



**FFI** Forsvarets  
forskningsinstitutt

23/01500

FFI-RAPPORT

# Dekning, rekkevidde og kapasitet for et 5G-radiosystem

Agnius Birutis



# Dekning, rekkevidde og kapasitet for et 5G-radiosystem

Agnius Birutis

---

---

## **Emneord**

5G NR  
Mobilkommunikasjon  
Radiodekning  
Radiokommunikasjon  
Radioplanlegging  
Rekkevidde

## **FFI-rapport**

23/01500

## **Prosjektnummer**

1659

## **Engelsk tittel**

Coverage, range and capacity of a 5G radio system

## **Elektronisk ISBN**

978-82-464-3484-1

## **Godkjenner**

Joakim Flathagen, *forskningsleder*

*Dokumentet er elektronisk godkjent og har derfor ikke håndskreven signatur.*

## **Opphavsrett**

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

---

---

## Sammendrag

Allerede i dag benytter Forsvaret kommersiell mobilteknologi, og det er mange grunner til å tro at militær bruk av mobilteknologi vil øke i framtiden. Femtegenerasjons mobilteknologi (5G) kan derfor bli en vesentlig komponent i den militære IKT-infrastrukturen. Nye radiokapabiliteter, virtualisering av nettverkskomponenter og forbedret sikkerhet gjør at 5G-teknologien kan bli tilpasset militære behov i enda høyere grad enn forrige generasjoner av mobilteknologi (2G, 3G og 4G). Forsvaret trenger derfor å kjenne egenskapene til teknologien for å vite hvor 5G er egnet. Denne studien tar for seg 5G-radiogrensesnittet *New Radio* (NR) og studerer dekningen, rekkevidden og kapasiteten i et 5G-radiosystem.

Rapporten presenterer teori om dekning og radiopropagasjonsmodeller. Vi har gjennomført radiomålinger i felt for å samle måledata og få praktisk erfaring med 5G-radiosystemer. Målingene ble tatt i ulike typer terreng med forskjellige 5G-oppsett. Vi har benyttet disse måledataene til å lage en modell som kan estimere dekningen, rekkevidden og kapasiteten til en 5G-basestasjon. I rapporten viser vi hvordan modellen kan brukes, og diskuterer metoder for å anslå den beste plasseringen av 5G-basestasjoner, forutsi tjenestekvaliteten og evaluere hvor mye eller hva slags utstyr som trengs.

På bakgrunn av resultatene har vi utarbeidet noen konkrete anbefalinger som skal sørge for at Forsvaret kan bruke 5G-dekning effektivt:

- Forsvaret bør ha tilgang til gode verktøy for å planlegge radiosamband. Radioplanleggingsverktøy må kunne støtte dekningsberegninger som gjelder 5G-radiokommunikasjon. Ved høye 5G-frekvenser er det spesielt viktig med god radioplanning for å utnytte omkringliggende terreng og oppnå færrest mulig hindringer for signalet mellom kommunikasjonsnoder.
- Forsvaret bør sørge for å ha frekvenser til militær bruk av 5G på så lave frekvensområder som mulig. Lave frekvensbånd gir betydelig bedre dekning i skog enn høye frekvensbånd.
- Forsvaret bør sørge for at sendeeffekten på brukerenheter er så høy som mulig. Det er derfor viktig å skaffe brukerenheter som støtter høy effekt og er utstyrt med gode antenner. Sendeeffekten kan også maksimeres ved å optimalisere parameterinnstillinger på basestasjonen.

---

---

## Summary

Commercial mobile technology is already in use by the Norwegian Armed Forces. There are many reasons to believe that military use of mobile technology will increase in the future. Fifth-generation mobile technology (5G) can become an essential component of the military ICT infrastructure. New radio capabilities, virtualisation of network components, and improved security make 5G technology easily adaptable to military needs to an even greater extent than previous generations of mobile technology (2G, 3G, and 4G). Norwegian Armed Forces need to investigate the technology in order to determine the suitable areas for 5G integration. This study focuses on the 5G radio interface, *New Radio* (NR), and studies the coverage, range, and capacity of a 5G radio system.

Our report presents theory about coverage and radio propagation models. We carried out radio measurements in the field to gather data and gain practical experience with 5G radio systems, measuring in different types of terrain with different 5G configurations. We then used these measurements to create a model for estimating the coverage, range, and capacity of a 5G base station. In our report, we show possible applications of our model and discuss various methods for estimating the best placement of 5G base stations, predicting service quality, and evaluating the required number or type of equipment.

Based on our results, we have drafted some concrete recommendations for the Norwegian Armed Forces to utilise 5G coverage effectively:

- The Norwegian Armed Forces should have access to proper tools for radio planning. Radio planning tools must be able to support coverage calculations that apply to 5G radio communication. At high 5G frequencies, good radio planning is particularly important to utilize the surrounding terrain and have as few obstacles as possible for the signal between communication nodes.
- The Norwegian Armed Forces should ensure that the frequency range for military use of 5G is as low as possible. Low-frequency bands provide considerably better coverage in forested areas than high-frequency bands.
- The Norwegian Armed Forces should ensure that the transmit power of user equipment is as high as possible. Therefore, it is important to acquire user equipment that supports high power and is equipped with proper antennas. The transmit power can also be maximised by optimising parameter settings at the base station.

---

---

# Innhold

<b>Sammendrag</b>	3
<b>Summary</b>	4
<b>Forord</b>	7
<b>1 Introduksjon</b>	9
1.1 Metode	9
1.2 Avgrensning	10
1.3 Rapportens struktur	10
<b>2 Relevant teori om dekning og rekkevidde</b>	11
2.1 Modeller for signaltap	12
2.1.1 Modeller for signaltap i ulike terreng	12
2.1.2 Verktøyet WRAP for dekningskart	15
2.2 Egenskaper til antenner i et 5G-radiosystem	15
2.2.1 Basestasjon	15
2.2.2 Brukerenhet	17
<b>3 Målinger</b>	19
3.1 Måleutstyr	19
3.1.1 5G-basestasjoner	19
3.1.2 5G-brukerenheter	19
3.1.3 Test av overføringshastighet	21
3.2 Målesteder og terreng	21
<b>4 Resultater</b>	23
4.1 Dekning, rekkevidde og kapasitet i en makrocelle	23
4.1.1 Punktmålinger	23
4.1.2 Modellering	23
4.1.3 Estimert kapasitet for ulik avstand og terrengtyper	25
4.1.4 Estimert rekkevidde for ulike 5G-oppsett og terrengtyper	26
4.1.5 Dekningskart	27
4.2 Dekning, rekkevidde og kapasitet i en pikocelle	30
4.2.1 Modellering	30
4.2.2 Estimert kapasitet for ulik avstand og terrengtyper	30
4.2.3 Estimert rekkevidde for ulike 5G-oppsett og terrengtyper	32
4.2.4 Dekningskart	33
<b>5 Diskusjon</b>	36
5.1 Usikkerhet i resultater	36

---

---

5.1.1	Estimert rekkevidde	36
5.1.2	Dekningsberegninger i skog	36
5.2	Sammenligning av makrocelle, mikrocelle og pikocelle	37
5.3	Forskjellige frekvensområder	37
5.3.1	Andre frekvensområder enn 2–5 GHz	38
5.4	Kapasitet	38
5.5	Sendeeffekt i opplink	39
5.5.1	Sendeeffekt i opplink som begrensede faktor for rekkevidde	39
5.5.2	Direktive antenner for økt sendeeffekt i opplink	39
5.6	Parameterjustering for maksimering av rekkevidde	41
5.6.1	Beskyttelsesperiode	42
5.6.2	Random Access Channel (RACH)	42
5.6.3	Cell Range	44
5.6.4	Uplink Power Control	44
5.6.5	Diverse terskler	44
5.7	Radioplanlegging	45
5.7.1	Optimal posisjon av en basestasjon	45
5.7.2	Dataoverføring fra en sensor	46
5.7.3	Radioplanlegging i fremskaffelse	47
5.7.4	Integrasjon mot militære systemer	47
<b>6</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>48</b>
	<b>Forkortelser</b>	<b>49</b>
	<b>Referanser</b>	<b>50</b>



---

## Forord

Rapportens forfatter ønsker å takke medlemmer i Team 5G i program Mime og ansatte fra Hærens CombatLab for allsidig bistand under gjennomføringen av radiomålinger. Jeg ønsker også å takke kollegaer ved FFI som har kommet med innspill og hjelp med dekningsberegninger.

Kjeller, 24. juli 2023  
Agnius Birutis



---

---

# 1 Introduksjon

Informasjons- og kommunikasjonsteknologi (IKT) er viktig for at Forsvaret skal kunne løse sine oppgaver på en effektiv og trygg måte. Hybridkonseptet i Forsvarets program Mime [14], samt anbefalinger fra Forsvarets forskningsinstitutt (FFI) [13, 27], sier at femte-generasjons mobilteknologi (5G) er en av teknologiene som bør være én del av den helhetlige IKT-løsningen til Forsvaret. Selv om 5G-teknologien hovedsakelig er designet med tanke på kommersielle, sivile markeder, kan den tilpasses til militær bruk. FFI har tidligere studert muligheter og sårbarheter ved bruk av kommersiell mobilteknologi i Forsvaret [20]. FFI har også sammenlignet 5G-mobilnett med andre militære kommunikasjonsløsninger [21]. Fordelen med 5G er at det er en standardisert teknologi, noe som gir interoperabilitet og bredt økosystem av hyllevareprodukter. Med rask utvikling sikter mobilteknologien også på å møte samfunnets stadig økende behov for dataoverføring. Dermed er høy overføringshastighet en annen fordelaktig egenskap ved 5G.

Det er 5G-radiokommunikasjonen og dens grensesnitt *New Radio (NR)* som sørger for at sluttbrukere har en trådløs tilgang til et mobilnett og dets tjenester som, for eksempel, internett. Det er behov for å undersøke muligheter og begrensninger med 5G-radiokommunikasjon for bruk som et militært radiokommunikasjonssystem. FFI har allerede studert sikkerhets- og robusthetsaspekter ved 5G NR [9]. Det er også viktig å ha kjennskap til 5G-radiosystemets dekning, rekkevidde og kapasitet for å kunne ta beslutninger om hvilken rolle 5G skal ha i Forsvarets kommunikasjonsnettverk. Denne studien bidrar til dette ved å undersøke problemstillinger rundt 5G-radiosystem som består av en basestasjon som leverer dekning til brukerenheter som smarttelefoner og modemer. Dekning, rekkevidde og kapasitet avhenger av mange faktorer som studien sikter å kartlegge.

## 1.1 Metode

Vi har studert teoretiske propagasjonsmodeller som passer til 5G-radiobølger og som kan brukes for dataanalyse og modellering. Vi har også undersøkt egenskaper til antenner som typisk benyttes på 5G-basestasjoner og 5G-brukerenheter.

I tillegg til teoretiske vurderinger har vi utført radiomålinger i ulike typer norsk terreng med forskjellige 5G-oppsett. Ikke minst var målingene viktige for å få praktisk erfaring med dekning levert av en 5G-basestasjon for å få kjennskap til hvordan et 5G-radiosystem fungerer i praksis, identifisere begrensninger og komme opp med forbedringer. Basestasjoner og brukerenheter brukt under målingene var standard hyllevare for å skape et realistisk målemiljø. Under målingene har vi brukt både stasjonær 5G-infrastruktur og en flyttbar 5G-basestasjon som kunne plasseres der det var ønskelig å måle dekning, rekkevidde og kapasitet.

Måledata ble brukt til å lage en modell som kartlegger forholdet mellom signaltap (mellom basestasjon og brukerenhet) og overføringshastighet. Vi har vist hvordan modellen kan brukes for å estimere dekning, rekkevidde og kapasitet for et 5G-radiosystem. Estimater er også brukt til å sammenligne ytelsen til forskjellige 5G-oppsett (ulike bærefrekvenser, antennehøyder og antennetyper) i forskjellige terreng (frisikt, ikke-frisikt, skog). Modellen er også brukt til å lage dekningskart.

---

---

## 1.2 Avgrensning

Studien omfatter ikke dekingen levert av det offentlige landsdekkende mobilnettet eller andre 5G-funksjoner designet for dekningsutvidelse. Vi studerer dekingen levert av én enkelt 5G-basestasjon. Målinger er utført på flere forskjellige 5G-basestasjoner innenfor frekvensområdet 2–5 GHz i TDD-modus (*Time-Division Duplexing*).

## 1.3 Rapportens struktur

Kapittel 2 beskriver relevant teori rundt deking og rekkevidde i et 5G-radiosystem. Kapittel 3 inneholder beskrivelse av måleutstyr brukt under målinger. Kapittel 4 omtaler måleresultater og introduserer en modell for å estimere deking, rekkevidde og kapasitet for et 5G-radiosystem. I kapittel 5 diskuteres resultater, vi sammenligner forskjellige 5G-oppsett og introduserer ulike bruksområder for modellen. Studiens konklusjon er gitt i kapittel 6.

---

---

## 2 Relevant teori om dekning og rekkevidde

Et trådløst kommunikasjonssystem består av en sender som stråler ut radiosignaler i rommet, og en mottaker som tar imot radiosignalene. Radiosignalet utsendes med en viss effekt som avtar ettersom signalet forplanter seg gjennom rommet. Signalet mottas følgelig med lavere effekt enn det som ble utsendt, og den tapte effekten kalles for *signaltap* (*Path Loss (PL)*). Signaltapet er definert som forholdet mellom den utsendte effekten og den mottatte effekten, vanligvis målt i desibel (dB) [25]. Signaltapet øker med økende avstand mellom senderen og mottakeren på grunn av frittromstapet. Tapet er også avhengig av hvordan radiosignalet blir påvirket av fysiske omgivelser og hindringer underveis. Hindringene forårsaker at signalet blir blokkert eller opplever refraksjon, diffraksjon, refleksjon eller absorpsjon. Hvor stor signaldempning som oppleves på grunn av omgivelsene er også avhengig av type hindringer: varierende terrengtyper, bygninger i forskjellige størrelser eller vegetasjon med varierende tetthet.

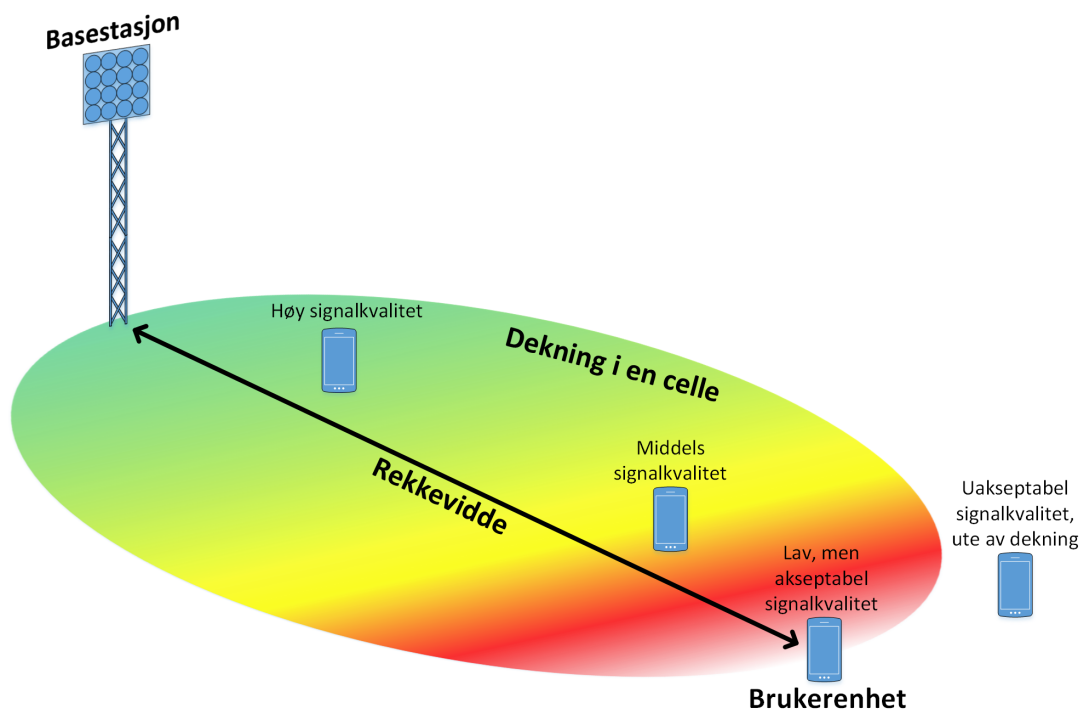
Den lengste mulige avstanden mellom en sender og en mottaker der radiosystemet fortsatt mottar et lesbart signal og klarer å levere kommunikasjonstjeneste, kalles for *rekkevidde*. Innenfor denne rekkevidden sier vi at brukerenheter er inne i dekningsområdet. Begrepet *dekning* i mobilkommunikasjon beskriver dermed det geografiske arealet hvor en basestasjon kan kommunisere med brukerenheter. Dekningsområdet som en basestasjon betjener, er også kjent som en *celle*. Signalkvalitet (signal-til-støyforhold) innenfor en celle er varierende og avhenger av signaltapet mellom en basestasjon og en brukerenhet.

*Overføringshastighet* er den hastigheten som brukerdata overføres med og er ofte målt i bit per sekund (bps). Den overføringshastigheten som et 5G-radiosystem klarer å levere, omtaler vi som systemets *kapasitet*. Overføringshastigheten er avhengig av signalkvaliteten mellom basestasjonen og brukerenheten siden et 5G-radiosystem justerer radioparametere, som modulasjon og koding, ut fra kvaliteten på radiokanalen. Jo høyere signalkvalitet, jo høyere modulasjons- og kodingsrate brukes, og jo høyere dataoverføringshastighet oppleves. Et 5G-radiosystem har måleparametere som RSRP (*Reference Signals Received Power*), RSRQ (*Reference Signal Received Quality*), SINR (*Signal-to-Noise and Interference Ratio*), CSI (*Channel State Information*) eller BLER (*Block Error Rate*), til å bestemme kvaliteten på en radiokanal. Om signaltapet er for høyt og signalkvaliteten er for lav til å opprettholde en forbindelse, terminerer basestasjonen forbindelsen med brukerenheten, og brukerenheten ansees som å være ute av dekning. Figur 2.1 illustrerer dekning levert av en basestasjon, rekkevidde mellom basestasjonen og en brukerenhet og varierende signalkvalitet innenfor cellen.

Rekkevidden er hovedsakelig avhengig av tre faktorer: utsendt effekt, signaltap og mottaksfølsomhet. Jo større utsendt effekt, jo sterkere signal mottas på mottakerens side, jo lengre rekkevidde kan oppnås. Jo høyere signaltap som oppleves under transmisjon, jo svakere signal mottas på mottakerens side, jo kortere rekkevidde kan oppnås. *Mottaksfølsomhet* kan forstås som det laveste effektnivået av det mottatte signalet der en mottaker fortatt klarer å lese signalets innhold. Jo bedre mottaksfølsomhet, jo svakere signal kan mottas på mottakeren, jo lengre rekkevidde kan oppnås.

Ulike propagasjonsmodeller brukes til å beregne signaltap, noe som videre kan brukes til å bestemme radiosystemets rekkevidde. Aktuelle modeller er presentert i kapittel 2.1.

Formfaktor av basestasjon og brukerenhet har også noe å si for dekning og rekkevidde. Generelle antenneegenskaper som fysisk størrelse og utsendt effekt, omtales i kapittel 2.2.



Figur 2.1 Illustrasjon av en 5G-basestasjon, brukerenhet, dekning i en celle og rekkevidde.

## 2.1 Modeller for signaltap

Det finnes mange ulike modeller for å estimere signaltap for et bestemt radiooppsett i et gitt miljø. Kapittel 2.1.1 beskriver noen modeller fra 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) og ITU (*International Telecommunication Union*), som ble brukt i denne studien for å estimere rekkevidde for et 5G-radiosystem.

Det finnes også ulike prediksjonsverktøy som brukes for å lage dekningskart basert på modeller for signaltap. I denne studien brukes verktøyet WRAP, som beskrives i kapittel 2.1.2.

### 2.1.1 Modeller for signaltap i ulike terreng

Frittromstap er et tap i signalstyrke når signalet forplanter seg mellom to antenner gjennom fritt rom (vanligvis luft). Frittromstap øker med økende frekvens og med økende avstand mellom antenner. Eventuelle ytterligere hindringer i signalets bane vil føre til ekstra signaltap i tillegg til frittromstapet. I radiokommunikasjonsverden er det over mange år utarbeidet flere modeller som kan gi et estimat for signaltap i ulike terrengetyper.

Tabell 2.1 viser fire ulike modeller for signaltap: én modell for frittromstap, to modeller for signaltap i friskt og ikke-friskt som definert av 3GPP (for mobilkommunikasjon for et landlig, ruralt område) [7], og én modell for signaltap definert av ITU, for propagasjon i skog [18]. Med friskt menes det at det er hindringsfri siktlinje mellom en basestasjon og en brukerenhet. Med ikke-friskt menes det at det er hindringer som bygninger, enkelte trær eller en terrengformasjon, mellom en basestasjon

og en brukerenhet. Med skog menes det at det er et visst antall meter med tett skog slik at det er ingen frisikt mellom en basestasjon og en brukerenhet. Modellene brukes for å beregne signaltap målt i dB. Tabell 2.2 beskriver alle parametere som brukes i modellene og oppgir en standardverdi for noen av parametere, som kan brukes hvis ikke noe annet er spesifisert. Standardverdiene for modell i skog ble valgt for å passe den type vegetasjon som er vanlig for norske skoger.

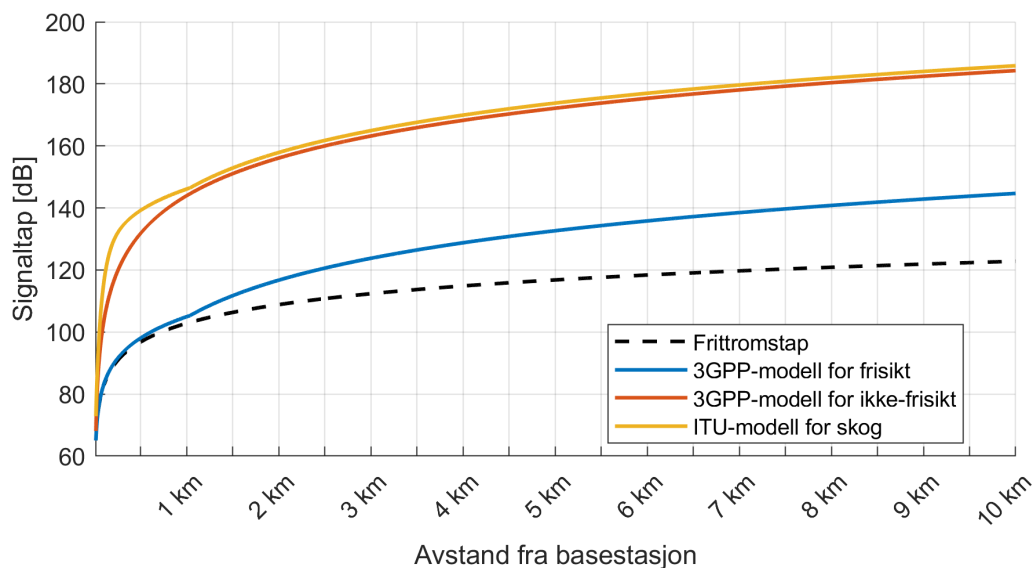
Type modell	Modell for signaltap (PL) [dB]
Frittromstap	$PL_{\text{frittromstap}} = 20 \log(40\pi df/3)$
3GPP-modell for signaltap i frisikt	$PL_{\text{frisikt}} = \begin{cases} PL_1, & 10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq d_{BP} \\ PL_2, & d_{BP} \leq d_{2D} \leq 10 \text{ km} \end{cases}$ $d_{BP} = 20\pi h_{BS} h_{UE} f/3$ $PL_1 = 20 \log(40\pi df/3) + \min(0.03h^{1.72}, 10) \log(d) - \min(0.044h^{1.72}, 14.77) + 0.002 \log(h)d$ $PL_2 = PL_1(d_{BP}) + 40 \log(d/d_{BP})$
3GPP-modell for signaltap i ikke-frisikt	$PL_{\text{ikke-frisikt}} = \max(PL_{\text{frisikt}}, PL')$ $PL' = 161.04 - 7.1 \log(W) + 7.5 \log(h) - (24.37 - 3.7(h/h_{BS})^2) \log(h_{BS}) + (43.42 - 3.1 \log(h_{BS}))(\log(d) - 3) + 20 \log(f) - (3.2(\log(11.75h_{UE}))^2 - 4.97)$
ITU-modell for signaltap i skog	$PL_{\text{skog}} = PL_{\text{frisikt}} + PL_{ev}$ $PL_{ev} = A_m (1 - \exp[-d_{\text{skog}}\gamma/A_m])$ $A_m = A_1 f_m^\alpha$ $\gamma = 0.0002f_m$

Tabell 2.1 Propagasjonsmodeller for å beregne signaltap i ulike typer terreng. Parameterne er beskrevet i tabell 2.2.

Figur 2.2 viser signaltap mellom en basestasjon og en brukerenhet som funksjon av avstand. Figuren viser fire ulike propagasjonsmodeller som kan brukes i ulike terrengetyper. Signaltapet i figuren ble beregnet for en bærefrekvens på 3,3 GHz, basestasjonens høyde er satt til 10 meter og brukerenhetens høyde er på 1,5 meter. Signaltapet i skog ble beregnet med forutsetning at hele avstanden mellom en basestasjon og en brukerenhet består av tett skog. Modellen for skog kan imidlertid også tilpasses til å beregne signaltapet i tilfeller der en basestasjon blir plassert i en viss avstand foran en skog og med frisikt foran denne.

Parameter	Beskrivelse	Enheter	Standardverdi	Intervall
$d$	Luftavstand (3D) mellom brukerenhet og basestasjon	m	-	-
$f$	Bærefrekvens	GHz	-	$0.5 < f < 30$ GHz
$d_{2D}$	Bakkeavstand (2D) mellom brukerenhet og basestasjon	m	-	$10\text{m} \leq d_{2D} \leq 10\text{km}$ for frisikt $10\text{m} \leq d_{2D} \leq 5\text{km}$ for ikke-frisikt
$d_{BP}$	<i>Break point</i> -avstand	m	-	-
$h_{BS}$	Basestasjonens høyde	m	35 m	$10 \leq h_{BS} \leq 150$ m
$h_{UE}$	Brukerenhetens høyde	m	1,5 m	$1 \leq h_{UE} \leq 10$ m
$h$	Gjennomsnittlig høyde på bygninger	m	5 m	$5 \leq h \leq 50$ m
$W$	Gjennomsnittlig gatebredde	m	20 m	$5 \leq W \leq 50$ m
$PL_{ev}$	Vegetasjonsdemping	dB	-	$0 \leq PL_{ev} \leq A_m$
$A_m$	Maksimal vegetasjonsdemping	dB	-	-
$d_{skog}$	Antall meter med skog	m	-	-
$A_1$	Modellparameter	dB	1,37	-
$\alpha$	Modellparameter	-	0,42	-
$f_m$	Bærefrekvens	MHz	-	$1 \leq f_m \leq 30$ GHz
$\gamma$	Spesifikk dempning	dB/m	-	$0,2 \leq \gamma \leq 6$

Tabell 2.2 Parameterne til propagasjonsmodeller i tabell 2.1.



Figur 2.2 Signalntap beregnet med forskjellige modeller for forskjellige terrengetyper i ulike avstand fra en basestasjon.



---

---

### 2.1.2 Verktøyet WRAP for dekningskart

WRAP er et radioprediksjonsverktøy levert av Altair [8]. Verktøyet inneholder flere propagasjonsmodeller som til sammen dekker frekvensområdet 10 kHz–350 GHz og kan blant annet brukes for dekningsberegninger for 5G-radiokommunikasjon. Verktøyet tar hensyn til terrengdata (noe som angir type terreng) og laserskannet høydedata for å beregne signaltap mellom sender og mottaker i et gitt geografisk område. Ut i fra dekningsberegningen kan dekningskart rundt basestasjoner lages i WRAP. Dekningskartene kan visualiseres med farger som representerer ulike nivå av signalkvalitet i én eller flere celler.

En propagasjonsmodell som passer 5G-frekvensområdet er en generisk terrestrisk propagasjonsmodell i frekvensområdet 30 MHz–50 GHz kalt ITU-R P.2001 [17]. Modellen kan brukes for å beregne signaltap mellom basestasjon og brukerenhet. I tillegg kan en ekstra demping i signalet legges til ved bruk av en prediksjonsmodell for såkalt *clutter*-tap. I denne sammenhengen refererer clutter til objekter som er på jordens overflate, men som ikke egentlig er en del av terrenget som sådan. Et eksempel på clutter kan være bygninger eller trær. Slike hindringer har en betydelig påvirkning på radiobølgepropagasjon og signaltap. Modellen for clutter-tapet bruker høydedata for å finne høyde på hindringer mellom sender og mottaker, og så estimeres diffraksjonstap forårsaket av disse hindringene. Modellen tar også hensyn til type clutter, noe som WRAP henter fra terrengdata. I prediksjonsmodellen er clutter klassifisert i fem typer: vann/sjø, åpent/rural, *suburban*, urban/trær/skog og tett urban. For å beregne clutter-tap i WRAP kan en prediksjonsmodell kalt ITU-R P.2108-0 3.1 [19] brukes på 5G-frekvenser. Propagasjonsmodellen for signaltap og prediksjonsmodellen for clutter-tap gir til sammen en forholdvis presis og hensiktsmessig prediksjon på signaltapet rundt en 5G-basestasjon plassert på en bestemt posisjon i kartet.

## 2.2 Egenskaper til antenner i et 5G-radiosystem

5G-radiokommunikasjon består av toveiskommunikasjon mellom en basestasjon og en brukerenhet som er innenfor basestasjonens dekningsområde. Radiosignalet sendt fra en basestasjon til en brukerenhet kalles for nedlink, mens radiosignalet sendt fra en brukerenhet til en basestasjon kalles for opplink. Basestasjonens antenner er forskjellige fra brukerenhetens antenner både i størrelse, utgangseffekt og utsendt effekt. Utgangseffekt (*output power*) er den totale effekten matet til antenner. Utsendt effekt eller sendeeffekt (*Effective Isotropic Radiated Power (EIRP)*) er den utstrålte effekten i en viss retning eller, med andre ord, summen av utgangseffekten og antennegevinsten. Basestasjonens typiske egenskaper er beskrevet i kapittel 2.2.1, mens brukerenhetens egenskaper er beskrevet i kapittel 2.2.2.

### 2.2.1 Basestasjon

Antenner på basestasjon kan være forskjellige i størrelse, utsendt effekt og kompleksitet, noe som har betydning for størrelsen på dekningsområdet i en celle. Mobilkommunikasjonsceller kan klassifiseres inn i tre typer: makrocelle, mikrocelle og pikocelle. Dekning i en makrocelle leveres av en stor, kraftig og kompleks antenne. En makrocelleantenne er egnet til montering på høye

---

---

radiomaster eller tak på bygninger for å skape størst mulig dekningsareal. Dekning i en mikrocelle leveres av en antenne som er en mindre og lettere versjon av en makrocelleantenne. Slike antenner monteres typisk på vegger på utsiden av bygninger til å utvide dekning i et tett byområde der signalet fra en makrocelle er skjermet av høye bygninger. Dekning i en pikocelle leveres av en liten og enkel antenne, noe som skaper lokal, vanligvis innendørs, Wi-Fi-type dekning. Figur 2.3 viser en typisk makrocelleantenne, mikrocelleantenne og pikocelleantenne.



*Figur 2.3 Typisk makrocelleantenne (venstre), mikrocelleantenne (midten) og pikocelleantenne (høyre).*

En vanlig antenne på en 5G-basestasjon i en makrocelle er en massive MIMO-gruppeantenne som har mange antenneelementer og støtter beamforming.<sup>1</sup> Sendeeffekten kan justeres etter behov eller i henhold til krav fra myndighetene. En massive MIMO-antenne er en aktiv antenneenhet, noe som betyr at antennen bruker digital beamforming og sender brukerdata i brukerspesifikke beamer. Et stort fysisk areal og et stort antall antenneelementer på en slik antenne gir også høy mottaksfølsomhet. Ulempen med å ha et stort antall antenneelementer i en gruppeantenne er at dette fører til stor vekt og høyt strømforbruk.

En typisk antenne på en 5G-basestasjon i en mikrocelle og pikocelle har lavere sendeeffekt enn en makrocelleantenne og støtter lavere antall MIMO-strømmer. Slike antenner er passive antenneenheter, noe som betyr at antennene bare bruker analog beamforming og retter den utsendte

---

<sup>1</sup>Teknologiene MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) og massive MIMO er beskrevet i FFI-rapport 22/00906 [9].

effekten mot en stor sektor og ikke mot en spesifikk brukerenhet. Mottaksfølsomheten på en slik antenne er lavere enn en massive MIMO-antenne. Fordelen med mikro- og piko-type antenner er redusert størrelse og vekt og lavt strømforbruk, noe som kommer på bekostning av redusert dekning og rekkevidde.

Tabell 2.3 gir en sammenligning av spesifikasjoner på antenner for makro-, mikro- og pikoceller. Spesifikasjoner i tabellen er samlet fra forskjellige datablader fra ulike antenneprodusenter og gjelder for dagens typiske antenner. I praksis kan verdiene variere fra produkt til produkt, og spesifikasjonene kan forandres seg med tiden på grunn av videre antenneutvikling.

Antenne	Utgangseffekt	Maksimal sendeeffekt (EIRP)	Mottaksfølsomhet	Beamforming	MIMO	Vekt
Makrocelle	200–320 W	75–80 dBm	-99 dBm	Aktiv antenne, massive MIMO-teknologi, brukerspesifikke beamer	64T64R 32T32R	20–40 kg
Mikrocelle	10–100 W	50–60 dBm	-96 dBm	Passive antenne, analog sektorbeamforming	4T4R	10–15 kg
Pikocelle	1–10 W	35–40 dBm	-93 dBm	Passive antenne, analog sektorbeamforming	4T4R	1–3 kg

Tabell 2.3 Typiske spesifikasjoner på makrocelle-, mikrocelle- og pikocelleantenner.

## 2.2.2 Brukerenhet

En 5G-brukerenhet kan være smarttelefon, PC, modem, ruter, modul en eller annen type enhet som støtter 5G og leverer mobilkommunikasjonstjenester til brukeren. En brukerenhet kan enten ha antenner innebygd eller ha RF-porter for tilkobling av eksterne antenner. Typisk har en brukerenhet flere antenner for å støtte MIMO-funksjonalitet. Den maksimale sendeeffekten er ulik for ulike brukerenheter. Som tidligere beskrevet bestemmes sendeeffekten av utgangseffekt og antennegevinst. Brukerenheten sender med den høyeste effekten kun når den opplever dårlig signalkvalitet. Dette gjøres for å maksimere signal-støy-forhold på det signalet som mottas på en basestasjon. Hvis brukerenheten er i nærheten av en basestasjon, er det ikke nødvendig med høy sendeeffekt, og effekten justeres ned. Justeringen utføres i henhold til en mekanisme kalt *Uplink Power Control* som er definert i 5G-standarden.

### 2.2.2.1 Maksimal utgangseffekt

Brukerenhetens maksimale utgangseffekt er regulert og spesifisert av 5G-standarden i 3GPP. Standarden definerer fire effektklasser som setter en grense for den maksimale utgangseffekten brukerenheter kan ha. Det er også spesifisert i hvilke frekvensbånd en effektklasse kan benyttes. Produsenten kan velge hvilken effektklasse en brukerenhet skal støtte. Produsenten kan også velge å bruke lavere effekt enn den maksimale tillatte utgangseffekten for å minimere strømforbruk. Tabell 2.4 gir oversikt over effektklassene spesifisert for frekvensområdet 410–7125 MHz [5].

Effektklasse	Maks utgangseffekt	Frekvensbånd
1	31 dBm	n14 (700 MHz)
1.5	29 dBm	n41 (2500 MHz) n77 (3,6 GHz) n78 (3,7 GHz) n79 (4,7 GHz)
2	26 dBm	n1 (2100 MHz) n3 (1800 MHz) n34 (2000 MHz) n39 (1900 MHz) n40 (2300 MHz) n41 (2500 MHz) n77 (3,6 GHz) n78 (3,7 GHz) n79 (4,7 GHz) n104 (6,7 GHz)
3	23 dBm	standard valg for alle bånd

Tabell 2.4 Effektklasser spesifisert i 3GPP 5G-standarden [5]. Effektklassene gjelder frekvensområdet 410–7125 MHz (FR1).

Effektklasse 3, som har en utgangseffekt på 23 dBm, er en standardklasse med mindre det er angitt at en annen klasse er implementert. Utgangseffekt på 29 dBm i effektklassen 1.5 oppnås ved at to transmittere på en brukerenhet med utgangseffekt på 26 dBm på hver utgang (2x2 MIMO i opplink). I følge standarden kan effektklasse 1 med utgangseffekt på 31 dBm brukes bare i radioutstyr laget for samfunnssikkerhet og beredskapsformål [12].

Når det gjelder antennegevinst, har en mobiltelefon vanligvis rundstrålende antenner uten betydelig antennegevinst. Modemer har typisk passive antenner som enten er innebygd eller eksternt tilkoblet. En passiv antenne kan gi noen ekstra desibel antennegevinst i en viss retning eller plan. Det at en antenne er passiv betyr at antennegevinsten kommer fra antennedesignet, ikke fra en eksternt signalforsterker eller aktiv (digital) retningsstyring. Regulatorisk sett har antennegevinsten, og dermed den totale sendeeffekten, ingen øvre grense, så lenge operatøren har kontroll over brukerenheter som brukes i nettet og brukerenheten ikke interfererer med andre basestasjoner [11]. Implementasjon og design av antenner er det opp til produsenter å bestemme. Selvfølgelig må produsentene ta hensyn til regulatoriske grenser som bestemmer hvor mye stråling mennesker kan bli utsatt for.

### 2.2.2.2 Uplink Power Control

Uplink Power Control er en mekanisme som til enhver tid bestemmer hvor mye utgangseffekt en brukerenhet skal bruke [3]. Mekanismen er i hovedsak en formel som brukerenheten bruker for å beregne utgangseffekt. Formelen er satt opp slik at resultatet (utgangseffekt) aldri overstiger en grense bestemt av effektklassen. Formelen har mange parametere som input som til sammen styrer hvor høy utgangseffekten blir. Parameterne er blant annet modulasjonsnivå, frekvensressurser og estimert signaltap mellom en basestasjon og en brukerenhet. Når det gjelder rekkevidde, er det estimerte signaltapet den mest relevante parameteren. Brukerenheten estimerer signaltapet ut i fra den målte signalstyrken på referansesignaler eller synkroniseringssignaler kringkastet av basestasjonen (RSRP). Brukerenheten får informasjon om hvor mye effekt basestasjonen bruker for å sende disse signalene og kan dermed beregne hvor mye av signaleffekten som ble tapt. Jo større signaltapet blir, jo høyere settes utgangseffekten. Under radioforbindelsesetablering sender en basestasjon flere instruksjoner og initiale verdier for Uplink Power Control til en brukerenhet.

---

---

## 3 Målinger

Vi målte overføringshastigheten på noen bestemte målepunkter i ulik avstand fra en 5G-basestasjon. Slik kunne tilgjengeligheten og kvaliteten av en kommunikasjonstjeneste logges på en gitt posisjon for et gitt 5G-radiooppsett i et gitt miljø. I etterkant kunne vi analysere måledata for å kartlegge dekning, rekkevidde og kapasitet. Målingene ble gjort i perioden fra desember 2021 til september 2022. Kapittel 3.1 beskriver utstyret brukt under målingene, mens kapittel 3.2 beskriver type terreng målingene ble tatt i.

### 3.1 Måleutstyr

Måleutstyr besto av 5G-basestasjoner, forskjellige typer 5G-brukerenheter og tjenester for måling av overføringshastighet.

#### 3.1.1 5G-basestasjoner

For radiomålingene som omtales i denne rapporten har vi brukt både en stasjonær 5G-basestasjon og en flyttbar 5G-basestasjon. Muligheten til å bruke basestasjonene fikk vi gjennom EU-prosjekter. Flere aktører satte diverse 5G-løsninger sammen og FFI fikk være en sluttbruker som prøvde disse løsningene ut. Den stasjonære basestasjonen ble bygget på Rygge flystasjon gjennom prosjektet 5G-VINNI i 2021 [24]. Den flyttbare basestasjonen, såkalt *cell-on-wheels* (COW), ble bygget gjennom prosjektet FUDGE-5G i 2021 [15]. Huawei var én av aktørene som deltok i begge prosjektene. Alt radioutstyr for basestasjonene var dermed levert av Huawei.

I våre forsøk var COW-en utstyrt med flere makrocelleantennener, som opererte på forskjellige frekvensområder, og en pikocelleantenne. Den stasjonære basestasjonen hadde tre like makrocelleantennener for å gi dekning på 360 grader (én antenne dekker en sektor på 120 grader). Vi hadde ikke noen mulighet til å teste med en mikrocelleantenne siden den ikke var tilgjengelig i perioden vi utførte målingene. Tabell 3.1 gir en oversikt over antennespesifikasjoner. Figur 3.1 viser basestasjonen på Rygge, den flyttbare basestasjonen med makrocelleantennener og pikocelleantennen.

#### 3.1.2 5G-brukerenheter

5G var i en tidlig fase da målingene ble gjort, og det var ikke mange brukerenheter som støttet kommunikasjon på et selvstendig 5G-nett. Vi benyttet enheter som var tilgjengelig på den tiden. Vi testet med forskjellige typer brukerenheter og antenner for å sammenligne ytelsen mellom ulike typer utstyr. Smarttelefoner som ble brukt under målinger var *Huawei Mate 20 X (5G)*, *Huawei P40*, *Sony Xperia 1 II* og *Nokia XR20*. Modemer som ble brukt under målinger var *Huawei CPE Pro 2*, *Huawei 5G Mobile WiFi*, *Celerway Go* og *Nokia Industrial 5G fieldrouter FRRO501a*. Eksterne antenner som ble brukt sammen med Nokia-modemet var *Nokia Industrial 4-in-1 Multi-port Antenna*, *Poynting XPOL-2-5G* og *Poynting OMNI-296*. Figur 3.2 viser noen av brukerenhetene montert på biltak.

Basestasjon	Type antenne	Antennemodell	Frekvensbånd	Båndbredde	Sendeeffekt (EIRP)
Stasjonær på Rygge	Makrocelle, massive MIMO 64T64R	AAU5613	3,6 GHz	80 MHz	63 dBm
Flyttbar COW	Makrocelle, massive MIMO 64T64R	AAU5636	2,3 GHz	80 MHz	78 dBm
Flyttbar COW	Makrocelle, massive MIMO 64T64R	AAU5636	3,3 GHz	80/100 MHz	78 dBm
Flyttbar COW	Makrocelle, massive MIMO 64T64R	AAU5649	3,6 GHz	40 MHz	78 dBm
Flyttbar COW	Makrocelle, massive MIMO 64T64R	AAU5636	4,9 GHz	100 MHz	78 dBm
Flyttbar COW	Pikocelle, 4T4R	pRRU5963	3,3 GHz	80/100 MHz	37 dBm

Tabell 3.1 Spesifikasjoner til antenner brukt under målinger.



(a) Stasjonær basestasjon på Rygge, (b) Flyttbar basestasjon, makro- (c) Flyttbar basestasjon, pikocelle.

Figur 3.1 Forskjellige typer basestasjoner og antenner brukt under målinger.

Spesifikasjoner til brukerenheter varierer fra enhet til enhet. Den maksimale sendeeffekten på en brukerenhet er avhengig av antall MIMO-strømmer støttet i opplink, effektklasse, kabeltap, antennegevinst og pekeretning til antennen. Informasjon om antennegevinst i et spesifikt frekvensområde er ikke alltid lett tilgjengelig. Med eksterne antenner forsvinner en del effekt i kabeltapet. Det er ikke alltid intuitivt å vite hva som er den mest optimale pekeretningen til antennen, særlig i tilfeller uten frisikt til basestasjonen. I denne studien hadde vi ikke mulighet for å gjøre eksakte målinger på den maksimale sendeeffekten for hver brukerenhet. I de frekvensområdene vi målte rekkeviddene på, er det mest vanlig med effektklasse 2 (26 dBm). Derfor, videre i dataanalysen, velger vi å bruke 26 dBm som en felles standardverdi på sendeeffekt for alle brukerenheter, mens i praksis kan den maksimale sendeeffekten ligge i området fra 23 dBm til 30 dBm eller mer.



(a) Fire brukerenheter montert på et militært kjøretøy (foto: Sindre Føllesdal/CYFOR). (b) Ekstern antenne Poynting XPOL-2-5G.

Figur 3.2 Brukerenheter var montert på biltak for å kunne kjøre rundt og utføre målinger.

### 3.1.3 Test av overføringshastighet

Vi gjennomførte tester av overføringshastighet i både nedlink og opplink. På den stasjonære basestasjonen på Rygge ble testene kjørt via internett mot en offentlig server via mobilapplikasjonen *Speedtest by Ookla* [22]. På den flyttbare basestasjonen ble overføringshastigheten målt mot en tjenesteserver som lå lokalt på det autonome 5G-nettet. Applikasjonen som ble benyttet het *OpenSpeedTest* [23].

## 3.2 Målesteder og terreng

Vi målte dekning og rekkevidde i forskjellige typer norsk terreng som byområde, åpent landskap og skog. Forskjellige terrengetyper ga måledata i ulik grad av frisikt (*line-of-sight*), ikke-frisikt (*non-line-of-sight*) og vegetasjon. Figur 3.3 viser noen bilder av ulike terrengetyper, tatt under målinger.

Vi gjennomførte målingene både på den stasjonære basestasjonen på Rygge og på den flyttbare basestasjonen som vi tok med til flere steder i landet – Rygge, Sjusjøen, Haslemoen, Skien, Jørstadmoen og Lom. Mesteparten av målingene ble gjort på makroceller siden de store antennene leverer lengst rekkevidde og dermed er mer relevante å undersøke. Pikocelleantennen var koblet til den flyttbare basestasjonen. Målingene med pikocellen ble gjennomført på Jørstadmoen og Haslemoen.



(a) Byområde, Skien.



(b) Åpent landskap, Jørstadmoen.



(c) Skog, Rygge.

Figur 3.3 Målinger ble gjort på forskjellige steder i Norge for å få relevante måledata i forskjellige typer terreng.



---

---

## 4 Resultater

Dette kapitlet beskriver resultater av målinger av dekning, rekkevidde og kapasitet. Vi introduserer også en modell basert på målingene, og viser noen eksempler på bruk av modellen til å estimere dekning, rekkevidde og kapasitet i et gitt scenario. Resultatene er delt i to. Først beskrives de resultatene som gjelder en makrocelle, og deretter de resultatene som gjelder en pikocelle.

### 4.1 Dekning, rekkevidde og kapasitet i en makrocelle

Resultater i dette kapitlet gjelder en makrocelle. Kapittel 4.1.1 viser måledata i form av punktmålinger tatt på ulik avstand fra basestasjon og i ulikt terreng. I kapittel 4.1.2 er måledata brukt til å lage en modell som beskriver forholdet mellom estimert signaltap og målt overføringshastighet. Modellen kan brukes for å estimere kapasitet i en gitt avstand fra en basestasjon, noe som beskrives i kapittel 4.1.3. Modellen kan også brukes for å estimere rekkevidde ved et gitt 5G-oppsett i en gitt terrengtype. Denne bruken av modellen beskrives i kapittel 4.1.4. Kapittel 4.1.5 beskriver dekningsberegningene med verktøyet for radioplanlegging og viser hvordan modellen kan benyttes til å lage dekningskart.

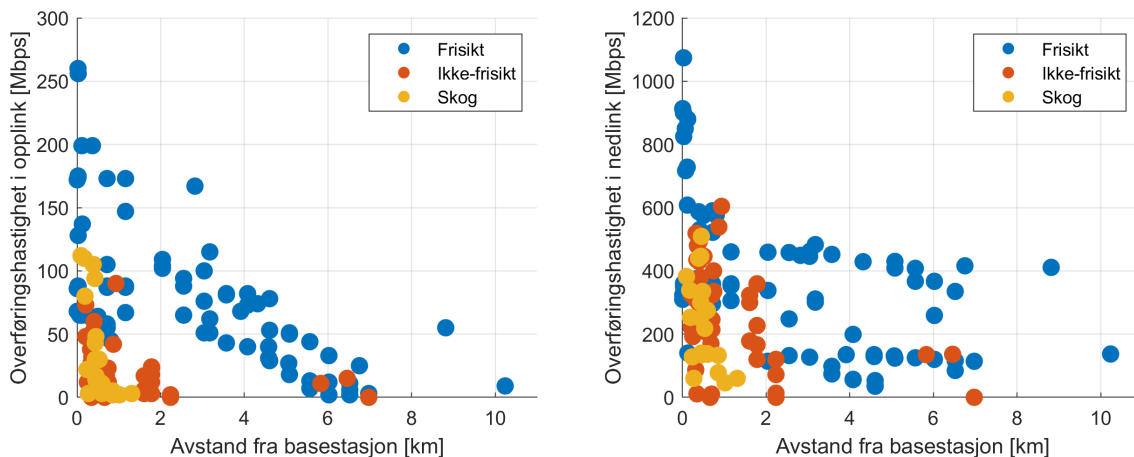
#### 4.1.1 Punktmålinger

Vi målte overføringshastighet på flere punkter i forskjellige terreng og i ulik avstand fra basestasjon. Resultater fra alle målesteder er samlet i figur 4.1 som viser overføringshastighet i opplink og nedlink målt i en gitt avstand fra basestasjon. Resultatene er gitt for målepunkter i frisikt, ikke-frisikt (hindret av enkelte trær, bygninger eller terreng) og skog. Den lengste rekkevidden på 10,2 km ble oppnådd på Jørstadmoen, der basestasjonen var plassert høyt på en bakketopp, noe som ga klar frisikt langt unna basestasjonen. Rekkevidden var betydelig redusert på målepunkter uten frisikt eller i skog.

#### 4.1.2 Modellering

Overføringshastigheten avtok med økende avstand mellom basestasjon og brukerenhet. Fysiske hindringer mellom basestasjon og brukerenhet førte også til en redusert overføringshastighet. Som ventet ble overføringshastigheten gradvis redusert med økende signaltap mellom basestasjon og brukerenhet.

Signaltap mellom en basestasjon og en brukerenhet ved et bestemt målepunkt er beregnet i verktøyet WRAP, som bruker propagasjonsmodeller beskrevet i kapittel 2.1.2. Vi har valgt ut de målepunktene som vi er sikre på at signaltapberegningene var tilstrekkelige på. De utvalgte målepunktene er brukt for å lage en modell som angir forholdet mellom signaltap og overføringshastighet.



Figur 4.1 Alle punktmålinger av overføringshastighet tatt i forskjellige terreng og i ulik avstand fra basestasjon.

Målinger av overføringshastighet i opplink er brukt i modellen. Grunnen til at målinger i opplink passer bedre å bruke til modellen enn målinger i nedlink, er hovedsakelig at under målingene var kvalitet på radiokanal i opplink en avgjørende faktor for rekkevidden. Ved høyt signaltap brøt forbindelsen i opplink ned før forbindelsen i nedlink. Ble det brudd på kommunikasjonen i opplink, fungerte heller ikke kommunikasjonen i nedlink.

Maksimal overføringshastighet i opplink, målt rett ved siden av basestasjon, varierte mellom ulike måleoppsett; båndbredde og tidslukekonfigurasjon var ikke lik på alle målinger. I tillegg hadde type brukerenhet noe å si for maksimal overføringshastighet. For å utjevne for ulike måleoppsett og typer brukerenheter er den målte overføringshastighet i opplink normalisert i forhold til den høyeste overføringshastigheten en gitt brukerenhet klarte å oppnå ved et gitt måleoppsett. Den normaliserte verdien av overføringshastighet i opplink varierer fra 0 til 1, noe som representerer overføringshastighet som varierte fra 0 % til 100 % av det som var maksimalt mulig å oppnå.

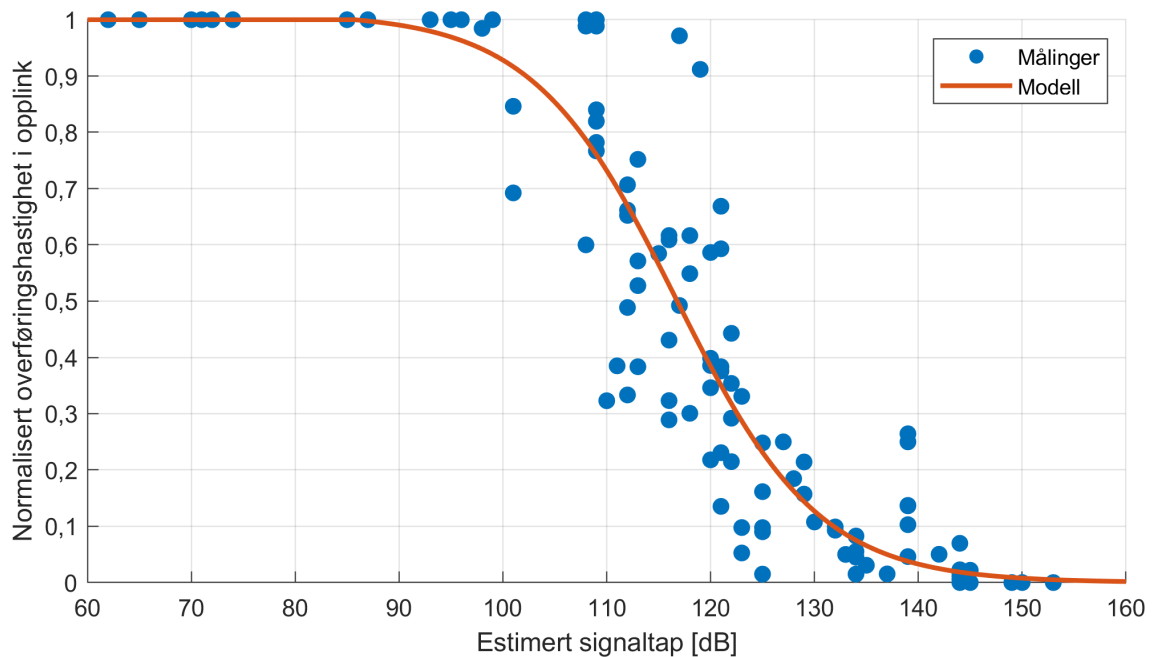
Figur 4.2 viser målinger i form av normalisert overføringshastighet i opplink ved et gitt estimert signaltap. Det er en tydelig sammenheng mellom økende signaltap og avtakende overføringshastighet. Kurvetilpasning er brukt for å finne en modell (matematisk funksjon) som beskriver forholdet mellom den normaliserte overføringshastigheten i opplink og det estimerte signaltapet. Modellen er også vist i figuren.

Modellen er en invers logistisk kurve bestemt av funksjonen

$$y = \min \left\{ 1, \frac{c}{1 + a \exp[b(x - 100)]} \right\} = \min \left\{ 1, \frac{1,0112}{1 + 0,0893 \exp[0,1452(x - 100)]} \right\} \quad (4.1)$$

der  $y$  er normalisert overføringshastighet i opplink og  $x$  er signaltap målt i dB. Variablene  $a$ ,  $b$  og  $c$  beregnes gjennom kurvetilpasning.

Modellen gjelder en typisk makrocelle der dekning er levert av en basestasjon med en massive MIMO-antenne som opererer i frekvensområdet 2–5 GHz.



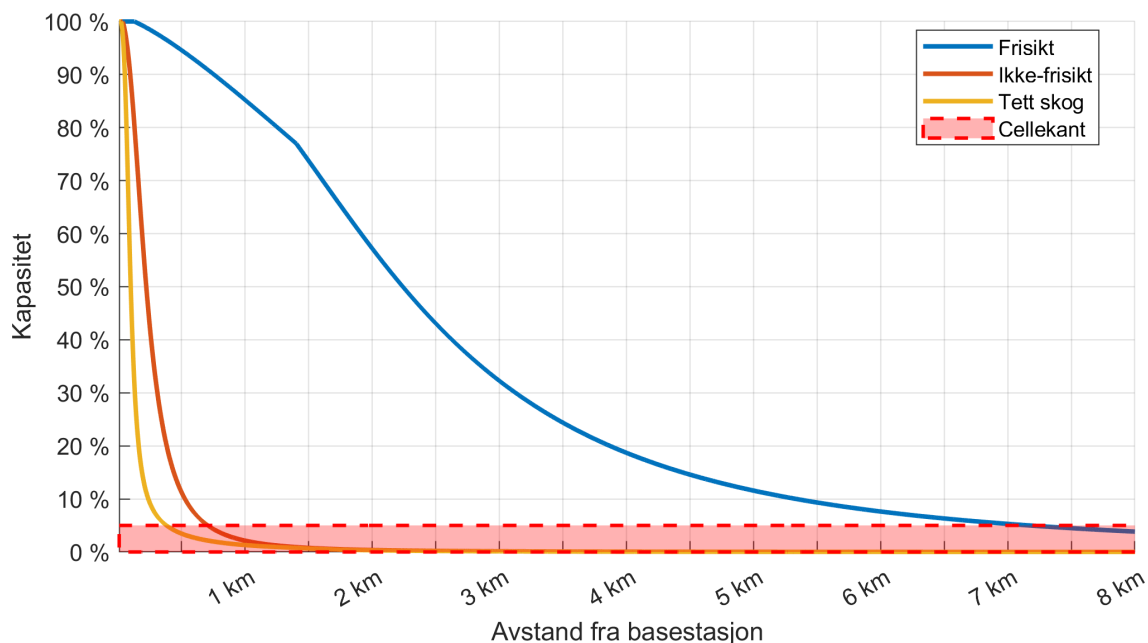
Figur 4.2 Normalisert overføringshastighet i opplink for estimert signaltap, og en modell som beskriver forholdet mellom de to.

#### 4.1.3 Estimert kapasitet for ulike avstand og terrengetyper

Den normaliserte overføringshastigheten i opplink blir videre oppgitt i prosent og betraktes som et mål for kapasitet. Rett ved siden av basestasjonen, der signaltapet er forholdsvis lite, får brukeren 100 % av kapasiteten, det vil si så høy overføringshastighet i opplink som 5G-radiosystemet klarer å levere. Ved økende signaltap vil kapasiteten gradvis falle, og den reduserte verdien av kapasiteten i prosent vil tilsvare andel av kapasiteten som er tilgjengelig sammenlignet med det som var maksimalt tilgjengelig ved 100 % kapasitet.

Modeller for signaltap fra 3GPP og ITU er brukt for å beregne signaltap for tre typiske terrengetyper: friskt, ikke-friskt og skog. Signaltapet er beregnet for økende avstand fra basestasjon, og en gitt antennehøyde og frekvens. For propagasjon i friskt og ikke-friskt har vi brukt modeller fra 3GPP, som beskrevet i kapittel 2.1.1. Standardverdier for den gjennomsnittlige høyden på bygninger  $h$  og den gjennomsnittlige gatebredden  $W$  er brukt. For propagasjon i skog har vi brukt en modell fra ITU, også beskrevet i kapittel 2.1.1. Standard verdier for modellparameterne  $A_1$  og  $\alpha$  er brukt.

Videre kan kapasiteten angis for den beregnede verdien av signaltapet ved å bruke modellen presentert i kapittel 4.1.2. Siden signaltapet er beregnet i en gitt avstand fra basestasjon, kan den avstanden knyttes til den estimerte kapasiteten. Figur 4.3 viser et eksempel på estimert kapasitet for ulike avstand fra basestasjon og ulike terrengetyper – friskt, ikke-friskt og tett skog. I disse beregningene for signaltap i skog forutsettes det at hele avstanden mellom en basestasjon og en brukerenhet består av tett skog. Med tett skog menes det at skogen er så tett at det ikke blir friskt mellom basestasjonen og brukerenheten. Estimert i figur 4.3 gjelder et 5G-radiosystem som opererer med en senterfrekvens på 3,35 GHz, med basestasjonens høyde på 10 meter og brukerenhetens høyde på 2 meter.



Figur 4.3 Estimert kapasitet for økende avstand fra basestasjon i ulike terreng. Basestasjonens høyde er 10 meter, brukerenhetens høyde er 2 meter, senterfrekvens er 3,35 GHz.

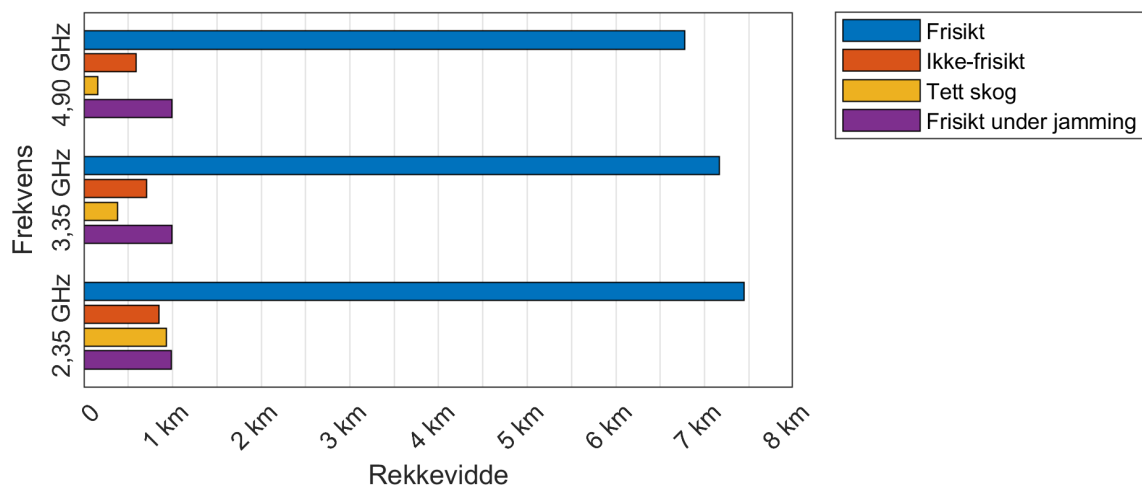
Brukerenheten antas som å være på cellekant når kapasiteten er lavere enn 5 %. Med cellekant menes det at forbindelsen ikke er god nok til å levere tjenester på akseptabelt nivå. Brukerenheten er da på grensen til å miste forbindelsen med basestasjonen og gå ut av dekning.

#### 4.1.4 Estimert rekkevidde for ulike 5G-oppsett og terrengetyper

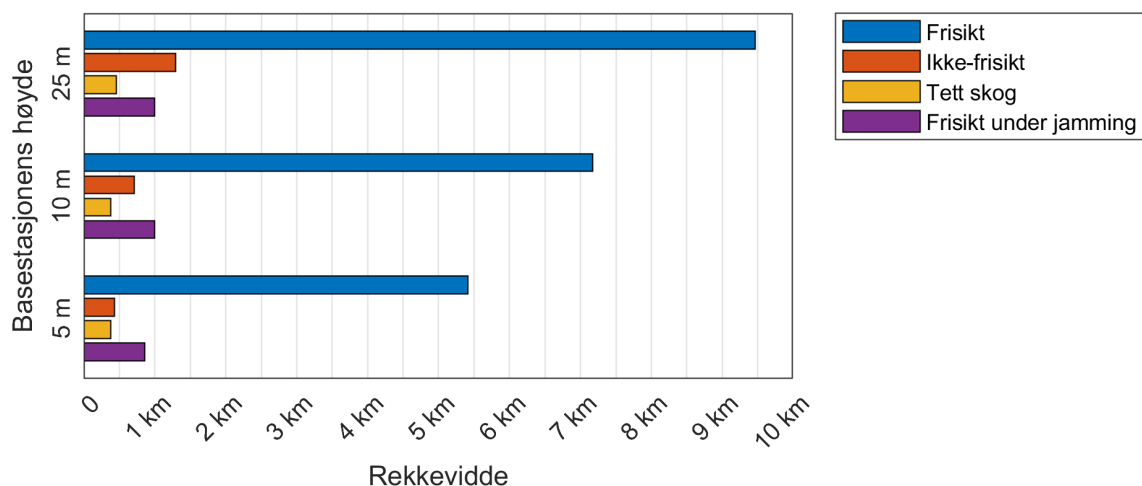
Som nevnt i kapittel 4.1.3 antas en brukerenhet å være på cellekant når signaltapet mellom basestasjonen og brukerenheten er så høyt at kapasiteten blir lavere enn 5 %. På grunn av dårlig kapasitet på cellekanten, leveres tjenester med dårlig kvalitet eller kan ikke leveres i det hele tatt. Den avstanden fra en basestasjon der kapasiteten er 5 %, velger vi dermed å betrakte som 5G-radiosystemets rekkevidde. Ved å bruke modellen presentert i kapittel 4.1.2, kan rekkevidden estimeres for forskjellige frekvenser, terrengetyper eller antennehøyder.

Figur 4.4 viser estimert rekkevidde for tre forskjellige frekvensbånd i ulike terrengetyper. I tillegg til frisikt, ikke-frisikt og tett skog er rekkevidden gitt for et 5G-radiosystem som er utsatt for jamming. Rekkevidden i en situasjon der en jammer er i området og brukerenhet er i frisikt med basestasjon, er beregnet basert på modellen beskrevet i [9].

Figur 4.5 viser et eksempel på bruk av modellen for å estimere og sammenligne rekkevidde for tre forskjellige masthøyder.



Figur 4.4 Sammenligning av rekkevidde for tre forskjellige frekvensbånd. Basestasjonens høyde er 10 meter, brukerenhetens høyde er 2 meter. En jammer med sendeeffekt på 47 dBm (50W), er 8 km unna i frisikt med basestasjon.



Figur 4.5 Sammenligning av rekkevidde for tre forskjellige maste høyder. Brukerenhetens høyde er 2 meter, senterfrekvens er 3,35 GHz. En jammer med sendeeffekt på 47 dBm (50W), er 8 km unna i frisikt med basestasjon.

#### 4.1.5 Dekningskart

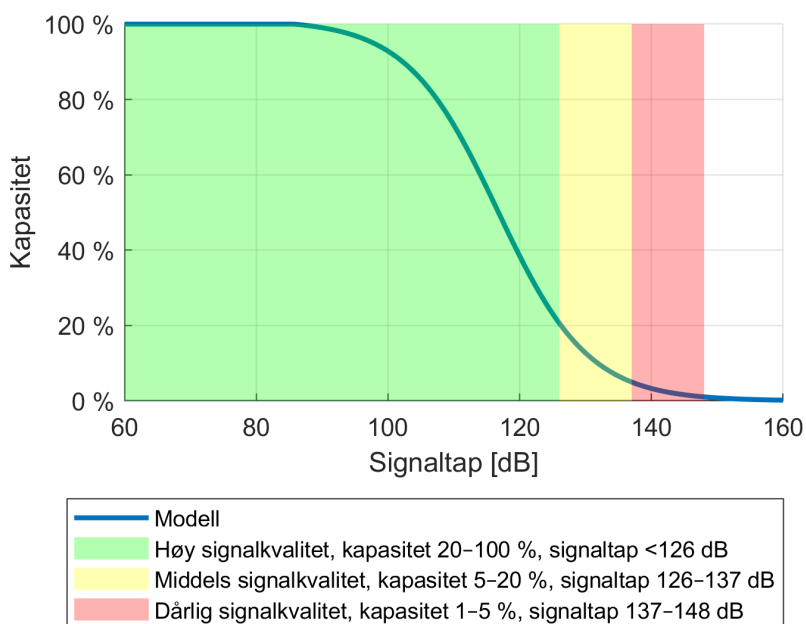
Propagasjonsmodeller i verktøyet WRAP, beskrevet i kapittel 2.1.2, er brukt til å lage dekningskart. En basestasjon er plassert på en bestemt posisjon i kartet, og verktøyet beregner signaltapet punkt for punkt rundt basestasjonen i et angitt geografisk område.

Basert på modellen presentert i kapittel 4.1.2, forhold mellom signaltapet og forventet kapasitet er kjent, noe som kan brukes til å bestemme farger på dekningskart. I dekningskartet til WRAP benyttes ulike farger til å representere ulike signalverdier. Figur 4.6 viser sammenhengen mellom fargene og verdiene. Grønn farge i dekningskartet representerer høy signalkvalitet med forventet

---

---

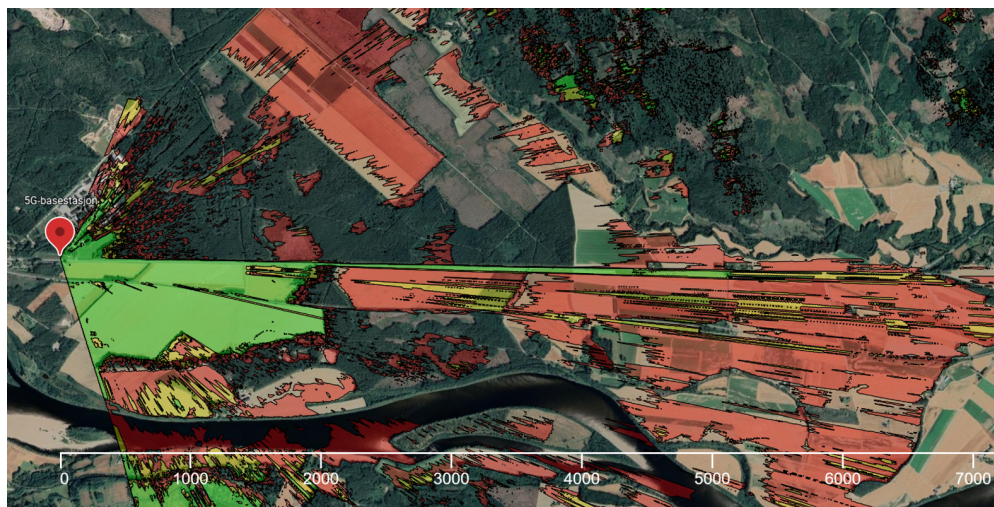
kapasitet i intervallet 20–100 % og tilsvarer et signaltap mindre enn 126 dB. Gul farge representerer middels signalkvalitet med forventet kapasitet i intervallet 5–20 % og tilsvarer et signaltap mellom 126 og 137 dB. Rød farge representerer dårlig signalkvalitet med forventet kapasitet i intervallet 1–5% og tilsvarer et signaltap mellom 137 og 148 dB. Signaltapet høyere enn 148 dB tilsvarer at kapasiteten er lavere enn 1 % og har ikke fått noen farge; brukerenheter antas her å være ute av dekning.



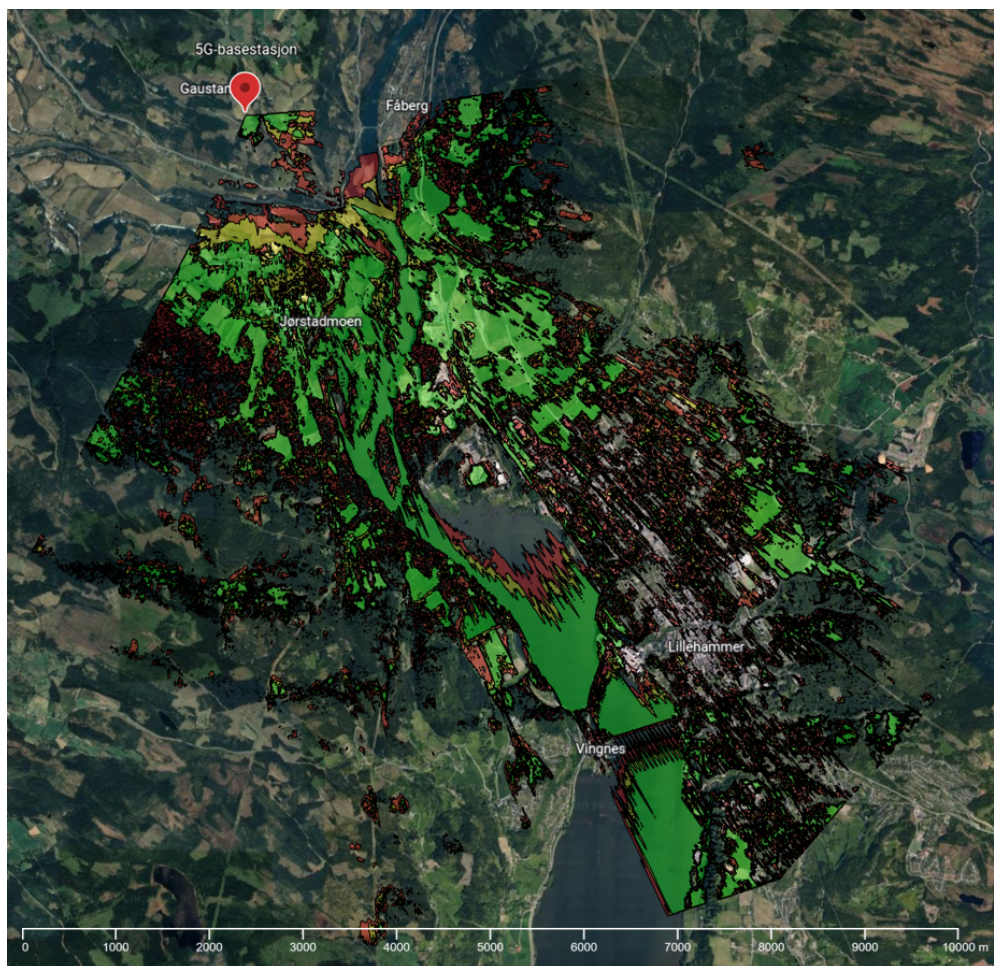
Figur 4.6 Farger i dekningskart representerer signaltapet og dermed forventet signalkvalitet og kapasitet.

Et eksempel på et dekningskart er vist i figur 4.7. En 5G-basestasjon plassert ved siden av Haslemoen militærleir, gir dekning langs Haslemostrekka. Basestasjonen er 10 meter over bakken og opererer med senterfrekvens på 3,35 GHz. Brukerenhetens antenne ligger 2 meter over bakken.

Et annet eksempel på et dekningskart er gitt i figur 4.8. I dette tilfellet er samme type basestasjon plassert på en høy bakke med hensikt å gi dekning over Lillehammer-området. Dekning er beregnet for en sektor på 120 grader fram til 10 km fra basestasjonen.



Figur 4.7 Et eksempel på dekningskart. Målestokken er gitt i meter.



Figur 4.8 Et eksempel på dekningskart. Målestokken er gitt i meter.

---

---

## 4.2 Dekning, rekkevidde og kapasitet i en pikocelle

Resultater i dette kapittelet gjelder en pikocelle. Før man leser dette kapittelet, anbefales det først å lese kapittel 4.1 som gjelder en makrocelle og inneholder fullstendige forklaringer og beskrivelser av resultater. I dette delkapittelet om pikocelle går vi direkte til endelige resultater.

Som fortalt i kapittel 3.2, har vi gjennomført færre målinger med en pikocelle enn med makroceller. Uansett er det fortsatt nok målepunkter for å kunne lage et rimelig estimat på dekning, rekkevidde og kapasitet.

Kapittel 4.2.1 viser måledata som er brukt til å lage en modell som beskriver forholdet mellom signaltapet og overføringshastigheten. Modellen kan brukes til å estimere kapasiteten i en gitt avstand fra en basestasjon, noe som beskrives i kapittel 4.2.2. Modellen kan også brukes for å estimere rekkevidde ved et gitt 5G-oppsett og en gitt type terreng. Denne bruken av modellen beskrives i kapittel 4.2.3. Kapittel 4.2.4 beskriver dekningsberegningene med verktøyet WRAP og viser hvordan modellen kan benyttes til å lage dekningskart.

### 4.2.1 Modellering

En modell som beskriver forholdet mellom normalisert overføringshastighet i opplink (kapasitet) og estimert signaltap er laget for pikocelle på samme måte som for makrocelle (kapittel 4.1.2). Figur 4.9 viser målepunkter tatt i en pikocelle. Figuren viser også den modellen som er laget med kurvetilpasning basert på disse målepunktene. Til sammenligning er modellen for makrocelle også gitt i figuren.

Modellen for pikocelle er en invers logistisk kurve bestemt av funksjonen

$$y = \min \left\{ 1, \frac{c}{1 + a \exp[b(x - 100)]} \right\} = \min \left\{ 1, \frac{1,044}{1 + 1,117 \exp[0,1342(x - 100)]} \right\} \quad (4.2)$$

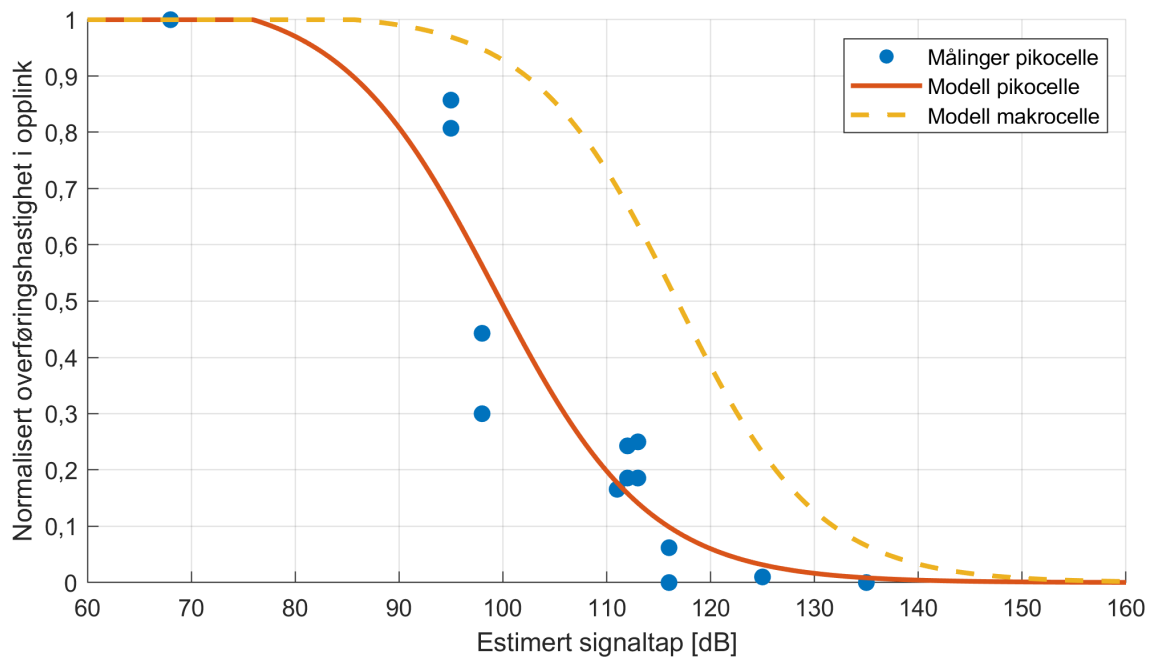
der  $y$  er normalisert overføringshastighet i opplink og  $x$  er signaltap målt i dB. Variablene  $a$ ,  $b$  og  $c$  beregnes gjennom kurvetilpasning.

Modellen gjelder en typisk pikocelleantenne som opererer i frekvensområdet 2–5 GHz.

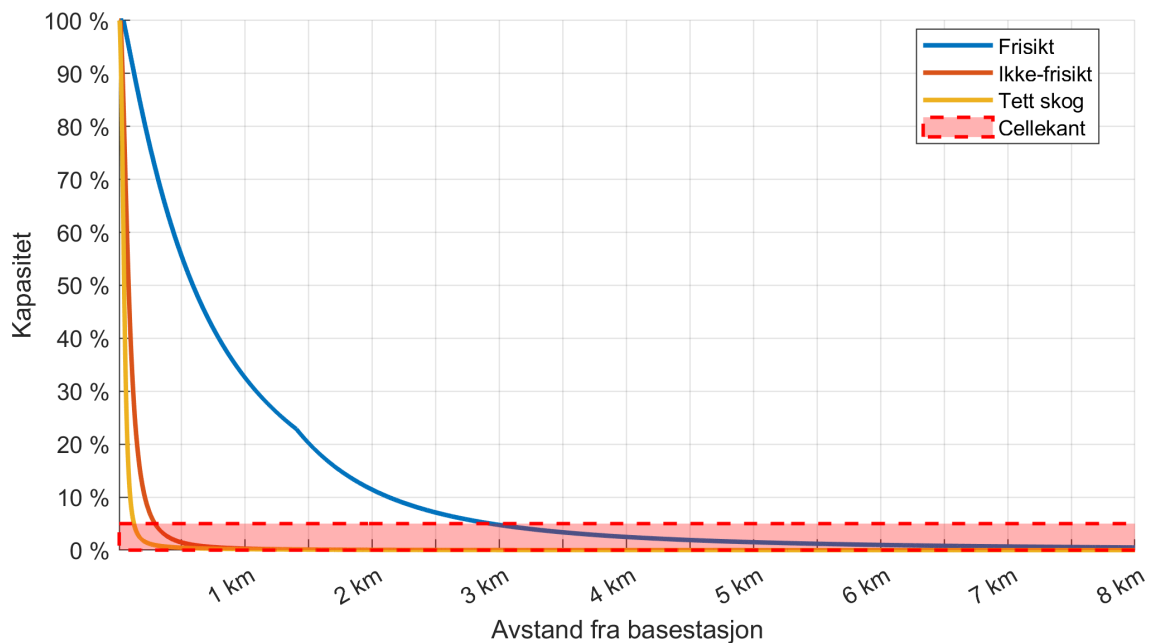
### 4.2.2 Estimert kapasitet for ulike avstand og terrengtyper

På samme måte som beskrevet i kapittel 4.1.3, er kapasitet estimert for ulike avstand fra basestasjon i ulike terreng – frisikt, ikke-frisikt og tett skog. Et eksempel på estimatet er gitt i figur 4.10. Dette eksemplet gjelder for en typisk pikocelleantenne som opererer med en senterfrekvens på 3,35 GHz, med en basestasjonshøyde på 10 meter og der brukerenhetens høyde er 2 meter over bakken.





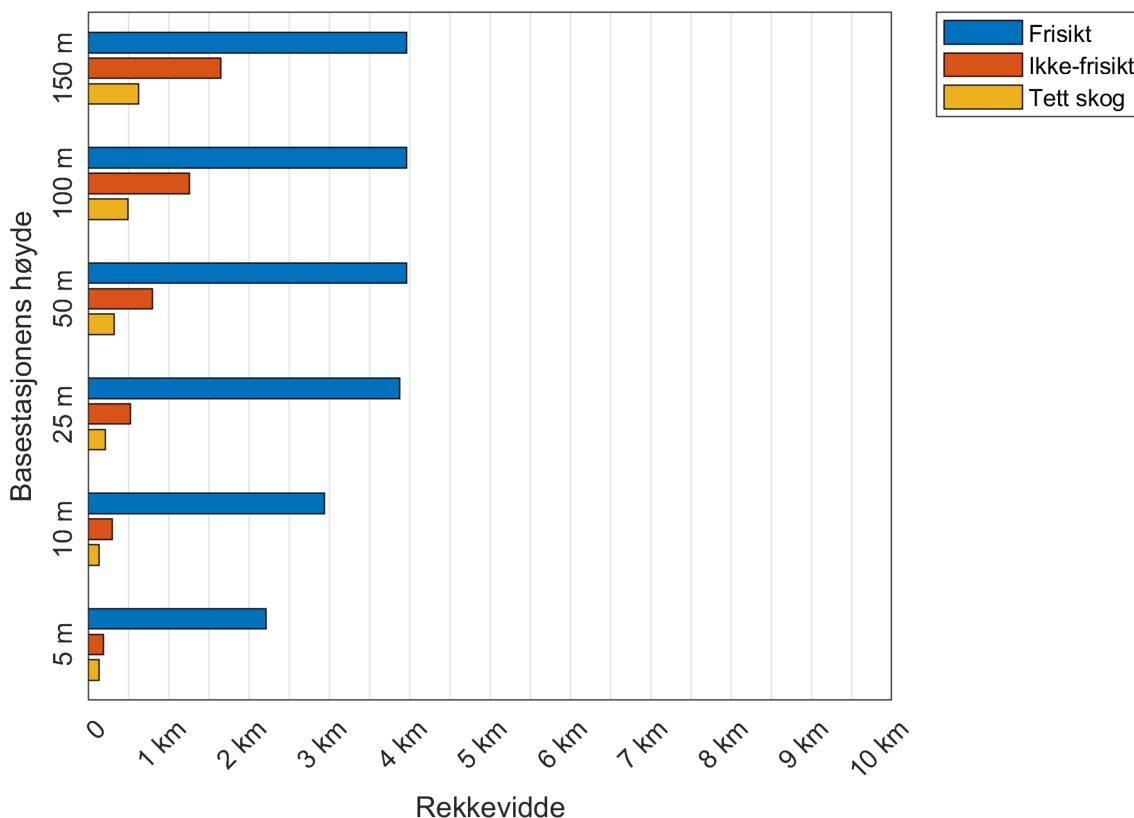
Figur 4.9 Normalisert overføringshastighet i opplink for estimert signaltap, og en modell som beskriver forholdet mellom de to i en pikocelle. Modellen for makrocelle var gitt i kapittel 4.1.2.



Figur 4.10 Estimert kapasitet for økende avstand fra basestasjon i ulike terrengetyper. Basestasjonens høyde er 10 meter, brukerenhetens høyde er 2 meter, og senterfrekvensen er 3,35 GHz.

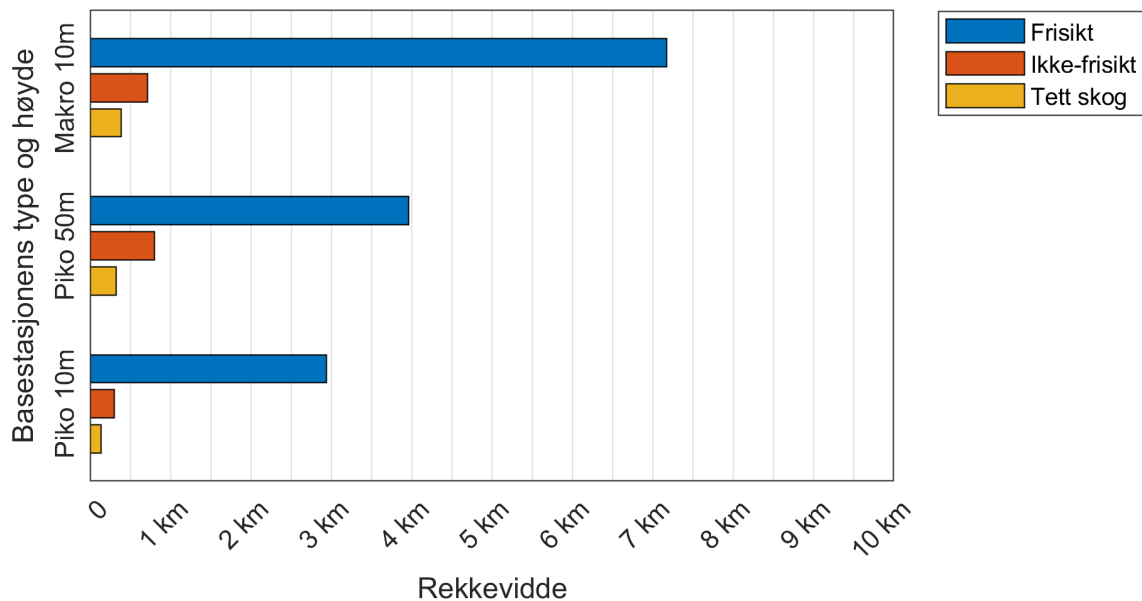
### 4.2.3 Estimert rekkevidde for ulike 5G-oppsett og terrengetyper

På samme måte som beskrevet i kapittel 4.1.4, er rekkevidde estimert for forskjellige masthøyder i ulike terreng. Den estimerte rekkevidden er vist i figur 4.11. Flere ulike høyder er valgt med tanke på at en pikocelleantenne er egnet for å bli løftet opp med en drone. Økt høyde øker sannsynligheten for frisikt og gir dermed bedre dekning. I følge estimatet ligger en øvre grense for rekkevidden på omtrent 4 km i en pikocelle.



Figur 4.11 Sammenligning av rekkevidde for tre forskjellige masthøyder. Brukerenhetens høyde er 2 meter, senterfrekvens er 3,35 GHz.

Et eksempel til er laget for å sammenligne forskjellige oppsett av 5G-basestasjoner. Rekkevidden er estimert for en pikocelle med basestasjonshøyde på 10 meter, pikocelle med basestasjonshøyde på 50 meter og makrocelle med basestasjonshøyde på 10 meter. Høyden på 50 meter er valgt for å kunne estimere hva rekkevidden kan bli med en antenne som er løftet opp med en drone. Den estimerte rekkevidden er vist i figur 4.12. Estimaten viser at en pikocelleantenne løftet opp i en høyde på 50 meter kan gi lignende dekning i ikke-frisikt og skog som en makrocelleantenne plassert 10 meter over bakken. Alle basestasjoner opererer med senterfrekvens på 3,35 GHz.



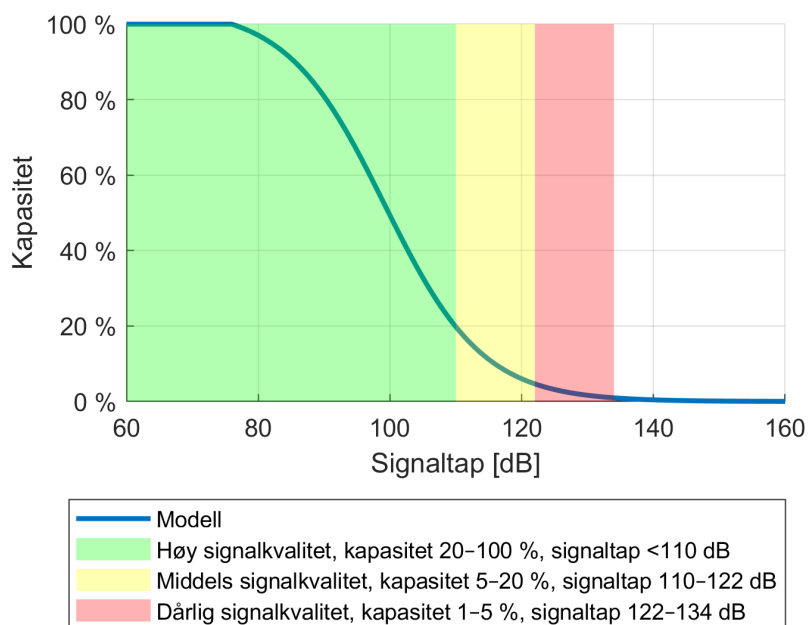
Figur 4.12 Sammenligning av rekkevidde for tre forskjellige 5G-oppsett. Brukerenhetens høyde er 2 meter, senterfrekvens er 3,35 GHz.

#### 4.2.4 Dekningskart

På samme måte som beskrevet i kapittel 4.1.5, er dekningskart også laget for pikocelle. I dekningskartene benyttes ulike farger til å representere ulike signalverdier. Figur 4.13 viser sammenhengen mellom fargene og verdiene. Grønn farge i dekningskartet representerer høy signalkvalitet med forventet kapasitet i intervallet 20–100 % og tilsvarer et signaltap mindre enn 110 dB. Gul farge representerer middels signalkvalitet med forventet kapasitet i intervallet 5–20 % og tilsvarer et signaltap mellom 110 og 122 dB. Rød farge representerer dårlig signalkvalitet med forventet kapasitet i intervallet 1–5 % og tilsvarer et signaltap mellom 122 og 134 dB. Signaltap høyere enn 134 dB betyr at kapasiteten er lavere enn 1 % og har ikke fått noen farge; brukerenheter antas da å være ute av dekning.

Et eksempel på et dekningskart for en pikocelle er vist i figur 4.14. En 5G-basestasjon med pikocelle-antenne er i dette tilfellet plassert på den samme posisjonen som basestasjonen med makrocelle-antenne i dekningskartet i figur 4.7. Begge basestasjonene opererer på samme senterfrekvens på 3,35 GHz og har en høyde på 10 meter.

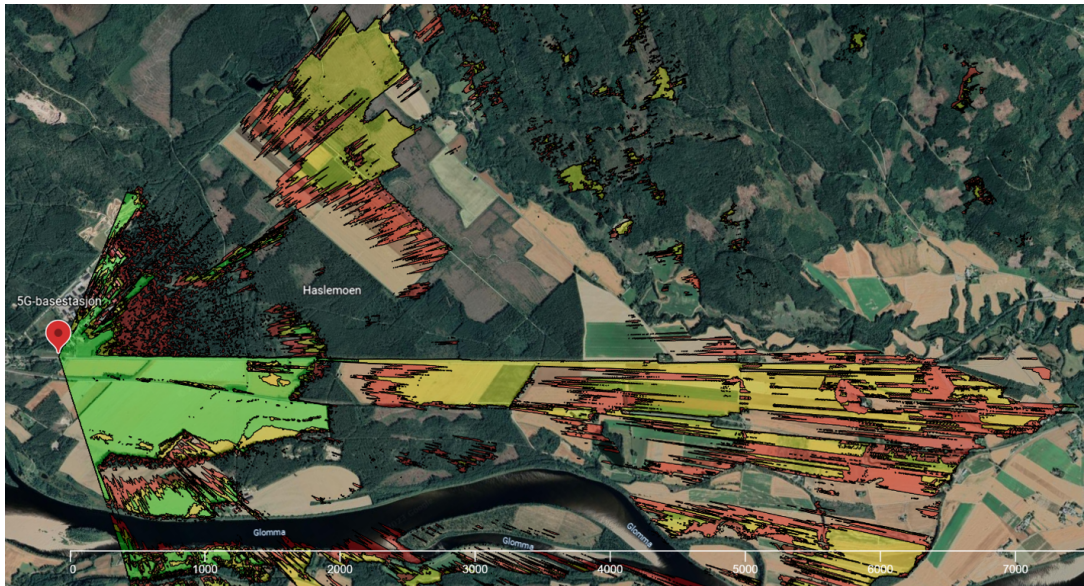
Et dekningskart til ble laget for å se på hvilken dekning som kan oppnås med en pikocelle som er hevet 50 meter over bakken med en drone. Figur 4.15 viser dekningskartet som viser at dekningen blir betydelig bedre sammenlignet med å plassere samme type basestasjon 10 meter over bakken.



Figur 4.13 Farger i dekningskart representerer signaltapet og dermed forventet signalkvalitet og kapasitet.



Figur 4.14 Et eksempel på dekningskart. Dekningskartet gjelder en pikocelle der basestasjonens høyde er på 10 meter over bakken. Målestokken er gitt i meter.



*Figur 4.15 Et eksempel på dekningskart. Dekningskartet gjelder en pikocelle der basestasjonens høyde er på 50 meter over bakken. Målestokken er gitt i meter.*

---

---

## 5 Diskusjon

Dette kapitlet diskuterer resultater, oppsummerer erfaringen med testing av 5G-radiokommunikasjon og gir noen anbefalinger for veien videre.

Usikkerhet i målinger og resultater omtales i kapittel 5.1. Kapittel 5.2 sammenligner forskjellige typer antenner på basestasjon, mens kapittel 5.3 sammenligner forskjellige frekvensbånd. Kapasitet og overføringshastighet ved et 5G-radiosystem er omtalt i kapittel 5.4. Begrensninger som gjelder sendeeffekt i opplink er dekket i kapittel 5.5. Parameterjustering for å optimalisere et 5G-radiosystem for lang rekkevidde beskrives i kapittel 5.6. Kapittel 5.7 gir noen råd om radioplanlegging og understreker viktigheten av dette.

### 5.1 Usikkerhet i resultater

Praktiske målinger i ukontrollerte testmiljø og bruk av propagasjonsmodeller vil i sin natur medføre antakelser og usikkerheter i resultater. Et visst avvik mellom den estimerte signalkvaliteten og den faktiske signalkvaliteten som oppleves i praksis, kan inntreffe. Uansett kan modellene og estimatene gitt i rapporten være hensiktsmessige og nyttige. Ved å samle inn flere målepunkter kan modellene forbedres.

#### 5.1.1 Estimert rekkevidde

Et estimat på rekkevidde i en makrocelle og i en pikocelle ble presentert i henholdsvis kapittel 4.1.4 og kapittel 4.2.3. Estimaten er basert på generiske propagasjonsmodeller for frisisikt, ikke-frisisikt og skog (kapittel 2.1.1). I praksis oppleves det en varierende grad av frisisikt, ikke-frisisikt og vegetasjon på en radiokanal mellom en basestasjon og en brukerenhet. Derfor betyr det ikke at den oppgitte rekkevidden er en øvre grense for rekkevidde. I enkelte tilfeller kan rekkevidden overstige eller ligge under estimaten. Estimaten for rekkevidde skal derfor sees som en gjennomsnittlig verdi. Et slikt estimat kan anvendes til å sammenligne forskjellige typer terreng og ulike 5G-oppsatt med ulik senterfrekvens eller masthøyde. For spesifikke scenarioer og bestemte geografiske områder er det hensiktsmessig å bruke spesielle verktøy for dekningskart for å oppnå mer presise dekningsberegninger.

#### 5.1.2 Dekningsberegninger i skog

Det er ekstra vanskelig å predikere dekning i skog. Hovedfaktorer som bestemmer signaltapet i skog er antall meter med skog mellom en sender og en mottaker, og skogens tetthet, noe som er vanskelig å forutsi med høy nøyaktighet.

Verktøyet WRAP har terrengdata som forteller til prediksjonsmodellen at et bestemt geografisk område er skog. I tillegg har verktøyet høydedata som også gjelder skog og inneholder trærnes

---

---

høyde over bakken. Ut ifra det velger verktøyet en prediksjonsmodell for clutter-tap som faller under typen skog. Slike dekningsberegninger gir en forholdsvis grov prediksjon for dekning i skog som ikke alltid er tilfredsstillende. Noen ganger overestimerer verktøyet signaltapet forårsaket av enkelte trær eller skog med lav tetthet. I verktøyet finnes det imidlertid en parameter som gjør det mulig å finjustere det estimerte signaltapet i vegetasjon. Vi justerte den parameteren ned fra 100 % (som er standard) til 80 %, noe som etter vår erfaring ga mest realistisk prediksjon for dekning i skog.

## 5.2 Sammenligning av makrocelle, mikrocelle og pikocelle

Vi har målt dekning, rekkevidde og kapasitet i flere makroceller og i én pikocelle. Som forventet viser resultatene at dekning, rekkevidde og kapasitet er aller best med en makrocelleantenne på basestasjon. Så lenge signaltapet mellom en basestasjon og en brukerenhet ikke overstiger 137 dB, ligger tjenesten levert i en makrocelle på et akseptabelt nivå (kapasitet høyere enn 5 %). Rekkevidde i en makrocelle er avhengig av terreng og er ulik for ulike 5G-oppsett. 5G-radiokommunikasjon opererer på relativt høye frekvenser, noe som er årsak til at frisikt er viktig for å oppnå lang rekkevidde. I frisikt kan rekkevidde på flere kilometer oppnås. I skog og andre forhold der det ikke er frisikt er rekkevidden betydelig begrenset. Innenfor dekning i en makrocelle er overføringshastigheten særlig høy i nedlink på grunn av beamforming og MIMO-teknologi dersom det er støttet av basestasjonen. Hovedgrunnen til at en makrocelleantenne leverer bra dekning er høy sendeeffekt og høy mottaksfølsomhet. Imidlertid kommer disse fordelene på bekostning av strømforbruk, støy og vekt.

Hvis strømforbruk, støy eller vekt skal minimeres, er en pikocelleantenne en passende løsning. Dette vil gå på bekostning av dekning og rekkevidde. Målinger og beregninger viser at med en pikocelle er rekkevidde begrenset til 3–4 km i frisikt. En pikocelle leverer følgelig relativt lokal dekning. Innenfor dekningsområdet er kapasitet for en bruker imidlertid noe lignende som i en makrocelle. En pikocelleantenne er også en løsning som er egnet for eleverte basestasjoner.

Støy og sendeeffekt på en typisk mikrocelleantenne ligger mellom støy og sendeeffekt på en typisk makrocelleantenne og en typisk pikocelleantenne. Derfor kan det antas at dekning levert i en mikrocelle er bedre enn dekning levert i en pikocelle, men ikke bedre enn dekning levert i en makrocelle.

## 5.3 Forskjellige frekvensområder

Vi har målt dekning, rekkevidde og kapasitet på forskjellige frekvensområder innenfor 2–5 GHz. Frekvensområdene som ble målt på var 2,3 GHz (2300–2380 MHz), 3,3 GHz (3300–3400 MHz), 3,6 GHz (3620–3700 MHz) og 4,9 GHz (4830–4930 MHz). Figur 4.4 sammenligner estimert rekkevidde for tre frekvensbånd – 2,3 GHz, 3,3 GHz og 4,9 GHz. De estimerte verdiene gjenspeiler måleresultater og det som var opplevd i praksis under målinger. Resultatene i figur 4.4 sier at frekvensbånd har mindre betydning under frisikt, siden rekkevidden ligger rundt 7 km på alle frekvensbånd. Men når det gjelder rekkevidden i skog, er det en betydelig forskjell mellom frekvensbåndene. I følge modellen er rekkevidden 970 meter på 2,3 GHz i skog, mens rekkevidden

---

---

på 3,3 GHz og 4,9 GHz ligger på henholdsvis 400 meter og 150 meter.<sup>2</sup> Generelt sett er det laveste frekvensbåndet på 2,3 GHz et foretrukket valg, for det leverer lengst rekkevidde sammenlignet med 3,3 GHz og 4,9 GHz.

### 5.3.1 Andre frekvensområder enn 2–5 GHz

Vi har målt og analysert dekning, rekkevidde og kapasitet i frekvensområdet 2–5 GHz, men 5G-radiokommunikasjon kan også operere både på lavere og på høyere frekvensområder enn dette. Frekvensområdet fra 450 MHz til 2 GHz er i bruk på de offentlige mobilnettene. Den største fordelene med lavfrekvenssignaler sammenlignet med høyfrekvenssignaler er at de propagerer betydelig bedre gjennom vegetasjon og andre hindringer som blokkerer frisikten mellom sender og mottaker. Imidlertid har frekvensområdet 2–5 GHz mer tilgjengelig båndbredde enn de lavere frekvensbåndene, noe som fører til høyere kapasitet.

5G-radiokommunikasjon er også spesifisert for frekvensområdet 24,25–52,6 GHz kalt *Frequency Range 2* (FR2) i 5G-standarden eller *mmWave* i det kommersielle markedet. Dette frekvensområdet tilbyr store frekvensressurser for båndbredde, men vil gi svært begrenset dekning og rekkevidde. Radiokommunikasjonen på så høy frekvens vil kreve friskt mellom en basestasjon og en brukerenhet for å kunne levere høy kapasitet.

## 5.4 Kapasitet

I denne studien har vi definert kapasiteten slik at 100 % kapasitet representerte den maksimale overføringshastigheten et 5G-radiosystem klarte å levere i opplink ved god signalkvalitet. Ved økende signaltap mellom en basestasjon og en brukerenhet gikk andelen tilgjengelig kapasitet ned. Når kapasiteten ble lavere enn 5 %, definerte vi at brukerenheten ansees som å være ute av dekning.

Hvor høy den maksimale overføringshastigheten ved 100 % kapasitet blir, er avhengig av flere faktorer som blant annet systemets båndbredde, oppsett på rammestruktur (andel tidsressurser fordelt mellom opplink og nedlink), antall MIMO-strømmer per brukerenhet støttet (SU-MIMO) og tilgjengelig prosesseringskraft på brukerenhet (et modem har ofte mindre prosesseringskraft enn en smarttelefon).

Overføringshastighet i opplink og nedlink oppnådd under målinger, ble vist i figur 4.1. Basert på erfaring fått under målingene, sier vår tommelfingerregel at overføringshastigheten ligger på 1–2 Mbps/MHz i opplink og 6–10 Mbps/MHz i nedlink. Det vil si at med båndbredde på 100 MHz og standard 5G-oppsett vil overføringshastigheten ligge rundt 100–200 Mbps i opplink og 600–1000 Mbps i nedlink ved gode signalforhold. Kapasitet avhenger også av type brukerenhet, antall MIMO-strømmer som basestasjonen og brukerenheten støtter og basestasjonens innstillinger på tidslukekonfigurering.

---

<sup>2</sup>Med rekkevidde i skog menes det at det er et gitt antall meter med tett skog slik at det er ingen friskt mellom en basestasjon og en brukerenhet.



---

---

## 5.5 Sendeeffekt i opplink

Sendeeffekten som er tilgjengelig på en 5G-brukerenhet er lav sammenlignet med en 5G-basestasjon og enkelte taktiske radiosystemer. Den lave sendeeffekten i opplink begrenser rekkevidden til et 5G-radiosystem. Kapittel 5.5.1 omtaler denne utfordringen og diskuterer hvordan det kommer til å være håndtert av 5G-standarden. En måte å øke sendeeffekt på er å ta i bruk direkte antenner som har større antennegevinst. Dette er omtalt i kapittel 5.5.2.

### 5.5.1 Sendeeffekt i opplink som begrensede faktor for rekkevidde

Radiokommunikasjon i 5G krever en toveis forbindelse, det vil si at forbindelsen må være oppe både i opplink og nedlink. Under målinger ble det observert at svakt signal i opplink var den hyppigste grunnen til at 5G-forbindelsen ble terminert, og at brukeren var utenfor dekning. Når det ble målt lav overføringshastighet i opplink på kanten av en celle, var signalstyrken (RSRP) og overføringshastighet i nedlink ofte fortsatt tilstrekkelig. Grunnen til at signalet i opplink er den mest begrensende faktoren for rekkevidde, er relativt lav sendeeffekt fra brukerenheter. Sendeeffekten i opplink, typisk 26 dBm, er lav sammenlignet med sendeeffekten i nedlink fra en basestasjon som typisk kan levere opptil 78 dBm. En basestasjon har typisk høy utgangseffekt og antennegevinst, noe som ble presentert i kapittel 2.2.1. Typisk sendeeffekt fra en brukerenhet ble beskrevet i kapittel 2.2.2.1.

Det at forbindelsen i opplink begrenser rekkevidden på de nye, høye 5G-frekvensområder er en kjent utfordring, men også noe som det jobbes med. 3GPP, konsortiet som lager 5G-standarden, hevder at opplink er en begrensende faktor for dekning og inviterer å komme med innspill for forbedringer i framtidige utgaver av 5G-standarden [1]. En av løsningene, foreslått i 5G-standarden, er noe som heter *Supplementary Uplink* (SUL) [6]. SUL er et ekstra frekvensbånd som går på lav frekvens, vanligvis under 2 GHz, og gir en lengre rekkevidde sammenlignet med rekkevidden på høyere frekvenser. Når en brukerenhet er på kanten av en celle og signalet i opplink begynner å bli for svakt, kan enheten automatisk bytte til å benytte SUL, noe som utvider rekkevidden i en celle.

Økning i sendeeffekt på brukerenheter vil definitivt føre til en lengre rekkevidde. En viktig tendens observert i 5G-standarden er at grenser for maksimal utgangseffekt på brukerenheter øker med nye utgaver av 5G-standarden. Det er stadig flere og flere frekvensbånd som har støtte for effektklasser med høyere utgangseffekt enn standard (23 dBm). Trenden er også synlig i praksis – produsentene til brukerutstyr velger ofte å implementere effektklasser med høy utgangseffekt som 24 dBm, 26 dBm eller 29 dBm.

### 5.5.2 Direktive antenner for økt sendeeffekt i opplink

En annen måte å øke sendeeffekt i opplink på er å ta i bruk direkte antenner på brukerenheten. Slike antenner er passive, det vil si at de ikke har en ekstern signalforsterker eller form for digitalt styrt beamforming, og gevinsten kommer fra direktivitet oppnådd i antennedesignet. I prinsippet er antennegevinst ikke begrenset i frekvenstillatelsene så lenge brukerenheter ikke smitter celler i andre mobilnett eller interfererer med andre radiosystemer over landegrensen [11]. Operatøren er selv ansvarlig for eventuell interferens forårsaket av brukerenheter.

---

Det finnes ulike typer direkte antenner med forskjellig antennegevinst. En direktiv antenne kan være integrert i et modem, eller kobles til som en ekstern antenne. Antenner brukt i denne studien ble presentert i kapittel 3.1.2.

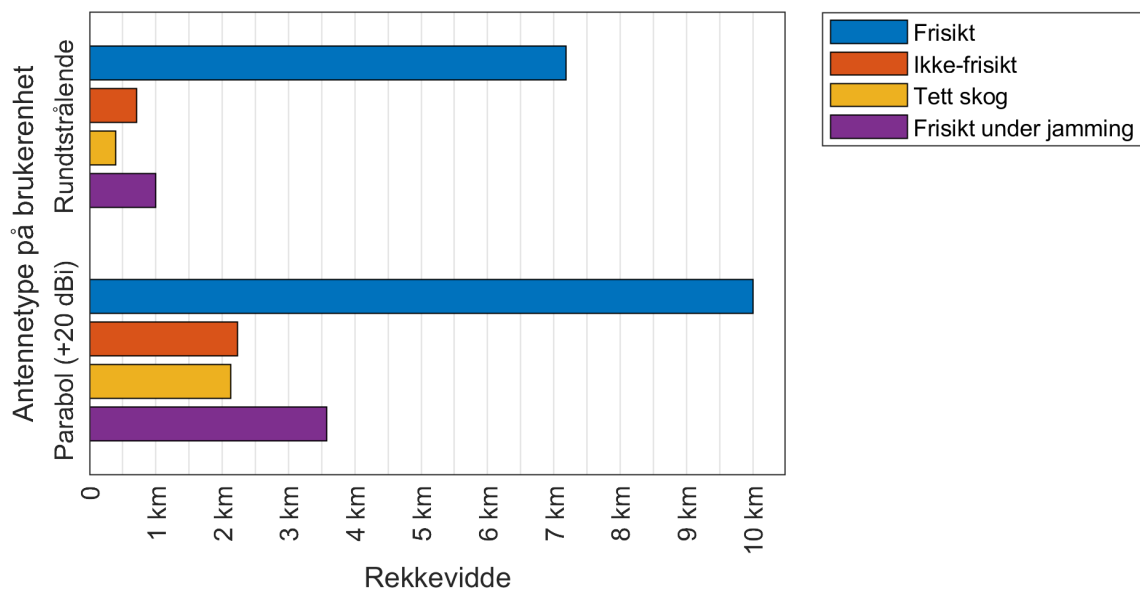
Ulempen med en direktiv antenne er at den alltid må pekes mot den retningen der signalet fra en basestasjon er sterkest. Jo større gevinst en antenne har, jo mer retningssensitiv er den. Direktiviteten går på bekostning av mobiliteten, siden en direktiv antenne med stor antennegevinst må settes fast, og pekeretningen manuelt må justeres mot den optimale retningen. Slik bruk av direkte antenner kan være egnet til punkt-til-punkt-type kommunikasjon mellom en brukerenhet og en basestasjon. Antennegevinsten vil føre til lengre rekkevidde og høyere overføringshastighet både i opplink og nedlink.

På slutten av denne studien har vi undersøkt en parabolantenne som kan kobles til et 5G-modem. Antennen leveres av Ubiquiti og modellen vi testet med var AF-3G26-S45. Antennegevinsten er opptil 26 dBi i frekvensområdet 3,3–3,8 GHz. Åpningsvinkelen er 7° (6dB). Antennen utnytter MIMO via dobbelt lineær antennepolarisasjon. Antennen er vist i figur 5.1.



*Figur 5.1 Parabolantenne AF-3G26-S45 fra Ubiquiti koblet til 5G-modem FRRO501a fra Nokia.*

I praksis opplevde vi en forskjell på omtrent 20 dB mellom en rundstrålende antenne (som også har antennegevinst på noen få dB) og parabolantennen fra Ubiquiti. Beregninger på forventet rekkevidde som ble presentert i kapittel 4.1.4, gjelder en rundstrålende antenne. Vi brukte den samme modellen, men la til en ytterligere antennegevinst på 20 dBi for å sammenligne hvor mye bedre rekkevidden kan bli. Resultatene er vist i figur 5.2.



Figur 5.2 Sammenligning av rekkevidde for ulike antennetyper på brukerenhet. Basestasjonens høyde er 10 meter, brukerenhetens høyde er 2 meter, senterfrekvens er 3,35 GHz. En jammer med sendeeffekt på 47 dBm (50W), er 8 km unna i frisikt med basestasjon.

## 5.6 Parameterjustering for maksimering av rekkevidde

En annen måte å øke rekkevidden på kan være å justere ulike parametere på basestasjonen. En base-stasjon har mange radioparametere som kan justeres for å optimalisere 5G-radiokommunikasjonens ytelse ut ifra type dekning og tjenester den skal levere. Det betyr at en enkelt base-stasjon også kan optimaliseres for å gi lengst mulig rekkevidde. Det er viktig å presisere at optimal dekning og rekkevidde kan gå på bekostning av redusert kapasitet eller økt interferens mellom brukere, antennesektorer eller naboceller i samme frekvensområde.

Vi har undersøkt radioparametere som kan sette begrensninger for rekkevidde, og, i så fall, om det er mulig å endre disse parametere. Kapittel 5.6.1 beskriver hvordan en beskyttelsesperiode i TDD-rammestruktur (*Time-Division Duplexing*) kan ha en betydning for rekkevidden. Kapittel 5.6.2 beskriver forskjellige konfigurasjoner på *Random Access Channel (RACH)* som kan sette en begrensning for rekkevidden. *Cell Range* er en parameter som også kan bestemme rekkevidden for en base-stasjon. Dette er omtalt i kapittel 5.6.3.

Alle mulige øvrige grenser for utgangseffekt i opplink bør justeres opp, slik at en brukerenhet får benyttet utgangseffekten den har tilgjengelig. Mekanismen som bestemmer sendeeffekten i opplink, heter *Uplink Power Control*. Dette er beskrevet i kapittel 5.6.4.

Det finnes diverse terskler som setter krav for signalkvalitet, som må tilfredsstilles for at en brukerenhet er tillatt til å koble seg til en base-stasjon. Lavere krav for signalkvalitet kan føre til en mer smidig forbindelsesetablering ved dårlig signalkvalitet, noe som kan oppleves som bedre dekning. Parameterjusteringen som gjelder disse tersklene er beskrevet i kapittel 5.6.5.

Det finnes sannsynligvis flere parametere som kan optimalisere base-stasjonen til å oppnå lengst

---

---

mulig rekkevidde. Parameterne kan også variere fra produsent til produsent, men hovedparten av innstillingene skal være basert på 3GPP-standarden og dermed felles uansett produsenten. Parameterjusteringen på basestasjon krever høy teknisk kompetanse som ligger hos mobiloperatører og leverandører de samarbeider med. Forsvaret som kunde bør kunne bestille basestasjoner som er optimalisert for lengst mulig rekkevidde.

Alle parameterjusteringene ble undersøkt etter at dekningsmålingene og påfølgende analyser var utført. Det betyr at resultater i kapittel 4 gjelder en basestasjon med standard innstillinger, det vil si at basestasjoner ikke var optimalisert for lang rekkevidde.

### 5.6.1 Beskyttelsesperiode

5G-radiokommunikasjon kan operere i TDD-modus, noe som betyr at nedlink-signalet fra en basestasjon og opplink-signalet fra en brukerenhet går på det samme frekvensbåndet men er separert i tid. En basestasjon kan betjene flere brukere samtidig. Disse brukerne kan være i forskjellige avstander fra basestasjonen, noe som også betyr forskjellige propagasjonstider til signalene som går mellom basestasjonen og brukerenheter. For å utjevne denne forskjellen i tidsforsinkelse, trenger et 5G-radiosystem tidsperioder der en node hverken sender eller mottar. I et TDD-radiosystem heter tidsperioden beskyttelsesperiode (*guard period*). Jo lengre beskyttelsesperioden er, jo større propagasjonsforsinkelse kan 5G-radiosystemet håndtere, og jo lengre rekkevidde kan oppnås.

Frekvensområdene på 2,3 GHz, 3,3 GHz og 4,9 GHz opererer i TDD-modus og bruker mellombæreravstand på 30 kHz. I radiatorammestruktur dedikeres et bestemt antall OFDM-tidssymboler<sup>3</sup> til beskyttelsesperioden. I disse frekvensbåndene kan beskyttelsesperioden typisk ha varighet på to, fire eller seks OFDM-symboler. Dette tilsvarer henholdsvis varigheten på 35,68  $\mu$ s, 71,36  $\mu$ s og 107,04  $\mu$ s og fører til rekkevidder på henholdsvis 10,7 km, 21,4 km og 32,1 km [16]. Det betyr ikke nødvendigvis at radiokommunikasjon slutter å fungere på en avstand som er lengre enn den gitte rekkevidden. Men det kan føre til ytterligere interferens, særlig dersom det er flere brukere på den samme basestasjonen. Dette gir igjen dårligere ytelse og kan gi brudd i forbindelsen. I teorien kan beskyttelsesperioden være lang nok til å støtte rekkevidden på 100 km, som per definisjon er den øvre grensen for rekkevidde i 5G. Imidlertid er implementasjonen opp til produsenter til basestasjoner å bestemme.

I de kommersielle 5G-nettene som opererer i frekvensområdet 2–5 GHz må beskyttelsesperioden være lik mellom alle mobiloperatører. Standard valg er to OFDM-symboler, noe som setter en grense for rekkevidden på 10,7 km. Taktiske 5G-nett som er uavhengige og opererer på egne frekvensbånd, er ikke nødt til å være i synkronisering med kommersielle nett og kan fritt velge en ønsket beskyttelsesperiode.

### 5.6.2 Random Access Channel (RACH)

Brukerenheten benytter RACH for å sende dens første melding til en basestasjon for å etablere en forbindelse med basestasjonen. På det fysiske laget brukes det *Physical Random Access Channel*

---

<sup>3</sup>Teknologien OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) er beskrevet i FFI-rapport 22/00906 [9].

(PRACH) for å overføre den første meldingen som heter *PRACH preamble*. Det finnes flere format og konfigurasjoner som bestemmer hvordan preambelen skal se ut og hvor i radiatorammen den skal plasseres. Basestasjonen kringkaster jevnlig instruksjoner om når og hvordan en ny bruker i cellen skal sende preambelen.

Avhengig av format får brukerenheten et bestemt tidsvindu med en bestemt lengde i tid for å sende preambelen. Er brukerenheten for langt unna basestasjonen, kommer preambelen for sent og kan ikke avleses av basestasjonen. Det fører til at forskjellige format og konfigurasjoner kan sette begrensninger for rekkevidde, særlig når det gjelder radiokommunikasjon på TDD, hvor det er en begrenset tidsperiode når brukerenheten kan sende i opplink.

I 5G finnes det 13 format til PRACH preamble. Formatene er navngitt som følger: 0, 1, 2, 3, A1, A2, A3, B1, B2, B3, B4, C0 og C2 [2]. Basert på [10] og [26] har vi beregnet den omtrentlige rekkevidden et gitt format er designet for. Format 1 og 2 har ingen begrensninger og støtter opp til 100 km rekkevidde, som per definisjon er den øvrige grensen for rekkevidde i 5G. Format 0 og 3 har en begrensning på 14 km, mens resten av formatene (fra A1 til C2) har en begrensning på 5 km.

Forskjellige formater har forskjellige lengder i tid, noe som i et TDD-system krever nok antall sammenhengende tidsluker i opplink for å kunne rekke å sende og motta en preamble med et gitt format. Med 30 kHz mellombæreravstand (*subcarrier spacing* (SCS)) krever format 0 og 3 to sammenhengende tidsluker i opplink, mens format 1 krever seks, og format 2 krever ni. Med formatene fra A1 til C2 sendes preambelen på en tidsluke.

En annen viktig konfigurasjon i PRACH preamble, er *zeroCorrelationZoneConfig* [2]. *ZeroCorrelationZoneConfig* er en parameter som bestemmer et syklisk skift av PRACH preamble. Med syklisk skift kan en preamble gjenbrukes av flere brukere ved å flytte den i tiden. Ved å bruke syklisk skift har preambelene enda kortere tid til å bli sendt og mottatt, noe som kan føre til ytterligere begrensninger for rekkevidde. *ZeroCorrelationZoneConfig* har 16 mulige konfigurasjoner (fra 0 til 15). Vi har identifisert hvilke konfigurasjoner som er mulige uten at det setter en ytterligere begrensning for rekkevidde i tillegg til den begrensningen som kommer fra valget av format til PRACH preamble.

Tabell 5.1 oppsummerer alle format til PRACH preamble, begrensninger for rekkevidde, antall tidsluker i opplink som kreves for å støtte et gitt format og mulige *zeroCorrelationZoneConfig*-konfigurasjoner.

Format til PRACH preamble	Rekkevidde gitt format designet for	Lavest antall konsekutive tidsluker i opplink for å kunne støtte gitt format	Mulige valg av <i>zeroCorrelationZoneConfig</i> for å kunne oppnå gitt rekkevidde
Format 0	14 km	2	0, 12, 13, 14, 15
Format 1	100 km	6	0
Format 2	100 km	9	0
Format 3	14 km	2	0, 15
Format A1, A2, A3, B1, B2, B3, B4, C0, C2	5 km	1	0

Tabell 5.1 Avhengighet av forskjellige format og konfigurasjoner i RACH og begrensninger for rekkevidde. Verdiene gjelder mellombæreravstand på 30 kHz.

---

---

Standard valg for tidslukekonfigurasjon i TDD er 4:1 (fire tidsluker er dedikert til nedlink, og én tidsluke er dedikert til opplink). Denne konfigurasjonen benyttes i dag av alle kommersielle basestasjoner som opererer i TDD i 3,6 GHz-båndet i det offentlige nettet. Siden det er kun én tidsluke i opplink, betyr det at kun formatene fra A1 til C2 kan benyttes, noe som begrenser rekkevidden til 5 km. Et 5G-nett i felt med dedikert frekvensspektrum kan velge en annen tidslukekonfigurasjon i TDD, for eksempel, 8:2 eller 7:3. Dette gir minst to sammenhengende tidluker i opplink. Da kan format 0 eller 3 benyttes, noe som medfører at begrensning for rekkevidde øker fra 5 km til 14 km. Det er noe vi har testet og verifisert at fungerer. Tidslukekonfigurasjoner i TDD som støtter format 1 eller 2 har vi ikke sett implementert i praksis ennå, men det er ikke usannsynlig at det etterhvert blir integrert på noen utvalgte løsninger for taktiske 5G-nett.

### 5.6.3 Cell Range

På sine basestasjoner bruker noen produsenter en parameter ofte kalt *Cell Range* som rett og slett angir en øvre grense for rekkevidden i en celle. Verdien til parameteren blir oppgitt i meter eller kilometer. Ut i fra verdien satt på Cell Range kan basestasjonen automatisk endre parametere for, for eksempel, beskyttelsesperiode eller RACH, slik at den satte Cell Range-verdien er oppnåelig. Det er viktig å passe på at verdien til en parameter som Cell Range (eller tilsvarende parametere) ikke ligger under ønsket verdi for rekkevidde.

### 5.6.4 Uplink Power Control

Som beskrevet i kapittel 2.2.2.1 er Uplink Power Control en mekanisme i 5G-radiokommunikasjon, som til enhver tid måler signaltapet mellom brukerenhet og basestasjon for å tilpasse sendeeffekten på brukerenheten [3]. Er brukerenheten i nærheten av basestasjonen, kan den sende med lav effekt både for å spare strøm og minimere interferens. Er brukerenheten langt unna basestasjonen, kan den sende med maksimal effekt. Sendeeffekten i opplink er på denne måten adaptiv og tilpasser seg dynamisk til radiokanalen.

Vi har identifisert flere innstillinger innenfor algoritmen til Uplink Power Control, som kan justeres for å tvinge brukerenheten til å bruke mest mulig effekt på utsendingen. Parameterne kan endres i basestasjonens innstillinger. Basestasjonen signalerer alle instruksjoner om utgangseffekt til brukerenheten via kontrollmeldinger (*System Information Blocks (SIBs)*). Et eksempel på en parameter i Uplink Power Control er parameteren *p-Max* som setter en øvre grense på utgangseffekten til brukerenheten. Det er viktig å passe på at den satte grensen ikke er lavere enn det brukerenheten klarer å levere, slik at hele utgangseffekten som er tilgjengelig kan benyttes. Et annet eksempel er parameteren *alpha* som forteller til algoritmen hvor stor andel av signaltapet som skal kompenseres med utgangseffekt i opplink. For å få høyest mulig sendeeffekt i opplink, anbefales det å sette alpha lik 1,0, slik at signaltapet kompenseres med 100 %.

### 5.6.5 Diverse terskler

Under basestasjonens innstillinger finnes det flere parametere for diverse terskler som setter krav for signalstyrke eller signalkvalitet. Kravene må være tilfredsstilte for å etablere og opprettholde

---

---

forbindelsen mellom brukerenhet og basestasjon. Det er vanlig at disse tersklene er satt til et relativt høyt nivå for å sikre at forbindelsen som er etablert er sterk nok og leverer god brukeropplevelse. I et taktisk scenario kan det derimot være ønskelig å etablere en forbindelse så lenge det er mulig å gjøre det, uansett hvor lav overføringskapasiteten blir. Da må tersklene for signalstyrke og signalkvalitet være satt lavest mulig.

Et eksemplet på slike terskler er parametere under *Cell Selection* og *Cell Reselection* [4]. Disse mekanismene setter krav for signalstyrke (RSRP) og signalkvalitet (RSRQ) som kan justeres for å senke terskelen for at brukerenheten får lov å koble seg til basestasjonen.

Hvis brukerenheten befinner seg på kanten av en celle, vil den gjentatte ganger kunne hoppe ut av og inn igjen i dekningsområdet. Det er da også viktig at terskelen for å kunne gjenopprette forbindelsen er lav, slik at brukerenheten kobler seg til basestasjonen med en gang de klarer å opprette forbindelsen, selv om forbindelsen er svak. Hvis terskelen er høy, må brukerenheten flytte seg nærmere basestasjonen for å kunne re-etablere forbindelsen, noe som ikke alltid er hensiktsmessig i et taktisk scenario.

## 5.7 Radioplanlegging

Radioplanlegging er en prosess for å bestemme plassering, høyde og retning av kommunikasjonsnoder, basert på hvilke frekvenser og andre radioparametere et trådløst kommunikasjonssystem benytter. Radioplanlegging kan brukes til å forutsi eksisterende eller oppnå ønsket dekning i et geografisk område. Propagasjonsmodeller er et viktig verktøy for god radioplanlegging.

Dekningskart kan utnyttes under radioplanlegging for å bestemme en optimal posisjon for en basestasjon som må levere dekning til noen bestemte geografiske områder. Optimal posisjon av en basestasjon er omtalt i kapittel 5.7.1. Kapittel 5.7.2 gir et eksempel på bruk av modellen, der modellen brukes for å anslå om forbindelsen mellom en basestasjon og en sensor, som for eksempel skal overføre en videostrøm, er tilstrekkelig for å levere tjenesten. Kapittel 5.7.3 omtaler hvordan radioplanlegging kan brukes som et risikoreduserende tiltak for å minimere sannsynligheten for feilinvesteringer av radiomateriell. Kapittel 5.7.4 diskuterer muligheter for å integrere den dekningsmodellen, som vi har introdusert i denne studien, i et militært kommando- og kontrollsystem, for eksempel som en egen modul for radioplanlegging.

### 5.7.1 Optimal posisjon av en basestasjon

Tidligere i rapporten har vi vist hvordan modellen for kapasitet kan bli realisert i et verktøy for dekningskart (kapitler 4.1.5 og 4.2.4). Når én eller flere 5G-basestasjoner har en bestemt posisjon, kan verktøyet brukes til å lage dekningskart som gir en prediksjon for dekning og tjenestekvalitet i det bestemte geografiske området. Men verktøyet kan også brukes når posisjonen til en basestasjon ikke er bestemt, men skal bestemmes for å levere optimal dekning eller om dekning er ønskelig på noen bestemte geografiske områder. Det er ikke alltid intuitivt å vite hva som er den beste posisjonen for en basestasjon for å dekke de områdene. Radioplanlegging for å finne en optimal posisjon for en basestasjon er relevant både for et flyttbart taktisk 5G-nett som skal brukes i et

---

---

oppdrag eller øvelse, og for en stasjonær mast som for eksempel skal gi dekning på en militær base. En del praktiske faktorer som fremkommelighet, tilgang til strøm og mulighet for *reach-back* til fiber eller det offentlige mobilnettet kan også komme i betraktning.

### 5.7.2 Dataoverføring fra en sensor

5G-radiokommunikasjon kan brukes som en databærer til en sensor (smarttelefon, videokamera, termisk kamera, fjernstyrt kikkert eller lignende) plassert i felt. Data som overføres er ofte videostrøm, noe som kan kreve relativt stor overføringshastighet. Selv om en 5G-brukerenhet er i dekning, betyr det ikke at den klarer å gi ønsket overføringshastighet. Hvis enheten er i stor avstand fra basestasjonen, eller om det er fysiske hindringer mellom sensoren og basestasjonen, kan signaltapet være for høyt til å levere tjenesten med ønskelig kapasitet. I en slik situasjon kan modellen for kapasitet, som er presentert i kapitlene 4.1.2 og 4.2.1, være nyttig. Modellen kan estimere overføringshastigheten i opplink på en bestemt posisjon der der er ønskelig å plassere sensoren.

For å illustrere dette konseptet, ble det skrevet et kort Python-skript. Input til skriptet er GPS-posisjonen og høyden til en basestasjon, GPS-posisjonen og høyden til en brukerenhet og 5G-radiosystemets maksimale kapasitet og bærefrekvens. Skriptet sender en rekke API-meldinger til verktøyet WRAP som beregner signaltapet mellom basestasjonen og brukerenheten. Ut i fra signaltapet beregnes det et estimat for overføringshastighet i opplink ved bruk av modellen (ligning 4.1). Slik kan overføringshastigheten på en bestemt forbindelse forutses, og en vurdering kan gjøres om den forventede kapasiteten er tilstrekkelig. Et skjermbilde av skriptets input og output er vist i figur 5.3. Fokus er på overføringshastighet i opplink fordi sensordata hovedsakelig går fra en sensor til en basestasjon, og fordi overføringshastighet i nedlink gjerne er minst like høy som overføringshastighet i opplink og ofte mye høyere.

```
Input:
GPS-posisjon til basestasjon: 61.563118 8.221486
Høyde til basestasjon: 10 m
GPS-posisjon til brukerenhet: 61.589901 8.200798
Høyde til brukerenhet: 2 m
Systemets bærefrekvens: 3350 MHz
Systemets maksimal kapasitet: 172 Mbps
Output:
Avstand mellom basestasjon og brukerenhet: 3174 m
Estimert signaltap: 121.3 dB
Estimert overføringshastighet i opplink: 59 Mbps
```

Figur 5.3 Skjermbilde av input og output til et skript som estimerer overføringshastighet i opplink for en bestemt 5G-forbindelse.



---

---

### 5.7.3 Radioplanlegging i fremskaffelse

Vi presenterer noen eksempler på hvordan god radioplanlegging kan bidra til å gjøre gode valg i forbindelse med fremskaffelse. Riktig valg av antall og type utstyr kan hindre feil innkjøp og redusere kostnader.

En antenne ofte monteres på en mast uansett om det er en flyttbar eller stasjonær basestasjon. Det kan dukke et spørsmål opp om hvor høy masta bør være. Når det gjelder radiopropagasjonsegenskaper, er svaret enkelt – jo høyere mast, jo bedre dekning (inntil begrensningene til et radiosystem nås). Dette var også gjenspeilet i resultater i figurene 4.5 og 4.11. Når det gjelder kostnader, kan utbygging av høye stasjonære master eller implementering av høye flyttbare master være kostbart og lite hensiktsmessig. Propagasjonsmodeller og dekningskart kan være et nyttig verktøy for evaluering av nødvendige msthøyder. Man kan estimere dekning og kapasitet ved forskjellige msthøyder for å avdekke hvilken høyde en mast minst må ha for å tilfredsstille behov for 5G-dekning. Dekningsberegninger kan også bidra til en vurdering på antall master eller antennesektorer som er nødvendige for å oppnå ønsket dekning.

Forskjellen i dekning mellom en makrocelle, mikrocelle og pikocelle ble omtalt i kapittel 5.2. Jo større antenne på basestasjon, jo høyere er vekt, strømforbruk og pris på utstyr. Modeller for kapasitet og dekningskart for hver cellestørrelse kan bidra til en vurdering på hvilken type antenner som bør anskaffes for en basestasjon.

### 5.7.4 Integrasjon mot militære systemer

Studien har introdusert en modell som kartlegger forholdet mellom estimert signaltap og forventet kapasitet (kapitler 4.1.2 og 4.2.1). Det ble vist i kapittel 4.1.5 og 4.2.4 hvordan modellen kan brukes i et verktøy for dekningskart. Lignende funksjonalitet finnes i militære radioplanleggingsverktøy. Et kommando- og kontrollsystem, for eksempel NorBMS eller NorCCIS, inneholder gjerne en applikasjon som bruker propagasjonsmodeller til å beregne signaltap mellom sender og mottaker. Beregningene kan da presenteres i form av et dekningskart rundt en radiostasjon, der forskjellige farger i kartet indikerer ulik signalkvalitet. Hvis et slikt system har en propagasjonsmodell som passer for en aktuell 5G-frekvens, kan signaltapet rundt en 5G-basestasjon beregnes. Videre kan fargeskalaen enkelt justeres til å representere forventet kapasitet (eller overføringshastighet) i henhold til modellen presentert i denne studien. Nøyaktighet på et slikt dekningskart vil avhenge av type propagasjonsmodeller og kartoppløsning i applikasjonen.

Vi anbefaler å undersøke nærmere muligheter rundt integrasjon av en spesialtilpasset og brukervennlig funksjon for 5G-radioplanlegging på militære K2-systemer. Slike verktøy for 5G-radioplanlegging vil kunne benyttes operativt av blant annet sambandsavdelinger.

---

---

## 6 Konklusjon

5G-mobilkommunikasjonsteknologi kan bli én av flere viktige kommunikasjonsløsninger for Forsvaret. Vi har gjennomført denne studien for å bygge forståelse for 5G-radiogrensensnittet og besvare uklarheter omkring dekning, rekkevidde og kapasitet en 5G-basestasjon kan levere.

Vi har utført målinger på dekning, rekkevidde og kapasitet på flere 5G-basestasjoner og flere typer brukerenheter i frekvensområdet 2–5 GHz. Målinger ble utført i ulike terrengetyper rundt omkring i landet for å få måledata både i byområder, åpent landskap og skog.

Målingene ble analysert og brukt til å lage en modell som estimerer dekning, rekkevidde og kapasitet for et gitt 5G-oppsett i et gitt terreng. Modellen kan anvendes til å sammenligne dekning, rekkevidde og kapasitet ved forskjellige 5G-oppsett, beregne forventet overføringshastighet eller lage dekningskart. Slik bruk av modellen gir radioplanleggingsmuligheter som blant annet kan anvendes til å bestemme optimal plassering av 5G-basestasjoner, prediksjon av tjenestekvalitet, evaluering av nødvendig antall av en gitt type utstyr eller hvilke systemer som er mest hensiktsmessige. I fremtiden kan det også være aktuelt å gjennomføre 5G-dekningsberegninger i operative situasjoner ved hjelp av en modul i militære K2-systemer.

Basert på denne studien har vi følgende anbefalinger:

- I frekvensområdet 2–5 GHz er det avgjørende med frisikt mellom en basestasjon og en brukerenhet. Dette vil kunne gi rekkevidde på flere kilometer. Uten frisikt, for eksempel, bak bygninger, i kuppert terreng eller i skog, er rekkevidden begrenset. Signaldempning fra hindringer kan minskes ved å heve basestasjon eller brukerenhet ved hjelp av master (figur 4.5) eller ved å ta i bruk UAV-er (figur 4.12). For å oppnå mest mulig frisikt kan omkringliggende terreng eller infrastruktur også utnyttes slik at en basestasjon eller brukerenheter plasseres høyt over bakken. Radioplanlegging hjelper med å finne optimale posisjoner og nødvendige høyder for basestasjoner. Forsvaret bør ha tilgang til gode radioplanleggingsverktøy som er tilpasset til 5G-frekvenser. Slike verktøy bør helst være tilgjengelig i eksisterende K2-systemer for militære enheter som planlegger samband.
- Vi har målt og vist at lavere frekvensbånd fører til bedre dekning og rekkevidde. Rekkevidden, særlig i skog, var lengst på 2,3 GHz-frekvensbåndet sammenlignet med frekvensbåndene 3,3 GHz og 4,9 GHz (figur 4.4). Det er derfor viktig for Forsvaret å sikre seg frekvensressurser til 5G-bruk på så lave frekvensområder som mulig.
- Lav sendeeffekt på brukerenheter er en begrensende faktor for rekkevidde på de høye 5G-frekvensene. Forsvaret bør alltid sørge for at en 5G-brukerenhet har så høy sendeeffekt i opplink som mulig for å oppnå lang rekkevidde. Det kan oppnås ved å skaffe brukerenheter som støtter effektklasser med høy utgangseffekt og er utstyrt med gode antenner. I tillegg bør kabeltap mellom en brukerenhet og en tilkoblet antenne minimeres. Parameterjustering på egne taktiske basestasjoner kan også føre til høyere sendeeffekt på brukerenheter.

---

---

## Forkortelser

3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	4th Generation mobile network
5G	5th Generation mobile network
AAU	Active Antenna Unit
BLER	Block Error Rate
BP	Break Point
BS	Base Station
CSI	Channel State Information
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
FFI	Forsvarets forskningsinstitutt
FR2	Frequency Range 2
ITU	International Telecommunication Union
K2	Kommando og kontroll
LTE	Long-Term Evolution
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
NR	New Radio
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PL	Path Loss
PRACH	Physical Random Access Channel
RACH	Random Access Channel
RRU	Remote Radio Unit
RSRP	Reference Signals Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
SCS	Subcarrier Spacing
SIB	System Information Block
SINR	Signal-to-Noise and Interference Ratio
SUL	Supplementary Uplink
TDD	Time-Division Duplexing
UE	User Equipment

---

---

## Referanser

- [1] 3GPP. *3GPP Highlights – Issue 06*. [Internett]. 2023.  
URL: <https://www.3gpp.org/newsletter-issue-06-may-2023>.
- [2] 3GPP. *NR; Physical channels and modulation*. Technical specification (TS) 38.211. Version 16.5.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), mar. 2021.  
URL: <https://3gpp.org/dynareport/38211.htm>.
- [3] 3GPP. *NR; Physical layer procedures for control*. Technical specification (TS) 38.213. Version 16.4.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), jan. 2021.  
URL: <https://3gpp.org/dynareport/38213.htm>.
- [4] 3GPP. *NR; User Equipment (UE) procedures in idle mode and in RRC Inactive state*. Technical specification (TS) 38.304. Version 16.4.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), mar. 2021.  
URL: <https://3gpp.org/dynareport/38304.htm>.
- [5] 3GPP.  
*NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone*. Tekn. rapp. 38.101-1. Version 17.6.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), jun. 2022.  
URL: <https://3gpp.org/dynareport/38101-1.htm>.
- [6] 3GPP. *Release description; Release 15*. Technical report (TR) 21.915. Version 15.0.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), okt. 2019.  
URL: <https://3gpp.org/dynareport/21915.htm>.
- [7] 3GPP. *Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz*. Tekn. rapp. 38.901. Version 16.1.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), jan. 2020.  
URL: <https://3gpp.org/dynareport/38901.htm>.
- [8] Altair. *Spectrum Management, Radio Coverage and Radar Planning*. [Internett]. 2023.  
URL: <https://altair.com/wrap-applications>.
- [9] Agnius Birutis mfl. *A study of 5G New Radio and its vulnerability to jamming*. FFI-Rapport 22/00906. 2022.
- [10] Arvind Chakrapani.  
“On the Design Details of SS/PBCH, Signal Generation and PRACH in 5G-NR”.  
I: *IEEE Access* 8 (2020), s. 136617–136637. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3010500](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010500).
- [11] The European Commission. *Commission Implementing Decision (EU) 2019/235 of 24 January 2019 on amending Decision 2008/411/EC as regards an update of relevant technical conditions applicable to the 3400-3800 MHz frequency band*. Jan. 2019.  
URL: [http://data.europa.eu/eli/dec\\_impl/2019/235/oj](http://data.europa.eu/eli/dec_impl/2019/235/oj).
- [12] Wikipedia contributors. *HPUE*. [Internett]. 2022.  
URL: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=HPUE&oldid=1105235924>.
- [13] Joakim Flathagen mfl. *Forsvarets IKT - Utvalgte anbefalinger*. Tekn. rapp. FFI-Rapport 23/00409. 2023.
- [14] Forsvarsmateriell (FMA). *Program Mime*. [Internett]. 2022.  
URL: <https://www.fma.no/anskaffelser/virksomhetsprogrammet-mime>.

- 
- 
- [15] FUDGE-5G. *Project Description*. [Internett]. 2022.  
URL: <https://fudge-5g.eu/en/description>.
- [16] GSMA. *5G TDD Synchronisation*. Tekn. rapp. GSM Association (GSMA), apr. 2020.  
URL: <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2020/04/3.5-GHz-5G-TDD-Synchronisation.pdf>.
- [17] ITU-R. *A general purpose wide-range terrestrial propagation model in the frequency range 30 MHz to 50 GHz*. Tekn. rapp. Recommendation P.2001-4. Radiocommunication Sector of ITU (ITU-R), sep. 2021.  
URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2001-4-202109-I/en>.
- [18] ITU-R. *Attenuation in vegetation*. Tekn. rapp. Recommendation P.833-10. Radiocommunication Sector of ITU (ITU-R), sep. 2021.  
URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.833-10-202109-I/en>.
- [19] ITU-R. *Prediction of clutter loss*. Tekn. rapp. Recommendation P.2108-0. Radiocommunication Sector of ITU (ITU-R), jun. 2017.  
URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2108-0-201706-S/en>.
- [20] Petter Kristiansen og Anders Mykkeltveit. *Muligheter og sårbarheter ved bruk av kommersiell mobilteknologi i Forsvaret*. Tekn. rapp. FFI-Rapport 18/01708 (BEGRENSET). 2019.
- [21] Bjørnar Libæk mfl. *Håndholdte kommunikasjonsløsninger for Forsvaret – vurderinger og anbefalinger*. FFI-Rapport 23/01056 (BEGRENSET). 2023.
- [22] Ookla. *Speedtest*. [Internet]. 2022. URL: <https://www.speedtest.net/about>.
- [23] OpenSpeedTest. *About openSpeedtest.com*. [Internet]. 2022.  
URL: <https://openspeedtest.com/about-speed-test>.
- [24] 5G-VINNI Project. *5G Verticals Innovation Infrastructure - Concept*. [Internett]. 2022.  
URL: <https://www.5g-vinni.eu/concept-approach/>.
- [25] Simon R Saunders og Alejandro Aragón-Zavala. *Antennas and propagation for wireless communication systems*. John Wiley & Sons, 2007.
- [26] Stefania Sesia, Issam Toufik og Matthew Baker. *LTE - The UMTS Long Term Evolution*. John Wiley & Sons, 2011.
- [27] Jan Erik Voldhaug mfl. *Hvordan kan ny IKT gjøre Forsvaret bedre?* FFI-Rapport 21/01819. 2021.

## Om FFI

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

## FFIs formål

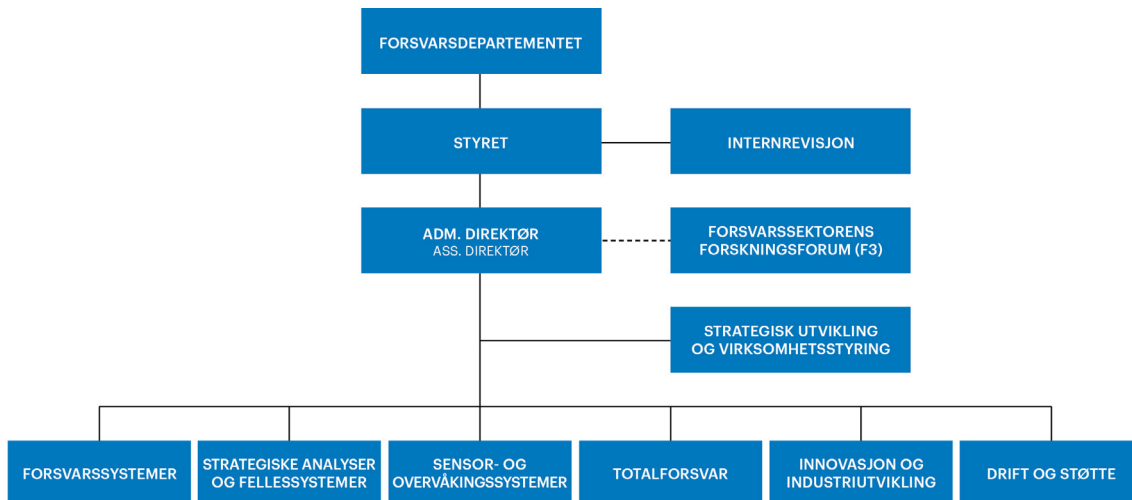
Forsvarets forskningsinstitutt er Forsvarets sentrale forskningsinstitusjon og har som formål å drive forskning og utvikling for Forsvarets behov. Videre er FFI rådgiver overfor Forsvarets strategiske ledelse. Spesielt skal instituttet følge opp trekk ved vitenskapelig og militærteknisk utvikling som 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](mailto:post@ffi.no)  
[ffi.no](http://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](mailto:post@ffi.no)  
[ffi.no/en](http://ffi.no/en)