenheten og satellitten, beregnet signaltap og mottakerens følsomhet, og simulert sammenheng mellom E_b/N_0 og modulasjon og koding, beregnet vi overføringskapasiteten for ulike båndbredder og cellestørrelser. Resultatene er gjengitt i tabellene D.2–D.5. Beregningsresultatene viser den høyest mulige overføringskapasiteten som kan oppnås under forhold med tap på grunn av flat fading på 8 dB i et gitt oppsett med tilhørende modulasjon, koding og E_b/N_0 , samt utnyttet båndbredde som gir den høyest mulige overføringskapasiteten.

På grunn av relativt lav sendeeffekt fra en smarttelefon, fører større båndbredde ikke nødvendigvis til høyere overføringskapasitet. Det hjelper ikke å benytte mer båndbredde hvis brukerenheten ikke har nok effekt til å fylle den tilgjengelige båndbredden. Det er også i noen tilfeller mer effektivt å samle sendeeffekten på noe mindre båndbredde og oppnå noe høyere modulasjon og koding enn å spre sendeeffekten over hele tilgjengelige båndbredden med noe lavere modulasjon og koding.

Parameter	Antatt verdi/egenskap	
Type brukerenhet	Smarttelefon	
Utgangseffekt brukerenhet (TRP)	26 dBm (0,4 W)	
Antennegevinst brukerenhet	0 dBi	
Sendeeffekt brukerenhet (EIRP)	26 dBm	
Støyfaktor brukerenhet	5 dB	
Gain-to-Noise Temperature ratio (G/T) brukerenhet	-26,2 dB/K	
Type satellitt	Lavbane (LEO)	
Satellittens banehøyde	500 km	
Elevasjonsvinkel	50 grader	
Utgangseffekt satellitt (TRP per celle)	37 dBm (5 W)	
Antennegevinst satellitt (3 dB cellekant)	36,7 dBi	19,2 dBi
Sendeeffekt satellitt (EIRP per celle)	73,7 dBm	56,2 dBm
Cellestørrelse	17,5 km	70 km
G/T satellitt (3 dB cellekant)	10,8 dB/K	-1,3 dB/K
Støyfaktor satellitt	1 dB	
Kanalestimering for signaltap	Frittromstap med flat fading	
Tap på grunn av flat fading	8 dB	
Båndbredde	5/10/15/20 MHz	
Dupleks	Frequency Division Duplex (FDD)	
Frekvensbånd i opplink (brukerenhet til satellitt)	1980–2010 MHz (n256)	
Frekvensbånd i nedlink (satellitt til brukerenhet)	2170–2200 MHz (n256)	
Multiple Input Multiple Output (MIMO)	Ingen, 1 datastrøm	
Mellombæreravstand	15 kHz	
Simulert radiokanal	Additive White Gaussian Noise (AWGN)	
Målsetting for Block Error Rate (BLER)	10^{-2}	

Tabell D.1 Parametere antatt i beregningene av forventet overføringskapasitet mellom en smarttelefon og satellitt med to forskjellige cellestørrelser. Radiokommunikasjonen er basert på 5G-NTN.

Imidlertid kan det sistnevnte også være fordelaktig med tanke på minimert interferens mellom brukere eller nærliggende celler.

Vi valgte å utføre beregninger for en satellitt i en banehøyde på 500 km, noe som er en relativt lav høyde for en LEO-satellitt. En LEO-satellittkonstellasjon kan operere i banehøyder på opptil 2000 km. En typisk GEO-satellitt ligger på en høyde på omtrent 35 780 km. En høyere banehøyde enn den vi brukte i beregningene, vil føre til økt frittromstap og dermed lavere overføringskapasitet. Det er mulig å kompensere for det økte frittromstapet ved å bruke større antenner på satellitten. Cellestørrelse og elevasjonsvinkler er også avhengige av banehøyden og satellittoppsettet.

Parameter	Beregnet verdi for gitt båndbrede			
Tilgjengelig båndbredde	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Beregnet høyest mulig overføringskapasitet (Mbps)	3,8	4,6	4,7	4,8
Benyttet modulasjon	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK
Tilhørende koding	526/1024	308/1024	251/1024	193/1024
Simulert Eb/N0 (dB)	2,6	1,7	1,6	1,5
Utnyttet båndbredde (MHz)	4,7	9,5	11,8	15,6

Tabell D.2 Beregningsresultatene for opplink for celledørrelse på 17,5 km.

Parameter	Beregnet verdi for gitt båndbrede			
Tilgjengelig båndbredde	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Beregnet høyest mulig overføringskapasitet (Mbps)	8,7	13,3	16,9	18,0
Benyttet modulasjon	16QAM	16QAM	16QAM	QPSK
Tilhørende koding	616/1024	490/1024	378/1024	602/1024
Simulert Eb/N0 (dB)	5,5	4,5	3,6	2,8
Utnyttet båndbredde (MHz)	5	9,3	15	20

Tabell D.3 Beregningsresultatene for nedlink for celledørrelse på 17,5 km.

Parameter	Beregnet verdi for gitt båndbrede			
Tilgjengelig båndbredde	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Beregnet høyest mulig overføringskapasitet (Mbps)	0,28	0,30	0,30	0,30
Benyttet modulasjon	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK
Tilhørende koding	193/1024	193/1024	157/1024	193/1024
Simulert Eb/N0 (dB)	1,8	1,5	1,5	1,5
Utnyttet båndbredde (MHz)	1,0	1,0	1,2	1,0

Tabell D.4 Beregningsresultatene for opplink for celledørrelse på 70 km.

Parameter	Beregnet verdi for gitt båndbrede			
Tilgjengelig båndbredde	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Beregnet høyest mulig overføringskapasitet (Mbps)	1,8	1,9	1,9	1,9
Benyttet modulasjon	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK
Tilhørende koding	251/1024	193/1024	251/1024	193/1024
Simulert Eb/N0 (dB)	1,8	1,5	1,5	1,5
Utnyttet båndbredde (MHz)	4,9	6,6	8,1	6,5

Tabell D.5 Beregningsresultatene for nedlink for celledørrelse på 70 km.

E Test av NB-IoT over NTN

Narrowband Internet of Things (NB-IoT) er en 3GPP-funksjonalitet designet for IoT-enheter som bruker mobilkommunikasjon med redusert båndbredde (typisk 180 kHz) hovedsakelig med formål å optimalisere strømforbruk. Frekvenskanalen til NB-IoT er så smal at den kan ligge eksempelvis på et beskyttelsesbånd mellom to vanlige frekvenskanaler til mobilkommunikasjon. Smal båndbredde fører til relativt lav overføringskapasitet på noen få titalls kbps. NB-IoT er tilgjengelig på kommersielle 4G-mobilnett i Norge.

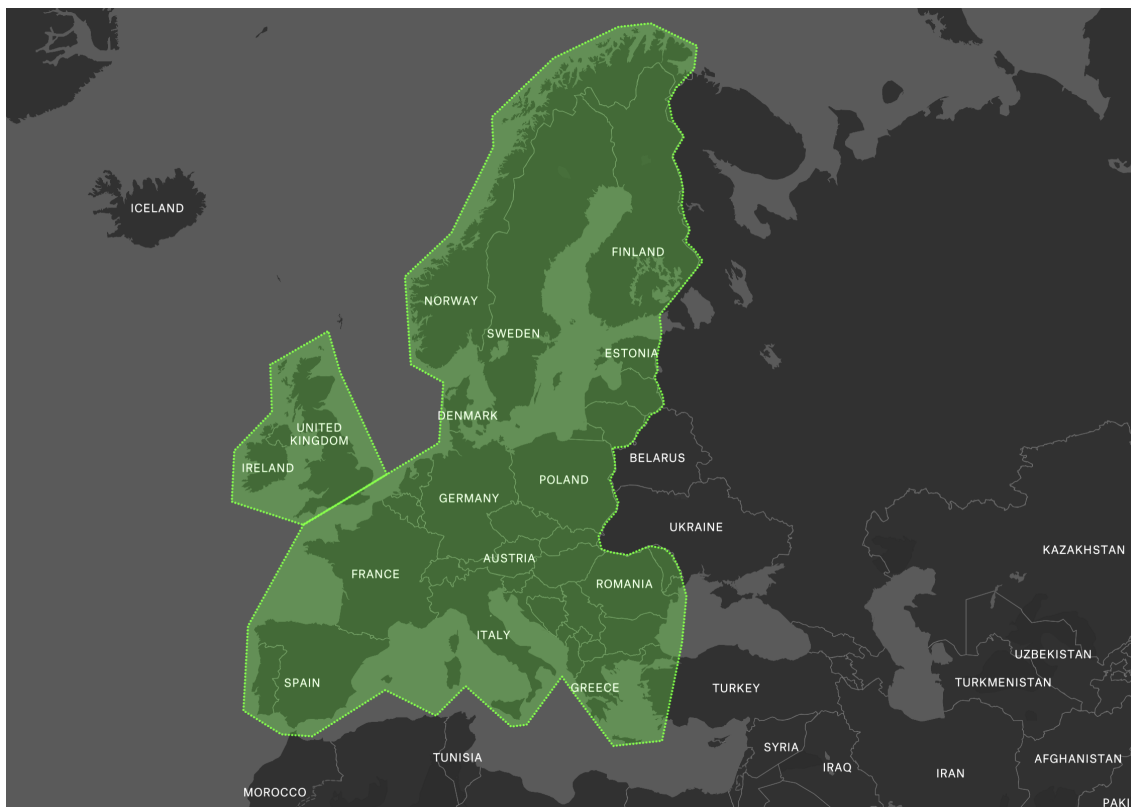
3GPP har også standardisert NB-IoT over NTN. Skylo er en leverandør som i samarbeid med mobiloperatørene, utstyrsprodusentene og satellittoperatørene tilbyr meldingstjeneste ved bruk av NB-IoT over NTN. Tjenesten er tilgjengelig i dag på enkelte Android-smarttelefoner, smartklokker og IoT-enheter [101]. Satellitttjenesten er tilgjengelig i flere europeiske land, inkludert Norge, og er støttet av nye telefonmodeller fra Google, Samsung og CAT. Skylo bruker geostasjonære (GEO) satellitter for å gi NTN-dekning, men har planer om å satse på lavbanesatellitter (LEO) også. Smalbåndskanaler som brukes til NB-IoT-kommunikasjon over NTN ligger innenfor NTN-frekvensbåndene n255 og n256 som var beskrevet i Tabell 3.5. Skylo har ambisjoner til å støtte fullstendig 5G-NTN i framtiden for å kunne levere vanlig datatjeneste til standard kommersielle brukerenheter.

Gjennom Skylo er det i dag mulig å sende SOS-meldinger på Google Pixel. Denne tjenesten leveres i samarbeid med Garmin som har en egen sentral som tar imot SOS-meldinger og kontakter lokale nødetater [102]. FFI har testet at det fungerer å sende SOS-meldinger via satellitt på en Google Pixel 9 i Norge. Samsung tilbyr bare å sende meldinger via operatøren Verizon og er bare tilgjengelig i USA [101].

CAT S75 støtter vanlige meldinger via satellitt i Norge [103]. Telefonen er laget i samarbeid med meldingstjenesten Bullitt [104] som leverer meldingstjenester over Skylo-satellitttjenesten. Bullitt oppgir at tjenesten har dekning i de fleste europeiske land, som vist i Figur E.1. På grunn av tilgjengelighet i Norge har FFI testet CAT S75. Imidlertid ble produksjon av CAT S75 stoppet i 2025.

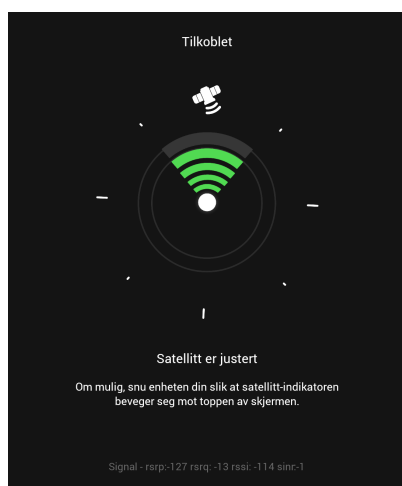
CAT S75 har blitt testet ved FFIs lokaler på Kjeller og flere steder i Troms og Finnmark. For at tjenesten skal fungere må man ha tilnærmet friskt mot sør, og være i et område uten dekning. Da vil telefonen automatisk prøve å koble seg til satellitttjenesten. Men det er også mulig å tvinge telefonen til å koble seg til satellitttjenesten selv om den befinner seg i et område med vanlig telefondekning. Siden satellitten er geostasjonær vil dens posisjon på himmelen endre seg avhengig av hvilken breddegrad man befinner seg på. Ved Kjeller er elevasjonsvinkelen mot sør på ca. 21 grader, mens i Nord-Norge kan elevasjonsvinkelen gå ned mot 11 grader. Dette betyr at det kan være vanskeligere å oppnå friskt i Nord-Norge enn i Sør-Norge.

For å sende meldinger må man bruke en app kalt *Bullitt Satellite Messenger* utviklet av Bullitt. Man bruker mobilnummer for å velge hvem man vil sende til. Appen kan både sende meldinger via satellitt eller 4G/5G/Wi-Fi, og støtter også mulighet for å dele lokasjon. Det er ikke mulig å sende bilder, videoer, eller andre filer. Mottakeren trenger ikke bruke den samme appen for å motta en melding, og kan motta en SMS i stedet. Hvis mottakeren ønsker å svare på meldingen må den bruke appen.

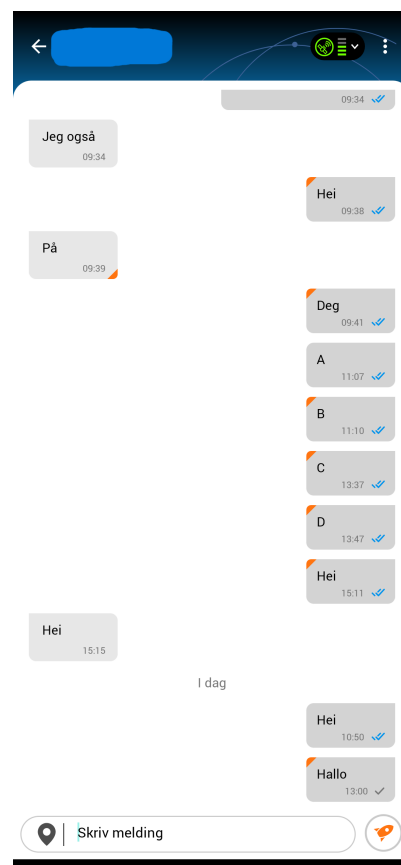


Figur E.1 Dekning i Europa for meldingstjenesten Bullitt gjennom NTN-tjenesten fra Skylo. Hentet fra [104].

CAT S75 og Bullitt fungerte tilstrekkelig under testing. Telefonen brukte ca. 1 minutt til å koble seg til satellittnettverket og etter dette hadde den dekning under alle testene. Det var viktig at telefonen var helt i ro mens den koblet seg til satellittnettverket. Det tok ca. 1–2 sekunder å sende en melding og det opplevdes ingen problemer å sende eller motta meldinger, uavhengig av meldingsstørrelse. Figur E.2 viser hvordan det ser ut å koble seg til satellittnettverket og sende melding med CAT S75 og Bullitt.



(a) CAT S75 som kobler seg til satellitt-nettverket i Bullitt-appen.



(b) Utforming av å sende meldinger i Bullitt-appen.

Figur E.2 Skjermdump fra Bullitt-appen som viser a) hvordan det ser ut når man kobler seg til satellitt-nettverket, og b) hvordan det ser ut å sende meldinger i Bullitt-appen.

F Mobilteknologi og satellittjenesten OneWeb

Selv om NTN ikke har kommet på markedet ennå, finnes det satellitterminaler i dag som har noen komponenter som er hentet fra mobilteknologi. Funksjonaliteten til slike dagens satellitterminaler ligner på hva som er forventet av fremtidige NTN-brukerenheter. Et eksempel på dette er satellitterminalen Kymeta Hawk u8 LEO som fungerer med OneWeb sine LEO-satellitter [105]. Terminalen er vist i figur F.1.



Figur F.1 Tre satellitterminaler fra Kymeta av modellen Hawk u8 LEO som fungerer med OneWeb sin satellittjeneste.

Størrelsen på terminalen er 90 cm i lengden og bredden. På markedet finnes det også andre kommersielle satellitterminaler som er mindre enn Kymeta sin terminal. Terminalprodusenter utvikler stadig nye satellitterminaler med bedre fasestyrte antenner for å kunne redusere terminalens størrelse og vekt med minst mulig reduksjon av ytelsen. Dermed forventes det at NTN-brukerenheter kommer til å være betydelig mindre enn Hawk u8 LEO fra Kymeta.

På OneWeb er signalet fra satellitt til terminal (nedlink) i frekvensområdet 10,70–12,75 GHz, mens signalet fra terminal til satellitt (opplink) er i 14,00–14,50 GHz-området. Sendeeffekten (EIRP) til Kymeta-terminalen ligger på maksimalt 66,6 dBm. Gjennom denne terminalen klarer OneWeb-satellittjenesten maksimalt å levere 195 Mbps i nedlink og 32 Mbps i opplink.

Satellitterterminalen fra Kymeta har en modul fra Qualcomm som er en kjent produsent av moduler for mobilkommunikasjon. Modulen inneholder identifikatorer som ICCID (*Integrated Circuit Card Identification*), IMEI (*International Mobile Equipment Identity*) og IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*), noe som brukes i mobilkommunikasjon for å identifisere, autentisere og registrere brukere i mobilnett.

ICCID er en identifikator knyttet til et SIM-kort. De første to sifrene var 89 på Kymeta-terminalen vi testet. Dette indikerer at terminalen inneholder et kort for mobilkommunikasjon. IMEI er et unikt nummer som identifiserer hver brukerenhet i et mobilnett. IMSI er et unikt nummer som identifiserer

abonnenten i et mobilnett og typisk er knyttet til et SIM-kort. De første fem sifrene i IMSI er en PLMN-kode (Public Land Mobile Network) som forteller hvilket mobilnett abonnenten er registrert på. PLMN-koden består av MCC (*Mobile Country Code*) og MNC (*Mobile Network Code*). I dette tilfellet var MCC 901, noe som betyr at mobiloperatøren er internasjonal, mens MNC var 60, noe som er registrert på OneWeb som mobiloperatør [106]. Alle disse identifikatorene tyder på at OneWeb har en del funksjonalitet i sitt system som vanligvis tilhører et kjernenett i et mobilnett. OneWeb bruker muligens mobilteknologiens mekanismer for blant annet identifisering, autentisering og registrering av brukere. I så fall vil hele OneWeb-systemet ligne på NTN, bortsett fra radiogrensesnittet som er OneWeb sin egen proprietære løsning.

G Beregninger av rekkevidde for sidelink

Vi beregner forventet rekkevidde over 5G-sidelink i frekvensbåndene fra tabell 3.9 i tre ulike scenarier: med frisikt, uten frisikt og med tett skog mellom to brukerenheter som har en sidelink-forbindelse med hverandre (D2D). Sendeeffekt på 23 dBm ble brukt for lisensierte frekvensbånd, mens sendeeffekt på 20 dBm er brukt for ulisensierte frekvensbånd [26]. Den største båndbredden som er tilgjengelig for hvert av disse frekvensbåndene, er brukt i beregningene. Mellombæreravstanden er valgt til å være 30 kHz for alle frekvensbånd.

Som vist gjennom simulering i [64] antar vi at signal-til-støy-nivå (SNR) må ligge på minst -5 dB for å få en fungerende forbindelse på laveste kanalkvalitetsnivå i tabell 5.2.2.1-2 i [99], noe som tilsvarer QPSK-modulasjon (Quadrature Phase Shift Keying) med koderaten $R = \frac{78}{1024}$. Sammenhengen mellom SNR og signaltap PL beregnes som

$$PL = P_{Tx} - 30 - NF - 10 \log_{10}(k_B T B) - SNR, \quad (G.1)$$

der P_{Tx} er sendeeffekten, NF er støyfaktoren, k_B er Boltzmann konstanten, T er temperaturen og B er båndbredden. Vi antar støyfaktoren NF til brukerenheten er 9 dB og temperaturen T er 290 K.

Tre forskjellige signaltap-modeller benyttes for å gi en sammenheng mellom signaltap og rekkevidde. De to første modellene er fra 3GPP og beskriver utendørsscenarier for en sidelink-forbindelse mellom to brukerenheter med og uten frisikt [107]. Den tredje modellen bruker ITU-R P.833 [108] for å beregne tilleggssignaltap til frisikt-modellen, noe som beskriver et tett skogsområde [30].

Resultatene i figur 3.8 demonstrerer at frekvensbånd, scenario og oppsett har en betydelig påvirkning på rekkevidden. Generelt sett fører en høyere frekvens til større signaltap og dermed kortere rekkevidde. Frekvensbånd n46, n96 og n102 er ulisensierte frekvensbånd som tillater lavere maksimal sendeeffekt og større båndbredde enn i lisensierte bånd, noe som påvirker rekkevidden negativt. Med frisikt kan man forvente en relativt lang rekkevidde på flere hundre meter, mens uten frisikt og i tett skog kan man bare forvente noen titalls til hundretalls meter. Det er viktig å være oppmerksom på at beregningene er basert på en ideell AWGN-kanal og et spesielt oppsett uten retransmisjoner. Man kan for eksempel forvente en lavere rekkevidde i en virkelig kanal, mens en lavere koderate¹⁴ og retransmisjoner kan føre til lengre rekkevidde.

¹⁴Den laveste støttede koderaten er $R = \frac{30}{1024}$. Med denne koderaten forventer vi en fungerende forbindelse ved SNR helt ned til -9 dB.

H Beregninger av overføringskapasitet for sidelink

Vi beregner forventet overføringskapasitet over 5G-sidelink for direkte kommunikasjon mellom to brukerenheter (D2D). Overføringskapasiteten på sidelink i bps kan estimeres som [109]

$$C = N_{\text{Layers}} Q_m f R \frac{12 N_{\text{PRB}}(B, \mu)}{T_S(\mu)} (1 - \text{OH}), \quad (\text{H.1})$$

der N_{Layers} er antallet MIMO-lag, Q_m er modulasjonsorden, f er en skaleringsfaktor, R er koderaten, $N_{\text{PRB}}(B, \mu)$ er antallet tilgjengelige ressursblokker avhengig av båndbredden B og numerologien μ , $T_S(\mu) = 10^{-3}/(14 \cdot 2^\mu)$ er tidslengden til en OFDM-symbol og OH er overheadfaktoren.

For hver mulig kombinasjon av båndbredde og numerologi beregner vi den minimale overføringskapasiteten ved lavest mulig modulasjon og koding, det vil si $Q_m = 2$ (QPSK) med $R = 30/1024$, og den maksimale overføringskapasiteten ved høyest mulig modulasjon og koding, det vil si $Q_m = 8$ (256QAM) med $R = 948/1024$. Modulasjons- og kodingsrate er basert på [99]. Resten av parametrene blir valgt som følger: $N_{\text{Layers}} = 2$, $f = 1$ og $N_{\text{PRB}}(B, \mu)$ i henhold til tabell 5.3.2-1 i [26], slik at kapasiteten maksimeres. Overheadfaktoren estimeres som 0,217 i FR1 og 0,25 i FR2 [109].

Båndbredde	Kapasitet i Mbps (QPSK, $R = \frac{30}{1024}$)			Kapasitet i Mbps (256QAM, $R = \frac{948}{1024}$)		
	Mellombæreravstand			Mellombæreravstand		
	15 kHz	30 kHz	60 kHz	15 kHz	30 kHz	60 kHz
5 MHz	0,39			48,71		
10 MHz	0,80	0,74	0,68	101,32	93,53	85,73
20 MHz	1,63	1,57	1,48	206,54	198,75	187,06
30 MHz	2,47	2,40	2,34	311,76	303,97	296,17
40 MHz	3,33	3,27	3,14	420,88	413,08	397,49
60 MHz		4,99	4,87		631,31	615,73
80 MHz		6,69	6,60		845,65	833,96
100 MHz		8,42	8,32		1063,88	1052,19

Tabell H.1 Estimert overføringskapasitet over sidelink ved lavest og høyest modulasjon og koding for ulike båndbredde og mellombæreravstand.

Tabell H.1 viser de estimerte overføringskapasitetene for sidelink ved ulike oppsett og i forskjellige scenarioer. Resultatene viser at overføringskapasiteten kan variere mye. Større båndbredde gir høyere overføringskapasitet, mens større mellombæreravstand reduserer overføringskapasiteten. Ved lavt signal-til-støy-forhold (SNR), for eksempel på lang avstand mellom to brukerenheter, benyttes det den laveste modulasjonen (QPSK) og koderaten ($R = \frac{30}{1024}$), noe som vil føre til at overføringskapasitet ligger mellom 400 kbps og 8 Mbps. I beste tilfelle, for eksempel med

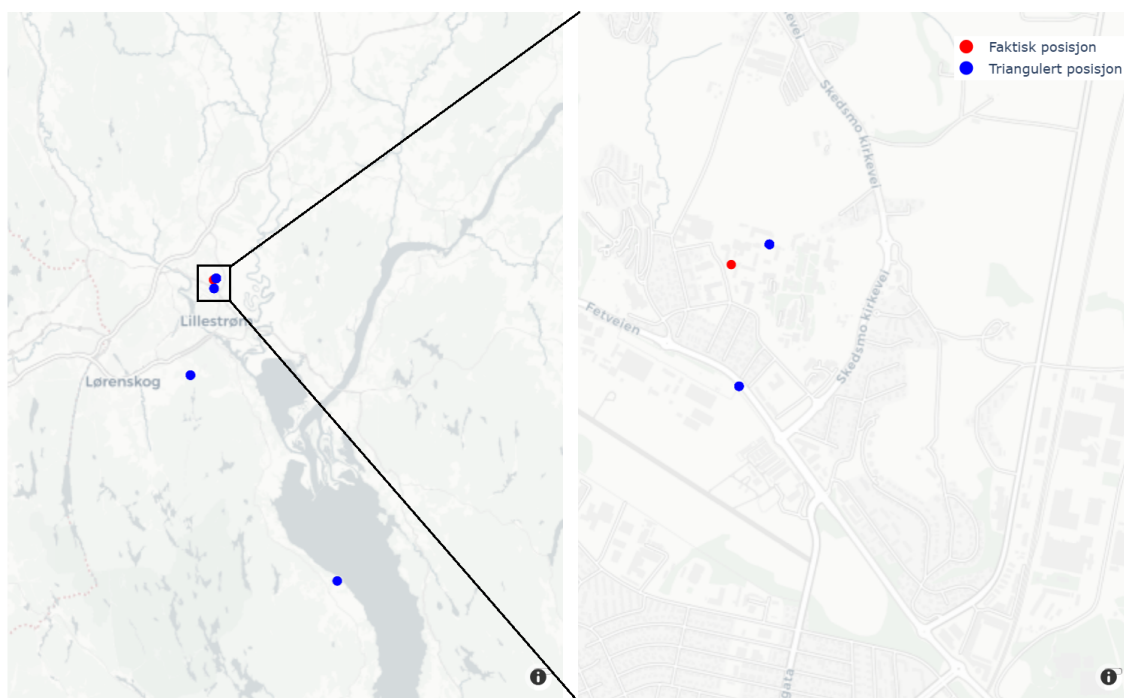
kort avstand mellom brukerenhetene, kan det benyttes den høyeste modulasjonen (256QAM) og koderaten ($R = \frac{948}{1024}$), noe som vil føre til overføringskapasitet som ligger mellom 50 Mbps og 1 Gbps.

Det er viktig å nevne at beregningene gjelder teoretisk ideelle forhold og ikke tar hensyn til carrier aggregation, tilbakemeldingskanalen eller retransmisjoner. Det forventes at overføringskapasiteten i et praktisk oppsett kan være noe mindre.

I Test av posisjoneringstjeneste gjennom radiomålinger og database

Blues er et amerikansk selskap som leverer fastvare og programvare for IoT-enehter. De lager blant annet enheten Notecard Cellular som støtter kommunikasjon via mobilnettet og Wi-Fi [110]. I tillegg har Notecard Cellular støtte for GNSS. Det er mulig å slå av GNSS og få posisjon estimert bare ved hjelp av triangulering basert på radiomålinger og database, som er beskrevet i kapittel 4.5.2. Notecard Cellular har tilgang til internett fra basestasjoner når den triangulerer posisjonen sin. Det er også mulig å bruke Wi-Fi for å forbedre estimatet av posisjonen, men den testede enheten støttet ikke Wi-Fi.

FFI testet posisjoneringen bare gjennom radiomålinger og database i løpet av to uker i februar 2025 for å undersøke nøyaktigheten. 93 målinger av posisjon ble utført hvor Notecard Cellular var plassert på samme sted hver gang. Figur I.1 viser de estimerte posisjonene fra triangulering og den faktiske posisjonen til Notecard Cellular. Målingene med samme posisjon blir lagt oppå hverandre i figuren, og fremstår som bare ett målepunkt.



Figur I.1 Triangulert og faktisk posisjon til Blues Notecard Cellular ved bruk av radiomålinger og database.

Ingen av de estimerte posisjonene var helt nøyaktige, men 79 målinger hadde et avvik på 167 meter, 6 med 453 meter avvik, ytterligere 6 med 5,14 kilometer avvik, og 2 målinger hadde et avvik på 18,35 kilometer. Det tok ca. 60 sekunder å utføre en posisjonsmåling. For posisjonene lengst unna varte bare målingene i under 10 sekunder. Dette kan bety at målingen ikke ble gjennomført fullstendig og kan forklare noe av det store avviket.

Forsøket viser at bruk av radiomålinger og database fungerer til å gi en grov posisjon til en brukerenhet. Likevel kan den estimerte posisjonen noen ganger være flere kilometer unna. Siden man ikke vet posisjonen til basestasjonene som blir brukt til målingene, vet man ikke om det er friskt mellom enhet og basestasjon. Dette kan påvirke den estimerte posisjonen. I tillegg kan refleksjoner føre til forstyrrelser i den estimerte posisjonen.

Forkortelser

2G	2nd Generation mobile network
3G	3rd Generation mobile network
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	4th Generation mobile network
5G	5th Generation mobile network
5G-A	5G Advanced
6G	6th Generation mobile network
AAU	Active Antenna Unit
AoA	Angle of Arrival
AoD	Angle of Departure
APN	Access Point Name
ATAK	Android Team Awareness Kit
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BBU	Baseband Unit
BLER	Block Error Rate
BWP	Bandwidth Part
COMPAD	Communications for Peacekeeping and Defence
D2D	Device-to-Device
DNN	Data Network Name
Eb/N0	Energy per bit to Noise Power Spectral Density ratio
EDF	European Defence Fund
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
eSIM	Embedded SIM
E-SMLC	Enhanced Serving Mobile Location Centre
FDD	Frequency Division Duplex
FKI	Forsvarets kommunikationsinfrastruktur
FR1	Frequency Range 1
FR2	Frequency Range 2
FR3	Frequency Range 3
GEO	Geostationary Earth Orbit
GNSS	Global Navigation Satellite System

GPS	Global Positioning System
G/T	Gain-to-Noise Temperature ratio
GTP	General packet radio service Tunnelling Protocol
HAPS	High-Altitude Platform Systems
HSPA	High-Speed Packet Access
ICCID	Integrated Circuit Card Identification
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IKT	Informasjons- og kommunikasjonsteknologi
IMEI	International Mobile Equipment Identity
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IMT	International Mobile Telecommunications
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IPsec	IP Security
IRIS ²	Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security by Satellite
ISAC	Integrated Sensing and Communication
ISL	Inter-Satellite Link
IST	Information Systems Technology panel
ITU-R	International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector
LAN	Local Area Network
LEO	Low Earth Orbit
LMF	Location Management Function
LTE	Long-Term Evolution
MCC	Mobile Country Code
MDF	Militær dekningsforlengelse
MEC	Multi-access Edge Computing
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MNC	Mobile Network Code
mmWave	Millimeter Wave
NARFA	National Allied Radio Frequency Agency Norway
NB-IoT	Narrowband IoT
NKOM	Nasjonal kommunikasjonsmyndighet
NPN	Non-Public Network
NPR	Noise Power Ratio

NR	New Radio
NSA	Non-Stand Alone
NTN	Non-Terrestrial Network
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PLMN	Public Land Mobile Network
PNI-NPN	Public Network Integrated NPN
PRS	Positioning Reference Signal
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAN	Radio Access Network
RedCap	Reduced Capability
RRC	Radio Resource Control
RRU	Remote Radio Unit
RSRP	Reference Signal Received Power
SA	Stand Alone
SIB	System Information Block
SIM	Subscriber Identity Module
SMS	Short Message Service
SNPN	Standalone NPN
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SRS	Sounding Reference Signal
STO	NATO Science and Technology Organization
TA	Timing Advance
TDD	Time-Division Duplexing
TMB	Taktisk mobilt bredband
TRP	Total Radiated Power
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UPF	User Plane Function
V2X	Vehicle-to-Everything
VPN	Virtual Private Network
VSAT	Very Small Aperture Terminal

Referanser

- [1] Forsvarsmateriell. *Mime*. [Internett]. 2025. URL: <https://www.fma.no/anskaffelser/virkningsprogrammet-mime>.
- [2] 5G COMPAD project. *5G Communications for Peacekeeping and Defence*. [Internett]. 2025. URL: <https://5gcompad.eu/>.
- [3] Petter Kristiansen og Anders Mykkeltveit. *Muligheter og sårbarheter ved bruk av kommersiell mobilteknologi i Forsvaret*. FFI-Rapport 19/01708. BEGRENSET. 2020.
- [4] Bodil Hvesser Farsund og Anne Marie Haugland. *5G i Forsvaret – muligheter og sikkerhetsutfordringer*. FFI-Notat 20/01206. 2019.
- [5] Agnius Birutis mfl. *A study of 5G New Radio and its vulnerability to jamming*. FFI-Rapport 22/00906. 2022.
- [6] 3GPP. *Introducing 3GPP*. [Internett]. URL: <https://www.3gpp.org/about-us/introducing-3gpp>.
- [7] ITU-R. *Handbook on International Mobile Telecommunications (IMT) 2022 edition*. Tekn. rapp. International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R), feb. 2022. URL: <https://www.itu.int/pub/R-HDB-62>.
- [8] ITU-R. *Requirements for the Radio Interface(s) for International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000)*. Tekn. rapp. RECOMMENDATION ITU-R M.1034-1 (02/1997). International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R), feb. 1997.
- [9] ITU-R. *Detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of International Mobile Telecommunications-Advanced (IMT-Advanced)*. Tekn. rapp. Recommendation ITU-R M.2012-6 (12/2023). International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R), des. 2023.
- [10] ITU-R. *Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)*. Tekn. rapp. Report ITU-R M.2410-0 (11/2017). International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R), nov. 2017.
- [11] ITU-R. *Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond*. Tekn. rapp. Recommendation ITU-R M.2160-0 (11/2023). International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R), nov. 2023.
- [12] Telia. *Telia først i Norge med skivedelt 5G-nett til Forsvaret*. [Internett]. 2023. URL: <https://presse.telia.no/pressreleases/telia-foerst-i-norge-med-skivedelt-5g-nett-til-forsvaret-3269729>.
- [13] Telenor. *Dette er 5G*. [Internett]. 2025. URL: <https://www.telenor.no/5g/>.
- [14] Wikipedia. *3GPP*. [Internett]. 2025. URL: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=3GPP&oldid=1266569357>.
- [15] 3GPP. *Releases*. [Internett]. 2025. URL: <https://portal.3gpp.org/Releases.aspx>.
- [16] ITU-R. *IMT Vision–Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*. Tekn. rapp. Recommendation ITU M.2083-0 (09/2015). International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R), 2015.

-
-
- [17] TechXplore. *How 5G disappointed 'pretty much everybody'*. [Internett]. 2023. URL: <https://techxplore.com/news/2023-02-5g-disappointed-pretty.html>.
- [18] Jillian Deutsch. «Why 5G is an Expensive Flop». I: *Bloomberg* (mar. 2025). [Internett]. URL: <https://www.bloomberg.com/explainers/why-5g-is-an-expensive-flop>.
- [19] Nokia. *Transforming the 6G vision to action*. Technical White Paper. 2024. URL: <https://www.nokia.com/asset/214027>.
- [20] Telenor. *Vil forsvare landet med 5G*. Pressemelding [Internett]. Sep. 2022. URL: <https://kommunikasjon.ntb.no/pressemelding/18034980/vil-forsvare-landet-med-5g?publisherId=17848695&lang=no>.
- [21] Ice. *Ice skrur på «ren 5G»*. Pressemelding [Internett]. Sep. 2024. URL: <https://kommunikasjon.ntb.no/pressemelding/18251657/ice-skrur-pa-ren-5g?publisherId=17846952&lang=no>.
- [22] Arild Færaas. «Vi ble presset til å svekke mobilsikkerheten på 80-tallet». I: *Aftenposten* (jan. 2014). URL: <https://www.aftenposten.no/norge/i/3MJv/--Vi-ble-preset-til-a-svekke-mobilsikkerheten-pa-80-tallet>.
- [23] Stefan Rommer mfl. *The Core Network for 5G Advanced*. London: Academic Press, 2025.
- [24] ENEA. *Location Tracking on The Battlefield*. Tekn. rapp. ENEA, 2024. URL: <https://www.enea.com/insights/location-tracking-on-battlefield/>.
- [25] 3GPP. *System architecture for the 5G System (5GS); Stage 2*. Technical report (TR) 23.501. V18.9.0 (2025-03). 3rd Generation Partnership Project (3GPP), mar. 2025. URL: <https://3gpp.org/dynareport/23501.htm>.
- [26] 3GPP. *User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone*. Technical Specification (TS) 38.101-1. Version 19.3.1. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), okt. 2025. URL: <https://3gpp.org/dynareport/38101-1.htm>.
- [27] NKOM. *Frekvenskompass for mobilkommunikasjon*. Tekn. rapp. 6. utgave. Nasjonal kommunikasjonsmyndighet (NKOM), 2022. URL: <https://nkom.no/aktuelt/ny-utgave-av-frekvenskompasset-for-mobil-frem-mot-2030>.
- [28] Wikipedia. *Liste over frekvenser for telekommunikasjon i Norge*. [Internett]. 2025. URL: https://no.wikipedia.org/wiki/Liste_over_frekvenser_for_telekommunikasjon_i_Norge.
- [29] Nasjonal kommunikasjonsmyndighet (NKOM). *Høring av innledende vurderinger for tildeling av 1500 MHz- og 26 GHz-båndene*. [Internett]. 2024. URL: <https://nkom.no/tidligere-horinger/horing-av-innledende-vurderinger-for-tildeling-av-1500-mhz-og-26-ghz-bandene>.
- [30] Agnius Birutis. *Dekning, rekkevidde og kapasitet for et 5G-radiosystem*. FFI-Rapport 23/01500. 2023.
- [31] 3GPP. *User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone*. Technical Specification (TS) 38.101-2. Version 18.8.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), jan. 2025. URL: <https://3gpp.org/dynareport/38101-2.htm>.
- [32] Nasjonal kommunikasjonsmyndighet (NKOM). *Tilgang til mobildata i Norge*. [Internett]. 2025. URL: <https://nkom.no/statistikk/nokkeltall-og-interaktive-dashbord/mobildekning>.

-
-
- [33] Doffin. *Tactical Mobile Broadband Link - Markedsundersøkelse (RFI)*. [Internett]. Mar. 2023. URL: <https://www.doffin.no/notices/2023-686512>.
- [34] Nasjonal kommunikasjonsmyndighet (NKOM). *Høring: 2,3 GHz-båndet til beredskapsaktører*. [Internett]. 2024. URL: <https://nkom.no/aktuelt/horing-2-3-ghz-bandet-til-beredskapsaktorer>.
- [35] Joern Krause (3GPP). *Non-Terrestrial Networks (NTN)*. [Internett]. 2024. URL: <https://www.3gpp.org/technologies/ntn-overview>.
- [36] 3GPP. *Release 17 Description*. Technical report (TR) 21.917. Version 17.0.1. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), jan. 2023. URL: <https://3gpp.org/dynareport/21917.htm>.
- [37] Andrew Wooden (Telecoms). *Starlink indicates its satellite-to-phone service will drop next year*. [Internett]. 2023. URL: <https://www.telecoms.com/telecoms-infrastructure/starlink-indicates-its-satellite-to-phone-service-will-drop-next-year>.
- [38] Apple. *Use Emergency SOS via satellite on your iPhone*. [Internett]. 2024. URL: <https://support.apple.com/en-us/101573>.
- [39] Apple. *About Messages via satellite on your iPhone*. [Internett]. 2025. URL: <https://support.apple.com/en-us/120930>.
- [40] European Commission. *IRIS²: the new EU Secure Satellite Constellation*. [Internett]. 2025. URL: https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space/iris2-secure-connectivity_en.
- [41] 3GPP. *Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks*. Technical report (TR) 38.811. Version 15.4.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), okt. 2020. URL: <https://3gpp.org/dynareport/38811.htm>.
- [42] 3GPP. *Release 18 Description*. Technical report (TR) 21.918. Version 2.0.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), jan. 2025. URL: <https://3gpp.org/dynareport/21918.htm>.
- [43] Reiner Stuhlfauth. *5G NTN Takes Flight: Technical Overview of 5G Non-Terrestrial Networks*. Technical White Paper. 2022. URL: https://www.rohde-schwarz.com/us/solutions/test-and-measurement/aerospace-defense/satellite-test/white-paper-5g-ntn-takes-flight-technical-overview-of-5g-non-terrestrial-networks_255919.html.
- [44] 3GPP. *Non-Terrestrial Networks (NTN)*. [Internett]. 2025. URL: <https://www.3gpp.org/technologies/ntn-overview>.
- [45] 3GPP. *5G; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 5: Satellite access Radio Frequency (RF) and performance requirements*. Technical Specification (TS) 38.101-5. Version 19.2.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), okt. 2025. URL: <https://3gpp.org/dynareport/38101-5.htm>.
- [46] 3GPP. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception for satellite access*. Technical Specification (TS) 36.102. Version 19.1.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), okt. 2025. URL: <https://3gpp.org/dynareport/36102.htm>.

-
-
- [47] Wikipedia. *Iridium satellite constellation*. 2025. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Iridium_satellite_constellation&oldid=1321610534.
- [48] 3GPP. *Service requirements for the 5G system*. Technical Specification (TS) 22.261. Version 18.18.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), jun. 2025. URL: <https://3gpp.org/dynareport/22261.htm>.
- [49] 3GPP. *User Equipment (UE) radio transmission and reception for enhanced NR sidelink*. Technical report (TR) 38.785. Version 17.0.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), jun. 2022. URL: <https://3gpp.org/dynareport/38785.htm>.
- [50] Regjeringen.no. *Regjeringen vil bruke moderne 5G-teknologi for Norges nye nødnett*. Aug. 2025. URL: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/regjeringa-vil-bruke-moderne-5g-teknologi-for-norges-nye-nodnett/id3117254/>.
- [51] CritComm Insights. *Told in Their Own Words: Live 5G Sidelink Demonstration from Alea, Qualcomm, and Softil*. Des. 2023. URL: <https://www.critcomminsights.com/analysis/2023/12/20/told-in-their-own-words-live-5g-sidelink-demonstration-from-alea-qualcomm-and-softil>.
- [52] Walt Magnussen. *Texas A&M: Walt Magnussen talks 5G Sidelink progress, prioritization tests*. Interview by Donny Jackson, Urgent Communications. Jul. 2025. URL: <https://urgentcomm.com/push-to-x/texas-a-m-walt-magnussen-talks-5g-sidelink-progress-prioritization-tests>.
- [53] 3GPP. *Service requirements for enhanced V2X scenarios*. Technical Specification (TS) 22.186. Version 18.0.1. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), apr. 2024. URL: <https://3gpp.org/dynareport/22186.htm>.
- [54] Mario H. Castañeda Garcia mfl. «A Tutorial on 5G NR V2X Communications». I: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 23.3 (2021), s. 1972–2026. DOI: 10.1109/COMST.2021.3057017.
- [55] Agnius Birutis og Anders Mykkeltveit. *Mulige nettverksoppsett for stridsledelsessystemet ATAK*. FFI-Notat Eksternnotat 24/01639. Unntatt Offentlighet. 2024.
- [56] 3GPP. *Study on NR Vehicle-to-Everything (V2X)*. Technical report (TR) 38.885. Version 16.0.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), mar. 2019. URL: <https://3gpp.org/dynareport/38885.htm>.
- [57] 3GPP. *Study on NR sidelink relay*. Technical report (TR) 38.836. Version 17.0.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), mar. 2021. URL: <https://3gpp.org/dynareport/38836.htm>.
- [58] 3GPP. *Overall description of Radio Access Network (RAN) aspects for Vehicle-to-everything (V2X) based on LTE and NR*. Technical report (TR) 37.985. Version 18.0.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), jan. 2024. URL: <https://3gpp.org/dynareport/37985.htm>.
- [59] 3GPP. *Proximity-services (ProSe) in 5G System (5GS) protocol aspects; Stage 3*. Technical Specification (TS) 24.554. Version 18.7.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), jan. 2025. URL: <https://3gpp.org/dynareport/24554.htm>.
- [60] 3GPP. *Multiplexing and channel coding*. Technical Specification (TS) 38.212. Version 18.2.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), mar. 2024. URL: <https://3gpp.org/dynareport/38212.htm>.

-
-
- [61] 3GPP. *Proximity based Services (ProSe) in the 5G System (5GS)*. Technical Specification (TS) 23.304. Version 18.7.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), sep. 2024. URL: <https://3gpp.org/dynareport/23304.htm>.
- [62] 3GPP. *Architecture enhancements for 5G System (5GS) to support Vehicle-to-Everything (V2X) services*. Technical Specification (TS) 23.287. Version 18.4.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), sep. 2024. URL: <https://3gpp.org/dynareport/23287.htm>.
- [63] 3GPP. *Mission Critical Services Common Requirements (MCCoRe); Stage 1*. Technical Specification (TS) 22.280. Version 18.5.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), des. 2023. URL: <https://3gpp.org/dynareport/22280.htm>.
- [64] Peng Liu mfl. «Towards 5G new radio sidelink communications: A versatile link-level simulator and performance evaluation». I: *Computer Communications* 208 (2023), s. 231–243. ISSN: 0140-3664. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.06.005>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366423002001>.
- [65] Lyse. *Oppnådde maksimal 5G-hastighet – trolig norgesrekord*. [Internett]. 2024. URL: <https://www.lysekonsern.no/om-oss/nyhetsarkiv/oppnaade-maksimal-5g-hastighet-trolig-norgesrekord>.
- [66] Telia. *Telia og Sony testet høykapasitets 5G under Ski-VM: – Ekstreme ytelser og bakkerekord*. [Internett]. 2025. URL: <https://presse.telia.no/pressreleases/telia-og-sony-testet-hoykapasitets-5g-under-ski-vm-ekstreme-ytelser-og-bakkerekord-3378780>.
- [67] European Commission. *Carolyn Taylor, 3GPP MCC*. [Internett]. 2023. URL: <https://www.3gpp.org/technologies/nr-redcap-glimpse>.
- [68] Qualcomm Dr. Kiran Mulkavilli. *5G NR-Light (RedCap): Revolutionizing IoT*. [Internett]. 2022. URL: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2022/07/what-is-5g-nr-light-a-k-a-redcap-and-how-will-it-accelerate-t>.
- [69] Share Technote. *5G/NR - NR Light/RedCap*. [Internett]. 2025. URL: https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_NR_Light.html.
- [70] Linh-An Phan mfl. «Demonstration of LAN-type Communication for an Industrial 5G Network». I: *IEEE INFOCOM 2023 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. Okt. 2023. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10826968>.
- [71] CumuCore Oy. *Europe's first 5G LAN which works in layer 2 networking (Ethernet PDU)*. Jul. 2023. URL: <https://cumucore.com/cumucore-news-and-events/europes-first-5glan-ethernet-pdu/>.
- [72] Eli Gjorven mfl. *Edge computing — operative effekter og teknologiske muligheter for Forsvaret*. FFI-Rapport 25/01500. 2025. URL: <https://www.ffi.no/publikasjoner/arkiv/edge-computing-operative-effekter-og-teknologiske-muligheter-for-forsvaret>.
- [73] 3GPP. *5G System Enhancements for Edge Computing; Stage 2*. Technical report (TR) 23.548. V18.10.0 (2025-06). 3rd Generation Partnership Project (3GPP), jun. 2025. URL: <https://3gpp.org/dynareport/23548.htm>.

-
-
- [74] ETSI. *Multi-access Edge Computing (MEC); Terminology 2*. Technical report (TR) ETSI GR MEC 001. V3.2.1 (2024-02). ETSI, feb. 2024. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gr/MEC/001_099/001/03.02.01_60/gr_mec001v030201p.pdf.
- [75] ETSI. *Multi-access Edge Computing (MEC). MEC 5G Integration*. Group report ETSI GR MEC 031. V2.1.1 (2020-10). ETSI, okt. 2020. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gr/MEC/001_099/031/02.01.01_60/gr_MEC031v020101p.pdf.
- [76] Telefonica. *Edge Computing, 3 case studies*. Feb. 2022. URL: <https://telefonicatech.com/en/blog/edge-computing-3-case-studies>.
- [77] Ericsson AB. *Ericsson and Far EasTone pave the way for new 5G Network Slicing use cases through Local Packet Gateway*. Jul. 2022. URL: <https://www.ericsson.com/en/news/2022/7/ericsson-and-fet-pave-the-way-for-new-5g-network-slicing-use-cases-through-local-packet-gateway>.
- [78] Ericsson. *Positioning with LTE*. White paper 284 23-3155. Ericsson, 2011. URL: <https://www.sharetechnote.com/Docs/WP-LTE-positioning.pdf>.
- [79] 3GPP. *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Stage 2 functional specification of User Equipment (UE) positioning in E-UTRAN*. Technical report (TR) 36.305. Version 18.0.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), feb. 2025. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136305/18.00.00_60/ts_136305v180000p.pdf.
- [80] 3GPP. *5G; NG Radio Access Network (NG-RAN); Stage 2 functional specification of User Equipment (UE) positioning in NG-RAN*. Technical report (TR) 38.305. Version 18.4.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), feb. 2025. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138305/18.04.00_60/ts_138305v180400p.pdf.
- [81] 3GPP. *Technical Specification Group Radio Access Network; Study on requirements and use cases for network verified UE location for Non-Terrestrial-Networks (NTN) in NR*. Technical report (TR) 38.882. Version 18.0.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), feb. 2025. URL: https://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/38_series/38.882.
- [82] Vishnu Rajendran Chandrika mfl. «SPIN: Synchronization Signal-Based Positioning Algorithm for IoT Nonterrestrial Networks». I: *IEEE Internet of Things Journal* 10.23 (2023), s. 20846–20867.
- [83] Alejandro Gonzalez-Garrido mfl. «Interference analysis and modeling of Positioning Reference Signals in 5G NTN». I: *IEEE Open Journal of the Communications Society* (2024).
- [84] Harish K Dureppagari mfl. «LEO-based Positioning: Foundations, Signal Design, and Receiver Enhancements for 6G NTN». I: *arXiv preprint arXiv:2410.18301* (2024).
- [85] 3GPP. *NR; Sidelink Positioning Protocol (SLPP); Protocol Specification*. Technical Specification (TS) 38.355. Version 18.5.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), mar. 2025. URL: <https://3gpp.org/dynareport/38355.htm>.
- [86] Taylan Şahin mfl. «Performance Evaluation of 5G Sidelink Positioning». I: *2023 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*. 2023, s. 177–182. DOI: 10.1109/CSCN60443.2023.10453141.

-
-
- [87] Zhi Chen mfl. «A survey on terahertz communications». I: *China Communications* 16.2 (2019), s. 1–35. DOI: 10.12676/j.cc.2019.02.001.
- [88] ETSI. *TeraHertz modeling (THz); Identification of use cases for THz communication systems*. Group report (GR) THz 001. Version 1.1.1. European Telecommunications Standards Institute, jan. 2024. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gr/THz/001_099/001/01.01.01_60/gr_THz001v010101p.pdf.
- [89] Eliane Semaan mfl. *6G Spectrum – Enabling the Future Mobile Life Beyond 2030*. White Paper GFTL-23:000243 Uen. Ericsson, mai 2024. URL: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/6g-spectrum-enabling-the-future-mobile-life-beyond-2030>.
- [90] Alan Davidson. *National Spectrum Strategy Implementation Plan*. Tekn. rapp. National Telecommunications og Information Administration, mar. 2024.
- [91] 3GPP. *3GPP Highlights - Newsletter Issue 06 (May 2023)*. [Internett]. 2023. URL: <https://www.3gpp.org/newsletter-issue-06-may-2023>.
- [92] Alireza Bayesteh mfl. *Integrated Sensing and Communication (ISAC) — From Concept to Practice*. Tekn. rapp. Huawei Research Issue 2. Huawei Technologies Co., Ltd., 2022. URL: <https://www-file.huawei.com/-/media/corp2020/pdf/publications/huawei-research/issue2/isac-en.pdf?la=en>.
- [93] 3GPP. *Integrated Sensing and Communication*. Technical Specification (TS) 22.137. Version 19.1.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), apr. 2024. URL: <https://3gpp.org/dynareport/22137.htm>.
- [94] 3GPP. *Study on Integrated Sensing and Communication*. Technical report (TR) 22.837. Version 19.4.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), jun. 2024. URL: <https://3gpp.org/dynareport/22837.htm>.
- [95] 3GPP. *Study on 6G Use Cases and Service Requirements*. Technical report (TR) 22.870. Version 0.2.1. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), mar. 2025. URL: <https://3gpp.org/dynareport/22870.htm>.
- [96] Qualcomm. *When wireless sensing meets communications: What new efficiencies and experiences can you expect in the 6G era?* [Internett]. 2024. URL: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2024/09/when-wireless-sensing-meets-communications-what-new-efficiencies-and-experiences-can-you-expect-in-the-6g-era>.
- [97] Ericsson. *Antenna System*. [Internett]. 2025. URL: <https://www.ericsson.com/en/portfolio/networks/ericsson-radio-system/antenna-system>.
- [98] 3GPP. *Numbering, addressing and identification*. Technical Specification (TS) 23.003. Version 19.3.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), jun. 2025. URL: <https://3gpp.org/dynareport/23003.htm>.
- [99] 3GPP. *Physical layer procedures for data*. Technical Specification (TS) 38.214. Version 18.2.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), mar. 2024. URL: <https://3gpp.org/dynareport/38214.htm>.
- [100] Jakob Hoydis mfl. *Sionna*. Versjon 1.2.1. <https://nvlabs.github.io/sionna/>. 2022.
- [101] Skylo. *Certified Devices*. [Internett]. 2025. URL: <https://www.skylo.tech/certified-devices>.

-
-
- [102] Garmin. *SOS Coverage and What Happens When Triggering an SOS*. [Internet]. 2025. URL: <https://support.garmin.com/en-US/?faq=dENvi0yoo5lib0Zh8L4E16>.
- [103] Multicom. *Cat S75 - 5G smarttelefon - 6GB/128GB*. [Internet]. 2025. URL: <https://www.multicom.no/cat-s75-5g-smarttelefon-6gb-128gb/cat-p/c/p1003712212>.
- [104] Bullitt. *Bullitt Satellite Messenger*. [Internet]. 2025. URL: <https://bullitt.com/>.
- [105] Kymeta. *Hawk u8*. [Internet]. 2025. URL: <https://www.kymetacorp.com/products/hawk-u8>.
- [106] Wikipedia. *Mobile country code*. [Internet]. 2025. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Mobile_country_code&oldid=1275748347.
- [107] 3GPP. *Study on LTE device to device proximity services; Radio aspects*. Technical report (TR) 36.843. Version 12.0.1. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), mar. 2014. URL: <https://3gpp.org/dynareport/36843.htm>.
- [108] ITU-R. *Attenuation in vegetation*. Recommendation P.833-10. International Telecommunication Union (ITU), 2021. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.833>.
- [109] 3GPP. *User Equipment (UE) radio access capabilities*. Technical Specification (TS) 38.306. Version 18.4.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), des. 2024. URL: <https://3gpp.org/dynareport/38306.htm>.
- [110] Blues. *The Notecard Cellular*. [Internet]. 2025. URL: <https://blues.com/products/notecard/notecard-cellular/>.

Om FFI

Forsvarets forskningsinstitutt ble etablert 11. april 1946. Instituttet er organisert som et forvaltningsorgan. Med særskilte fullmakter underlagt Forsvarsdepartementet.

FFIs formål

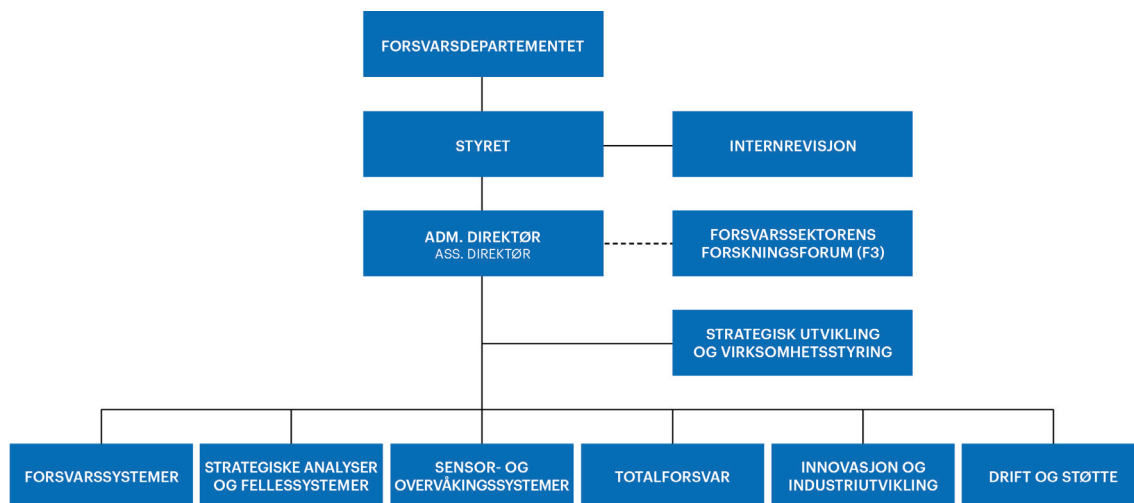
Forsvarets forskningsinstitutt er Forsvarets sentrale forskningsinstitusjon og har som formål å drive forskning og utvikling for Forsvarets behov. Videre er FFI rådgiver overfor Forsvarets strategiske ledelse. Spesielt skal instituttet følge opp trekk ved vitenskapelig og militærteknisk utvikling som kan påvirke forutsetningene for sikkerhetspolitikken eller forsvarsplanleggingen.

FFIs visjon

FFI gjør kunnskap og ideer til et effektivt forsvar.

FFIs verdier

Skapende, drivende, vidsynt og ansvarlig.



Forsvarets forskningsinstitutt (FFI)
Postboks 25
2027 Kjeller

Besøksadresse:
Kjeller: Instituttveien 20, Kjeller
Horten: Nedre vei 16, Karljohansvern, Horten

Telefon: 91 50 30 03
E-post: post@ffi.no
ffi.no

Norwegian Defence Research Establishment (FFI)
PO box 25
NO-2027 Kjeller
NORWAY

Visitor address:
Kjeller: Instituttveien 20, Kjeller
Horten: Nedre vei 16, Karljohansvern, Horten

Telephone: +47 91 50 30 03
E-mail: post@ffi.no
ffi.no/en