



# **Norske mobilnett i 2019**

**CRNA - Centre for Resilient Networks and Applications**

# Norske mobilnett i 2019

Tilstandsrapport fra  
Centre for Resilient Networks and Applications

**Om denne rapporten** Denne rapporten er utarbeidet av Center for Resilient Networks and Applications (CRNA), som er en del av Simula Metropolitan Center for Digital Engineering. CRNA driver grunnleggende forskning innen robusthet og sikkerhet i nettverk med mandat og finansiering fra Kommunal- og moderniseringsdepartementet. Senteret produserer en årlig rapport om tilstanden i norske mobilnett. Årets rapport er den sjuende i rekken.

**Ansvarlig for årets rapport** Dr. Ahmed Elmokashfi  
**Bidragstere** Dr. Amund Kvalbein  
Mikael Christiansson  
Anas Saeed Al-Selwi  
Dr. Thomas Dreibholz  
Cise Midoglu

**Omslag** Image by Pete Linforth from Pixabay  
**Publiseringsdato** 30. juni 2020  
**ISBN** 978-82-92593-28-4

**Økonomiske bidragstere** Kommunal- og moderniseringsdepartementet  
Norges Forskningsråd  
Telia Norge  
Ice Norge

# NORSKE MOBILNETT I 2019

## Innhold

<b>1</b>	<b>Sammendrag og hovedfunn .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Stabilitet i tilkoblingen .....</b>	<b>9</b>
2.1	Nedetid	10
2.2	Varighet av brudd i tilkobling	11
2.3	Nedetid gjennom året for enkeltforbindelser	13
2.4	Større hendelser	13
2.5	Utvikling over tid	13
<b>3</b>	<b>Stabilitet i dataplanet .....</b>	<b>17</b>
3.1	Tapsrate	17
3.2	Utvikling over tid	18
<b>4</b>	<b>Stabil ytelse .....</b>	<b>21</b>
4.1	Opplastings- og nedlastingshastighet	21
4.2	Variasjon mellom forbindelser	23
4.3	Variasjon gjennom året	24
4.4	Hastighet i ulike frekvensbånd	24
<b>5</b>	<b>Mobiltjenester på tog .....</b>	<b>29</b>
5.1	Mobildekning på tog	29
5.2	Mobildekning per banestrekning	31
5.3	Nedlastingshastighet målt fra tog	33



<b>6</b>	<b>Tingenes Internett .....</b>	<b>37</b>
6.1	Problemstilling	37
6.2	Testparametere	37
6.3	Metode	38
6.4	Eksperimentoppsett	38
6.5	Resultater og observasjoner	39
<b>7</b>	<b>Bakgrunn og metode .....</b>	<b>43</b>
7.1	Mobilnettene vi måler	45
7.2	Nor-net Edge målenoder	46
7.3	Server-side infrastruktur	46
7.4	Metode	46

# NORSKE MOBILNETT I 2019

## 1. Sammendrag og hovedfunn

Simulas Center for Resilient Networks and Applications (CRNA) har siden høsten 2013 gjort målinger av stabiliteten i norske mobilnett. Den første rapporten basert på disse målingene ble publisert i februar 2014. Gjennom hele denne perioden har vi målt og rapportert på grunnleggende parametere knyttet til stabilitet og robusthet i mobilnettene. Vi har sammenhengende måleserier for *stabiliteten i tilkoblingen* mellom brukerterminaler og mobilnett. Denne stabiliteten har bedret seg dramatisk gjennom disse årene, mye takket være overgangen fra 2G/3G til 4G. Mens vi de første årene observerte flere store utfall der mange målenoder mistet forbindelsen samtidig, har vi observert få eller ingen slike hendelser de siste årene. Vi har også sammenhengende målinger av *pakketap* i flere av mobilnettene. De første årene vi gjorde målinger, var det ikke uvanlig med forbindelser som hadde et gjennomsnittlig pakketap på over 1 %. I år har svært få forbindelser et gjennomsnittlig pakketap på over 0,1 %.

Gjennom årene har vi også tidvis rapportert på andre parameter knyttet til stabilitet og robusthet. De første årene viste vi resultater som viste at en ikke ubetydelig andel av forsøkene på å laste ned en fil over mobilnettet feilet. I 2014 feilet over 1 % av forsøkene på å laste ned en fil i 5 % av Telenorforbindelsene og 18 % av Teliaforbindelsene (den gang Netcom). I dag har vi sluttet å gjøre disse målingene, fordi feilraten er så lav. I overgangen fra 3G til 4G har vi flere år rapportert forskjeller i stabilitet og ytelse mellom disse. Disse målingene har vist hvordan utbyggingen av 4G-nett har gitt mobilbrukere svært mye bedre tjenester. For eksempel viser målinger fra 2015 at pakketapet i 3G var 2-3 ganger høyere enn i 4G, og målinger fra 2014 viste at hastigheten i 4G var over den dobbelste av 3G.

Siden 2015 har vi også inkludert målinger fra mobile noder på tog. Disse målingene har vist hvordan den opplevde 4G-dekningen på tog har økt dramatisk gjennom disse årene. Dette skyldes både en kraftig utbygging av 4G-nettene, men også introduksjonen av signalforsterkere på stadig flere togsett fra 2017 og frem til i dag.

Fra 2016 har vi rapportert hvilken ned- og opplastingshastighet vi har målt fra våre målenoder. Vi har ikke målt noen vesentlig utvikling i hastighet i perioden 2016-2019. Den målte nedlastingshastigheten er faktisk noe lavere i 2019 enn i 2016 hos både Telenor og Telia, og marginalt høyere hos Ice. Dette tyder på at eventuelle kapasitetsøkninger i mobilnettene ha blitt oppveiet av mer

trafikk.

Resultatene som presenteres i årets rapport er basert på aktive målinger fra 161 stasjonære målepunkter spredt over store deler av Norge gjennom hele 2019. I tillegg har vi målinger fra 17 målenoder plassert på tog.

Årets rapport viderefører mange av målingene fra tidligere år. Vi ser på stabiliteten i tilkoblingen mellom målenoder og mobilnett, og utviklingen i pakketap. På et overordnet nivå fortsetter den positive trenden vi har sett de senere årene: norske mobilnett opplevde fortsatt få brudd, og lavere pakketap i 2019 enn noe år tidligere.

I årets undersøkelse inkluderer vi for første gang målinger av den nye NB-IoT-standarden som ble introdusert i Telias nett i juni 2018 og i Telenors nett i september 2018. NB-IoT er en teknologi beregnet på enheter med behov for svært lave datarater (typisk noen få korte meldinger per døgn) og store krav til strømgjerrighet. Våre målinger tyder på at valg av utstyr er viktigere enn valg av nettverksleverandør for signalkvalitet og energiforbruk i NB-IoT.

Vi rapporterer også for første gang målinger av oppnådd hastighet fra målenoder på tog. I tillegg går vi mer i dybden på hastighetsmålingene fra stasjonære molenoder, og ser på betydningen av dekning fra ulike frekvensbånd for oppnådd hastighet.

I det følgende oppsummerer vi noen av de viktigste observasjonene fra årets rapport.

### Stabilitet i tilkoblingen

- Vi måler god stabilitet i tilkoblingen til mobilnettene. I sum er stabiliteten om lag den samme som i 2018, men vi observerer flere forbindelser enn før som nesten aldri opplever brudd.
- De fleste forbindelser opplever en tilgjengelighet på over 99,99 %, noe som tilsvarer en nedetid på under 9 sekunder i døgnet. Om lag 80 % av forbindelsene i Telias nett og 60 % hos Telenor og Ice oppnår en slik tilgjengelighet.
- Vi observerte noe høyere stabilitet hos Telia enn hos de andre operatørene i 2019. En av tre Teliaforbindelser gikk gjennom hele året uten en eneste dag med mer enn ett minutt nedetid. Det samme gjaldt om lag en av ti forbindelser hos Telenor og Ice mobil.
- Vi observerer svært få vesentlige hendelser der et større antall forbindelser mister tilkoblingen til nettet samtidig. De fleste slike hendelser finner sted om natten, noe som kan tyde på at de skyldes vedlikehold eller planlagt arbeid i mobilnettet. Vi observerer kun én slik hendelse utenom vedlikeholdsvinduer hos Telia, én hos Telenor og ingen hos Ice mobil.

### Stabilitet i dataplanet

- Det observerte pakketapet var noe lavere i 2019 enn i 2018, og har aldri vært lavere så lenge vi har gjort målinger. Telenor har fremdeles det laveste pakketapet, men vi observerer den sterkeste reduksjonen hos Telia.
- Ice opplever noe høyere pakketap enn Telenor og Telia, men fortsatt lave verdier.
- Pakketapet var stort sett stabilt gjennom 2019, med noe høyere verdier i september.

### Stabilitet i ytelse

- Våre hastighetsmålinger er ikke egnet til å beskrive den maksimale hastigheten som kan leveres av mobilnettene, fordi våre målenoder ikke støtter den nyeste teknologien for å slå sammen kapasitet fra flere frekvensbånd (LTE cat 9). Våre målinger kan likevel si noe om hvordan ytelse varierer over tid, og hvordan tilgjengelig hastighet påvirker brukeropplevelsen.
- De observerte hastighetene har vært stort sett uforandret siden vi begynte med denne typen målinger i 2016. Vi ser endringer fra år til år, men i det store bildet er hastighetene stabile.
- Forskjellene i hastighet mellom operatørene er noe mindre i 2019 enn i 2018. Fremdeles har Telenor noe høyere hastigheter enn Telia og Ice.
- Vi observerer stor variasjon i hastighet mellom enkeltmålinger tatt fra samme lokasjon og i det samme nettet. Dette skyldes i stor grad at en målenode veksler mellom å koble seg til ulike basestasjoner som kan gi svært ulike brukeropplevelser.

- En analyse av hastighet i ulike frekvensbånd viser at forskjellen mellom operatørene i stor grad skyldes at Telenor oppnår høyere hastighet for forbindelser som benytter høye frekvensbånd (2600 MHz).

### **Mobiltjenester på tog**

- I år som i fjor presenterer vi flere målinger fra tog som har signalforsterkere montert om bord. Slike signalforsterkere skal motvirke dempning av mobilsignaler i togkarosseriet, og gi samme opplevde dekning inne i toget som langs sporet. Våre målinger tyder på at slike signalforsterkere har en vesentlig positiv effekt på den opplevde dekningen. Tog med signalforsterkere måler 4G-dekning på det aller meste av lokal- og intercitystrekningene vi har målinger fra.
- Vi observerer en videre økning i opplevd 4G-dekning fra 2018 til 2019 langs de strekningene vi måler. Vi måler nær full 4G-dekning på både lokaltog-strekninger og intercity-strekninger hos både Telenor og Telia.
- Vi har tidligere rapportert om mangel på sømløs overgang fra 3G til 4G i Telias nett. Dette problemet virker å ha blitt redusert i 2019, enten på grunn av mer sammenhengende 4G-dekning eller på grunn av endringer i Telias nett.
- Det er økende 4G-dekning også utenfor intercity-strekningene, men her er det fremdeles vesentlige områder uten slik dekning, og større utfordringer med å oppnå sammenhengende tjenestekvalitet.
- Vi rapporterer i år for første gang resultater fra hastighetsmålinger om bord på tog. Disse målingene viser at gjennomsnittlig hastighet fra tog er relativt høy, og ikke mye lavere enn tilsvarende tall for stasjonære målenoder. Stabiliteten i ytelse er likevel (som forventet) lavere om bord på tog.

### **Tingenes Internett**

- Vi presenterer i år for første gang målinger som benytter NB-IoT for maskin-til-maskin kommunikasjon gjennom mobilnettene. Målingene tar for seg opplevd signalkvalitet, forsinkelse og strømforbruk for IoT-enheter.
- Resultatene viser at valg av maskinvare (kommunikasjonsmodul) er viktig for den opplevde kvaliteten. Det er store variasjoner i signalkvalitet og strømforbruk mellom de to modulene vi benyttet i våre målinger, og disse forskjellene har sterkere innvirkning på kvaliteten enn valg av nettverk.



## 2. Stabilitet i tilkoblingen

I dette kapittelet undersøker vi stabiliteten til tilkoblingen mellom våre målnoder og mobilnettet. Målnodene forsøker å opprettholde tilkoblingen til de ulike mobilnettene til en hver tid, og tilkoblingen brytes aldri aktivt fra målnodens side<sup>1</sup>. Målnodene overvåker kontinuerlig tilkoblingen til de ulike mobilnettene, og logger status på denne. Dersom tilkoblingen brytes, vil målnoden umiddelbart forsøke å gjenopprette den. Den vil kontinuerlig og uten opphold gjenta forsøket helt til tilkoblingen kan gjenopprettes. Et brudd vil derfor resultere i en kortere eller lenger feilperiode hvor tilkoblingen er utilgjengelig. Resultatene skiller ikke mellom ulike teknologier som 2G, 3G og 4G. Hver forbindelse vil til en hver tid velge den beste tilgjengelige teknologien, som forklart i kapittel 7. Forbindelsene vi måler i årets rapport er i all hovedsak 4G-forbindelser for alle operatører.

Brudd på tilkoblingen kan skyldes ulike forhold knyttet til brukerterminalen, radioforbindelsen mellom brukerterminal og basestasjon, selve basestasjonen, transmisjon mellom basestasjon og kjernenett, eller feil i ulike deler av kjernenettet. Ulike typer feil vil ofte ha ulike signaturer i målingene. For eksempel kan antall samtidige brudd, lokasjonen til målnodene som opplever brudd, varighet av brudd og så videre fortelle mye om rotårsaken til bruddet. Vi bruker denne informasjonen i vår analyse av utfall i de ulike mobilnettene.

Basert på overvåkingen av tilkoblingen genererer vi en tidsserie av *ned* og *opp* hendelser for hver målte forbindelse, hvor tilkoblingen blir henholdsvis brutt og gjenopprettet. Basert på disse tidsseriene undersøker vi ulike forhold knyttet til stabiliteten i tilkoblingen. Vi ser på total nedetid for hver forbindelse, hvor lenge et avbrudd i tilkoblingen varer, samt hvor ofte en forbindelse opplever et vesentlig avbrudd i tilkoblingen. Vi viser som i fjor resultater for Telenor, Telia og Ice. For Ice rapporterer vi stabilitet for *Ice mobil*, som er samme type abonnement som Ice selger for bruk i mobiltelefoner. Ice mobil benytter ikke 450 MHz-båndet, men benytter i stedet Telias nett der Ice ikke har egen dekning på andre frekvenser.

---

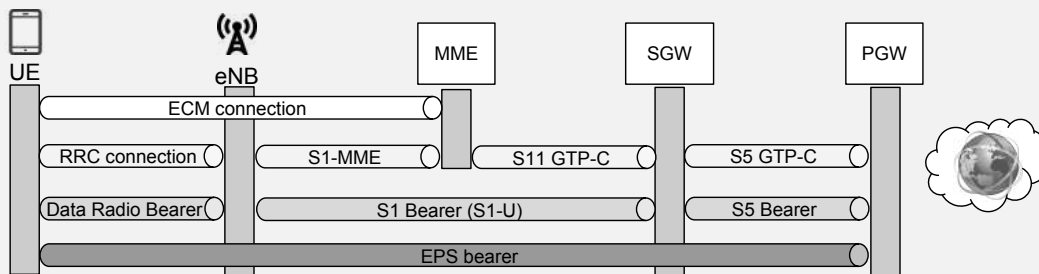
<sup>1</sup>Unntaket er i feilsituasjoner der tilkoblingen eller noden må restarteres som en del av en feilrettingsprosess.



## Tilkobling i 4G-nettverk

Mobilnett har en sentralisert arkitektur. All trafikk som utveksles må innom sentrale rutere i det mobile kjernenettet før den kan sendes videre til en tjener på internett eller til en telefon på nabokontoret. Den logiske tilkoblingen mellom brukerterminal og kjernenett i et 4G-nettverk kalles en Evolved Packet System (EPS) bærer. En EPS bærer inneholder informasjon om IP-adressen til brukerterminalen, hvilken tjenestekvalitet tilkoblingen skal ha og hvilket datanett tilkoblingen hører til, definert ved et Access Point Name (APN). En EPS bærer må alltid være på plass før trafikk kan sendes over mobilnettet. En brukerterminal kan ha flere samtidige EPS bærere til ulike APN og med ulike tjenestekvalitetsklasser. For eksempel krever tale over LTE at det opprettes en egen EPS bærer til et APN kalt IMS.

I 3G-nettverk finnes ikke begrepet EPS bærer, men i stedet en Packet Data Protocol (PDP) kontekst. Hovedforskjellen på en EPS bærer og en PDP kontekst er at en EPS bærer krever mindre signalering for å etableres. Mens en EPS bærer alltid må være til stede så lenge en brukerterminal er knyttet til mobilnettet, kan en PDP kontekst tas ned når det ikke sendes datatrafikk.

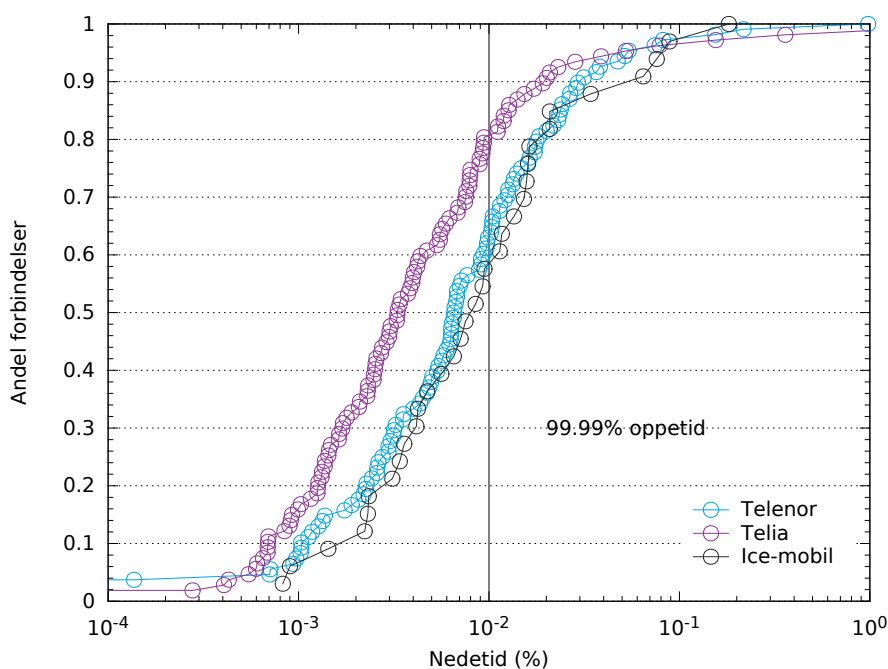


En EPS bærer realiseres over en serie med tunneller mellom brukerterminalen og en komponent i kjernenettet som kalles en Packet Gateway (PGW), som vist i figuren over. Disse tunnelene sørger blant annet for at tilkoblingen beholdes selv om brukerterminalen flytter seg fra et område til et annet. Vi måler stabiliteten i tilkoblingen ved å registrere hvor ofte og hvor lenge EPS bæreren er utilgjengelig. Som figuren illustrerer, er det flere forhold som kan føre til at EPS-bæreren blir utilgjengelig. Dette kan være forhold knyttet til radiogrensesnittet, handover mellom celler eller teknologier (3G/4G), feil i transmisjon mellom basestasjon og kjernenett, eller feil i komponenter i kjernenettet. Mens feil ytterst i aksessnettet oftest berører et lite antall forbindelser, kan feil i kjernenettet ta ned EPS bæreren for et stort antall forbindelser samtidig.

## 2.1 Nedetid

Nedetid er beregnet som den totale andelen av måleperioden en tilkobling var utilgjengelig. Figur 2.1 viser fordelingen av nedetid over alle forbindelser for hver operatør. Nedetiden er angitt som en såkalt kumulativ distribusjon. Kumulative distribusjoner beskriver hvor stor andel av de målte verdiene (på y-aksen) som er mindre enn en gitt verdi (på x-aksen). Populært forklart er det bra å ligge *oppe til venstre* i figuren, altså at grafen stiger så bratt som mulig i området med lav nedetid.

En overordnet observasjon er at stabiliteten i tilkoblingen er god for alle operatører, og at forskjellene i stabilitet er begrenset. I forhold til tidligere år ser vi en noe større variasjon i nedetiden mellom forbindelser fra samme operatør. Dette skyldes primært at en større andel forbindelser hos alle operatører opplever svært få brudd, samt at noen få forbindelser har litt høyere nedetid enn før.



Figur 2.1: Fordeling av nedetid over forbindelser for hver operatør.

Vi måler de mest stabile forbindelsene hos Telia. Her oppnår 80 % av forbindelsene en tilgjengelighet på minst 99,99 %, noe som er den samme andelen som i 2018. Vi ser imidlertid en større andel forbindelser hos Telia som har svært lav nedetid. Faktisk opplever så mye som 15 % av Teliaforbindelsene en tilgjengelighet på 99,999 %. Dette er svært høyt, og tilsvarer om lag 5 minutter utilgjengelighet i løpet av hele året. Merk at dette tallet må tolkes med noe varsomhet. Ved så lave tall vil selv små unøyaktigheter i måleoppsettet eller prosesseringen av data få store utslag. I prosesseringen av måledata filtrerer vi bort noen brudd som vi antar skyldes forhold ved vår måleinfrastruktur, og det er en risiko for at vi i den prosessen også fjerner noen brudd som reelt skyldes feil i nettet. Det er likevel klart at stabiliteten i 2019 var svært høy i Telias nett.

Telenor opplever også høy stabilitet i 2019, om enn noe lavere enn Telia. 63 % av Telenorforbindelsene opplevde en tilgjengelighet på minst 99,99 %, noe som er en nedgang fra rundt 80 % i 2018. Også hos Telenor opplevde noen forbindelser, om lag 8 %, en tilgjengelighet på 99,999 %. Vi diskuterer mulige årsaker til forskjellen mellom Telia og Telenor nærmere under.

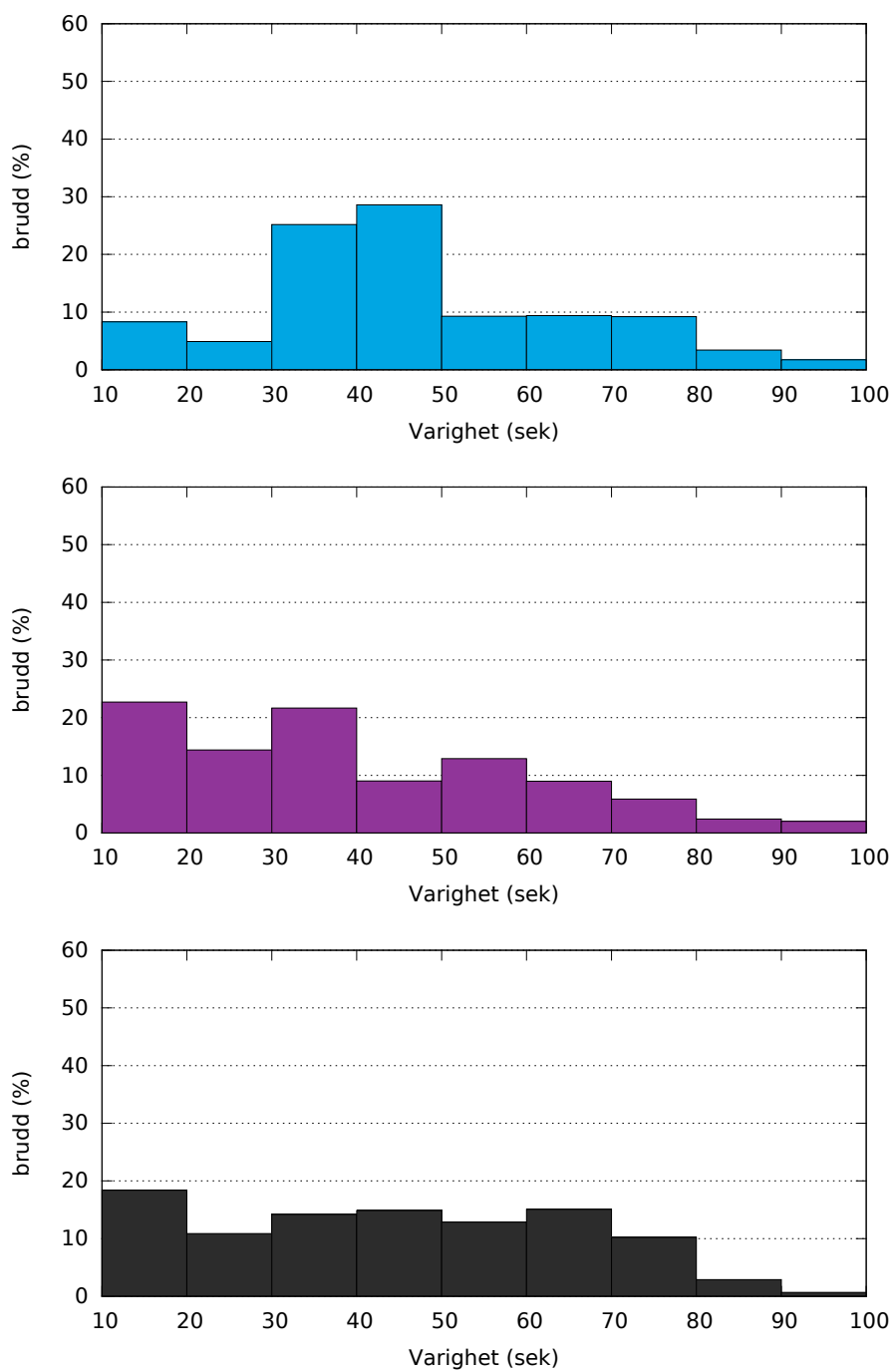
Ice mobil viser en klar forbedringen i stabilitet fra 2018 til 2019, og om lag 60 % av forbindelsene her oppnådde en tilgjengelighet på over 99,99 %, opp fra om lag 55 % i 2018.

Få forbindelser opplever vesentlig nedetid - kun en eller to forbindelser fra hver operatør opplevde nedetid på over 0,1 % (90 sekunder i døgnet).

## 2.2 Varighet av brudd i tilkobling

Figur 2.2 viser fordelingen av varigheten for brudd i tilkoblingen over alle forbindelser for hver operatør. De fleste feilene er kortvarige, og det store flertallet varer under ett minutt.

En del brudd har varighet fra 35 til 45 sekunder. Vi ser av figuren at andelen brudd i denne kategorien er høyere for Telenor enn for Telia og Ice. Dette tilsvarer den typiske tiden det tar å gjennomføre en full tilkoblingsprosedyre mellom målenoden og nettverket, inkludert SIM-autentisering med PIN-kode og etablering av forbindelsen. Våre målenoder vil gjennomføre en slik prosedyre når forbindelsen av ulike årsaker ikke er tilgjengelig. Antallet slike re-etableringer er altså høyere hos Telenor enn hos de andre operatørene. Vi mistenker at samspillet mellom modemmet



Figur 2.2: Varighet på brudd i tilkoblingen. Telenor (øverst), Telia og Ice mobil (nederst).

Operatør	Dato	Ca klokkeslett	Berørte forbindelser	Vedlikeholdsvindu?
Telenor	24. mai	04:00	10	Ja
	17. juni	03:00	20+	Ja
	24. juni	02:00	20+	Ja
	19. sept	09:00	21	Nei
Telia	12. mars	14:00	55	Nei
	6. april	05:00	20+	Ja
	5. des	01:00	15	Ja
	9. des	03:00	18	Ja
Ice mobil	6. jan	00:00	alle	Ja
	21. jan	01:00	alle	Ja
	23. jan	01:00	alle	Ja
	3. okt	01:00	9	Ja
	3. des	01:00	7	Ja
	19. des	02:00	9	Ja

Tabell 2.1: Samtidig brudd i flere forbindelser fra en operatør

og nettverket gjør at tilstandsinformasjonen som er assosiert med forbindelsen i nettet av en eller annen grunn utløper, og tvinger fram en ny tilkobling.

## 2.3 Nedetid gjennom året for enkeltforbindelser

Figur 2.3 viser antall dager forbindelsene hos hver operatør opplever vesentlig nedetid, her definert som minst ett minutt nedetid totalt i løpet av døgnet. De fleste forbindelsene hos alle operatører opplever få slike dager. Henholdsvis 11 %, 35 % og 9 % av forbindelsene hos Telenor, Telia og Ice mobil opplevde ingen dager i 2019 med over ett minutt nedetid. For Telenor og Ice mobil er antall forbindelser som ikke opplever vesentlig nedetid noe høyere i 2019 enn i 2018, men antall dager med vesentlig nedetid er fremdeles lavt. 14 % (Telenor), 5 % (Telia) og 6 % (Ice mobil) av forbindelsene hadde mer enn 5 dager med vesentlig nedetid.

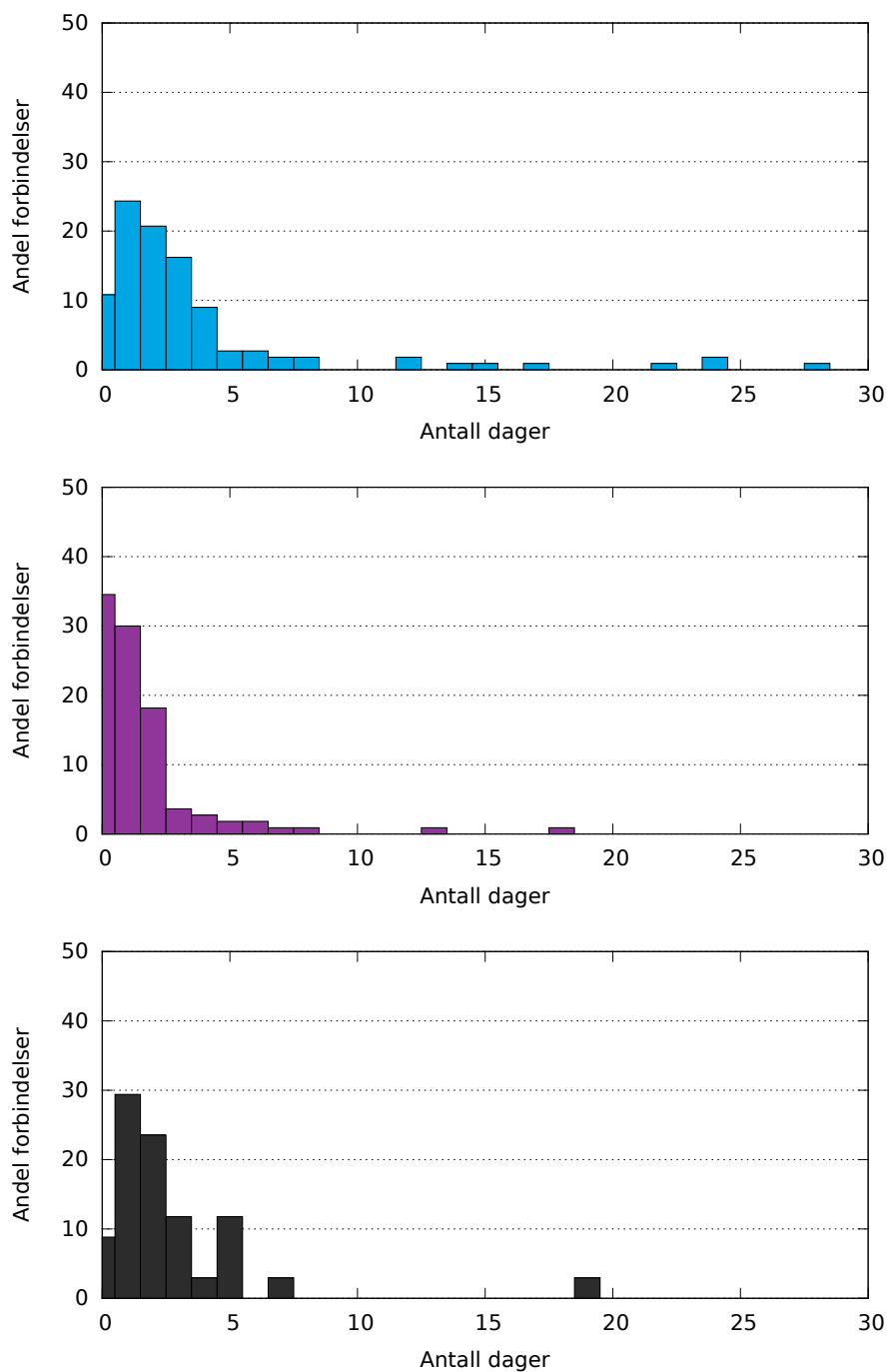
## 2.4 Større hendelser

Noen ganger oppstår det situasjoner der et større antall forbindelser hos en operatør mister tilkoblingen til nettet samtidig. Dette vil typisk skyldes feil eller endringer som gjøres i sentrale komponenter i mobilnettet. De første årene vi gjorde målinger i mobilnettene observerte vi mange og store slike hendelser. De siste året har antallet hendelser generelt vært lavt, og de hendelsene vi har observert har som regel funnet sted i typiske vedlikeholdsvinduer (om natten). Slik var det også i 2019.

Tabell 2.1 viser en oversikt over vesentlige hendelser i 2019. Vi observerer en håndfull hendelser per operatør, og de fleste forekommer på tidspunkter på døgnet som gjør det naturlig å tro at de er forårsaket av vedlikehold. For de fleste av hendelsene var utfallene av relativt kort varighet.

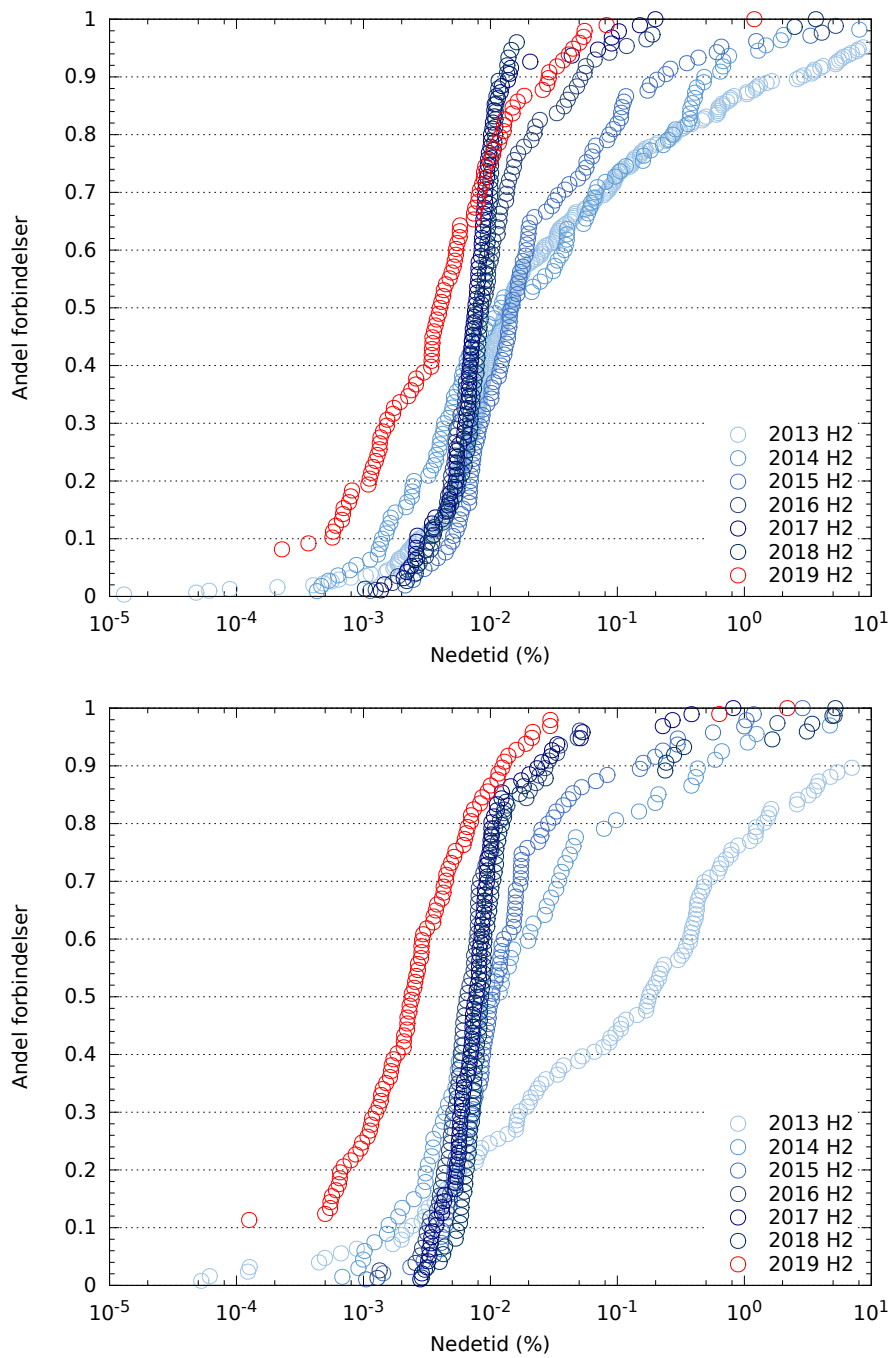
## 2.5 Utvikling over tid

Figur 2.4 viser utviklingen i nedetid fra 2013 til 2019 for Telenor og Telia. Figuren er basert på måledata fra andre halvår hvert år. Grafene kan sammenlignes med Figur 2.1. Figuren viser hvordan grafen 'reiser seg' og beveger seg mot venstre etter hvert som tiden går, noe som betyr at en større

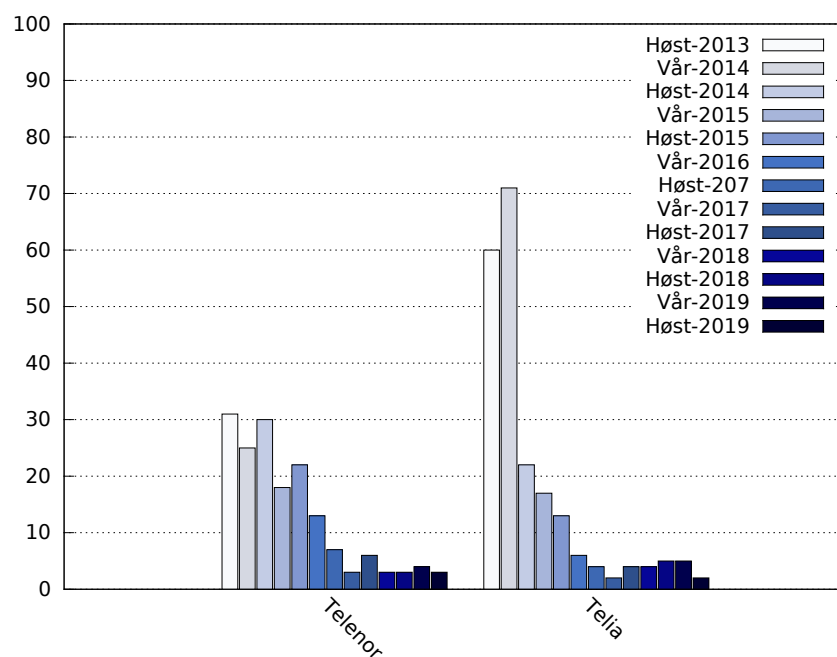


Figur 2.3: Antall dager med nedetid over ett minutt. Telenor (øverst), Telia og Ice-mobil (nederst).





Figur 2.4: Utvikling i nedetid hos Telenor (topp) og Telia (bunn) fra 2013 til 2019.



Figur 2.5: Andel forbindelser med gjennomsnittlig nedetid > 1 minutt per dag.

andel av forbindelsene får en mindre nedetid. Som observert over var det noe mer variasjon mellom forbindelsene i nedetid hos både Telenor og Telia i 2019 enn tidligere år.

For Telenor og Telia var andelen forbindelser med mer enn 1 minutt nedetid per dag henholdsvis 5 % og 4 % i 2018. Som vist i figur 2.5, er denne andelen marginalt høyere i 2019 enn i 2018 for Telenor, og marginalt lavere for Telia.



## 3. Stabilitet i dataplanet

I dette kapittelet ser vi på mobilnettens evne til å gi en stabil ende-til-ende forbindelse med lavt pakketap. Vi måler dette ved å sende en kontinuerlig strøm av små datapakker. Basert på disse målingene analyserer vi *tapsraten*, altså hvor stort pakketap vi opplever for hver forbindelse. Mens forrige kapittel diskuterte stabiliteten og tilgjengeligheten til forbindelsens tilkobling til nettet, sier denne analysen noe om kvaliteten på forbindelsene i den tiden de er tilkoblet.

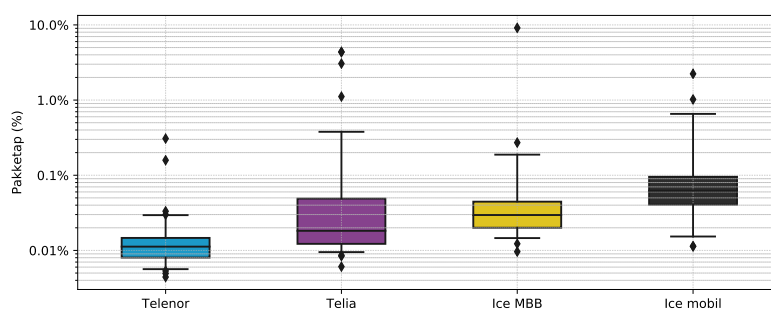
Måletrafikken vi baserer vår analyse på består av små (20 Byte) UDP-pakker som sendes til en sentral server hvert sekund. Serveren sender den samme pakken tilbake umiddelbart. For hver pakke registrerer vi hvor lang tid det tar før svarpakken kommer tilbake. Dersom ingen svarpakke kommer i retur innen 60 sekunder, anser vi pakken som tapt. Denne typen målinger kjøres kontinuerlig på alle forbindelser så lenge de er koblet til nettet. Lengden på måleperioden for hver forbindelse varierer, siden ikke alle målenodene har vært aktive hele året. I denne analysen har vi sett bort fra forbindelser hvor vi har mindre enn 7 døgn med målinger.

### 3.1 Tapsrate

Tapsraten er definert for hver forbindelse som  $(\text{tapte pakker})/(\text{sendte pakker})$  over hele måleperioden. For å beregne tapsraten for en operatør har vi først beregnet tapsraten for hver enkelt forbindelse. Deretter har vi sortert alle forbindelsene etter pakketap for hver operatør.

Figur 3.1 og Tabell 3.1 viser en oppsummering av tapsraten hos Telenor, Telia, Ice mobil og Ice MBB<sup>1</sup>. Den tykke svarte linjen viser *median* tapsrate, det vil si at halvparten av forbindelsene fra denne operatøren har en tapsrate som ligger over/under denne verdien. De fargede boksene viser 25- og 75-persentilene. Halvparten av forbindelsene hos en operatør har en tapsrate som ligger innenfor boksen. En av fire forbindelser har en tapsrate som er lavere enn nederste grense for boksen, mens en av fire har en tapsrate som er høyere enn øverste grense. De ytterste markørene viser 5- og 95-persentilene. 5 % av forbindelsene har en tapsrate som ligger under den nederste markøren, og 5 % har en tapsrate som ligger over den øverste markøren.

<sup>1</sup>For Ice MBB og Ice mobil er tallene kun basert på første halvår, på grunn av problemer med måleinfrastrukturen i andre halvår.



Figur 3.1: Pakketap per operatør

Operatør	10 persentil	Median	90 persentil	Gjennomsnitt
Telenor	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%
Telia	0,01%	0,02%	0,22%	0,23%
Ice mobil	0,03%	0,06%	0,32%	0,17%

Tabell 3.1: Pakketap

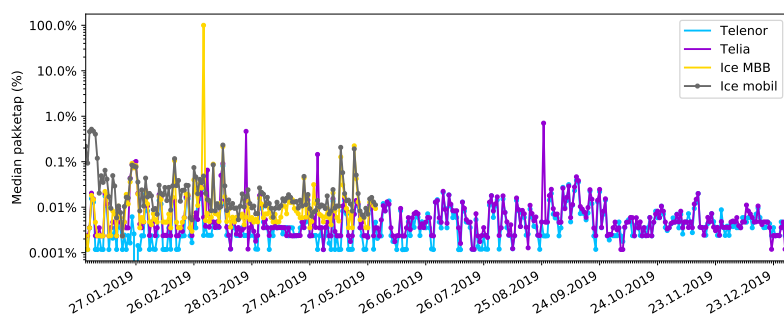
Generelt observerer vi lavt og synkende pakketap hos alle operatører. Telenor har marginalt lavere pakketapet i 2019 enn i 2018, og har fremdeles det laveste pakketapet med median på 0,012 %. Nesten alle Telenors forbindelser har en tapsrate på under 0,1 %, og en av tre forbindelser har en tapsrate på under 0,01 %. Telia opplever en kraftig reduksjon i pakketap fra i fjor, med et median pakketap på 0,018 %. Tre av fire Telia-forbindelser har et pakketap under 0,1 %, men kun 10 % har et pakketap under 0,01 %. Ice mobil har et noe høyere pakketap med median pakketap på 0,06 %. Nesten tre av fire Ice-forbindelser har et pakketap under 0,1 %, men ingen har et pakketap under 0,01 %.

Tidligere år har pakketapet i noen grad vært påvirket av at en betydelig andel 3G-forbindelser, som generelt har høyere pakketap enn 4G. Denne effekten er nå svært begrenset, siden nær alle forbindelsene går over 4G.

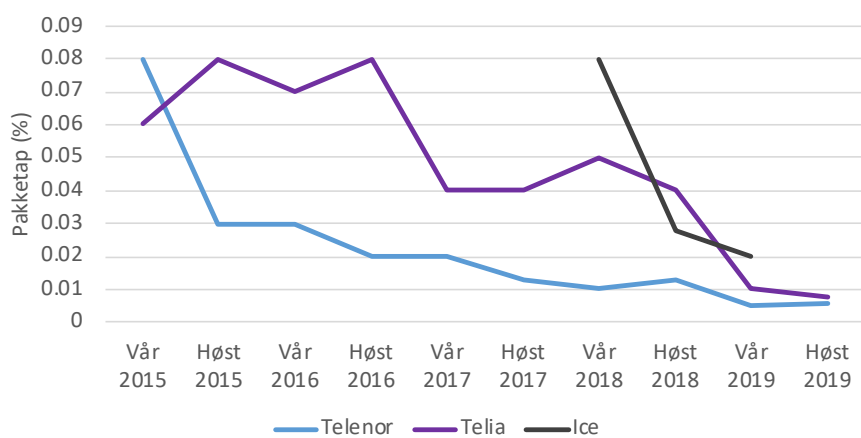
Pakketapet varierer fra dag til dag og gjennom året, som vist i 3.2, men det er ingen store endringer gjennom året. Både Telenor og Telia opplevde noe høyere pakketap i september enn i resten av året.

### 3.2 Utvikling over tid

Figur 3.3 viser median pakketap hvert halvår de fem siste årene for Telenor og Telia. For Ice har vi kun data fra 2018 og første halvdel av 2019. I det meste av denne perioden har Telia hatt noe høyere pakketap enn Telenor. Pakketapet har vist en nedadgående trend for begge operatører. Den streke nedgangen i pakketap for Telia i 2019 gjør at forskjellen på disse operatørene nå er mindre enn noen gang. Mye av reduksjonen gjennom denne perioden kan tilskrives overgangen fra 3G til 4G.



Figur 3.2: Median pakketap per dag gjennom 2019 NB remove Ice 2nd half.



Figur 3.3: Utvikling i median tapsrate 2015 - 2019





## 4. Stabil ytelse

De siste årene har vi målt stabilitet i ytelse i mobilnettene. Vi har tidligere sett på oppnådd hastighet, ytelse i lastning av websider og ytelse i videostrømming. I årets undersøkelse inkluderer vi (som i fjor) kun resultater knyttet til hastighet, siden disse er nærmest knyttet til mobilnettens egenskaper. Vi har i 2019 også gjort målinger av hastighet fra målenoder plassert på tog. Disse presenteres i kapittel 5.

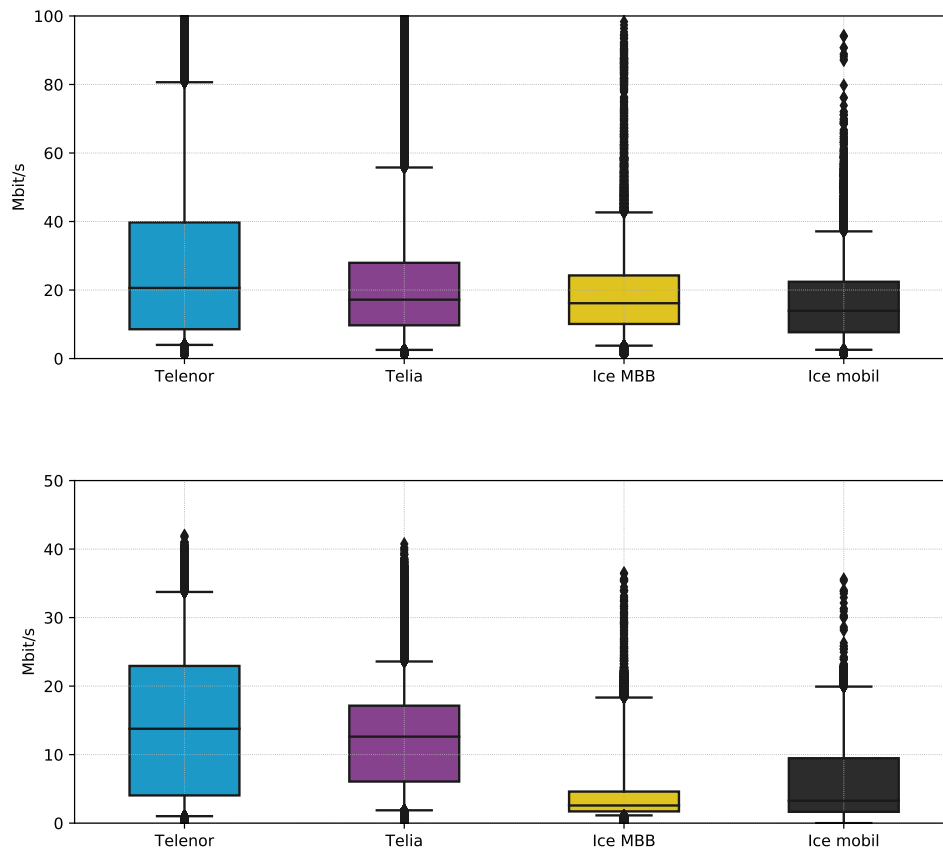
Merk at den brukeropplevde ytelsen avhenger av flere faktorer, som dekningsforhold, antall samtidige brukere og interferens i området. Resultatene som presenteres her vil være avhengige av de konkrete forholdene på de steder og de tidspunkt målingene er foretatt. Våre målenoder er plassert innendørs. Vi har ikke kontroll over lokale forhold som hvor i bygningen målenodene er plassert. Dekningsforholdene vil variere noe fra node til node, men alle målenodene har god dekning i henhold til operatørens dekningskart. Vi mener at antallet målenoder og den geografiske spredningen gjør at resultatene gir et representativt bilde av ytelsen som kan forventes i mobilnettene.

Målenodene som benyttes for hastighetsmålinger er utstyrt med et Sierra Wireless AirPrime MC7455 modem. Dette modemmet støtter LTE Cat 6, (også kalt LTE Advanced, 3GPP Release 10), men ikke den nyere LTE Cat 9 (LTE Advanced Pro, 3GPP Release 13) som også benyttes i norske mobilnett. Det betyr at vi i våre målinger ikke alltid vil oppnå den maksimale hastigheten som kan tilbys i nettene vi måler. Blant annet støtter ikke disse modemene aggregering av kapasitet fra mer enn to frekvensbånd. Resultatene bør tolkes med dette i mente. Våre resultater sier likevel noe om stabiliteten i hastighetene som oppnås i mobilnettene.

### 4.1 Opplastings- og nedlastingshastighet

Vi måler hastigheter ved hjelp av en klient basert på åpen kildekode som lar oss kjøre målinger fra våre målenoder mot Ooklas `speedtest.net`<sup>1</sup>. I motsetning til de andre målingene presentert i denne rapporten kjøres altså ikke hastighetsmålingene mot vår egen måleserver, men mot måleservere knyttet til Ooklas infrastruktur. Klienten velger selv den geografisk nærmeste tilgjengelige måleser-

<sup>1</sup><https://github.com/sivel/speedtest-cli>



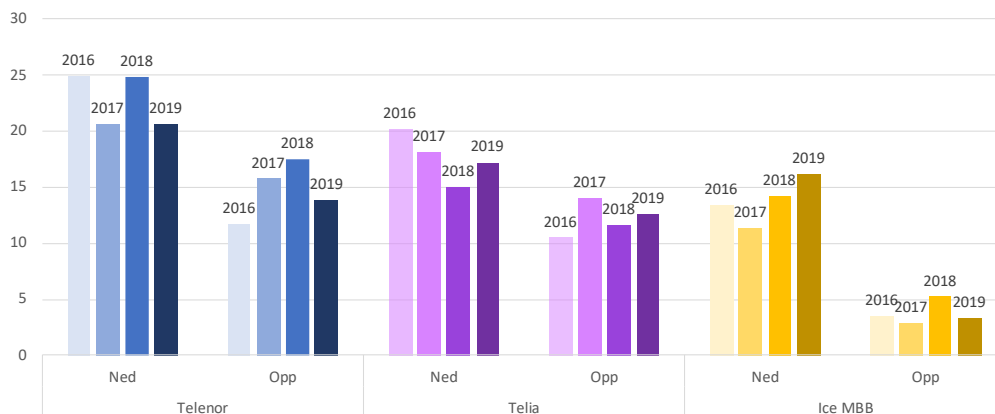
Figur 4.1: Nedlastingshastighet (øverst) og opplastingshastighet (nederst) for ulike operatører.

veren. Siden mobilnett har en sentralisert arkitektur der all trafikk må gjennom sentralt plasserte kjernekomponenter, geolokaliserer vi alle våre målenoder i Oslo. Etter å ha valgt måleserver, gjør testen en serie nedlastinger av små filer over http for å gjøre et grovt estimat av nedlastingshastigheten. Deretter velger den en tilstrekkelig stor filstørrelse for å gjennomføre selve hastighetsmålingen. Prosedyren gjentas for både nedlastings- og opplastingshastighet. Hastighetsmålingen gjentas tre ganger i døgnet, klokken 02:00, 14:00 og 19:00, for å fange opp eventuelle forskjeller som skyldes ulik trafikkbelastning gjennom døgnet.

Målingene for Ice er foretatt med deres mobiltelefonabonnement. Disse målingene benytter Ice sitt nett i 800 MHz og 1800 MHz båndene, men ikke frekvenser i 450 MHz-båndet. Der Ice ikke har egen dekning i disse båndene, benyttes Telias nett.

Til sammen har vil opptil 2000 målinger for hver forbindelse, totalt 74626 målinger fra 110 forbindelser for Telenor, 102030 målinger fra 110 forbindelser for Telia, og 26896 målinger fra 33 forbindelser for Ice.

Figur 4.1 viser fordelingen av nedlastings- og opplastingshastigheter for hver av operatørene. Den tykke svarte linjen viser *median* hastighet, det vil si at halvparten av alle målingene i det aktuelle mobilnettet oppnådde en hastighet som ligger over/under denne verdien. De fargede boksene viser 25- og 75-persentilene. Halvparten av målingene i et mobilnett ligger innenfor boksen. En av fire målinger viste en hastighet som er lavere enn nederste grense for boksen, mens en av fire viste en hastighet som er høyere enn øverste grense. De ytterste markørene viser 5- og



Figur 4.2: Utvikling i ned- og opplastingshastighet 2016-2019.

95-persentilene. 5 % av målingene ligger under den nederste markøren, og 5 % ligger over den øverste markøren.

Målingene viser noe mindre forskjeller mellom operatørene i 2019 enn i 2018. Telenor oppnår fremdeles generelt høyere hastigheter enn Telia og Ice både nedstrøms og oppstrøms, på tross av en nedgang i hastighet fra 2018 til 2019. Median nedlastingshastighet er 20,6 Mbit/s i Telenors nett, 17,2 Mbit/s i Telias nett, 13,9 Mbit/s i Ice mobil sitt nett og 16,1 Mbit/s i Ice MBB. 72 % av målingene i Telenors nett viser en nedlastingshastighet over 10 Mbit/s (en nedgang fra 81 % i 2018). Tilsvarende tall er 74 % (70 %) for Telia, 75 % (68 %) for Ice mobil og 66 % (62 %) for Ice MBB. 18 % av målingene i Telenors nett viser en nedlastingshastighet over 50 Mbit/s (en nedgang fra 26 % i 2018). Tilsvarende tall er 7 % (5 %) for Telia, 3 % (4 %) for Ice mobil og 1 % (1 %) for Ice MBB.

Median opplastingshastighet er 13,8 Mbit/s i Telenors nett (mot 17,5 Mbit/s i 2018), 12,6 (11,6) Mbit/s i Telias nett, 3,3 (2,6) Mbit/s i Ice mobil og 3,3 (5,3) Mbit/s i Ice MBB. 61 % av målingene i Telenors nett viser en opplastingshastighet over 10 Mbit/s (ned fra 74 % i 2018). Tilsvarende tall er 61 % (56 %) for Telia og 24 % (17 %) for Ice MBB.

Figur 4.2 viser utviklingen i median ned- og opplastingshastighet fra 2016 til 2019. Merk at figuren må tolkes med noe varsomhet, siden målepunktene ikke er nøyaktig de samme hvert år. Vi har ikke historiske data for Ice mobil. Figuren viser ingen klar utvikling i målte hastigheter over de siste fire årene. For Telenor gikk median nedlastingshastighet noe ned i 2019, og var tilbake på samme nivå som i 2017, etter å ha vært noe høyere i 2018. For Telia økte hastigheten noe i 2019, etter en nedgang de foregående årene. Ice MBB hadde høyere median nedlastingshastighet i 2019 enn i noe tidligere år.

Median opplastingshastighet var noe høyere i 2019 enn i 2018 for Telia, mens den var noe lavere for Telenor og Ice MBB. Variasjonene i opplevd hastighet kan trolig kobles til trafikkutviklingen i nettene. Merk at den målte opplastingshastigheten for Ice mobil er lavere enn forventet. Kontrollmålinger gjort med mobiltelefoner viser klart høyere hastigheter. Vi tror de lave hastighetene kan skyldes spesielle konfigurasjoner knyttet til våre abonnement. Vi har jobbet sammen med Ice for å undersøke dette, men har ikke lyktes med å avdekke årsaken. Det er imidlertid grunn til å tro at den reelle opplastingshastigheten i Ice sitt nettverk er høyere enn hva våre målinger viser.

## 4.2 Variasjon mellom forbindelser

Figur 4.3 viser hvordan den målte nedlastingshastigheten varierer for hver enkelt forbindelse hos hver operatør. Den svarte markøren viser median hastighet, altså ligger halvparten av de målte

Operatør	450 MHz	800 MHz	900 MHz	1800 MHz	2100 MHz	2600 MHz
Telenor	-	20 MHz	30 MHz	60 MHz	40 MHz	80 MHz
Telia	-	20 MHz	30 MHz	50 MHz	40 MHz	40 MHz
Ice	10 MHz	20 MHz	10 MHz	40 MHz	40 MHz	-

Tabell 4.1: Frekvensbeholdning i ulike frekvensbånd pr 2019. Kilde: Nkom

verdiene over og halvparten under dette nivået. De tykke markørene angir 25 og 75 persentilene for hver forbindelse, mens de lengste vertikale linjene viser henholdsvis 5 og 95 persentilene. Halvparten av målingene for den aktuelle forbindelsen ligger innenfor området definert av 25 og 75 persentilene, og avstanden mellom disse kalles interkvartilavstanden. Interkvartilavstanden er et mål på hvor mye hastigheten varierer over tid for en gitt forbindelse. Telenor har generelt noe høyere variasjon i nedlastingshastighet enn Ice og Telia. Mens 12 % av forbindelsene hos Ice og 26 % hos Telia har en interkvartilavstand som er høyere en medianen, gjelder dette 33 % av forbindelsene hos Telenor.

### 4.3 Variasjon gjennom året

Figur 4.4 viser hvordan median nedlastingshastighet utvikler seg gjennom året for hver operatør. Hvert punkt i grafen viser median hastighet over alle målingene som ble foretatt for det aktuelle nettet gjennom ett døgn. Utviklingen i nedlastingshastighet er ulik i de ulike nettene. Telenor har klart høyest nedlastingshastighet første halvår, men hastigheten reduseres gjennom sommeren før den tar seg noe opp igjen utover høsten. Telia har en mindre nedgang i hastighet gjennom sommeren, og en kraftigere økning utover høsten. Forskjellen i nedlastingshastighet mellom Telenor og Telia er dermed mindre i andre halvår enn i første halvår. Vi måler relativt jevn nedlastingshastighet gjennom hele året for Ice, både Ice mobil og Ice MBB.

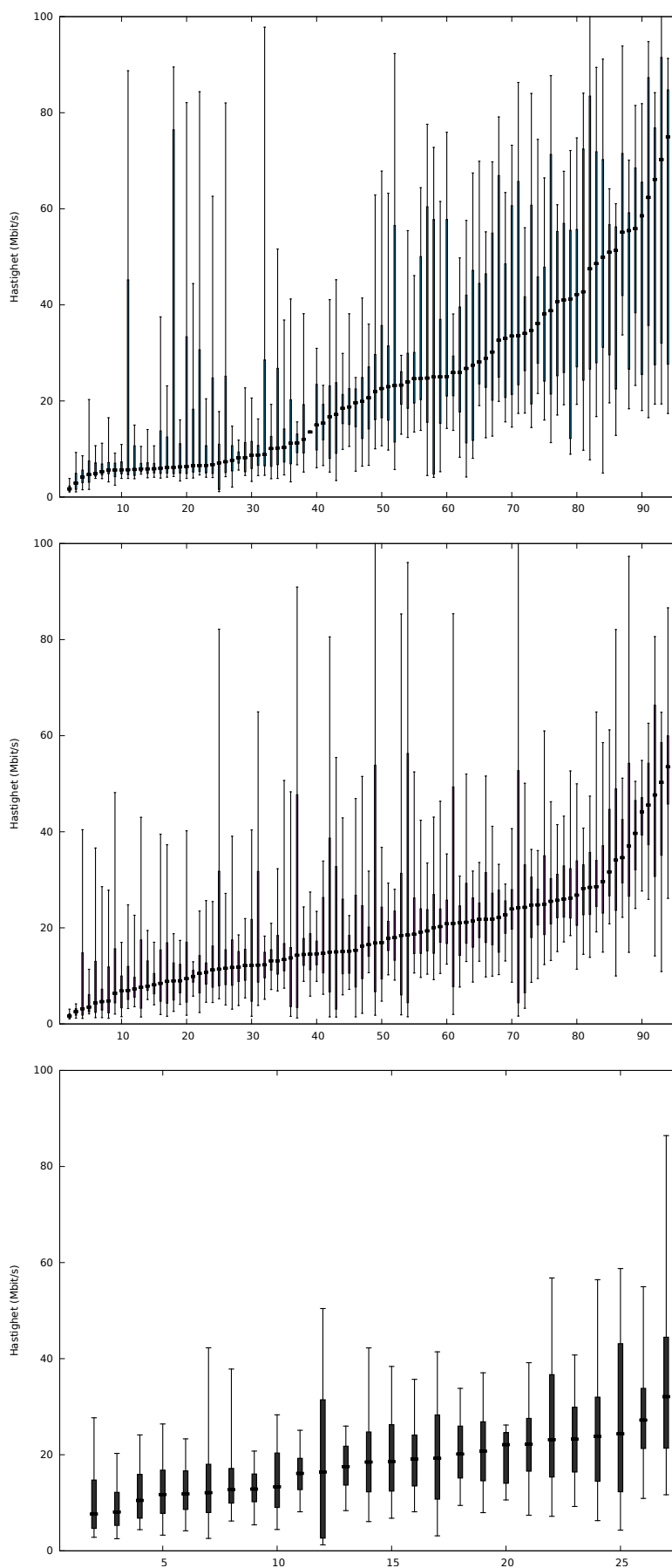
Når vi skal tolke denne utviklingen er det igjen viktig å være oppmerksom på at målenodene ikke nødvendigvis kan utnytte all kapasitet som er tilgjengelig i mobilnettene. For eksempel kan ikke målenodene gjøre såkalt *carrier aggregation* mellom 2100 MHz-båndet og andre LTE frekvensbånd, noe som vil påvirke hastigheten som oppnås. Høyt pakkeap vil også påvirke opplevd nedlastingshastighet.

### 4.4 Hastighet i ulike frekvensbånd

Mobiloperatører benytter ulike frekvensbånd for kommunikasjonen mellom basestasjoner og brukerterminaler. Frekvensbåndene som benyttes til mobilkommunikasjon er harmonisert globalt og regionalt av ITU og EU. Tabell 4.1 viser en forenklet oversikt over mobiloperatørenes frekvensbeholdning i frekvensbånd som ble benyttet til offentlig mobilkommunikasjon i Norge i 2019. Alle frekvensbåndene i tabellen benyttes (i større eller mindre grad) til 4G/LTE trafikk. 900-båndet og 2100 båndet benyttes også til 2G/GSM, mens 2100-båndet i tillegg benyttes til 3G/UMTS.

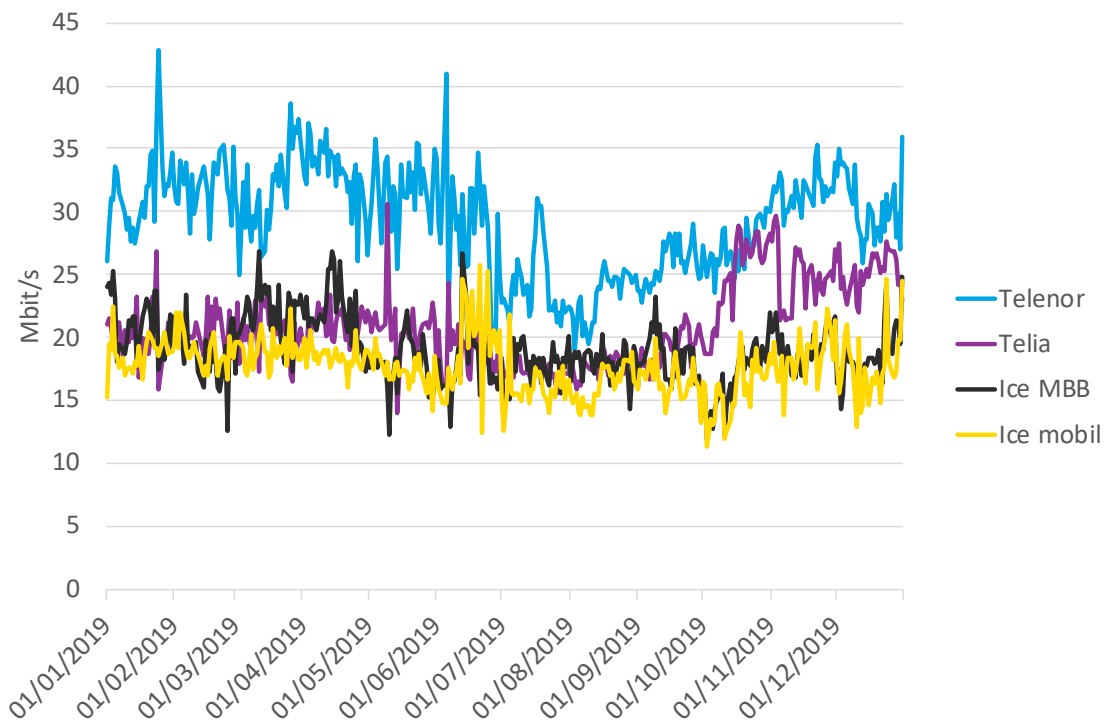
Ulike frekvensbånd har ulik kapasitet (båndbredde) og ulike dekningssegenskaper. Generelt benyttes lave (sub-GHz) frekvensbånd for å gi god arealdekning langs transportårer og utenfor tettbygde strøk. Radiosignaler i disse frekvensbåndene rekker langt, og man kan dermed dekke store arealer fra et begrenset antall radiosendere, ofte ved å plassere disse høyt i terrenget. Høyere frekvensbånd benyttes i større grad til å øke kapasiteten i områder med større trafikkgrunnlag. Moderne basestasjoner kan ofte sende på et bredt frekvensspektrum, og flere frekvensbånd benyttes ofte på samme lokasjon.

LTE støtter såkalt *carrier aggregation*, hvor flere frekvensblokker (fra samme eller forskjellige basestasjoner og frekvensbånd) kan benyttes av samme brukerterminal. Dette gjør det mulig å



Figur 4.3: Variasjon i nedlastingshastighet for 4G-forbindelser hos Telenor (øverst), Telia (midten) og Ice mobil (nederst).





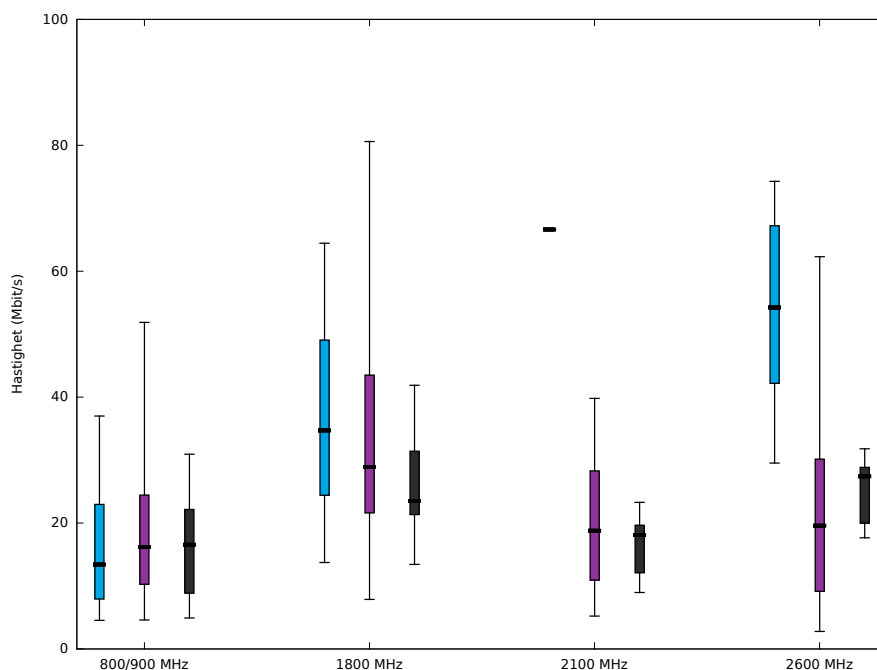
Figur 4.4: Utvikling i nedlastingshastighet gjennom 2019.

tilby høyere hastigheter. LTE-standarden åpner for å kombinere opptil 5 ulike frekvensblokker, men brukerutstyr har sjeldent støtte for så mange frekvensblokker. Som tidligere nevnt støtter våre målenoder kun aggregering av to frekvensblokker.

Her undersøker vi hva dekning fra forskjellige frekvensblokker har å si for den oppnådde nedlastingshastigheten i mobilnettene. Våre måleforbindelser er til enhver tid ankret til en gitt celle i mobilnettet. Vi har informasjon om hvilken frekvens denne cellen sender på. Vi kan dermed avgjøre hvilken frekvens som ble benyttet ved en hastighetsmåling. Merk at vi kun kjenner cellen (og dermed frekvensen) som forbindelsen er ankret til. Som diskutert over vil nedlastingen ofte skje ved å aggregere flere frekvensbånd. Vi kan ikke direkte måle dette fra våre noder, men vi antar at sjansen for at flere frekvensbånd er benyttet er stor når forbindelsen er ankret i et høyt frekvensbånd.

Figur 4.5 viser nedlastingshastigheter fordelt på de ulike frekvensbåndene som hver operatør benytter. Vi ser at for lave frekvensbånd (800 og 900 MHz), er det liten forskjell mellom operatørene. Ice oppnår den høyeste nedlastingshastigheten, med en median hastighet på 16,6 Mbit/s, foran Telia med 16,2 Mbit/s og Telenor med 13,4 Mbit/s. For 1800-båndet er forskjellene heller ikke dramatiske. Her oppnår Telenor den høyeste median hastigheten med 34,7 Mbit/s, foran Telia med 28,9 Mbit/s og Ice med 23,5 Mbit/s. For de høyeste frekvensene (2100 MHz og 2600 MHz) er imidlertid forskjellene store. Her oppnår Telenor mye høyere hastigheter (henholdsvis 66,6 Mbit/s og 54 Mbit/s) enn Telia (18,8 Mbit/s og 19,6 Mbit/s) og Ice (18,1 Mbit/s og 27,4 Mbit/s). Dette er den viktigste forklaringen på at Telenor oppnår den høyeste nedlastingshastigheten totalt sett, som diskutert over. Forskjellen mellom Telenor og de andre operatørene i 2600 MHz-båndet er overraskende stor, og kan tyde på at aggregering av frekvensbånd ikke fungerer optimalt hos alle operatører. Slik aggregering støttes av måleutstyret.

Tabell 4.2 viser hvordan hastighetsmålingene hos hver operatør fordelte seg på de ulike frekvensbåndene. Vi ser at om lag halvparten av hastighetsmålingene ble foretatt i lave frekvensbånd



Figur 4.5: Nedlastingshastighet fordelt på ulike frekvensbånd.

Operatør	800/900 MHz	1800 MHz	2100 MHz	2600 MHz
Telenor	56 %	35 %	4 %	5 %
Telia	71 %	11 %	5 %	12 %
Ice	82 %	13 %	2 %	3 %

Tabell 4.2: Andel målinger i forskjellige frekvensbånd.

for Telenor og Telia, mens dette gjaldt fire av fem målinger for Ice. De øvrige målingene fordeler seg på 1800- 2100- og 2600-båndene. Telia virker å ha en større andel av sine målinger i 2600-båndet enn Telenor, som til gjengjeld har flere målinger i 1800-båndet.



## 5. Mobiltjenester på tog

I dette kapitlet presenterer vi målinger av mobildekning og ytelse målt om bord på tog. Målingene omfatter som tidligere Telenor og Telia. Nytt av året er at vi også har målinger fra Ice. Målingene er gjennomført ved å plassere Nornet målenoder på 17 tog i samarbeid med Norske tog. Togene er av forskjellige typer, og kjører både langdistanse og intercity-strekninger. Resultatene som presenteres her er basert på målinger foretatt gjennom hele 2019.

De fleste av togene med målenoder har nå installert signalforsterkere om bord (se faktaboks). Vi skiller ikke mellom tog med og uten signalforsterkere i årets undersøkelse.

I vår analyse av målingene deler vi toglinjene opp i segmenter på 1 km, og slår sammen alle målinger av dekning og ytelse i hvert segment. Antallet måleravlesninger vi har i hvert segment vil variere med togsettenes reisemønster. Vi krever minst 10 avlesninger for en operatør for å ta med det aktuelle segmentet i vår analyse.

For hvert intervall beregner vi den *typiske* dekningen. Den typiske dekningen er definert som den teknologien som er observert flest ganger i det aktuelle intervallet. Merk at det fremdeles kan finnes mindre hull uten dekning innen hvert 1km-intervall.

### 5.1 Mobildekning på tog

I denne analysen ser vi på hvilken teknologi forbindelsen går over. Dette kan være 4G, 3G, 2G eller Ingen tjeneste. Målenodene vil automatisk velge den beste tilgjengelige teknologien. Hver målenode rapporterer status for forbindelsen til hvert mobilnett fire ganger i minuttet, inkludert teknologitype og signalstyrke for forbindelsen. Ved å kombinere disse målingene med lokasjonsdata fra togets GPS, kan vi si noe om den opplevde dekningen om bord på togene langs mye av det norske jernbanenettet.

Mobiloperatørene bygger ut sine 4G-nett i høyt tempo, og en økende del av jernbanestrekningene er dekket av 4G. Dekningen er imidlertid fremdeles varierende mange steder, og brukerterminaler med 4G støtte vil derfor oppleve hyppige skifter mellom 4G og andre teknologier, noe som vil påvirke brukeropplevelsen negativt.

Signalforsterkere på tog (fra *Bedre mobiltjenester på tog*, Nexia 2015)

Normal mobildekning langs jernbanen er ikke tilstrekkelig for å sikre gode mobiltjenester på tog. Dempning av radiosignalene i togkarosseriet fører til at selv om det er normalt gode dekningsforhold i friluft, vil signalkvaliteten inne i toget ikke være tilstrekkelig til å støtte en god brukeropplevelse. Togsettet vil vil i mange tilfeller opptre som et Faradaybur, som effektivt blokkerer radiosignalene. Særlig moderne togsett gir sterk dempning av signaler. Krav til støydemping, solskjerming og redusert varmetap gjør at disse har en tett konstruksjon med metallfilm i vinduene. Eldre togsett har ofte større vinduer uten metallfilm, og demper signalet i mindre grad. Graden av dempning er også avhengig av frekvensen til radiosignalene. Lavere frekvenser trenger lettere gjennom togkarosseriet, mens høyere frekvenser stoppes mer effektivt.

NSB har tidligere gjennomført målinger av hvor mye mobilsignaler dempes i togkarosseriet for ulike togtyper og radiofrekvenser. De fant at typisk dempning er i området 10-15 dB, og noen ganger over 20 dB. Denne dempningen vil ha betydelig innvirkning på kvaliteten til mobiltjenester. En dempning på 3dB betyr at radiosignalet utenfor toget må være dobbelt så sterkt for å gi en tilsvarende tjeneste. En dempning på 10 dB betyr at styrken på radiosignalet må være 10 ganger så sterkt, mens en dempning på 20dB betyr at det må være 100 ganger så sterkt. Det er dermed svært vanskelig å bygge radiodekning langs jernbanen som skal gi en tilstrekkelig tjenestekvalitet uten å installere utstyr som skal motvirke dempningen i karosseriet.

I 2015 inngikk mobilselskapene, NSB og Jernbaneverket en avtale som skulle gi bedre mobiltjenester på tog. Avtalen innebærer at mobilselskapene skal prioritere dekning langs jernbanestrekninger, Jernbaneverket skal bygge dekning i tunneler, og NSB skal installere signalforsterkere på tog. Slike signalforsterkere henter mobilsignaler utenfor toget med en eksternt antenne, og videresender dette inne i togsettet. På denne måten bidrar de til økt opplevd dekning. For noen strekninger har vi målinger fra tog både med og uten signalforsterkere, og kan dermed måle effekten disse har på den opplevde dekningen.

## Utfordringer ved måling av 4G-dekning

Våre målenoder sender kontinuerlig måletrafikk over alle forbindelser, som beskrevet i kapittel 7. Det innebærer at dataforbindelsen til hvert mobilnett stort sett er i *aktiv* tilstand. Telia har konfigurert mobilnettene sine slik at en dataforbindelse ikke oppgraderes fra 3G til 4G mens den er aktiv, selv om en bruker beveger seg inn i et område med 4G-dekning, som omtalt i kapittel 3. En forbindelse kan derfor bli hengende igjen i 3G-nettet og rapportere 3G som den beste tilgjengelige teknologien i et område selv om 4G også er tilgjengelig. Dette innebærer en fare for at vi undervurderer Telias 4G-dekning i våre målinger, sammenlignet med hva en bruker med et annet trafikkmønster vil oppleve. Merk at det samme problemet vil ramme en vanlig bruker som har en aktiv dataforbindelse som det kontinuerlig sendes trafikk over. Særlig vil dette ramme NSBs wifi om bord-løsning, der mange brukere deler en felles forbindelse over mobilnettet. Denne forbindelsen vil nesten alltid være aktiv, og vil derfor ofte ikke oppgraderes til 4G når det er mulig.

Vi observerer imidlertid at dette problemet reduseres år for år, i takt med at antall strekninger uten 4G-dekning reduseres. I 2019 var måleforbindelsene i all hovedsak på 4G også for Telia.

Banestrekning	Områder
Lokal	Oslo - Moss Oslo - Eidsvoll Oslo - Drammen Stavanger - Nærbø
Intercity	Oslo - Skien Oslo - Lillehammer Oslo - Drammen
Bergensbanen	Oslo - Bergen via Drammen, Kongsberg og Hønefoss
Sørlandsbanen	Oslo - Stavanger via Drammen, Kongsberg og Kristiansand
Dovrebanen	Oslo - Trondheim via Lillehammer og Dombås

Tabell 5.1: Banestrekninger.

Figur 5.1 viser den typiske dekningen for Telenor, Telia og Ice på alle banestrekninger vi har målinger fra. Figuren illustrerer at 4G er den dominerende teknologien langs jernbanestrekningene for alle tre operatører. For Telenor finnes det bare noen få strekninger, primært langs Sørlandsbanen, der 2G er den dominerende teknologien. For Telia ser vi noen strekninger der 3G er den dominerende teknologien, særlig mellom Oslo og Lillehammer. Det er imidlertid grunn til å tro at problemene med manglende sømløs handover diskutert over er forklaringen på den manglende målte 4G-dekningen<sup>1</sup>. Ice opererer et rent 4G-nett. Der Ice ikke har egen dekning, benytter de Telia sitt nett. Målingene kan tyde på at Ice-forbindelsene ofte kobles til 2G i disse tilfellene.

## 5.2 Mobildekning per banestrekning

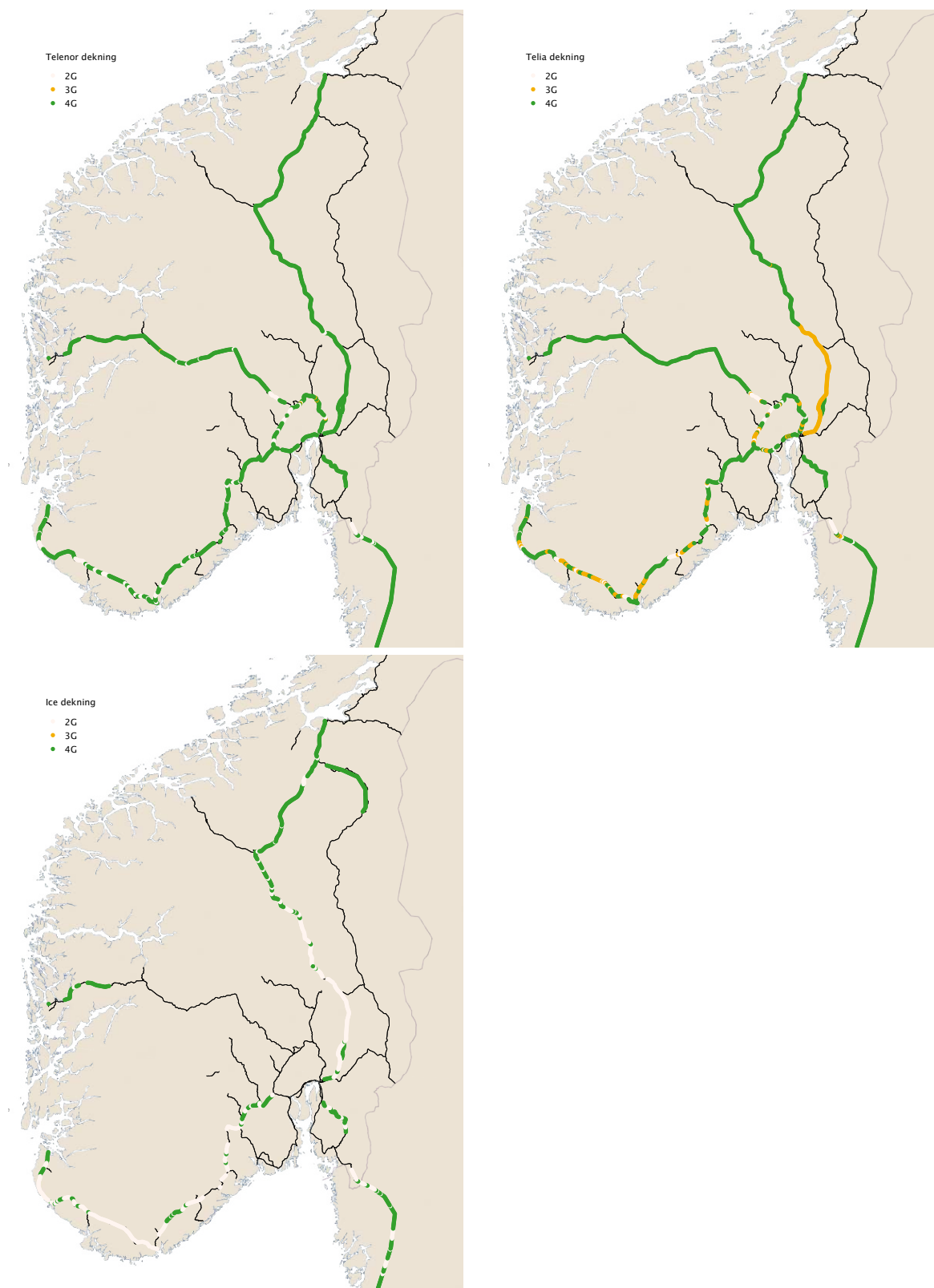
For vår videre analyse deler vi det norske jernbanenettet inn i delvis overlappende områder, som vist i tabell 5.1.

For hver strekning beregner andelen 1km-segmenter langs strekningen der 4G er den mest observerte teknologien. Tabell 5.2 viser 4G-dekningen per banestrekning for 2018 og 2019. Tallene inkluderer bare strekninger der vi faktisk har målinger. Dersom vi ikke har tilstrekkelige målinger på et 1-km segment, vil dette segmentet utelates fra beregningen. Vi har ikke måleutstyr for Ice på alle tog, og datagrunnlaget for disse målingene er derfor mer begrenset. Merk at det kan være forskjeller i nøyaktig hvilke strekninger vi har målinger fra i 2018 og 2019. For eksempel har vi ikke målinger fra Vestfoldbanen i 2019. Det er likevel tydelig at den opplevde 4G-dekningen har økt betydelig fra 2018 til 2019. Noe av dette kan skyldes en større andel tog med signalforsterkere om bord, men den viktigste forklaringen er utbyggingen av 4G-nettene.

4G-dekningen er naturlig nok bedre i sentrale strøk (Lokal og Intercity) enn på langdistansestrekninger.

Tabell 5.2 viser at den opplevde 4G-dekningen stadig øker langs jernbanen. Dette er særlig tydelig på Bergensbanen, Dovrebanen og Sørlandsbanen. En del av forklaringen kan være at det er flere tog som har installert signalforsterkere i 2019 enn det var i 2018. Merk at vi har inkludert 3G-dekning på strekningen Oslo-Lillehammer i tallene for Telia (Lokal, Intercity og Dovrebanen). Som diskutert over, skyldes trolig den manglende 4G-dekningen her problemer knyttet til overgangen 3G-4G for enkeltforbindelser.

<sup>1</sup>I 2018 målte vi 4G-dekning på den samme strekningen, og det er ingen grunn til å tro at denne dekningen har blitt borte.



Figur 5.1: Målt typisk dekning på tog. Telenor (øverst til venstre), Telia (øverst til høyre) og Ice mobil (nederst)



Banestrekning	Telenor		Telia		Ice
	2018	2019	2018	2019	2019
Lokal	99%	98 %	100 %	98 %	47 %
Intercity	99 %	98%	86 %	99 %	25 %
Bergensbanen	81 %	90 %	50 %	85 %	94* %
Dovrebanen	94 %	99 %	58 %	71 %	53 %
Sørlandsbanen	81 %	84 %	36 %	68 %	27 %

Tabell 5.2: 4G dekning per banestrekning 2018 og 2019. \*Kun deler av Bergensbanen for Ice.

Banestrekning	Nedlasting	Opplasting
Bergensbanen	30 Mbit/s %	14 Mbit/s %
Dovrebanen	15 Mbit/s %	8 Mbit/s %
Sørlandsbanen	17 Mbit/s %	9 Mbit/s %
Østfoldbanen østre	18 Mbit/s %	9 Mbit/s %

Tabell 5.3: Gjennomsnittlig nedlastings- og opplastingshastighet for ulike banestrekninger.

### 5.3 Nedlastingshastighet målt fra tog

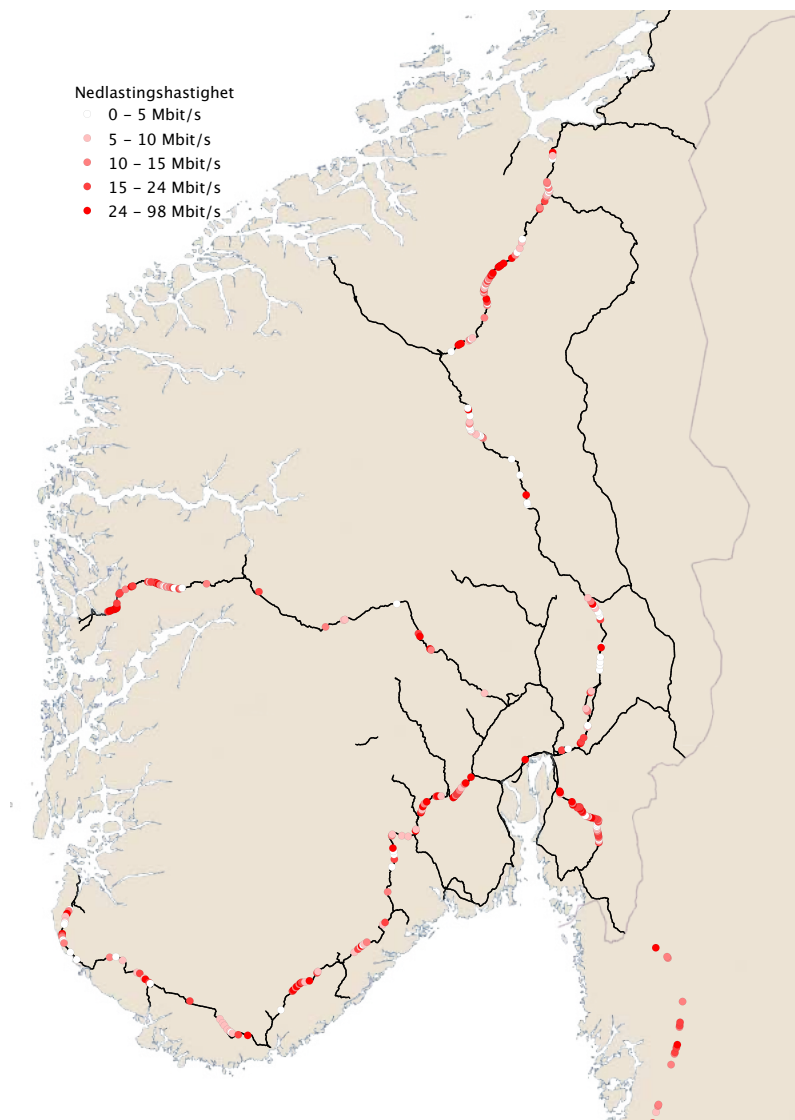
Vi har gjennomført hastighetsmålinger fra målenodene plassert på tog. Disse hastighetsmålingene er gjort på en litt annen måte enn målingene beskrevet i kapittel 4.1. I stedet for å gjøre målinger mot Ookla's speedtest.net, benytter vi en tilnærming for hastighetsmåling utviklet i EU-prosjektet MONROE<sup>2</sup>. Denne metoden er svært fleksibel med tanke på å bestemme hvor mye data som må sendes for å bestemme kapasiteten i dataforbindelsen.

Figur 5.2 viser hvordan hastighetsmålingene fordeler seg på ulike deler av jernbanenettet. Vi har i hovedsak målinger fra Bergensbanen, Dovrebanen, Sørlandsbanen og Østfoldbanens østre linje. Hovedtyngden av målinger er fra mindre sentrale områder. Merk at vi ikke kjenner til om toget beveger seg eller står stille når målingene utføres.

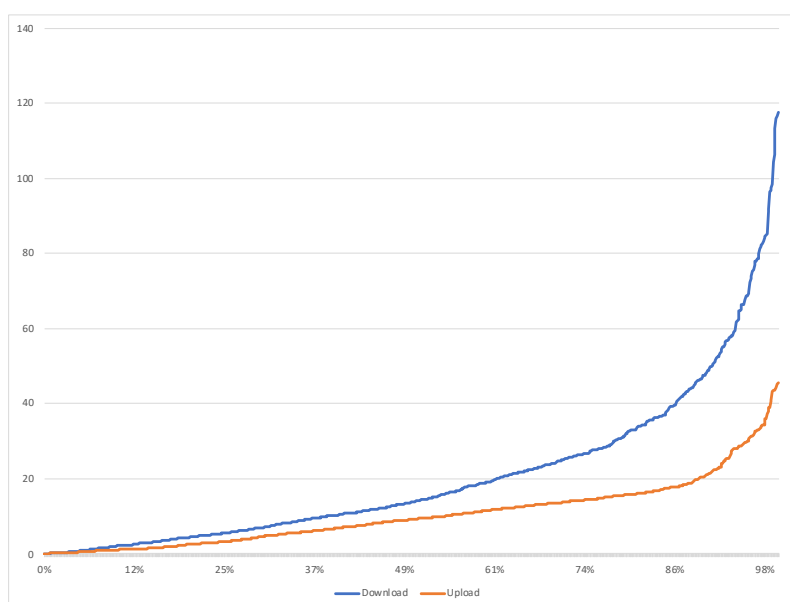
Figure 5.3 viser hvordan de målte ned- og opplastingshastighetene fordeler seg, uavhengig av geografi. Vi ser at det er stor variasjon i den opplevde hastigheten. Det er likevel relativt få målinger med svært lav hastighet: 94 % av målingene gir en nedlastingshastighet på over 1 Mbit/s. 79 % av målingene gir en nedlastingshastighet over 5 Mbit/s, mens 62 % av målingene gir en nedlastingshastighet over 10 Mbit/s. Drøyt 5 % av målingene viser en nedlastingshastighet over 60 Mbit/s. Den målte opplastingshastigheten ligger typisk på mellom 50 % og 70 % av nedlastingshastighet.

Tabell 5.3 viser den geografiske fordelingen av hastighetsmålingene. Merk at disse tallene er basert på målinger fra et relativt begrenset antall lokasjoner langs hver banestrekning, og at de derfor ikke vil være representative for hva man kan forvente langs andre seler av strekningen. Særlig er målingene for Bergensbanen dominert av et stort antall målinger i et område rett øst for Bergen med god dekning.

<sup>2</sup>Cise Midoglu et. al. MONROE-Nettest: A Configurable Tool for Dissecting Speed Measurements in Mobile Broadband Networks, 2018



Figur 5.2: Målt nedlastingshastighet fra tog.



Figur 5.3: Målt nedlastingshastighet fra tog.



## 6. Tingenes Internett

Fra Release 13 støtter LTE NB-IoT, en ny mobilkommunikasjonsstandard som tilbyr et robust og energieffektivt tilkoblingsalternativ til det raskt ekspanderende markedet Internet of Things (IoT). IoT-enheter vil ofte være enkle enheter som skal være enkle å sette opp og ha god energieffektivitet. Det er derfor av interesse å belyse det virkelige energiforbruket i IoT-enheter som benytter NB-IoT-standarden. Merk at målingene diskutert i dette kapittelet ikke er utført fra de samme målenodene som andre resultater i rapporten, men fra to enheter plassert i Simula Metropolitans lokaler i Oslo.

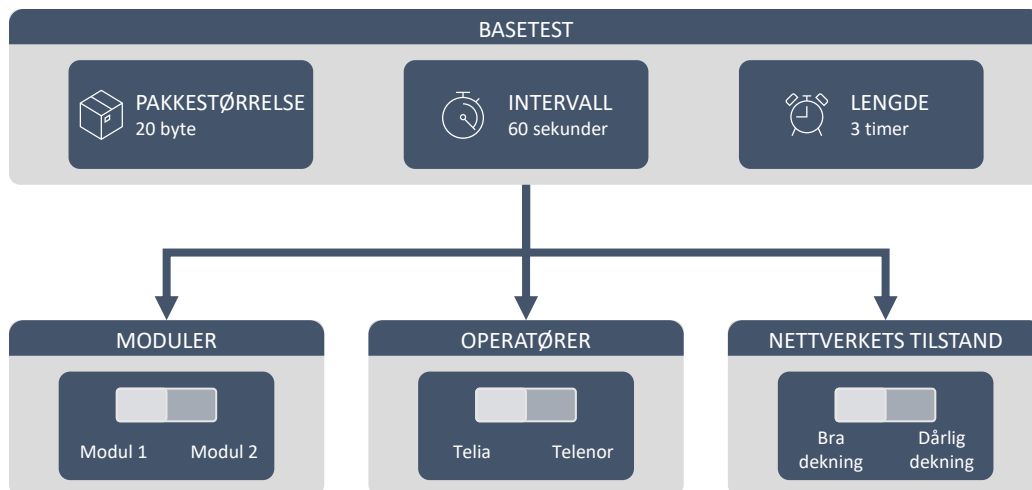
### 6.1 Problemstilling

Energieffektivitet er en viktig parameter for typiske IoT-bruksscenarier, ettersom batterier til IoT-enheter ofte ikke er ment å lades eller byttes, og binder batteriets levetid til selve enhetens levetid. Analysen vår har som mål å kvantifisere effekten av flere parametere på energiforbruket og å se om nettverkskonfigurasjoner kan påvirke enhetens levetid uten å gi ytelsesgevinster.

### 6.2 Testparametere

De følgende tre testparametere ble variert i våre målinger.

- **Modulene:** Det er brukt to hylleware NB-IoT-moduler, nemlig u-blox SARA-N211-02B og Quectel BC95-G. Disse modulene er blant de første kommersielt tilgjengelige LTE Cat NB1 modulene og er sertifisert av en rekke mobiloperatører. Den første modulen støtter datahastigheter opptil 27,2 kbps nedstrøms og 31,25 kbps oppstrøms. Quectel BC95 støtter opptil 25,2 kbps nedstrøms og 15,625 kbps oppstrøms. Siden formfaktoren til disse modulene ikke egner seg til eksperimentering, blir de solgt som en del av et utviklingskort (dev-kit) som gjør det mulig å drive modulen og koble den til via USB.
- **Operatørene:** Vi har gjennomført målinger i Telias og Telenors nett, siden Ice foreløpig ikke har lansert NB-IoT.
- **Nettverkstilstanden:** Hver test ble utført i to forskjellige nettverkstilstander: en med god nettverksdekning og en med dårlig nettverksdekning. Dårlige dekningsforhold ble opprettet på to måter: 1) ved bruk av signaldempere og 2) ved å plassere modulene i en spesialdesignet



Figur 6.1: Oversikt over basetesten og de tre testparametrene

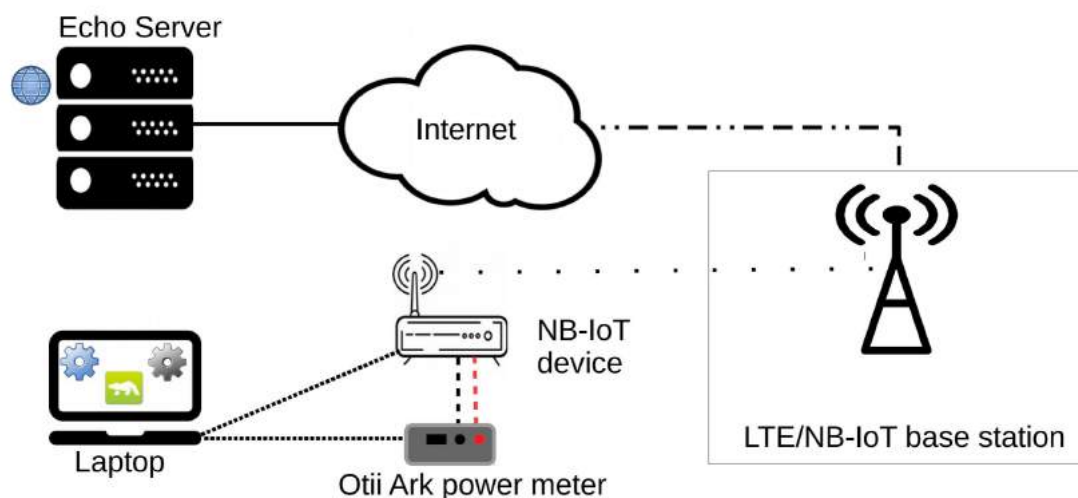
metallboks. Dette oppsettet gir mulighet for repeterbarhet av eksperimenter. For noen av eksperimentene plasserte vi modulene i en dyp kjeller, for å oppnå et realistisk dekningsscenario for noen typer enheter. Ytelsen i kjelleren er lik ytelsen når du bruker dempningsapparatene og spesialboksen. Under disse dårlige forholdene er vanlige LTE mobile enheter uten dekning.

### 6.3 Metode

Vi reperterte en basistest under forskjellige forhold. Basistesten besto av en 20 byte pakke sendt hvert 60 sekund i 3 timer. Denne testen ble gjentatt med tre parametere som ble endret som beskrevet over: modulen, operatøren og til slutt nettverkstilstanden. Alle de tre parameterne hadde to forskjellige innstillinger (dvs. to moduler, to operatører (Telia og Telenor) og to nettverksforhold (god og dårlig dekning)). Basistesten ble gjentatt fem ganger for hver parametersetting, slik at totalt 40 tester ble utført i perioden 26. november til 27. desember 2019. Oversikten over basistesten og de tre testparametrene er illustrert i 6.1.

### 6.4 Eksperimentoppsett

Det eksperimentelle oppsettet er illustrert i 6.2. En Oti Arc strømmåler ble brukt til å spore energiforbruk. Denne enheten kan brukes som både en strømforsyningsenhet for den testede IoT-enheten og som en strøm- og spenningsmåleenhet. Vi koblet hver modul til en bærbar PC, der vi kjørte et sett med skript for å administrere NB-IoT-enhetens autentisering, registrering til nettverket og RRC-konfigurasjon. NB-IoT-modulene bruker kommersielle abonnement for å koble seg til Telia og Telenor. For å måle strømforbruk sendte vi UDP-pakker til en server som sendte dem tilbake. Vi brukte den samme bærbare datamaskinen for å kontrollere både dev-settet og Oti Arc-måleinstrumentet. I tillegg til å måle strømforbruk, sporer vi også forsinkelse (Round Trip Time - RTT), pakketap og datarate. Vi brukte et sett med AT-kommandoer for å samle tilkoblingsmetadata. Disse inkluderer RRC-tilkoblings- og frigjøringshendelser, signal til støyforhold (SNR), strømforbruk (TX-strøm), fysisk celleidentitet (PCI), signalstyrke (RSRP) og kvalitet på mottatt referansesignal (RSRQ). En særlig viktig parameter å måle er *Extended Coverage*



Figur 6.2: Oppsett av IoT-eksperimentet

*Level* (ECL). Dette er en parameter som bestemmes av mobilnettet og som kan anta tre ulike verdier, Normal (ECL=0), Robust (ECL=1) og Ekstrem (ECL=2). Ved høyere ECL-nivå kan IoT-enheter kommunisere ved dårligere signalforhold, gjennom å justere blant annet sendestyrke og antall forsøk på å sende en melding. Høyere ECL-nivå øker imidlertid energiforbruket. Balansen mellom energiforbruk og robust kommunikasjon er derfor et av de viktigste valgene en mobiloperatør må ta stilling til i konfigureringen av sitt nett.

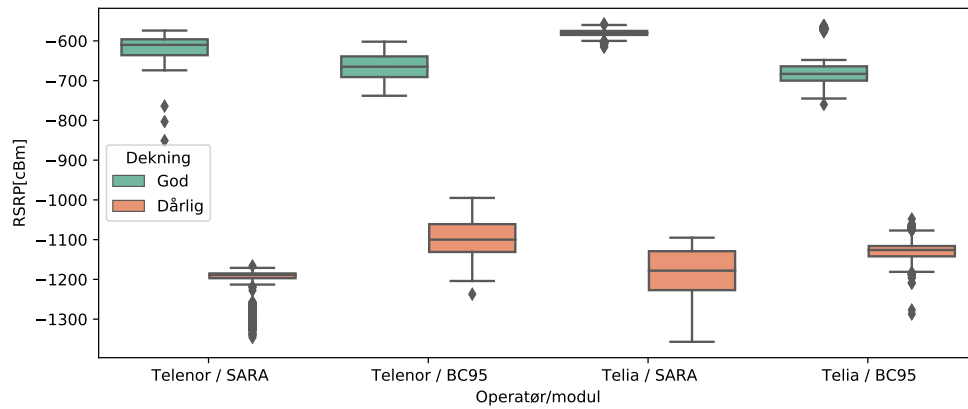
## 6.5 Resultater og observasjoner

Figur 6.3 viser fordelingen av RSRP målt på steder med god og dårlig dekning for begge operatører og begge moduler. Som i tidligere figurer viser vi median, kvartiler og 95/5 persentiler. Vi måler en forskjell på omtrent  $-60$  dBm i RSRP mellom de to stedstypene. Vi registrerer ikke store forskjeller mellom operatørene, men heller mellom modulene. SARA-N2 har en høyere RSRP når dekningen er god, men lavere RSRP når dekningen er dårlig. Dette illustrerer at det kan være store forskjeller på ulike modeller. Applikasjonseiere bør vurdere maskinvare grundig før de forplikter seg til en bestemt leverandør, siden dette kan ha en betydelig innvirkning på batteriets levetid.

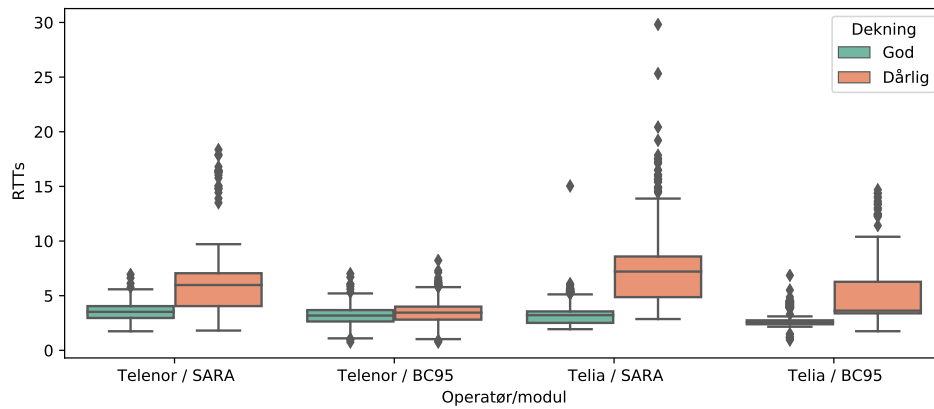
Figur 6.4 viser forsinkelse (RTT) målt for de samme kombinasjonene ovenfor. Igjen er forskjellene mellom operatørene små. Interessant nok er forskjellen i forsinkelse mellom steder med god og dårlig dekning også relativt liten. Til tross for  $60$  dBm-fallet i RSRP, øker median forsinkelse ikke med mer enn to sekunder. RTT er i hovedsak under 10 sekunder, noe som er i samsvar med NB-IoT-spesifikasjonen. Dette viser at metodene som brukes av NB-IoT for å øke ytelsen når dekningen er dårlig, som å sende pakker på nytt, ikke fører til særlig mye ekstra forsinkelse. Vi observerer igjen en klar forskjell på de to modulene, hvor SARA gir høyere forsinkelse enn BC95 under dårlige signalforhold.

Figur 6.5 viser fordelingen av strømforbruk for de forskjellige kombinasjonene ovenfor. Valget av modul ser igjen ut til å spille en viktigere rolle enn operatøren. Vi ser også at energiforbruket kan øke med fire til fem ganger når dekningen er dårlig. Dette fremhever den avgjørende avveiningen mellom ytelse og energiforbruk i denne sammenhengen. En slik økning kan forkorte batteriets



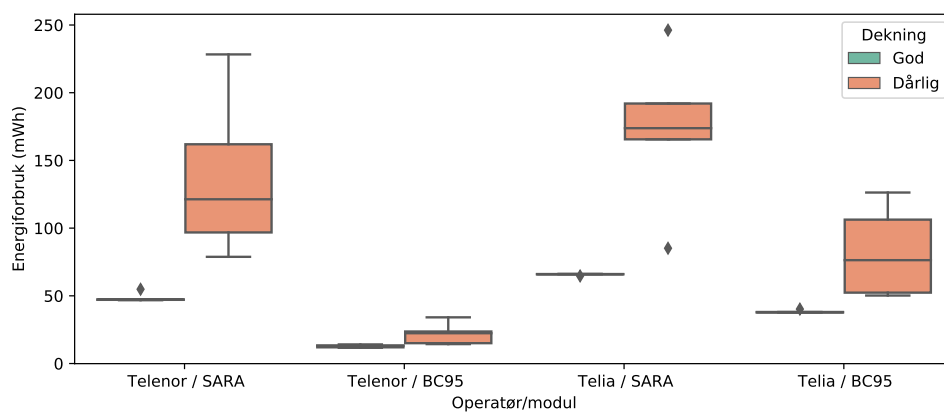


Figur 6.3: Distribusjon av RSRP



Figur 6.4: Distribusjon av RTTs

levetid med flere år.



Figur 6.5: Distribusjon av strømførbruk

## 7. Bakgrunn og metode

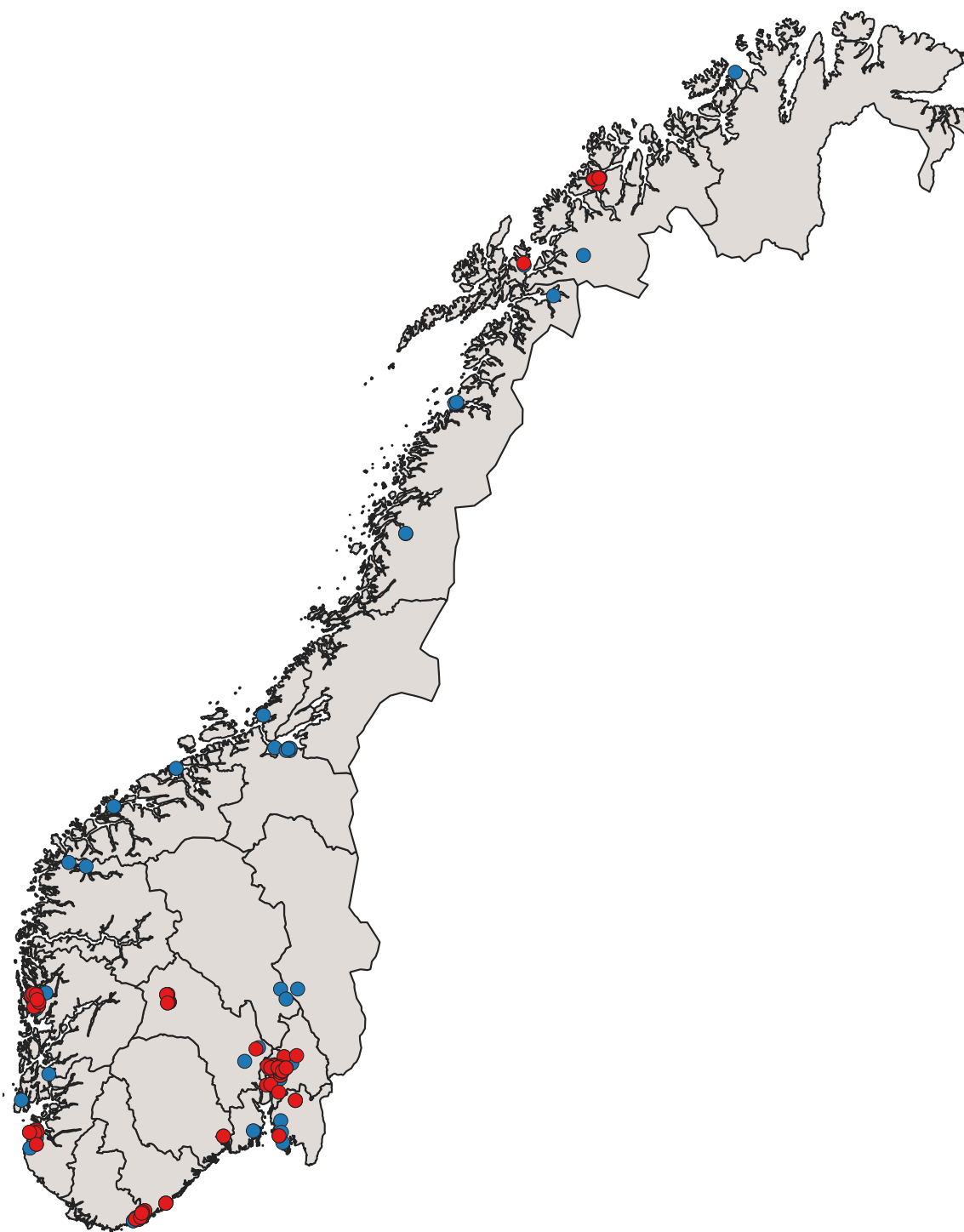
Målingene som presenteres i denne rapporten er utført ved hjelp av Nornet Edge. Nornet Edge er en infrastruktur for målinger og eksperimentering i mobile bredbåndsnett, delvis finansiert av Norges Forskningsråd<sup>1</sup>. Infrastrukturen består av et hundretalls målnoder spredt rundt i Norge. Hver målnode er koblet til 2-4 mobiloperatører, og samler kontinuerlig inn data om dekningsforhold, status for tilkoblingen og ytelse for hver forbindelse. Infrastrukturen omfatter også en sentral komponent plassert på Simula som tar i mot, prosesserer og lagrer måledata.

Centre for Resilient Networks and Applications (CRNA) samarbeider med lokale partnere over hele landet som fungerer som vertskap for målnoder. Figur 7.1 gir et inntrykk av den geografiske fordelingen av målnoder. På grunn av et tidligere samarbeid med e-valgprosjektet i Kommunal- og Moderniseringsdepartementet, er mange målnoder plassert i valglokaler. Valglokaler er ofte skoler, sykehjem eller rådhus, og er som regel plassert i sentrumsnære områder. I tillegg samarbeider vi direkte med en rekke skoler, musikkorps og andre foreninger om utplassering av målnoder. Det er en overvekt av målnoder i en del større byer, spesielt i Oslo, Bergen og Trondheim. Våre målinger har dermed en skjevhet mot tettbygde strøk, og gir ikke nødvendigvis et korrekt bilde av forholdene langs veier eller utenfor tettbygde strøk. Det er imidlertid stor spredning i geografi og størrelse på tettstedene, og vi mener at våre målinger er rimelig representative for hva brukere kan forvente innendørs.

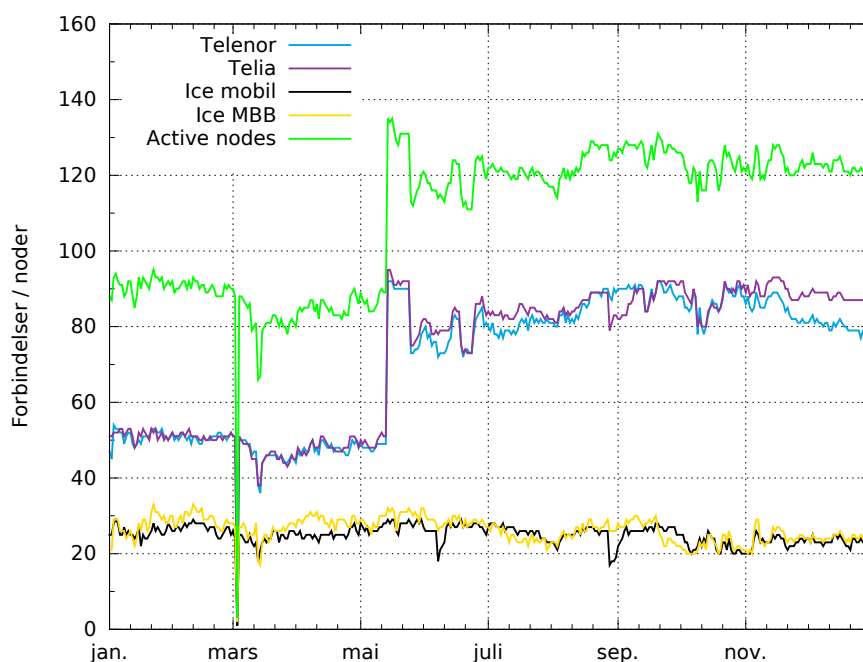
Antallet målnoder har variert gjennom måleperioden, som vist i figur 7.2. De første månedene lå antall målnoder på rundt 90. I mai 2019 ble 41 nye målnoder med Telenor- og Teliatorbindelser satt i drift, og deretter lå antallet målnoder på om lag 120 resten av året. Vi har stasjonære målnoder i alle landsdeler. Resultatene i denne rapporten er basert på målinger fra totalt 303 forbindelser fordelt på 161 ulike stasjonære målnoder. I tillegg har vi målinger fra 17 målnoder plassert på tog.

---

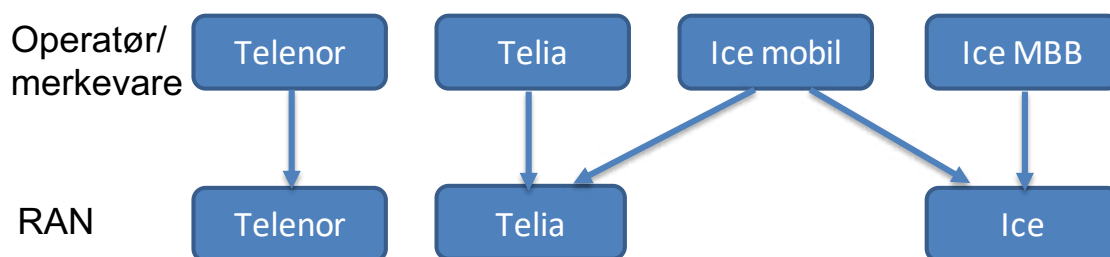
<sup>1</sup>Nornet består i tillegg til Nornet Edge av Nornet Core, som brukes til målinger og eksperimenter i fastnett.



Figur 7.1: Geografisk fordeling av målenoder. Målenoder av ny type i rødt.



Figur 7.2: Antall aktive målenoder og forbindelser fra hver operatør gjennom 2019.

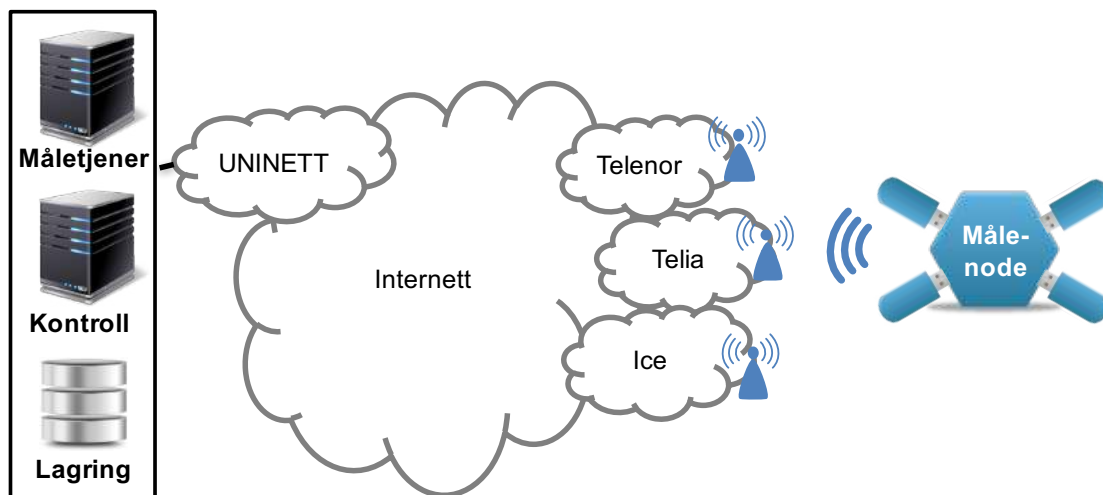


Figur 7.3: Operatører og nettverk behandlet i denne rapporten.

## 7.1 Mobilnettene vi måler

Vi gjør målinger i flere kommersielle mobilnett i Norge som har eget radionett, det vil si Telenor, Telia og Ice. Telenor og Telia opererer hvert sitt landsdekkende mobilnett. Disse operatørene har sitt eget kjernenett og sitt eget radioaksessnett, og forbindelser i disse nettene er aldri avhengige av komponenter i andre mobilnett. Ice opererer det tredje norske mobilnettet, og gjennomførte i 2015 et teknologiskifte i sitt nett, fra CDMA til LTE. Dette nettet er et rent 4G (LTE) nett, i motsetning til Telenor og Telias nett som også støtter 2G (GSM) og 3G (UMTS). Vi presenterer målinger for to ulike typer forbindelser for Ice Ice mobil bredbånd (Ice MBB) er rene dataabonnement, og benytter frekvenser i 450 MHz og 800 MHz-båndene. Ice mobil har også mulighet for telefoni. Disse kan ikke benytte 450 MHz-frekvensene, og benytter Telias nett dersom de er utenfor områder som Ice dekker med andre frekvenser.

Figur 7.3 viser sammenhengen mellom operatør/merkevare og hvilket radioaksessnett (RAN) operatøren bruker.



Figur 7.4: Nornet Edge måleinfrastrukturen.

## 7.2 Nornet Edge målenoder

I slutten av 2016 startet vi utrulling av andre generasjon målenoder, og gjennom 2017 tok nye målenodene gradvis tatt over for de en eldre versjon. Den nye generasjonen målenoder er basert på hyllevarekomponenter, og bruker interne PCI express modemer for å koble seg til mobilnettene. Målenodene har også en GSM-tilkobling som gjør at strømtilførselen kan kuttes via SMS, noe som vesentlig øker driftsstabiliteten til nodene. I likhet med første generasjon målenoder kjører de et standard Debian Linux operativsystem, og er derfor svært fleksible med tanke på hva slags målinger som kan støttes.

Teknisk er målenodene basert på et integrert APU2-kort fra PC Engines. Kortet har en firekjerner AMD G series prosessor, 4 GB RAM og 2 miniPCI express porter. I disse sitter det AirPrime MC7455 modemer fra Sierra Wireless, som støtter LTE Cat 6, også kjent som LTE Advanced. Merk at disse modemene ikke støtter LTE Cat 9, noe som betyr at vi ikke kan måle den maksimale hastigheten kan mobilnettene tilby ved å slå sammen tre ulike frekvensbånd. For Ice MBB benytter vi WeTelecom WDP-600N LTE modemer, siden disse også støtter frekvenser i 450 MHz-båndet.

## 7.3 Server-side infrastruktur

Målenodene utfører målinger ved å sende trafikk til Simulas måleservere i Oslo, som vist i figur 7.4. Trafikk til og fra måleserverne rutes gjennom de ulike mobilnettene og videre gjennom UNINETT. Måleserverne har god kapasitet i form av minne, prosessering og nettverkstilknytning, for å unngå at de skal være en flaskehals i målingene.

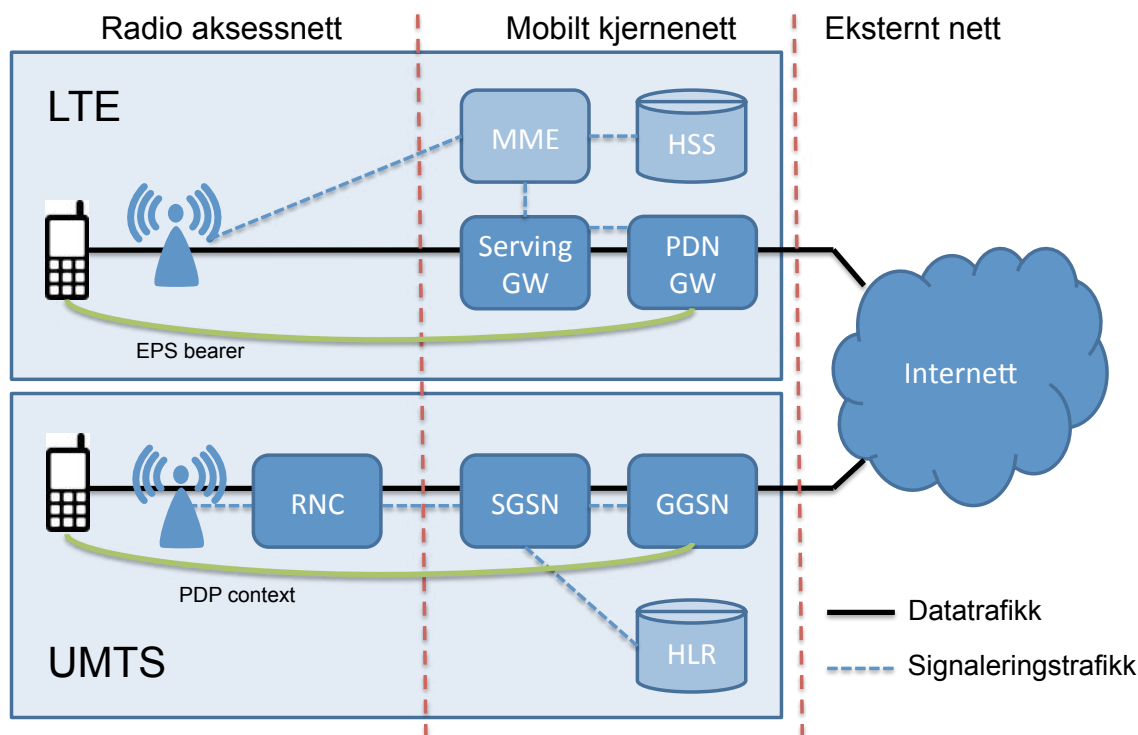
Målenodene overfører resultater fra målingene fortløpende til en sentral server, hvor de prosesseres og legges inn i en database. De innsamlede dataene behandles og filtreres for å fjerne perioder der vi opplevde problemer i server-side infrastrukturen.

Nornet Edge omfatter også et omfattende system for å monitorere, vedlikeholde og oppdatere målenodene, samt å orkestre de ulike målingene som skal kjøres.

## 7.4 Metode

Denne rapporten undersøker den brukeropplevde robustheten og stabiliteten til norske mobilnett. Vi ser på stabilitet i tilkoblingen mellom brukerterminalen og mobilnettet, og på stabiliteten i dataforbindelsen over denne tilkoblingen. I tillegg ser vi på stabiliteten i ytelsen en bruker oppnår





Figur 7.5: Hovedkomponentene i 3G (UMTS) og 4G (LTE) nettverk.

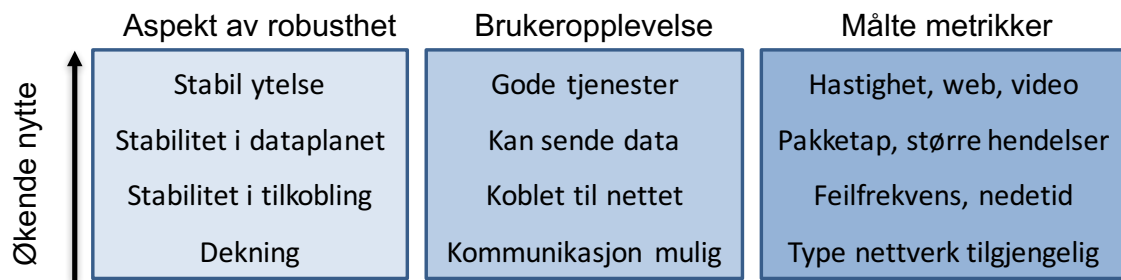
i mobilnettet, gjennom å måle den opplevde nedlastings- og opplastingshastigheten. Vi ser også på dekning og ytelse på tog, og rapporterer tidlige målinger fra mobilnettenes tjenester rettet mot Internet of Things.

Den opplevde stabiliteten er en kompleks størrelse som påvirkes av en rekke forhold. Dette kapittelet forklarer hvordan vi bryter det abstrakte begrepet *opplevd robusthet* ned i mindre, lettere målbare metrikker, og hvilke tester vi bruker for å måle disse.

Figur 7.5 viser en forenklet framstilling av de viktigste komponentene i et 4G (LTE) og et 3G (UMTS) mobilnett. Begge nettverkene består av et radio aksessnettverk, kalt henholdsvis UTRAN i 3G og eUTRAN (evolved UTRAN) i 4G, og et kjernenett. Radionettet inkluderer brukerterminaler og basestasjoner. I 3G nettverk inkluderer det også Radio Network Controllers (RNC) som hver kontrollerer et antall basestasjoner. I 4G nettverk er RNC-funksjonaliteten i hovedsak flyttet ut i basestasjonene.

Kjernenettet inkluderer et antall sentrale funksjoner. 4G-nettverk er rene datanettverk, og inkluderer ikke komponenter nødvendig for å produsere linjesvitsjet tale. Slike komponenter er en del av 3G-kjernenettet, men er ikke vist i figuren. Den viktigste delen av kjernenettet for vår diskusjon er komponenten som forbinder mobilnettet med eksterne nett (Internett). Denne enheten kalles Gateway GPRS Support Node (GGSN) i 3G, eller Packet Data Network Gateway (PGW) i 4G.

For å beskrive den opplevde robustheten i mobilnettene, er det nødvendig å gjøre målinger på flere nivåer. I denne rapporten har vi valgt å dele robusthet inn i fire nivåer, som vist i figur 7.6. Disse er dekning, stabilitet i nettverkstilkoblingen, stabilitet i dataforbindelsen, og stabilitet i ytelse. De fire nivåene bygger på hverandre, og representerer økende grad av opplevd nytteverdi for endebbrukeren. All mobilkommunikasjon forutsetter dekning. En stabil nettverkstilkobling er nødvendig for en stabil ende-til-ende kommunikasjon, som igjen er nødvendig for en stabil ytelse.



Figur 7.6: Rammeverk for å måle robusthet på flere nivåer.

For hvert av disse nivåene presenterer vi eksperimenter og resultater som sier noe om den opplevde stabiliteten eller robustheten over tid.

**Dekning.** All mobilkommunikasjon forutsetter at brukerterminalen kan motta radiosignaler med tilstrekkelig signalstyrke fra en basestasjon, slik at en tilkobling er mulig. I mobilnettene vi måler kan en slik tilkobling være av tre typer, tilsvarende teknologien som benyttes: 2G, 3G eller 4G. I denne rapporten sier vi at vi har dekning i et område så lenge en målenode kan opprettholde en tilkobling til mobilnettet i dette området. Vi rapporterer altså ikke tekniske parametere som signalstyrke eller signal til støyforhold, men fokuserer i stedet direkte på brukeropplevelsen. Dette er i tråd med tilnærmingen i resten av denne rapporten.

Dekningen er normalt relativt stabil i et område, og endrer seg først og fremst når en mobiloperatør fjerner eller etablerer nye basestasjoner. Vårt oppsett er derfor ikke egnet til å måle dekning ved hjelp av våre stasjonære målenoder. Vi rapporterer derfor kun dekningsmålinger fra mobile målenoder, altså noder montert på tog. For disse rapporterer vi den beste teknologien (2G < 3G < 4G) som er tilgjengelig for målenoden til en hver tid.

**Stabilitet i tilkoblingen.** En stabil nettverkstilkobling er grunnlaget for en god brukeropplevelse. Med tilkobling mener vi i denne sammenhengen at det er etablert en EPS bærer (eller PDP kontekst) i PGW (eller GGSN) og i brukerterminalen. Fra brukerens ståsted vil dette som regel bety at terminalen har en tildelt IP-adresse. Stabiliteten til tilkoblingen bestemmes av både RAN og kjernenettet. En tilknytning kan brytes på grunn av manglende dekning, feil i basestasjonen eller transmisjonsnettet, eller kapasitetsproblemer i sentrale komponenter som SGSN eller GGSN/PGW. I denne rapporten ser vi på den tildelte IP-adressen som et mål på hvor stabil nettverkstilknytningen er. Vi måler hvor ofte en målenode mister IP-adressen, hvor lang tid det tar før den kommer tilbake, og hvor mye nedetid (uten tilkobling) en forbindelse opplever totalt.

**Stabilitet i dataplanet.** Selv om brukerterminalen har en tildelt IP-adresse, er det ikke sikkert at den har en velfungerende forbindelse til Internett. Interferens, endringer i signalstyrke eller metning i nettet kan gi høyt pakketap eller avbrudd hvor data ikke kan sendes eller mottas. I denne rapporten ser vi på pakketap for å karakterisere stabilitet i dataplanet, og sammenligner pakketap hos de ulike operatørene.

**Stabil ytelse.** Robusthet innebærer også en grad av stabilitet og forutsigbarhet i ytelsen til applikasjonene som kjører over det mobile bredbåndsnettet. Applikasjoner har ulike krav til nettverket. Noen applikasjoner krever høy båndbredde, andre lav forsinkelse eller lavt pakketap. I mobilnett avhenger disse parameterne av hvilken radiotilstand forbindelsen har. Det er derfor ofte vanskelig å forutsi en applikasjons ytelse basert på generiske målinger. I stedet bør stabiliteten måles ved faktisk å kjøre de aktuelle applikasjonene gjentatte ganger og observere ytelsen. I årets rapport måler vi hvilken opplastings- og nedlastingshastighet vi oppnår fra våre målenoder. Nytt av året er at vi også gjør hastighetsmålinger fra mobile noder på tog.