

Norske mobilnett i 2018

CRNA Centre for Resilient
Networks & Applications

Simula Metropolitan Center for Digital Engineering

Norske mobilnett i 2018

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 Samferdselsdepartementet. Senteret produserer en årlig rapport om tilstanden i norske mobilnett. Årets rapport er den sjettede i rekken.

Ansvarlig for årets rapport Dr. Ahmed Elmokashfi (CRNA)
Bidragstere Dr. Amund Kvalbein (Analysys Mason AS)
Dr. Thomas Dreibholz (CRNA)
Dr. Chad Jarvis (Simula)

Omslag Image Communication
Publiseringsdato 29. mai 2019
ISBN 978-82-92593-25-7

Økonomiske bidragstere Samferdselsdepartementet
Norges Forskningsråd
Telia Norge
Ice Norge

Innhold

1	Sammendrag og hovedfunn	5
2	Stabilitet i tilkoblingen	9
2.1	Nedetid	10
2.2	Varighet av brudd i tilkobling	11
2.3	Nedetid gjennom året for enkeltforbindelser	11
2.4	Utvikling over tid	14
3	Stabilitet i dataplanet	19
3.1	Tapsrate	19
3.2	Utvikling over tid	24
4	Stabil ytelse	25
4.1	Opplastings- og nedlastingshastighet	25
4.2	Variasjon mellom forbindelser	26
4.3	Variasjon gjennom året	28
5	Avhengigheter mellom ulike nett	31
5.1	Korrelasjon i pakketap	31
5.2	Korrelasjon i bytte av celle	32
5.3	Korrelasjon i signalstyrke	33
6	Mobiltjenester på tog	35
6.1	Mobildekning på tog	36

6.2	Mobildekning per banestrekning	37
6.3	Effekt av signalforsterkere på togsett	39
7	Bakgrunn og metode	41
7.1	Mobilnettene vi måler	41
7.2	Nornet Edge målenoder	42
7.3	Server-side infrastruktur	43
7.4	Metode	43

Norske mobilnett i 2018

1. Sammendrag og hovedfunn

SimulaMet *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. Den gang rapporterte vi om store utfordringer i norske mobilnett. Rundt en fjerdedel av alle forbindelser vi målte var nede mer enn 10 minutter hver dag. 2G-forbindelsene opplevde brudd i 10 % av alle timer, mens 3G-forbindelsene mistet tilkoblingen i 4 % av alle timer. Rundt en fjerdedel av alle forbindelser hadde et pakketap på over 1 %. Vi rapporterte også en rekke store hendelser, der et stort antall forbindelser opplevde redusert eller ingen tjeneste i perioder på opptil 17 timer.

Gjennom de årene vi har gjennomført målinger, har vi observert store endringer i mobilnettene. Ikke minst har innføringen av 4G vært avgjørende viktig for at vi i dag ser en helt annen stabilitet og kvalitet enn vi gjorde i 2013. De siste årene har nedetiden til måleforbindelsene blitt kraftig redusert, og i 2018 var det en vesentlig andel av måleforbindelsene som aldri opplevde en dag med mer enn ett minutt nedetid. Kvaliteten på forbindelsene er også vesentlig bedre, med et pakketap under 0,1 % for de aller fleste forbindelsene. Det er flere år siden vi observert store hendelser av et omfang som kan sammenlignes med utfallene vi observert i 2013 og 2014.

Denne utviklingen er svært gledelig, og gir grunn til optimisme i årene som kommer. Samfunnets avhengighet av mobilnettene har blitt større i løpet av perioden vi har publisert målinger, og den kommer til å fortsette å øke de neste årene. I 2017 bestemte Regjeringen at neste generasjon Nødnnett skal realiseres i de kommersielle mobilnettene. Flere andre kritiske samfunnsfunksjoner innen forsvar, transport og energiforsyning ser aktivt på hvordan de i større grad kan utnytte de samme nettene for å løse sine oppgaver bedre og mer effektivt. I innføringen av 5G vil nettopp behovene til disse kritiske brukergruppene være et av de sentrale temaene. CRNA vil i tiden fremover arbeide med å forstå disse brukergruppenes behov, og bidra til å utvikle nye løsninger som understøtter disse. Fortsatte målinger av den opplevde stabiliteten og kvaliteten i mobilnettene vil være en viktig del av dette arbeidet.

Resultatene som presenteres i årets rapport er basert på aktive målinger fra 141 stasjonære målepunkter spredt over store deler av Norge gjennom hele 2018. Vi har også som tidligere år gjort målinger om bord på tog. Ved hjelp av disse målingene har vi kunnet følge utviklingen

i mobildekning langs jernbanen. I år som i fjor har vi også målinger fra tog som har installert *signalforsterkere* om bord. Disse målingene gir grunn til optimisme: signalforsterkere gir en vesentlig forbedring i den opplevde dekningen om bord 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 færre brudd og stort sett lavere pakketap i 2018 enn noe år tidligere. I årets rapport presenterer vi også detaljerte data om stabilitet og pakketap for hver enkelt forbindelse gjennom året. Disse resultatene gir innsikt i hvordan kvaliteten i mobilnettene varierer mellom ulike lokasjoner, men også over tid på en gitt lokasjon. Vi ser også på korrelasjoner i pakketap, endringer i celle-tilknytning og signalstyrke for forbindelser fra ulike operatører på samme lokasjon. Disse målingene kan si noe om hvor uavhengig to forbindelser fra ulike operatører oppfører seg. Slik innsikt er viktig for å kunne vurdere hvilken gevinst man kan forvente i form av økt stabilitet eller ytelse ved å knytte en tjeneste til flere mobilnett.

Vi presenterer i år for første gang også målinger for *Ice mobil*, i tillegg til *Ice mobil bredbånd (MBB)*. Ice mobil benytter ikke frekvensressurser i 450 MHz-båndet, men benytter nasjonal gjesting i Telias nett der Ice ikke selv har bygget dekning i andre frekvensbånd.

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

Stabilitet i tilkoblingen

- Målenodenes tilkoblinger til mobilnettet var i sum marginalt mer stabile i 2018 enn i 2017, for alle målte nett. Vi observerer ingen store forskjeller mellom operatørene når det gjelder stabilitet i tilkoblingen.
- Flere forbindelser opplever en tilgjengelighet på over 99,99 %, noe som tilsvarer en nedetid på under 9 sekunder i døgnet i gjennomsnitt. Om lag 80 % av forbindelsene i Telenor og Telias nett oppnår en slik tilgjengelighet, noe som er en forbedring fra om lag 70 % i 2017.
- Flere forbindelser gikk gjennom hele året uten en eneste dag med mer enn ett minutt nedetid. Dette gjelder mellom 9 % (Ice mobil) og 44 % (Ice MBB) av forbindelsene, noe som er en forbedring fra 2017 for de fleste nettene. Ingen målte forbindelser fra Ice MBB opplevde mer enn fem dager med mer enn ett minutt nedetid.
- 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 og Ice, og ingen hos Telenor. Tilsvarende tall for 2017 var 3 hendelser hos Telenor og 4 hos Telia.

Stabilitet i dataplanet

- Det observerte pakketapet var om lag på samme nivå i 2018 som i 2017. Vi ser en liten økning i pakketap hos Telia, som følge av noen perioder med spesielle utfordringer.
- Vi observerer noe økt pakketap i perioder med høy trafikk, for eksempel rundt VM i fotball. Dette kan indikere at nettene nærmer seg sin kapasitetsgrense i slike perioder.

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.
- Vi ser noe større forskjeller i hastighet mellom nettene enn tidligere år. Telenor oppnår høyest hastighet i våre målinger, men har samtidig større variasjon i ytelse.
- 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.

Korrelasjon i pakketap mellom nett

- Ved å sammenligne pakketap i forbindelser fra ulike nett på samme lokasjon, finner vi at pakketapet stort sett er uavhengig. Forbindelser fra Telenor og Telia opplever noe økt pakketap i perioder med mye trafikk.
- Størst uavhengighet finner vi mellom forbindelser fra Telenor og Ice mobilt bredbånd.

Mobiltjenester på tog

- I årets rapport presenterer vi flere målinger fra tog som har signalforsterkere montert om bord. Slike signalforsterkere skal motvirke demping 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 4G-dekningen fra 2017 til 2018 om bord på togene langs de strekningene vi måler. Vi måler nær full 4G-dekning på lokaltog-strekninger hos både Telenor og Telia. Vi observerer en typisk 4G-dekning på 80-90 % langs jernbanen for Telenor. Den målte 4G-dekningen for Telia er noe lavere, men dette skyldes trolig i noen grad mangelen på sømløs overgang fra 3G til 4G i Telias nett. Denne mangelen gjør at våre målenoder ikke er koblet til 4G-nettet alle steder dette er tilgjengelig.
- Selv om vi måler en økning i 4G-dekning langs jernbanen, er det fortsatt store utfordringer med stabilitet i tilkobling og sammenhengende tjenestekvalitet om bord på tog.



2. Stabilitet i tilkoblingen

I dette kapitlet undersøker vi stabiliteten til tilkoblingen mellom våre målenoder og mobilnettet. Målenodene forsøker å opprettholde tilkoblingen til de ulike mobilnettene til en hver tid, og tilkoblingen brytes aldri aktivt fra målenodens side¹. Målenodene overvåker kontinuerlig tilkoblingen til de ulike mobilnettene, og logger status på denne. Dersom tilkoblingen brytes, vil målenoden 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.

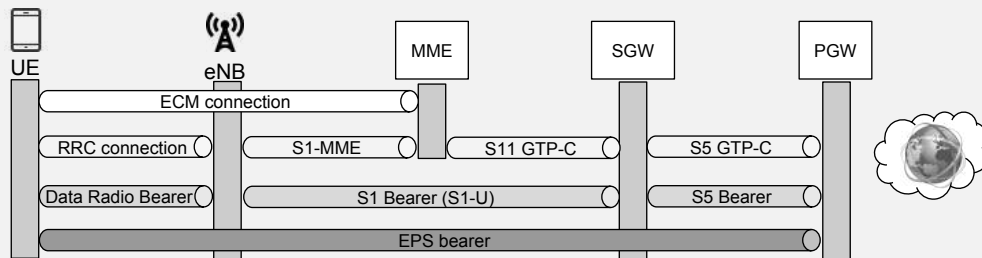
Brudd på tilkoblingen kan skyldes ulike forhold knyttet til brukerterminalen, radioforbindelsen mellom brukerterminal og basestasjon, selve basestasjonen, transmisjon mellom basestasjon og kjernenett, eller feil i ulike deler av kjernenettet. Ulike typer feil vil ofte ha ulike signaturer i målingene. For eksempel kan antall samtidige brudd, lokasjonen til målenodene 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 skiller vi mellom *Ice mobilt bredbånd (MBB)* og *Ice mobil*. Ice MBB benytter alle Ice sine frekvensressurser, inkludert 450 MHz-båndet. Som diskutert i kapittel 7, benytter disse forbindelsene en annen type modem enn andre forbindelser. Ice mobil benytter ikke 450 MHz-båndet, men benytter i stedet Telias nett der Ice ikke har egen dekning på andre frekvenser.

¹Unntaket 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.

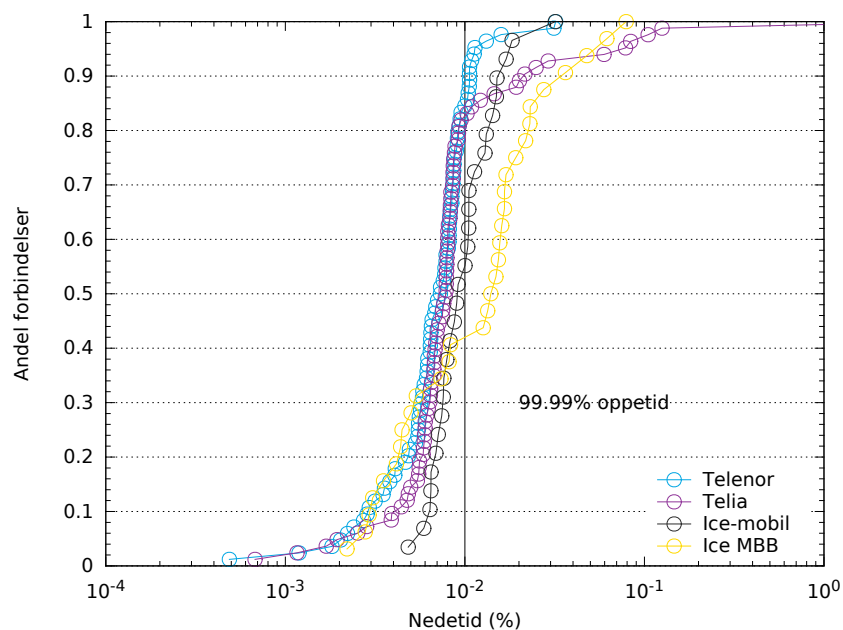


En EPS bærer realiseres over en serie med tunneller mellom brukerterminalen og en komponent i kjernenettet som kalles en Packet Gateway (PGW), som vist i figuren over. Disse tunnelene sørger blant annet for at tilkoblingen beholdes selv om brukerterminalen flytter seg fra et område til et annet. Vi måler 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. Ice MBB opplever noe mer nedetid enn de andre operatørene for om lag halvparten av forbindelsene. Mye av dette skyldes trolig utfordringer med måten modemmet som benyttes for disse forbindelsene kommuniserer med målenoden. Vi har forsøkt å



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

filtrere ut nedetid som skyldes denne feilkilden, men den kan fremdeles innvirke på resultatene for Ice MBB. Om lag 40 % av Ice MBB-forbindelsene har en oppetid på minst 99,99 %, noe som betyr at disse forbindelsene er utilgjengelige mindre enn ni sekunder i døgnet i gjennomsnitt. For Telenor og Telia er tilsvarende tall over 80 %, noe som er en forbedring fra om lag 70 % i 2017. Ice opplever noe hyppigere brudd i tilkoblingen enn Telenor og Telia, men disse varer til gjengjeld noe kortere i gjennomsnitt. Få forbindelser opplever vesentlig nedetid - kun en håndfull forbindelser fra Telia og Ice MBB opplevde nedetid på over 0,02 % (43 sekunder i døgnet).

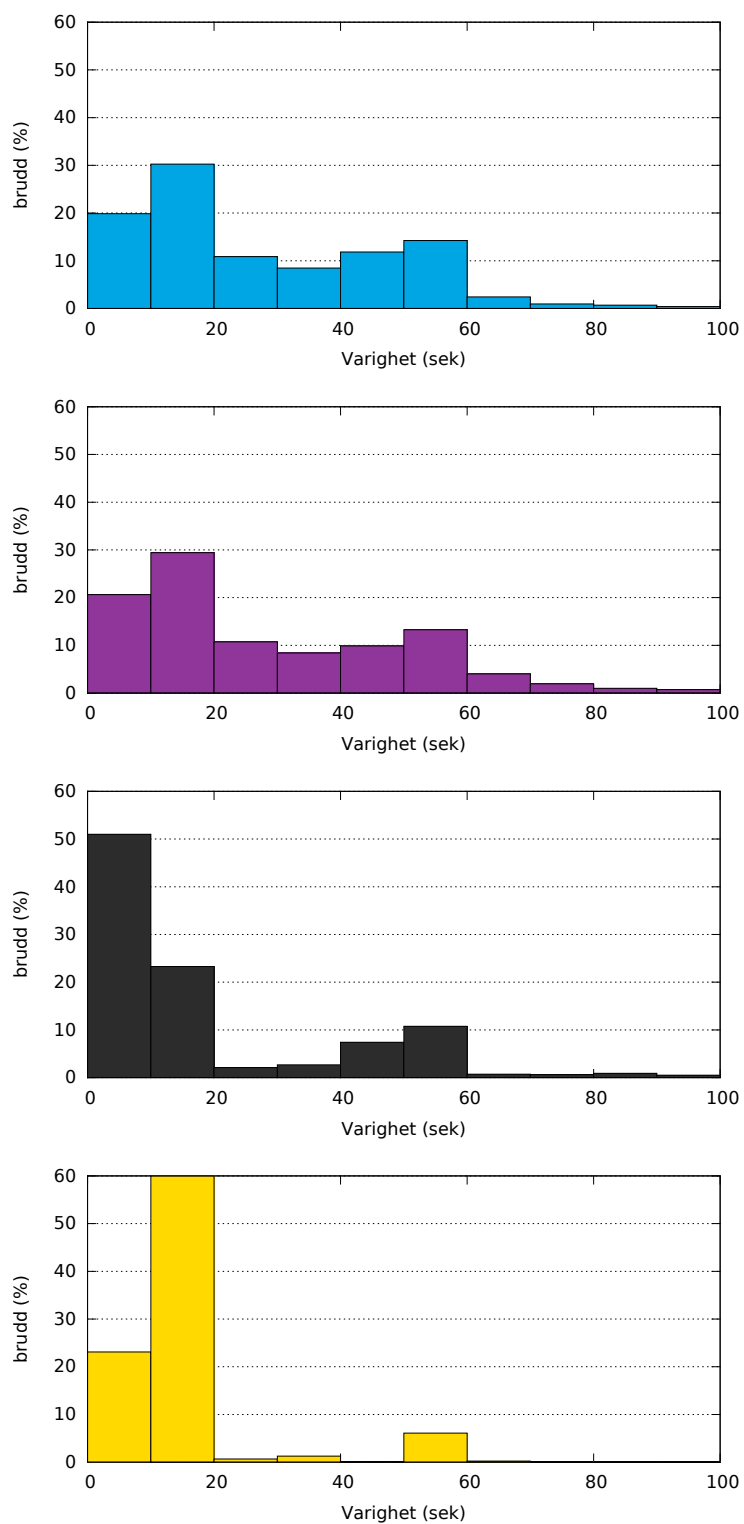
2.2 Varighet av brudd i tilkobling

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. Om lag halvparten av bruddene hos Telenor og Telia varer under 20 sekunder. Dette er i hovedsak der tilkoblingen (EPS bærereren) kan gjenopprettes nærmest umiddelbart etter et brudd. Andelen slike korte feil er høyere hos Ice - særlig hos Ice MBB hvor nær 85 % av bruddene varer under 20 sekunder. Disse hyppige bruddene fører til at stabiliteten og oppetiden er noe lavere hos Ice MBB enn i de andre nettene.

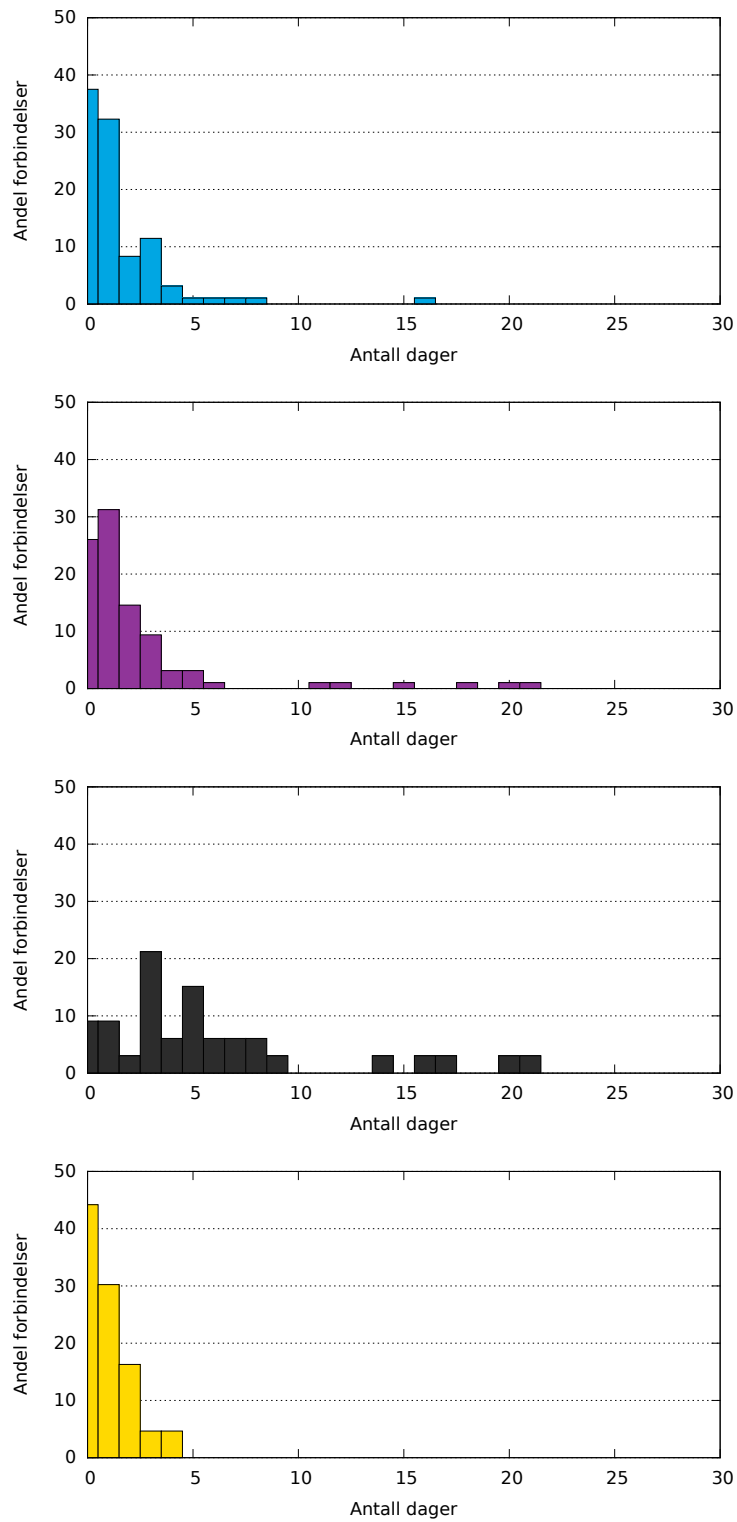
En del brudd har varighet fra 40 til 60 sekunder. For Telenor og Telia gjelder dette om lag 25 % av bruddene. Vi observerer at de fleste brudd i denne kategorien innebærer en full tilkoblingsprosedyre mellom målenoden og nettverket, inkludert SIM-autentisering med PIN-kode og etablering av forbindelsen. Denne prosedyren tar opp mot ett minutt. Det er vanskelig å se noe mønster i hva som utløser brudd som krever slik re-autentisering. I en del tilfeller ser det ut til å ha sammenheng med høy trafikk over forbindelsen.

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



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



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

opplever få slike dager. Henholdsvis 37,5 %, 26,0 %, 9,1 % og 44,2 % av forbindelsene hos Telenor, Telia, Ice mobil og Ice MBB opplevde ingen dager i 2018 med over ett minutt nedetid. 4,2 % (Telenor), 7,3 % (Telia), 36,4 % (Ice mobil) og 0,0 % (Ice MBB) av forbindelsene hadde mer enn 5 dager med vesentlig nedetid.

For å illustrere variasjoner i stabilitet mellom forbindelser og over tid, presenterer vi her en oversikt over nedetid for hver forbindelse hos Telenor, Telia og Ice mobil gjennom året. Resultatene beskrevet her illustrerer hvordan enkelte forbindelser har høyere nedetid enn andre, og hvordan nedetid er høyere på enkelte dager eller i enkelte perioder. Figur 2.4 og 2.5 viser nedetid for hver forbindelse og hver dag gjennom 2018. Hver linje tilsvarende en forbindelse, og fargen på linjen viser nedetiden den aktuelle dagen. For eksempel vil en forbindelse som opplevde en nedetid på 10 minutter (0,7 %) ha rød farge den dagen.

Hvite felter indikerer at vi ikke har målinger fra den aktuelle forbindelsen. Fra midt november 2018 til januar 2019 hadde vi et problem med infrastrukturen som skyldtes en feil i en programvareoppgradering. Dette medførte til at flere noder var utilgjengelige, og vi mangler derfor måledata fra denne perioden.

Dager der et stort antall forbindelser hos en operatør opplevde nedetid vil framstå som røde/oransje linjer vinkelrett på tidsaksen i figuren. Her oppsummerer vi noen observasjoner fra figur 2.4 og 2.5 :

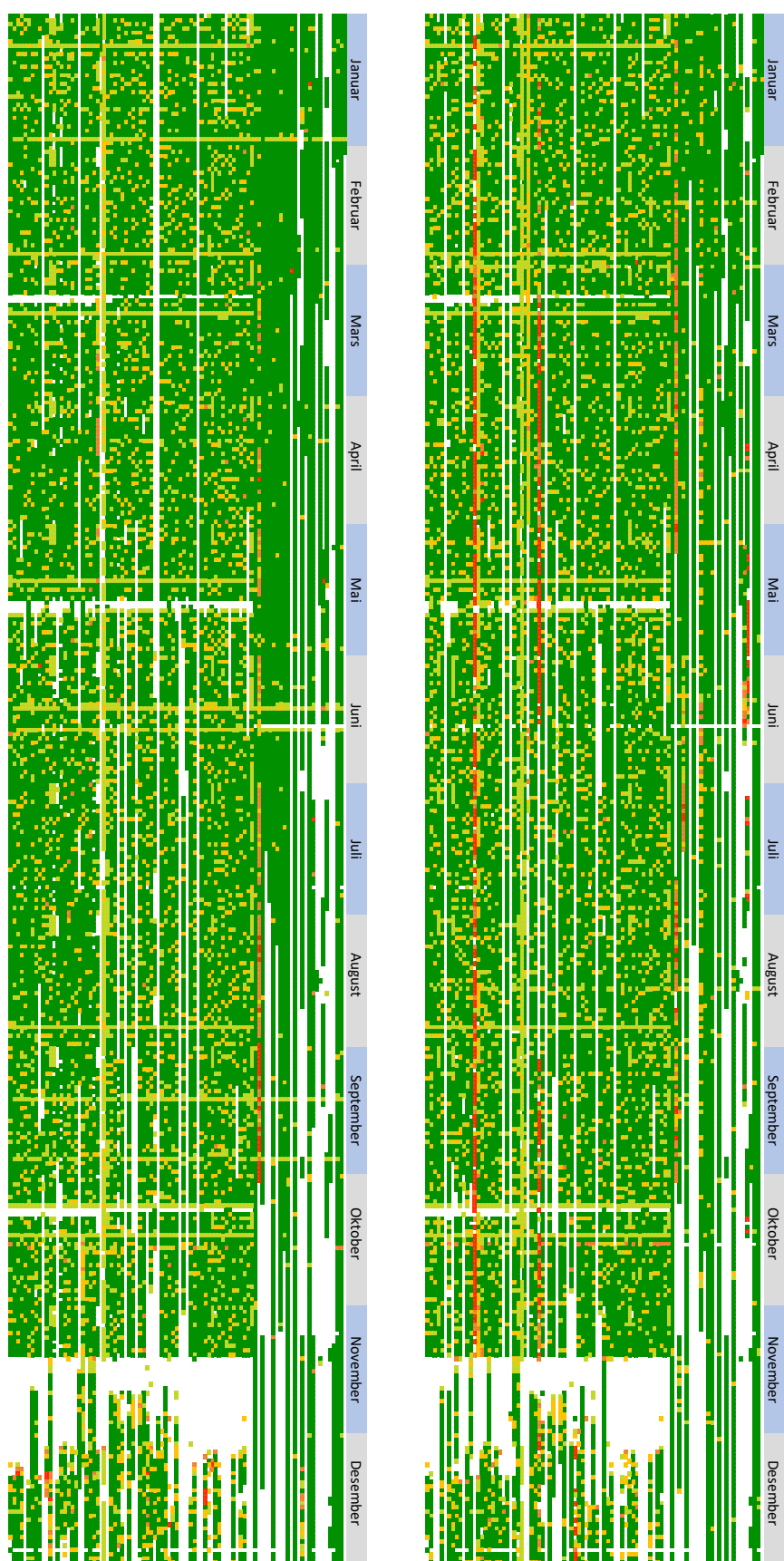
- Figurene inneholder en del falske hendelser der det ser ut til at et stort antall forbindelser opplever utilgjengelighet samtidig, men som i realiteten skyldes oppførselen til vår måleinfrastuktur. Måleprogramvaren inneholder en prosedyre som forsøker å kontakte Google med jevne mellomrom. Dersom et antall slike forsøk feiler antar programvaren at tilkoblingen har feilet, og re-etablerer forbindelsen. Sju ganger i løpet av 2018 opplevde vi at denne prosedyren re-etablerte alle forbindelser hos alle operatører, siden Google ikke kunne nås². Disse bruddene skyldtes trolig nedetid hos Google.
- Når vi ser bort fra disse anomaliene, var antall hendelser der mer enn halvparten av alle forbindelser i et nett mistet tilkoblingen samtidig er lave. Vi observerer fem slike hendelser hos Telenor, tre hos Telia og åtte hos Ice mobil i løpet av hele 2018.
- De fleste hendelsene som førte til brudd i tilkoblingen hos flertallet av forbindelser fant sted om natten, i typiske vedlikeholdsvinduer. Kun en hendelse hos Telia og en hendelse hos Ice mobil fant sted utenfor slike tidsrom.
- Bortsett fra anomaliene diskutert over, ser vi ingen tilfeller der flertallet av forbindelser hos mer enn en operatør går ned samtidig.

2.4 Utvikling over tid

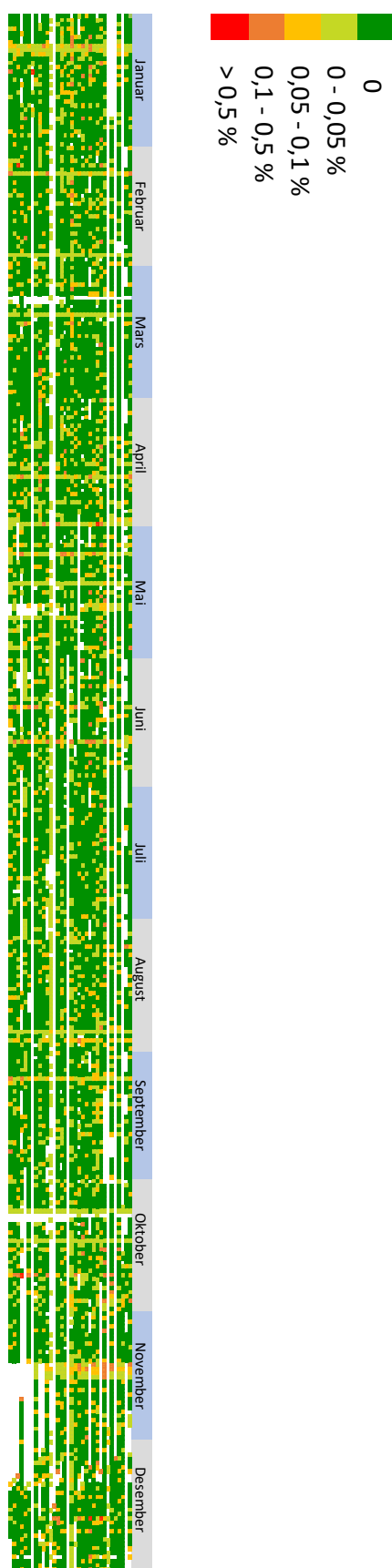
Figur 2.6 viser utviklingen i nedetid fra 2013 til 2018 for Telenor og Telia. Figuren er basert på måledata fra andre halvår hvert år. Grafene kan sammenlignes med Figur 2.1. Figuren viser hvordan grafen 'reiser seg' og beveger seg mot venstre etter hvert som tiden går, noe som betyr at en større andel av forbindelsene får en mindre nedetid. Nedetiden i 2018 var om lag som i 2017 for både Telenor og Telia.

For Telenor og Telia var andelen forbindelser med mer enn 1 minutt nedetid per dag henholdsvis 3 % og 5 % i 2018. Som vist i figur 2.7, er denne andelen marginalt høyere i 2018 enn i 2017 for Telia, og marginalt lavere for Telenor.

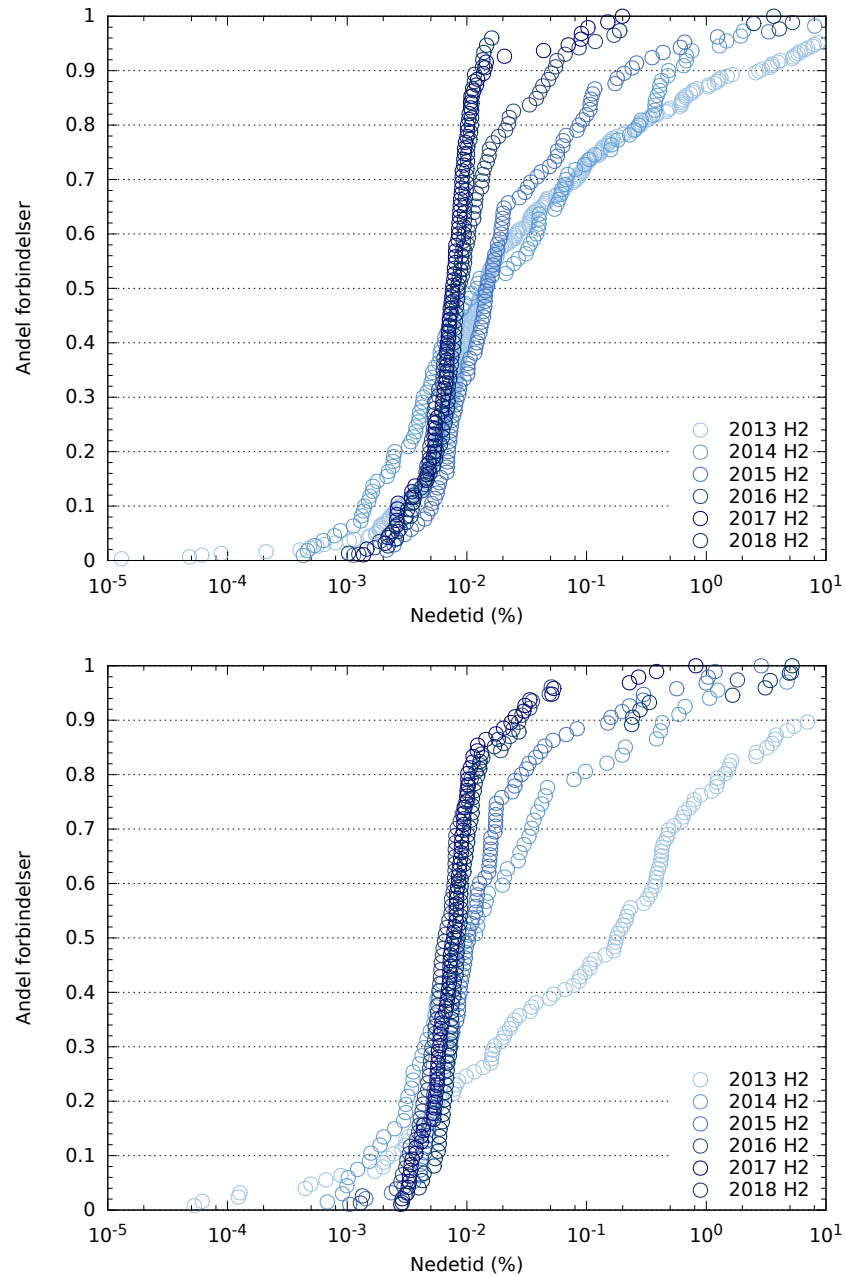
²9. januar, 26. februar, 12. mars, 14. mai, 27. august, 8. oktober og 15. oktober.



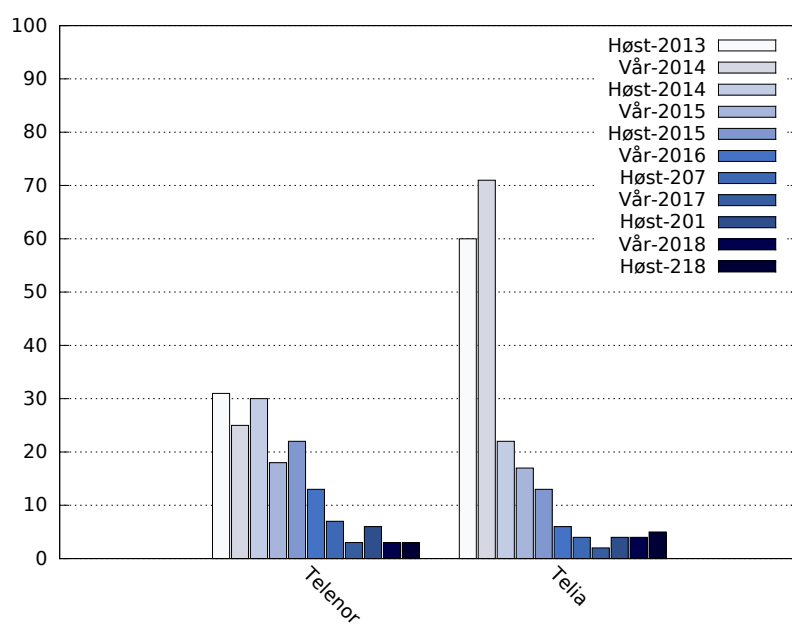
Figur 2.4: Oversikt over nedetid gjennom året for hver forbindelse. Telenor (venstre) og Telia (høyre).



Figur 2.5: Oversikt over nedetid gjennom året for hver forbindelse, Ice mobil.



Figur 2.6: Utvikling i nedetid hos Telenor (topp) og Telia (bunn) fra 2013 til 2018.



Figur 2.7: Andel forbindelser med gjennomsnittlig nedetid > 1 minutt per dag.

3. Stabilitet i dataplanet

I dette kapitlet ser vi på mobilnettenes 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.

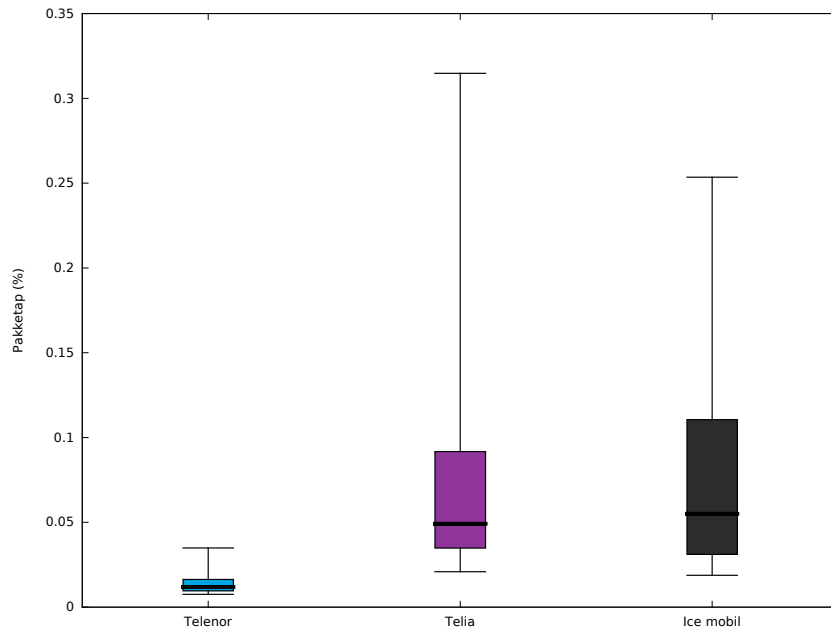
Måletrafikken vi baserer vår analyse på består av små (20 Byte) UDP-pakker som sendes til en sentral server hvert sekund. Serveren sender den samme pakken tilbake umiddelbart. For hver pakke registrerer vi hvor lang tid det tar før svarpakken kommer tilbake. Dersom ingen svarpakke kommer i retur innen 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 gjennomsnittlig tapsrate for alle forbindelser. 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 og Ice mobil. Vi har ikke inkludert resultater for Ice MBB i denne analysen, på grunn av utfordringer med modemer i deler av året. Den tykke svarte horisontale 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.

Generelt observerer vi lavt pakketap i de fleste forbindelsene, men det er relativt store forskjeller mellom operatørene. Telenor har som i fjor det laveste pakketapet. Pakketapet hos Telenor er



Figur 3.1: Pakketap.

Operatør	10 persentil	Median	90 persentil	Gjennomsnitt
Telenor	0,01%	0,01%	0,03%	0,02%
Telia	0,02%	0,05%	0,17%	0,10%
Ice mobil	0,02%	0,06%	0,23%	0,10%

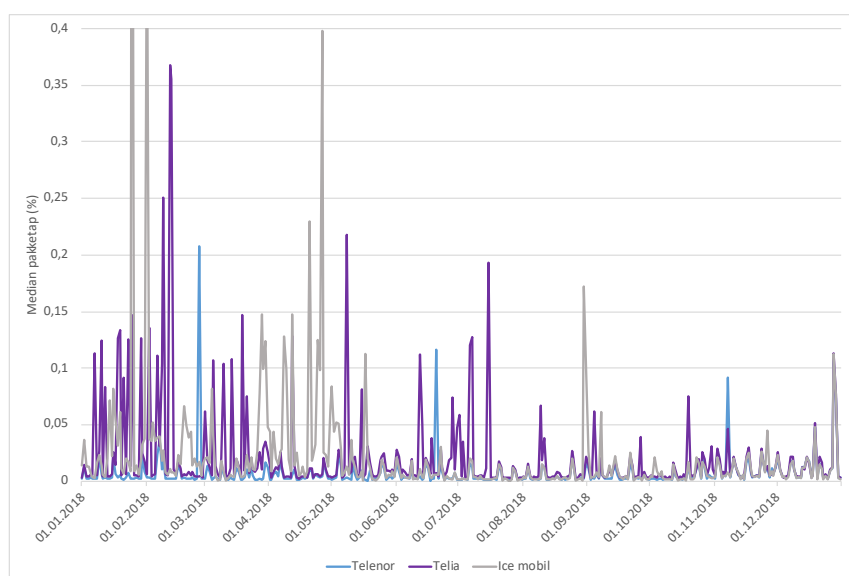
Tabell 3.1: Pakketap

redusert videre siden i fjor, fra allerede lave nivåer. Median pakketap er 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 har et pakketap om lag på samme nivå som i fjor, med et median pakketap på 0,05 %. Tre av fire Telia-forbindelser har et pakketap under 0,1 %, men ingen har et pakketap under 0,01%. Vi diskuterer årsakene til denne forskjellen under. Ice mobil er om lag på samme nivå som Telia med et median pakketap på 0,06 %. Nær tre av fire Ice mobil-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 mindre i 2018, siden nær alle forbindelsene går over 4G.

Pakketapet varierer relativt mye gjennom året, som vist i 3.2. Dette gjelder særlig for Telia og Ice mobil. Telia hadde særlig høyt pakketap i første kvartal, i to perioder i januar-februar og mars. Etter dette ble pakketapet redusert til et mer normalt nivå, med unntak av en kortere periode i månedsskifte juni-juli. Ice mobil opplevde også perioder med klart høyere pakketap i januar-februar og april-mai. For Telenor observerer vi ikke tilsvarende perioder, men det var enkeltdager med unormalt høyt pakketap. Disse episodene diskuteres videre under.

Figur 3.3 og 3.4 viser hvordan pakketapet utviklet seg for hver enkelt forbindelse gjennom året. Hver linje i figurene tilsvarer en forbindelse, og fargen til hvert punkt indikerer gjennomsnittlig pakketap for forbindelsen en gitt dag. I denne beregningen har vi fjernet perioder der en forbindelse opplever 100 % pakketap i mer enn 15 minutter, siden slike perioder kan skyldes problemer knyttet



Figur 3.2: Median pakketap per dag gjennom 2018.

til måleinfrastrukturen.

Først observerer vi at Figur 3.3 -3.4 bekrefter punktene diskutert over. Telenor har generelt lavere pakketap enn de andre operatørene, og har derfor flere grønne felter i figuren. Telenor opplevde få episoder med økt pakketap for mange forbindelser. Den sjuende februar opplevde halvparten av forbindelsene i Telenors nett 6 % pakketap i en kort periode. Den sjuende november opplevde om lag to tredjedeler av forbindelsene 25 % pakketap i en kort periode.

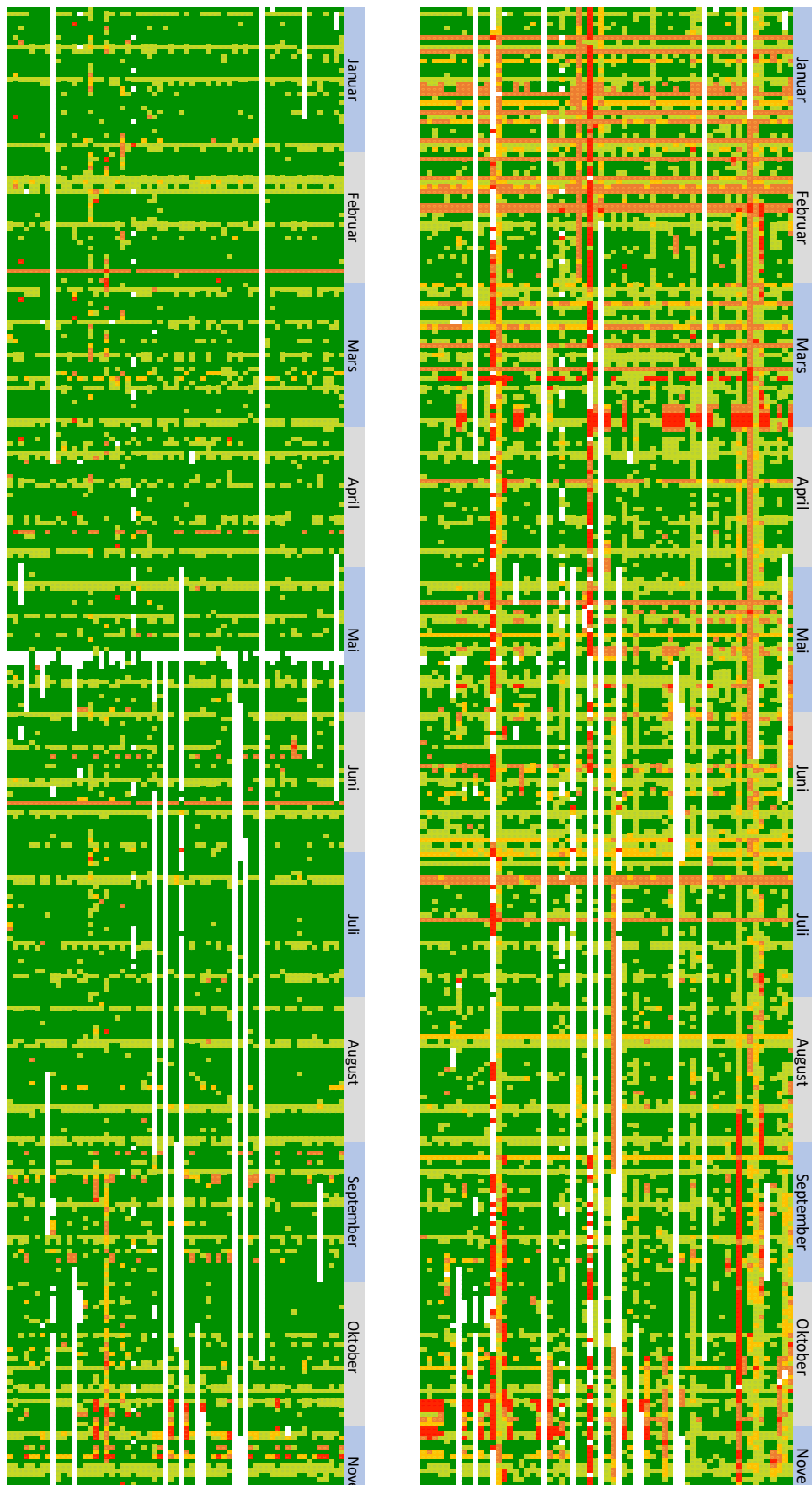
Telia har høyere pakketap enkelte dager i januar, februar og mars. Vi ser at på disse dagene opplever alle eller nesten alle forbindelsene høyere pakketap enn normalt. I dialog med Telia har vi fått bekreftet at årsaken til de fleste av disse hendelsene var problemer med en ruter på grensesnittet mot NIX som bærer trafikk mellom Telia og Uninett. Merk at trafikk som ikke utveksles over NIX ikke vil påvirkes av disse problemene¹. Fra slutten av oktober til medio november opplevde om lag 20 % av forbindelsene i Telias nett økt pakketap. Telia opplyser av årsaken til denne økningen var feil på en transportforbindelse leid fra en transmisjonsleverandør.

Både Telenor og Telia opplevde økt pakketap under fotball-VM. For eksempel hadde nesten alle forbindelser hos begge operatører høyere pakketap under kvartfinalene den sjettede og sjuende juli. Telia opplevde også høyere pakketap under finalen den femtende juli.

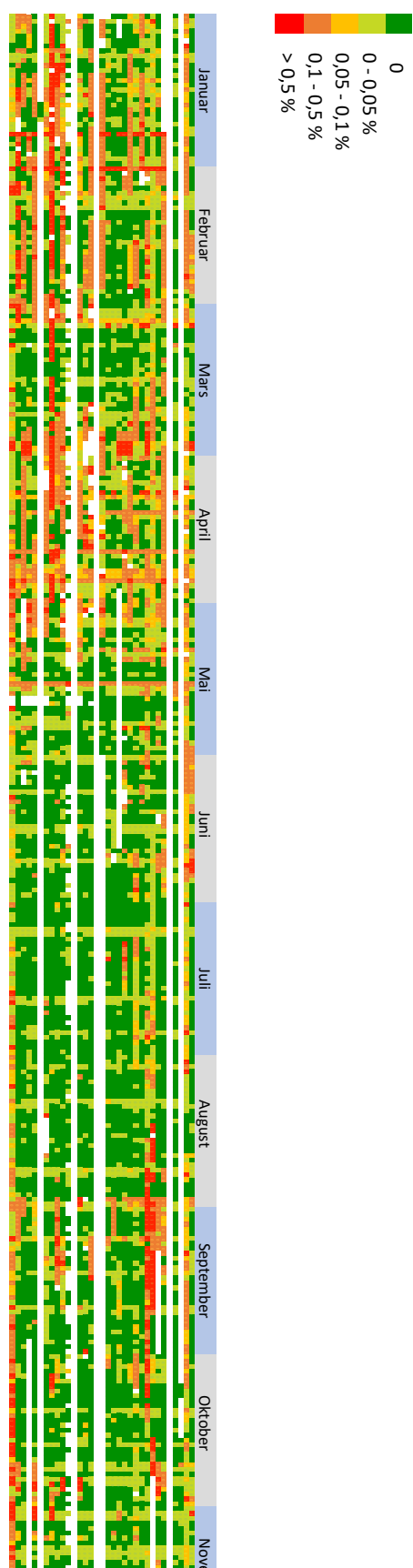
Figur 3.4 viser igjen at pakketapet hos Ice var høyere i første halvdel av 2018. Også hos Ice observerer vi enkelte dager der alle eller nesten alle forbindelser har høyt pakketap. Vi ser imidlertid også perioder der kun enkelte forbindelser opplever unormale tapsrater, noe som indikerer at årsaken er knyttet til enkelte basestasjoner.

Hos alle operatørene, men særlig hos Telia, kan vi observere enkeltforbindelser som har høyere pakketap gjennom hele eller deler av året. Disse vil framstå som røde/oransje linjer langs tidsaksen i figuren. Årsaken til slikt pakketap kan være problemer med dekning eller lokal metning på enkelte basestasjoner.

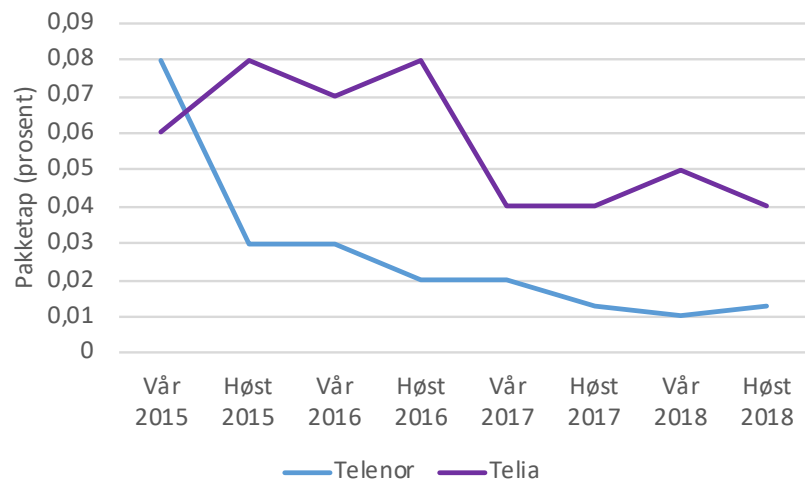
¹Uninett er Simulas internettleverandør, og all måletrafikk går derfor gjennom Uninett. Telia opplyser at under 5 % av deres mobiltrafikk rutes gjennom NIX.



Figur 3.3: Oversikt over pakketap gjennom året for hver forbindelse. Telenor (venstre) og Telia (høyre).



Figur 3.4: Oversikt over pakketap gjennom året for hver forbindelse, Ice mobil.



Figur 3.5: Utvikling i median tapsrate 2015 - 2018.

3.2 Utvikling over tid

Figur 3.5 viser median pakketap hvert halvår de fire siste årene, for Telenor og Telia. I det meste av denne perioden har Telia hatt noe høyere pakketap enn Telenor. Pakketapet har vist en nedadgående trend for begge operatører, selv om reduksjonen har vært sterkest for Telenor. Mye av reduksjonen kan tilskrives overgangen fra 3G til 4G. Vi har ikke sammenlignbare data for Ice i denne perioden.



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 kun resultater knyttet til hastighet, siden disse er nærmest knyttet til mobilnettene egenskaper.

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 målnoder er plassert innendørs. Vi har ikke kontroll over lokale forhold som hvor i bygningen målnodene er plassert. Dekningsforholdene vil variere noe fra node til node, men alle målnodene har god dekning i henhold til operatørens dekningskart. Vi mener at antallet målnoder og den geografiske spredningen gjør at resultatene gir et representativt bilde av ytelsen som kan forventes i mobilnettene.

Målnodene 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 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 åpen klient som lar oss kjøre målinger fra våre målnoder mot Ooklas [speedtest.net](https://github.com/sivel/speedtest-cli)¹. I motsetning til de andre målingene presentert i denne rapporten kjøres ikke hastighetsmålingene mot vår egen måleserver, men mot måleservere knyttet til Ooklas infrastruktur. Klienten velger selv den geografisk nærmeste tilgjengelige måleserveren. Siden mobilnett har en sentralisert arkitektur der all trafikk må gjennom sentralt plasserte kjernekomponenter, geolokaliserer vi alle våre målnoder i Oslo. Etter å ha valgt måleserver, gjør testen en serie nedlastinger

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

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 mobil 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 nasjonal gjesting i Telias nett. For Ice MBB benytter forbindelsene alle frekvenser i Ice sitt nett, inkludert 450 MHz-båndet.

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

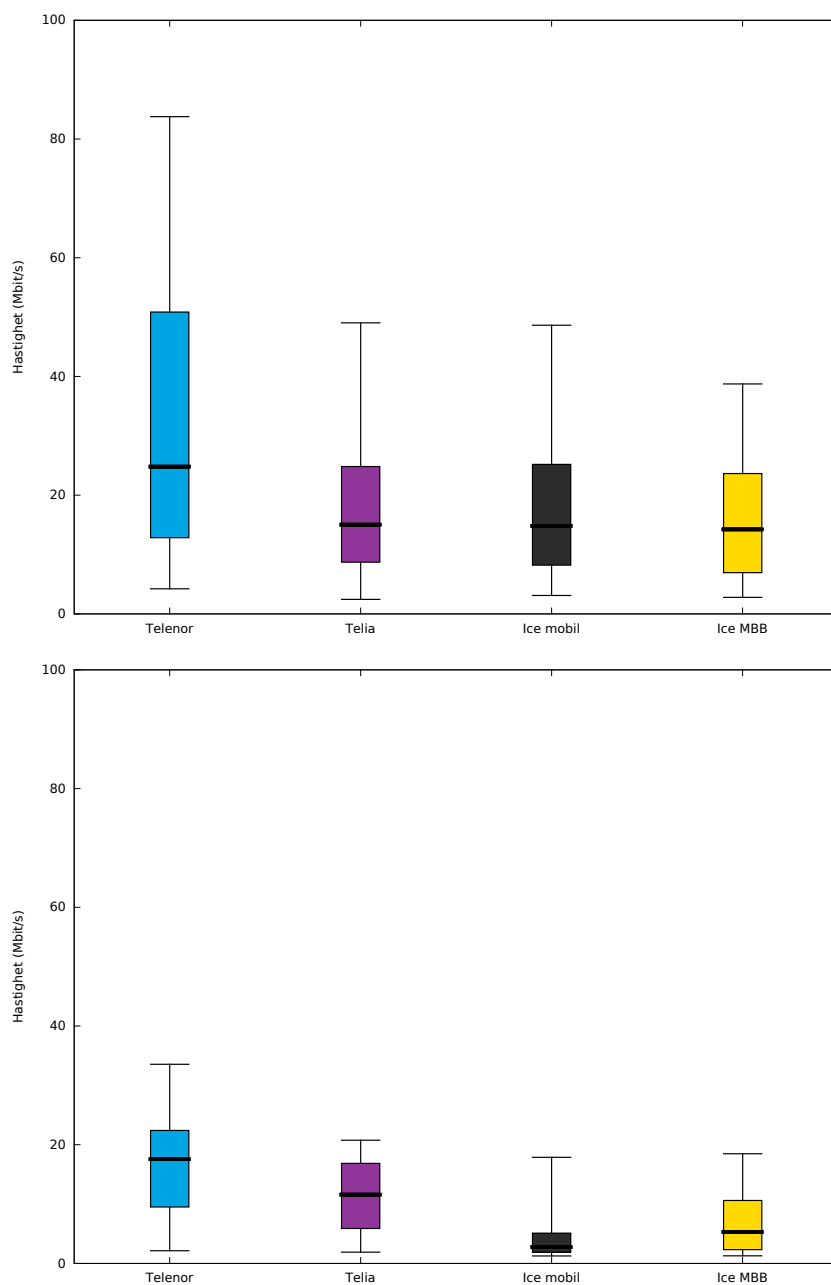
Årets målinger viser en tydeligere forskjell i hastighet mellom nettene enn tidligere års målinger. Telenor oppnår generelt høyere hastigheter enn Telia og Ice både nedstrøms og oppstrøms. Median nedlastingshastighet er 24,8 Mbit/s i Telenors nett, 15,0 Mbit/s i Telias nett, 14,8 Mbit/s i Ice mobil sitt nett og 14,2 Mbit/s i Ice MBB. 81 % av målingene i Telenors nett viser en nedlastingshastighet over 10 Mbit/s. Tilsvarende tall er 70 % for Telia, 68 % for Ice mobil og 62 % for Ice MBB. 26 % av målingene i Telenors nett viser en nedlastingshastighet over 50 Mbit/s. Tilsvarende tall er 5 % for Telia, 4 % for Ice mobil og 1 % for Ice MBB.

Median opplastingshastighet er 17,5 Mbit/s i Telenors nett, 11,6 Mbit/s i Telias nett, 2,6 Mbit/s i Ice mobil og 5,3 Mbit/s i Ice MBB. 74 % av målingene i Telenors nett viser en opplastingshastighet over 10 Mbit/s. Tilsvarende tall er 56 % for Telia og 17 % for Ice MBB.

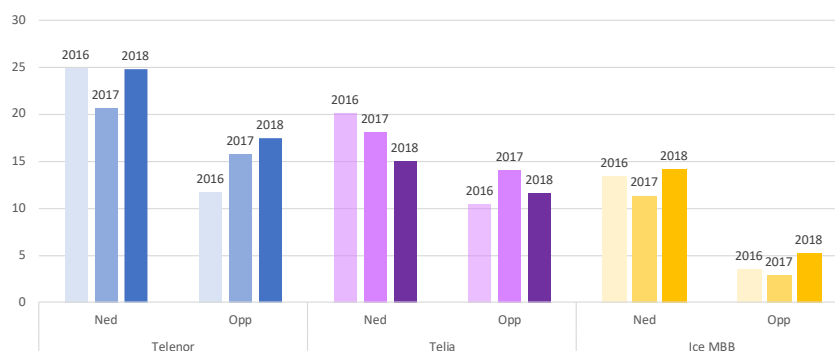
Figur 4.2 viser utviklingen i median ned- og opplastingshastighet fra 2016 til 2018. Merk at figuren må tolkes med noe varsomhet, siden målepunktene ikke er nøyaktig de samme hvert år. Vi har ikke historiske data for Ice mobil. Figuren viser ingen klar utvikling i målte hastigheter over de siste tre årene. For Telenor og Ice MBB var median nedlastingshastighet i 2018 tilbake på samme nivå som i 2016, etter å ha vært noe lavere i 2017. For Telia fortsetter nedgangen i målte hastigheter fra 2017 til 2018. Median opplastingshastighet var noe høyere i 2018 enn i 2017 for Telenor og Ice MBB, mens den var noe lavere for Telia. Variasjonene i opplevd hastighet kan trolig kobles til trafikkutviklingen i nettene. Den målte nedlastingshastigheten for Ice mobil er overraskende lav. Disse forbindelsene benytter enten Ice eller Telias mobilnett, og ytelsen kan forventes å være sammenlignbar med disse nettene. Vi observerer at Ice mobil en del ganger blir hengende på 3G i Telias nett. Median-forbindelsen til Ice mobil tilbringer 14 % av tiden på 3G. Dette kan skyldes samspillet mellom modemmet i målenodene og konfigurasjoner for nasjonal gjesting i nettene, og kan trolig forklare noe av den lave hastigheten.

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 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



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



Figur 4.2: Utvikling i ned- og opplastingshastighet 2016-2018.

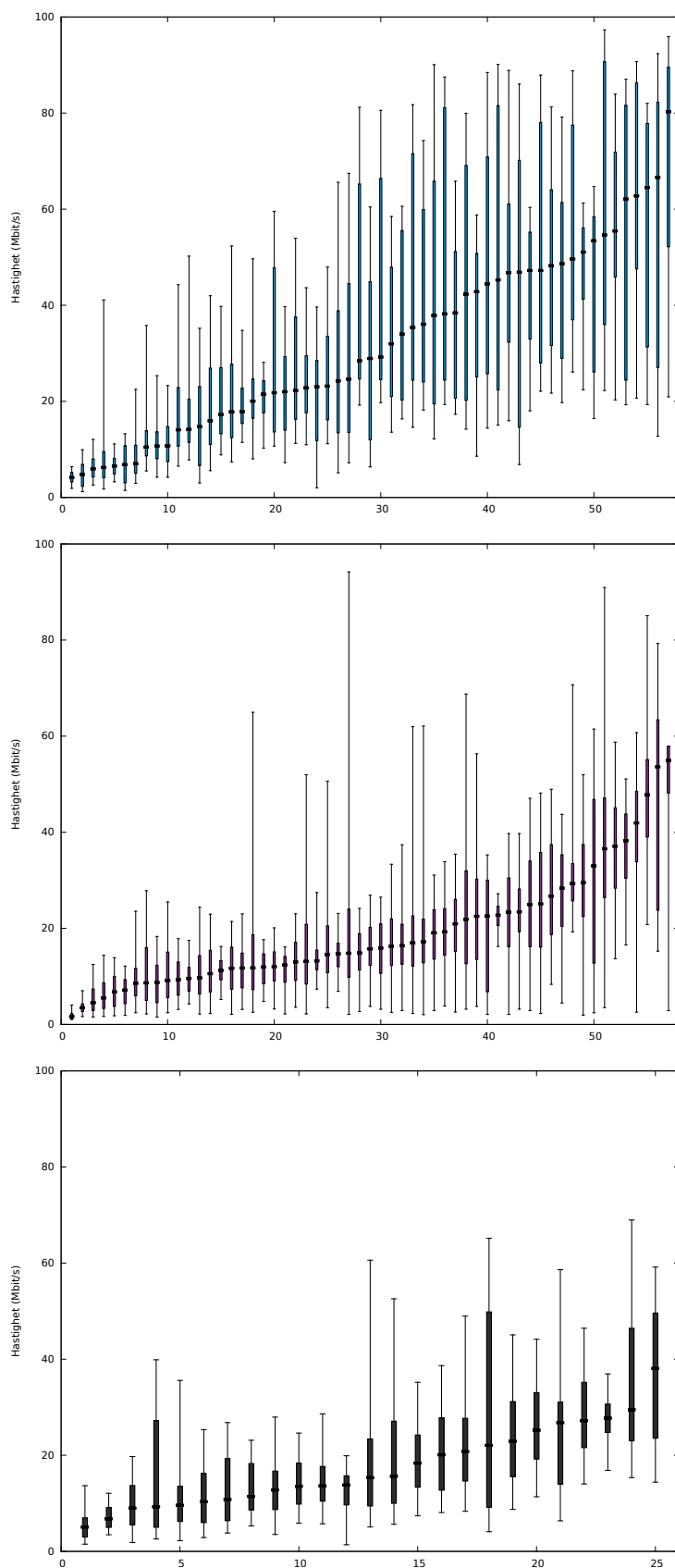
høyere variasjon i nedlastingshastighet enn Ice og Telia. Mens 16 % av forbindelsene hos Ice og 7 % hos Telia har en interkvartilavstand som er høyere en medianen, gjelder dette 32 % av forbindelsene hos Telenor.

4.3 Variasjon gjennom året

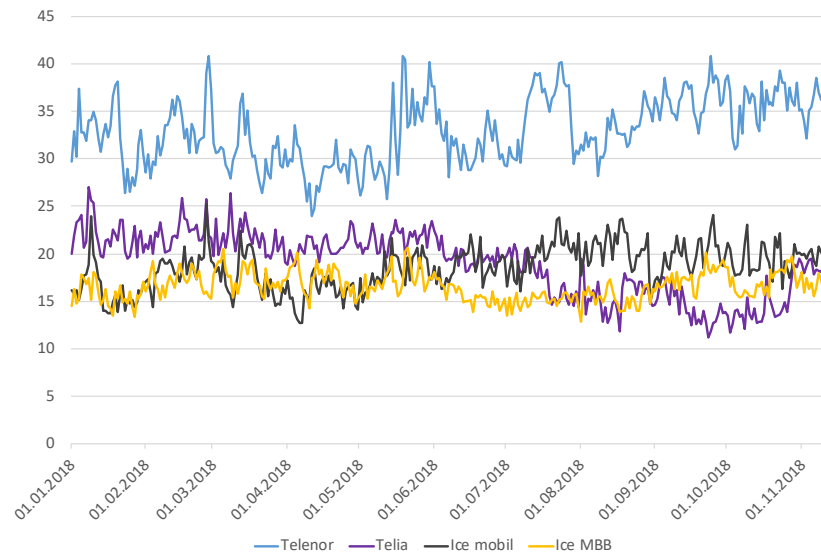
Figur 4.4 viser hvordan median nedlastingshastighet utvikler seg gjennom året for hver operatør. Hvert punkt i grafen viser median hastighet over alle målingene som ble foretatt for det aktuelle nettet gjennom ett døgn. Utviklingen i nedlastingshastighet er ulik i de ulike nettene. Mens Telenor viser en positiv utvikling fra første halvår til andre halvår, ser vi en klar negativ utvikling for Telia. Særlig ser vi en reduksjon i nedlastingshastighet for Telia fra rundt første juni, og en ytterligere reduksjon fra midten av juli. 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 pakketap vil også påvirke opplevd nedlastingshastighet.

Figur 4.5 viser et eksempel på målte nedlastingshastigheter fra en enkelt forbindelse i Telias nett. Grafen viser høyeste og laveste hastighet oppnådd hver dag gjennom året fra en adresse i Oslo. Hastighetene varierer kraftig fra dag til dag, og mellom målinger foretatt samme dag. I enkelte målinger oppnår målenoden hastigheter på over 50 Mbit/s, mens flertallet av målinger ligger mellom 10 og 20 Mbit/s. Ved nærmere analyse av målingene, ser vi at målenoden veksler mellom å koble seg til forskjellige celler. Hastigheten som oppnås er sterkt avhengig av hvilken celle målenoden er knyttet til. Gjennomsnittlig hastighet for de fire cellene målenoden var knyttet til i første kvartal 2018 varierte fra 7,7 Mbit/s til 51,7 Mbit/s. Vi ser også klare variasjoner gjennom døgnet. Gjennomsnittlig hastighet målt kl 02:00 var 23,2 Mbit/s, mens tilsvarende kl 14:00 var 16,6 Mbit/s. Fjorårets rapport behandlet variasjoner i hastighet gjennom døgnet i mer detalj.

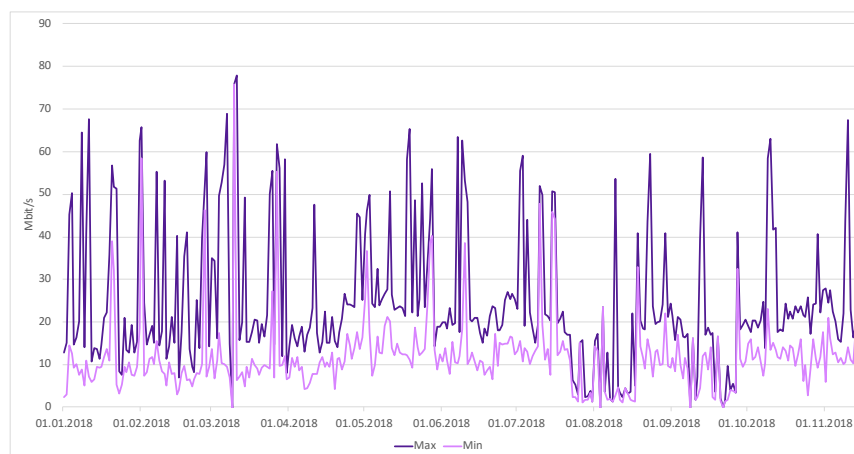
Disse observasjonene viser hvordan styring av hvilken celle en brukerterminal knytter seg til er svært avgjørende for opplevd hastighet. De store variasjonene kan tyde på at det er rom for å forbedre mekanismene for cellevalg.



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 2018.



Figur 4.5: Eksempel på variasjon i nedlastingshastighet for Telia-forbindelse fra Østerli Terrasse i Oslo.



5. Avhengigheter mellom ulike nett

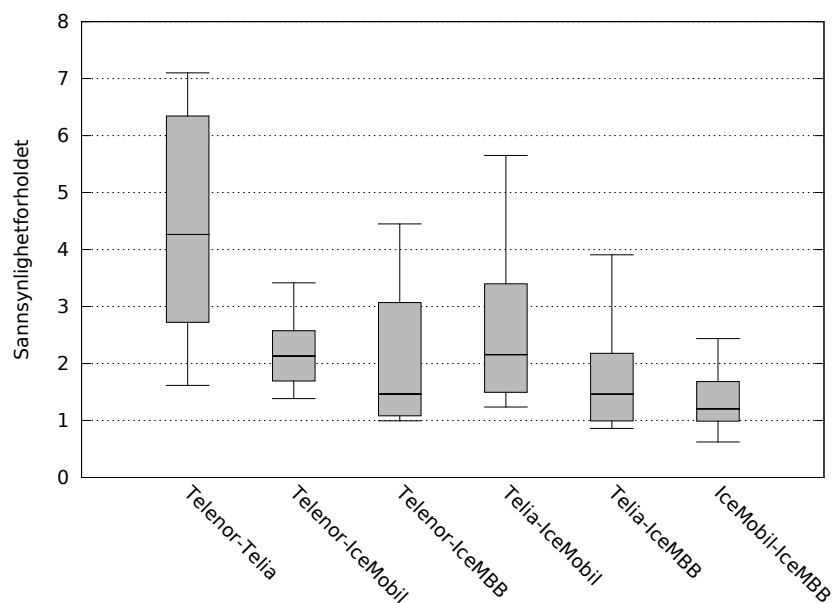
I dette kapittelet ser vi på avhengigheter mellom de ulike nettverkene. Målet er å undersøke hvor uavhengige de ulike mobilnettene er med tanke på stabilitet og ytelse. Ved å se på korrelasjoner i feilmønstre mellom operatører, kan vi også si noe om potensialet for øket robusthet gjennom å koble seg til flere operatører samtidig. Dersom forbindelser fra de ulike operatører feiler stort sett samtidig sett fra en målenode, vil det være lite å vinne på slik *multihoming*.

For å undersøke avhengighet mellom ulike nett, ser vi på par av forbindelser fra målenoder på samme lokasjon. Vi sammenligner tidsseriene for pakketap og endring av basestasjon (handover) for disse forbindelsene. Som diskutert i kapittel 2, ser vi få brudd i tilkoblingen. Antall samtidige brudd for flere forbindelser på samme lokasjon er så lavt at vi ikke presenterer statistikk for disse. Generelt kan vi si at slike brudd er svært sjeldne, og vi observerer bare noen få tilfeller i våre målinger. Dette er positivt med tanke på potensialet for økt robusthet gjennom bruk av flere parallelle forbindelser.

5.1 Korrelasjon i pakketap

For å beregne korrelasjon i pakketap tar vi utgangspunkt i de samme 5-minutters intervallene beskrevet i kapittel 3. La $P(A)$ betegne den (empiriske) sannsynligheten for at forbindelse A opplever pakketap i et gitt 5-minutters intervall, og $P(B)$ være det samme for en annen forbindelse B fra den samme lokasjonen. Fra målingene beregner vi også den betingede sannsynligheten $P(A|B)$ for at B opplever pakketap gitt at A gjør det. Vi sammenligner den betingede sannsynligheten $P(A|B)$ med den ubetingede sannsynligheten $P(A)$ ved å beregne sannsynlighetsforholdet $R = P(A|B)/P(A)$. Dette forholdet sier noe om hvor mye sannsynligheten for pakketap i en forbindelse øker (eller minker) dersom vi vet at en annen forbindelse fra samme målenode opplever pakketap. Dersom R er nær 1, er det liten sammenheng i pakketap mellom de to forbindelsene. Dersom R er høy, er avhengigheten høy. Merk at fra Bayes setning har vi at $P(A|B)/P(A) = P(B|A)/P(B)$, slik at avhengigheten er den samme begge veier.

Figur 5.1 viser fordelingen av R for ulike par av nettverk på samme lokasjon. Som grafer brukt tidligere i denne rapporten viser figuren 25-, 50- (median) og 75-persentilene for R over alle par av forbindelser. De lengste vertikale linjene viser henholdsvis 10 og 90 persentilene. Generelt observerer vi relativt lave verdier av R , mellom 1 og 6. Dette viser at sammenhengen mellom



Figur 5.1: Korrelasjon i pakketap mellom par av forbindelser fra ulike operatører.

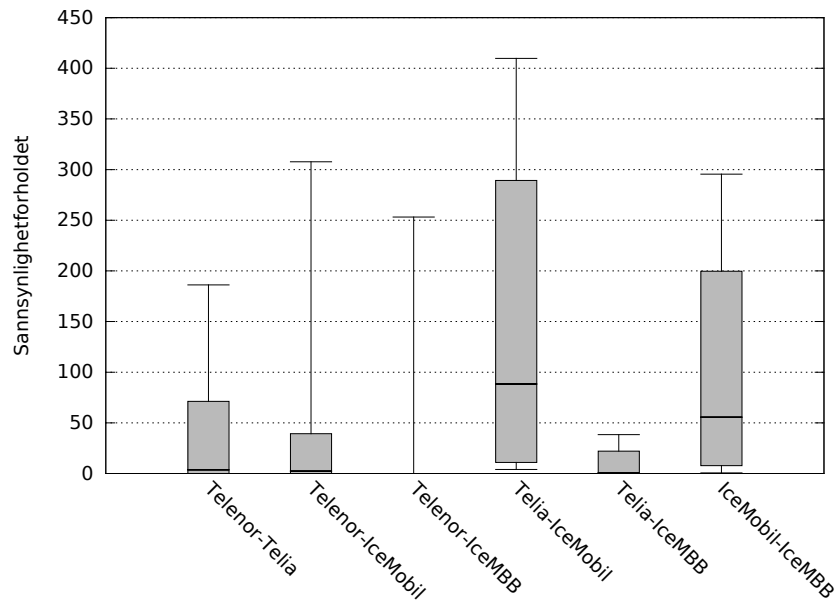
pakketap for forbindelser fra ulike operatører på samme lokasjon er relativt lav. Sannsynligheten for at forbindelse A opplever pakketap i et 5-minutters intervall er 1-6 ganger høyere enn normalt dersom vi vet at en forbindelse B fra en annen operatør på samme lokasjon opplever pakketap i det gitte tidsintervallet. Vi ser at korrelasjonen er høyest mellom Telenor og Telia. Dette kan trolig skyldes likheter i trafikkmønster mellom disse nettene. Merk at i de aller fleste 5-minutters intervaller med pakketap er det bare en eller to pakker som går tapt. Slike sporadiske pakketap forekommer oftere i perioder med høy trafikkbetasting i nettet, når nettet opererer nærmere sin kapasitet. Korrelasjonen mellom Telenor og Telia kan tyde på at disse nettene har en høyere trafikkbetasting enn Ice mobil og Ice MBB.

I tillegg til sporadiske pakketap på grunn av høy trafikkbetasting finnes det også et mindre antall 5-minutters intervaller med vesentlig pakketap. Figur 5.2 viser sannsynlighetsforholdet R når vi bare ser på intervaller med minst 3 % pakketap. Vi ser at for denne typen pakketap er R mye høyere. For kombinasjonen Ice mobil og Ice MBB ser vi en medianverdi for R på over 50, og for kombinasjonen Telia og Ice mobil er medianverdien over 90. Dette betyr at dersom vi opplever vesentlig pakketap på en Telia-forbindelse, så er det nesten 100 ganger mer sannsynlig enn vanlig at vi også opplever vesentlig pakketap på en Ice mobil-forbindelse fra samme lokasjon. Dette er ikke uventet: Ice mobil benytter Telias radioaksessnett der Ice ikke har bygget egen dekning. Forstyrrelser i radioaksessnettet som gir vesentlig pakketap vil derfor ofte ramme begge operatører. I motsatt ende av spekteret har vi kombinasjonen Telenor og Ice MBB. Her virker det å være svært liten sammenheng i sannsynligheten for vesentlig pakketap.

5.2 Korrelasjon i bytte av celle

Resultatene vi presenterer i dette kapitlet er basert på målinger fra stasjonære målenoder. Disse vil ofte ha dekning fra flere ulike celler i mobilnettene. I blant observerer vi at forbindelser gjør såkalte handover, det vil si at de flyttes over fra en celle til en annen. Slike handover kan ofte føre til endringer i stabilitet eller ytelse, som diskutert i forbindelse med hastighetsmålinger i kapittel 4.1.

Figur 5.3 viser sannsynlighetsforholdet R for at to ulike forbindelser i to ulike nettverk skal gjøre

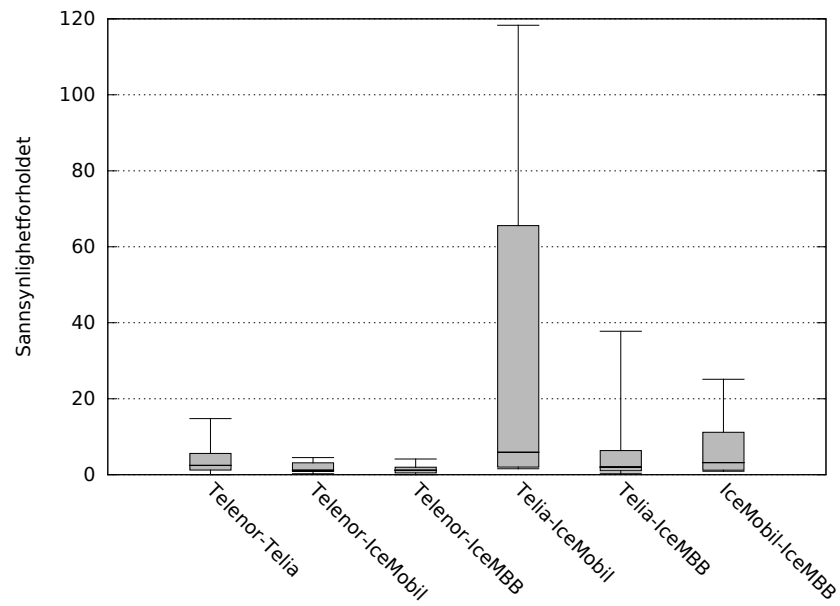


Figur 5.2: Korrelasjon i pakketap over 3 % mellom par av forbindelser fra ulike operatører.

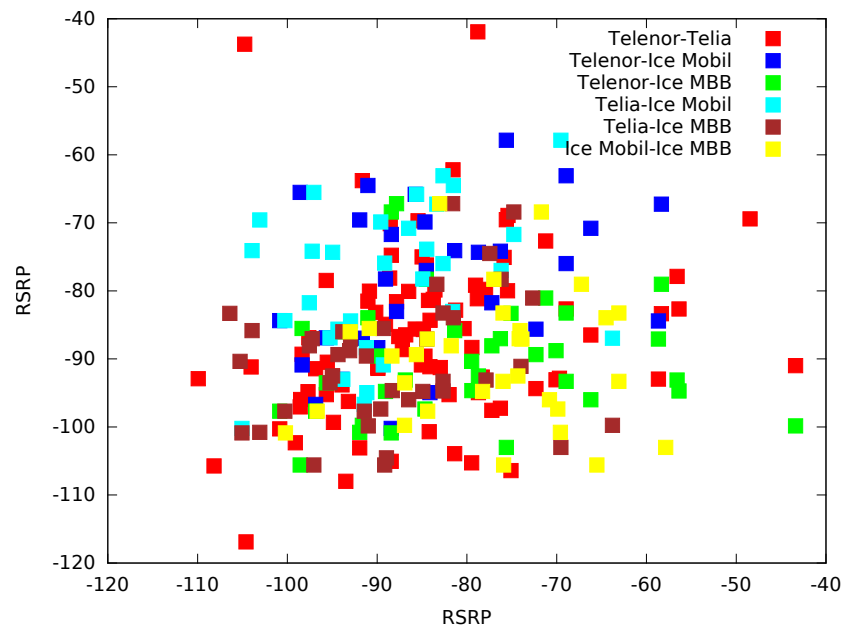
en bytte celle i samme 5-minutters intervall. Ikke overraskende er igjen R størst for kombinasjonen Telia og Ice mobil. Vi observerer også noen grad av korrelasjon mellom Ice mobil og Ice MBB, mellom Telia og Ice MBB og mellom Telenor og Telia. En mulig forklaring å korrelasjon i cellebytte er feil i felles transmisjonslinjer.

5.3 Korrelasjon i signalstyrke

Til sist ser vi på korrelasjon i signalstyrke mellom forbindelser fra ulike operatører på samme lokasjon. Signalstyrke måles her ved såkalt Reference signals Received Power (RSRP). Vi viser her korrelasjon i form av et såkalt scatterplot i figur 5.4. Hvert punkt i figuren tilsvarer et par av forbindelser, og hver kombinasjon av to operatører er angitt ved en fargekode. Dersom det var stor korrelasjon i signalstyrke mellom ulike operatører på et gitt punkt, ville vi forvente at de fleste forbindelsespårene ville ligge langs en akse fra nedre venstre til øvre høyre hjørne. Vi observerer imidlertid ikke et slikt mønster i vesentlig grad. Dette tyder på at det er relativt store lokale forskjeller i signalstyrke i de ulike nettene.



Figur 5.3: Korrelasjon i bytte av celle



Figur 5.4: Korrelasjon i signalstyrke



6. Mobiltjenester på tog

I dette kapitlet presenterer vi målinger av mobildekning målt om bord på tog. Målingene omfatter Telenor og Telia, og er gjennomført ved å plassere Nornet målenoder på 15 tog i samarbeid med Norske tog. Togene er av forskjellige typer, og trafikkerer både langdistanse og intercity-strekninger. Resultatene som presenteres her er basert på målinger foretatt gjennom hele 2018.

Vi presenterer i år som i fjor målinger fra tog som har installert signalforsterkere om bord (se faktaboks). For noen strekninger har vi dermed mulighet til å sammenligne dekning og ytelse med og uten signalforsterkere.

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.

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.

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 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 ekstern 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.

6.1 Mobildekning på tog

Mobiloperatørene bygger ut sine 4G-nett i høyt tempo, og en økende del av jernbanestrekningene er dekket av 4G. Denne dekningen har tidligere stort sett vært konsentrert rundt byer og andre sentrale områder, men er nå i ferd med å omfatte også mer øde områder. 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.

Figur 6.1 viser den typiske dekningen for Telenor og Telia på alle banestrekninger vi har målinger fra. Figuren illustrerer at Telenor har 4G-dekning langs det meste av jernbanenettet i Sør-Norge, selv om det fremdeles finnes enkelte huller uten dekning. Vi ser også at det er svært få steder der 3G eller 2G er den dominerende teknologien, noe som tyder på at Telenor nå har etablert 4G på alle sine basestasjoner. For Telia ser vi flere strekninger med kun 3G-dekning. Det er imidlertid grunn til å tro at problemene med manglende sømløs handover diskutert over er hovedforklaringen på den manglende målte 4G-dekningen.

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 6.1: Banestrekninger.

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. Vi observerer imidlertid at dette problemet er mindre i 2018 enn i 2017, i takt med at antall strekninger uten 4G-dekning reduseres.

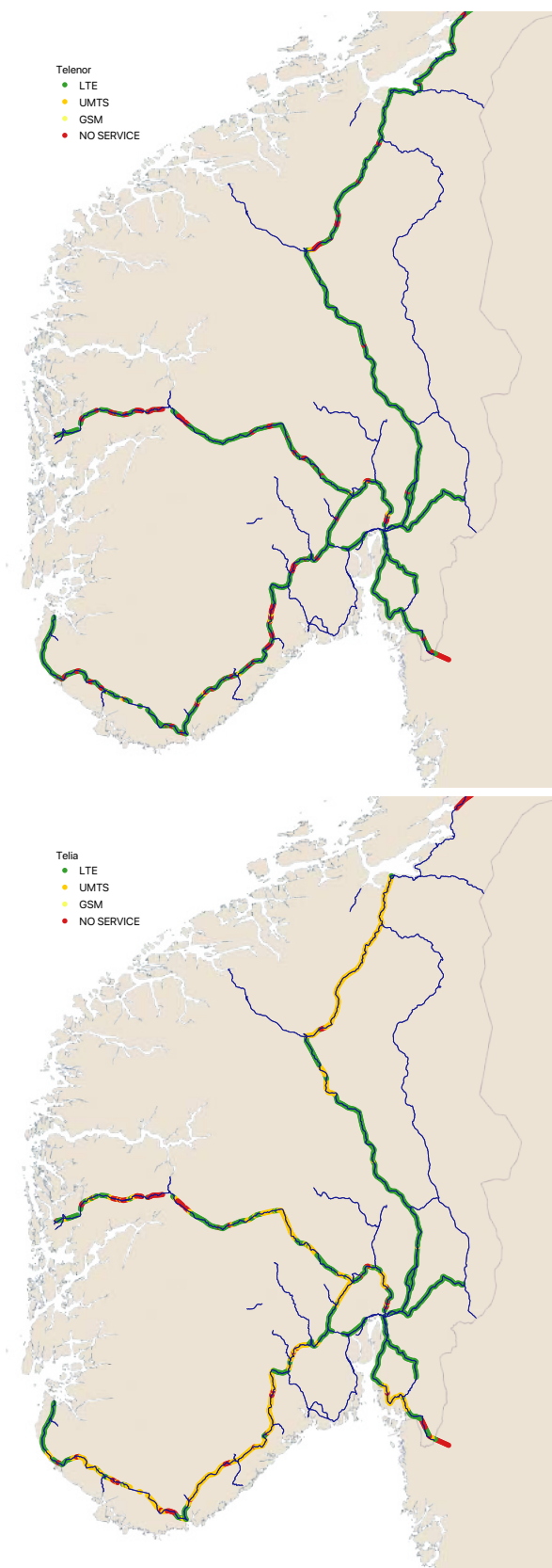
Merk at det samme problemet vil ramme en vanlig bruker som har en aktiv dataforbindelse som det kontinuerlig sendes trafikk over. Særlig vil dette ramme NSBs wifi om bord-løsning, der mange brukere deler en felles forbindelse over mobilnett. Denne forbindelsen vil nesten alltid være aktiv, og vil derfor ofte ikke oppgraderes til 4G når det er mulig.

6.2 Mobildekning per banestrekning

For vår videre analyse deler vi det norske jernbanenettet inn i delvis overlappende områder, som vist i tabell 6.1.

For hver strekning beregner andelen 1km-segmenter langs strekningen der 4G er den mest observerte teknologien. Tabell 6.2 viser 4G-dekningen per banestrekning for 2017 og 2018. Merk at det kan være forskjeller i nøyaktig hvilke strekninger vi har målinger fra i 2017 og 2018. For eksempel har vi ikke målinger fra Vestfoldbanen i 2018. Det er likevel tydelig at den opplevde 4G-dekningen har økt betydelig fra 2017 til 2018. Noe av dette kan skyldes en større andel tog med signalforsterkere om bord, men den viktigste forklaringen er utbyggingen av 4G-nettene.

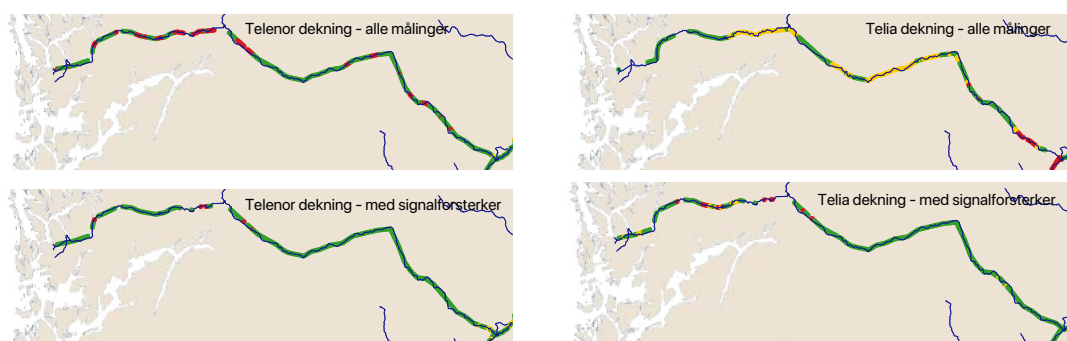
4G-dekningen er naturlig nok bedre i sentrale strøk (Lokal og Intercity) enn på langdistansestrekninger.



Figur 6.1: Målt typisk dekning på tog. Telenor (øverst) og Telia (nederst)

Banestrekning	Telenor		Telia	
	2017	2018	2017	2018
Lokal	83 %	99%	19 %	100 %
Intercity	78 %	99%	23 %	86 %
Bergensbanen	72 %	81 %	13 %	50 %
Dovrebanen	88 %	94 %	28 %	58 %
Sørlandsbanen	77 %	81 %	12 %	36 %

Tabell 6.2: 4G dekning per banestrekning 2017 og 2018.



Figur 6.2: Typisk dekning på Bergensbanen for tog med signalforsterkere sammenlignet med alle målinger.

6.3 Effekt av signalforsterkere på togsett

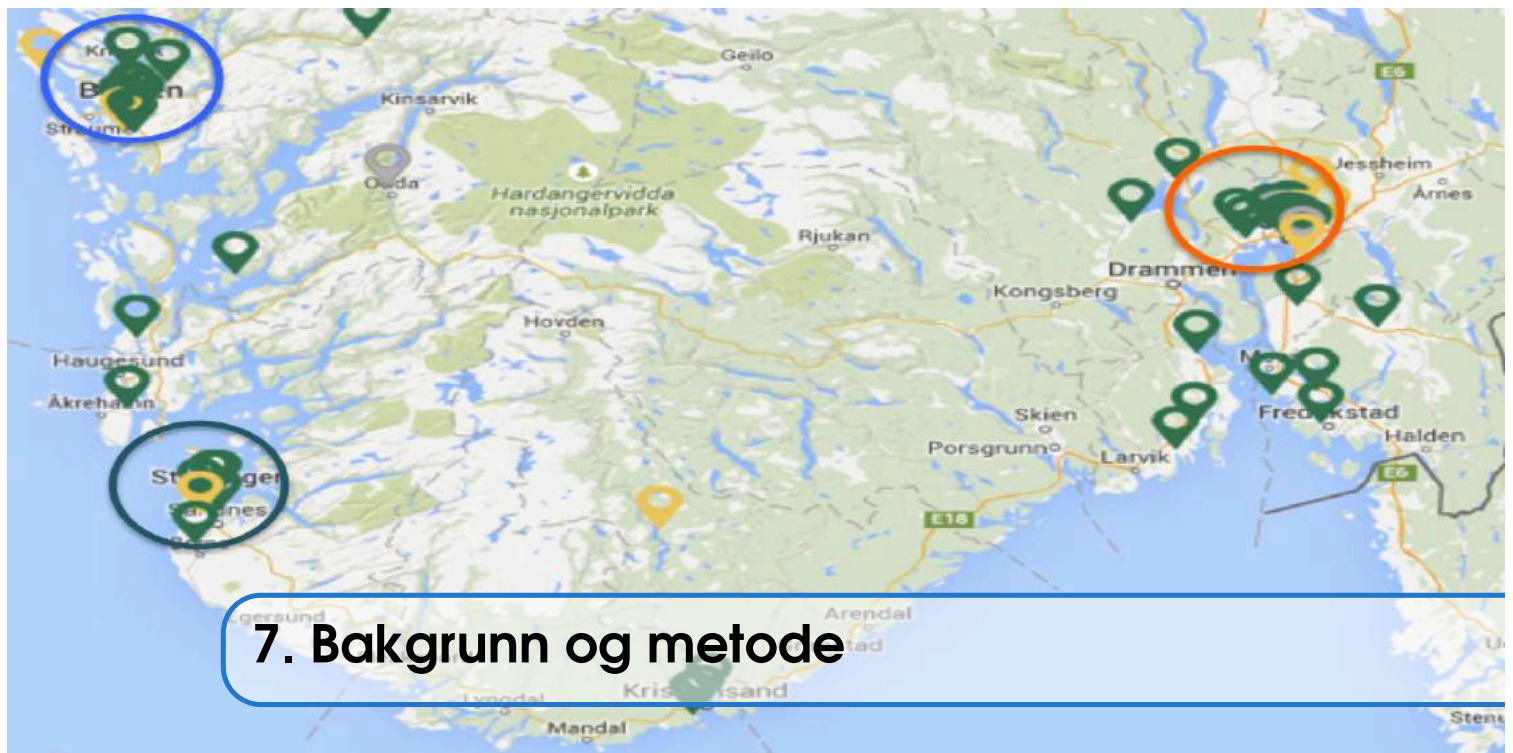
For noen banestrekninger har vi målinger fra tog både med og uten signalforsterkere. Dette setter oss i stand til å kvantifisere effekten av slikt utstyr. Figure 6.2 viser målinger for Telenor og Telia på Bergensbanen, hvor vi sammenligner resultater fra tog med signalforsterkere med resultater fra alle målinger. Vi observerer at signalforsterkere har betydelig effekt på den opplevde dekningen om bord. For Telenor øker andelen 1-km intervaller hvor 4G er den typiske dekningen fra 81 % til 88 %, mens for Telia er økningen fra 52 % til 91 %.

Tabell 6.3 bekrefter det samme inntrykket. Tabellen viser typisk 4G-dekning (som definert over) for strekninger hvor vi har målinger fra tog både med og uten signalforsterkere. Merk at resultatene kan avvike noe fra resultatene i tabell 6.2. Årsaken til dette er at vi her bare inkluderer strekninger hvor vi har målinger både med og uten signalforsterkere.

		Alle tog	Med signalforsterkere
Lokal	Telenor	99 %	100 %
	Telia	100 %	100 %
Intercity	Telenor	99 %	100 %
	Telia	99 %	100 %
Bergensbanen	Telenor	81 %	88 %
	Telia	52 %	91 %
Dovrebanen	Telenor	99 %	100 %
	Telia	91 %	100 %

Tabell 6.3: Typisk 4G-dekning med og uten signalforsterker.

Som tabellen viser, øker den typiske 4G-dekningen kraftig om bord på tog med signalforsterkere, og er nær 100 % på alle strekningene unntatt Bergensbanen. Disse målingene gir grunn til optimisme. Det er all grunn til å tro at en fortsatt utrulling av signalforsterkere i stadig flere togsett kan gi vesentlig bedre tilbud om mobiltjenester på tog i årene som kommer.



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 bredbåndnett, delvis finansiert av Norges Forskningsråd¹. Infrastrukturen består av om lag 100 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.

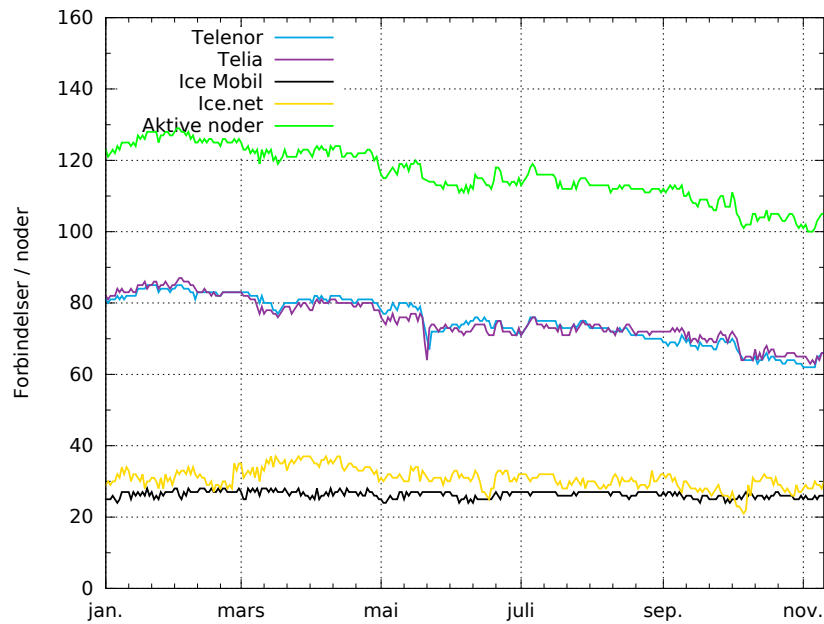
CRNA samarbeider med lokale partnere over hele landet som fungerer som vertskap for målnoder. På grunn av et tidligere samarbeid med e-valgprosjektet i Kommunal- og Moderniseringsdepartementet, er mange målnoder plassert i valglokaler. Valglokaler er ofte skoler, sykehjem eller rådhus, og er som regel 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 7.1. Vi har stasjonære målnoder i alle landsdeler. Resultatene i denne rapporten er basert på målinger fra totalt 265 forbindelser fordelt på 141 stasjonære målnoder. I tillegg har vi målinger fra 15 målnoder plassert på tog.

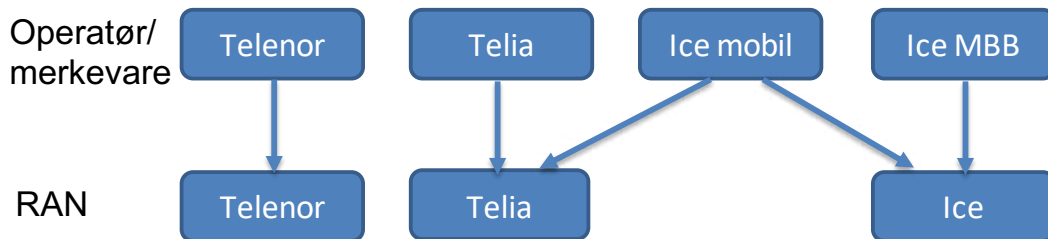
7.1 Mobilnettene vi måler

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 i 2015, fra CDMA til LTE. Dette nettet er et rent 4G (LTE) nett, i motsetning

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



Figur 7.1: Antall aktive målenoder og forbindelser fra hver operatør gjennom 2018.



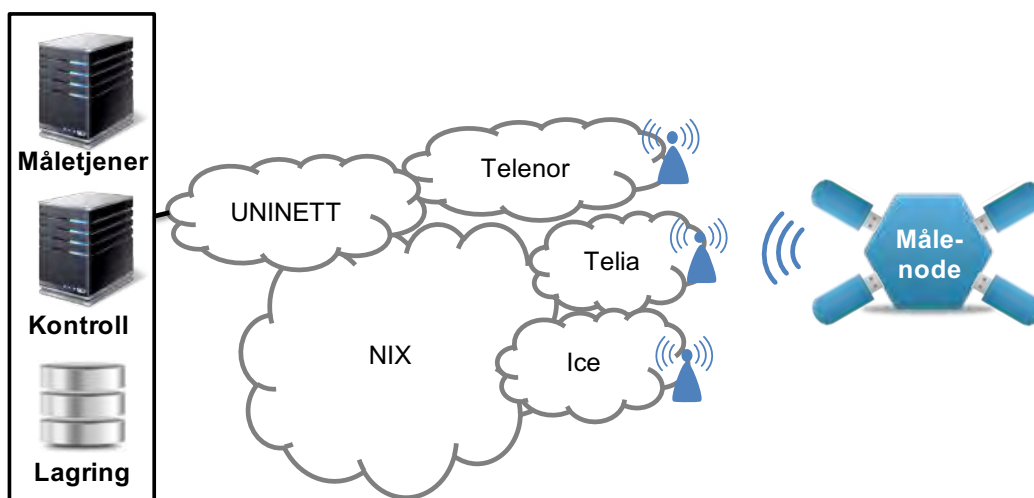
Figur 7.2: Operatører og nettverk behandlet i denne rapporten. Vi rapporterer for første gang resultater for Ice mobil i årets undersøkelse.

til Telenor og Telias nett som også støtter 2G (GSM) og 3G (UMTS). Flatedekningen i LTE-nettet til Ice sikres av deres frekvensressurser rundt 450 MHz. I tillegg benytter Ice frekvensressurser i høyere LTE-bånd for å sikre kapasitet i sentrale områder. Vi presenterer i år for første gang målinger for to ulike typer forbindelser for Ice Ice mobilt 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 7.2 viser sammenhengen mellom operatør/merkevare og hvilket radioaksessnett (RAN) operatøren bruker.

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.



Figur 7.3: Nornet Edge måleinfrastrukturen.

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 firekjerners 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

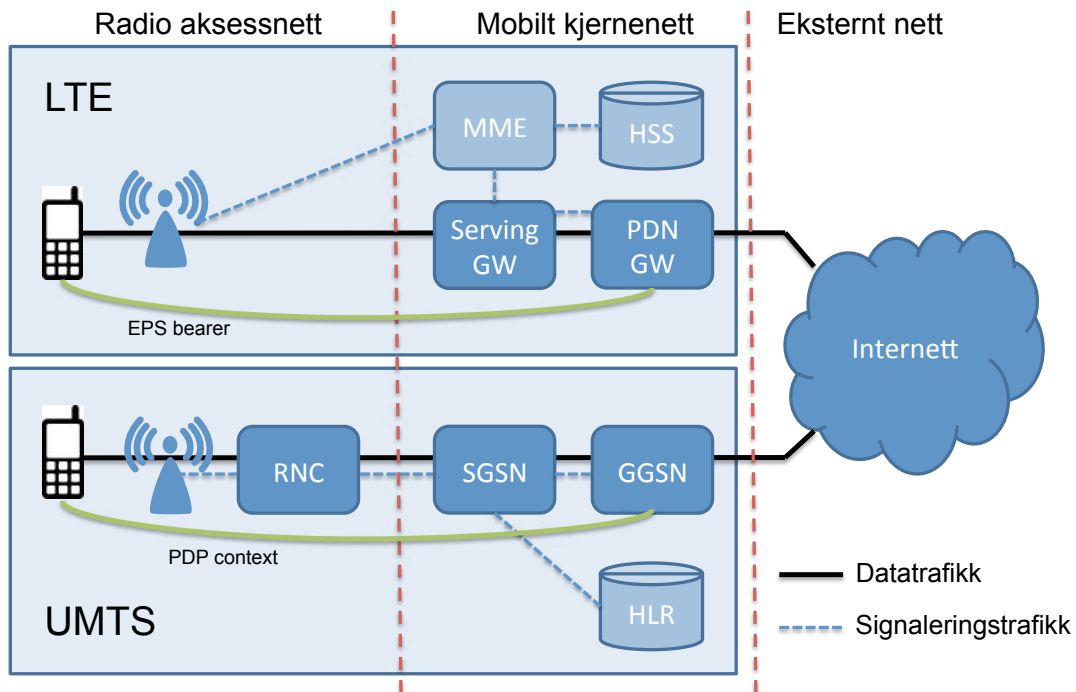
Målenodene utfører målinger ved å sende trafikk til Simulas måleservere i Oslo, som vist i figur 7.3. Trafikk til og fra måleserverne rutes gjennom de ulike mobilnettene og videre gjennom UNINETT. Måleserverne har god kapasitet i form av minne, prosessering og nettverkstilknytning, for å unngå at de 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 mobilnett, og på stabiliteten i dataforbindelsen over denne tilkoblingen. I tillegg ser vi på stabiliteten i ytelsen en bruker oppnår i mobilnett. Vi måler den opplevde nedlastings- og opplastingshastigheten, og vi undersøker hvilken rolle denne hastigheten har for å oppnå en god brukeropplevelse.



Figur 7.4: Hovedkomponentene i 3G (UMTS) og 4G (LTE) nettverk.

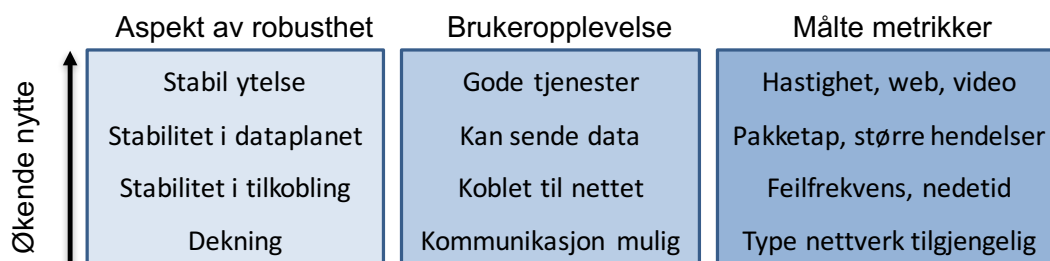
Den opplevde stabiliteten er en kompleks størrelse som påvirkes av en rekke forhold. Dette kapitlet forklarer hvordan vi bryter det abstrakte begrepet *opplevd robusthet* ned i mindre, lettere målbare metrikker, og hvilke tester vi bruker for å måle disse.

Figur 7.4 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 et antall 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 7.5. 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. 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



Figur 7.5: Rammeverk for å måle robusthet på flere nivåer.

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. Dekningsmålingene langs jernbanen er mer omfattende i år enn tidligere år, og inneholder også målinger av effekten av signalforsterkere på togene.

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 ulike aspekter av pakketap for å karakterisere stabilitet i dataplanet, og sammenligner pakketap hos de ulike operatørene. Vi bruker også målingene av pakketap til å identifisere hendelser der mange forbindelser hos en operatør opplever unormalt stort pakketap samtidig. Slike hendelser er som regel forårsaket av feil i sentrale deler av mobilnettet.

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.



www.simula.no