

A hand holding a smartphone against a blue sky with clouds. The hand is positioned on the right side of the frame, holding the phone vertically. The background is a clear blue sky with some light clouds at the bottom. The overall image has a clean, modern aesthetic.

Norske mobilnett i 2024

CRNA - Center for Resilient Networks and Applications

Norske mobilnett i 2024

Tilstandsrapport fra
Simula Metropolitan Center for Digital Engineering
Center 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 Digitaliserings- og forvaltningsdepartementet. Senteret produserer en årlig rapport om tilstanden i norske mobilnett. Årets rapport er den ellefte i rekken.

Ansvarlig for årets rapport Dr. Tarik Čičić
Bidragstere Dr. Alojz Gomola
Dr. Foivos Ioannis Michelinakis

Omslag Canva photo
Publiseringsdato 15. april 2025
ISBN 978-82-92593-42-4

Økonomiske bidragstere Digitaliserings- og forvaltningsdepartementet
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	12
2.4	Større hendelser	12
2.5	Utvikling over tid	13
3	Stabilitet i dataplanet	17
3.1	Tapsrate	17
3.2	Hendelser med forhøyet pakketap	18
3.3	Utvikling over tid	20
4	Stabil ytelse	23
4.1	Opplastnings- og nedlastningshastighet i 4G	23
4.2	Opplastnings- og nedlastningshastighet i 5G	25
4.3	Variasjon mellom forbindelser	25
4.4	Historisk utvikling i hastighet	27
4.5	Jitter	30
5	Bredbånd over satellitt	33
5.1	Forsinkelse	34
5.1.1	Geostasjonær satellitt	34

5.1.2	Satellitter i lav jordbane	34
5.2	Pakketap	36
5.3	Hastighet	36
5.3.1	Geostasjonær satellitt	36
5.3.2	Satellitter i lav jordbane	36
5.4	Diskusjon	39
6	Mobildekning på tog	43
6.1	Mobil dekning	44
6.2	Brukeropplevelse	44
7	Bakgrunn og metode	49
7.1	Mobilnettene vi måler	49
7.2	NorNet Edge målenoder	51
7.3	Server-side infrastruktur	52
7.4	Metode	53
7.4.1	Mobile bredbåndsnett	53
7.4.2	Rammeverk for måling av robusthet	53
7.5	Ookla Speedtest	55



1. Sammendrag og hovedfunn

Norske mobilnett befinner seg i en stabil periode, der 5G-utbyggingen i stor grad er gjennomført i større byer og tettsteder for Telenor og Telia, og mer betydelig 5G-utbygging fortsatt pågår kun hos Ice. Ytelsen er god, og økningene i ned- og opplastningshastigheten vi har sett i tidligere år begynner nå å flate ut. Det er fortsatt kun 5G NSA (*“non-standalone”*, som benytter 4G-kjernenett) som kommersielt tilbys i Norge. Vi følger utviklingen videre med interesse, særlig med tanke på den fremtidige innføringen av 5G SA (*“standalone”*, som benytter 5G-kjernenett) og de nye mulighetene og bruksområdene dette vil kunne åpne for.

Hoveddelen av resultatene som presenteres i årets rapport er basert på aktive målinger fra over 100 stasjonære målepunkter eller ”noder”, spredt over store deler av Norge. Ca. 80 av disse målepunktene er 5G-kapable, og resten er kun 4G-kapable. 2024 er det siste året vi gjennomfører målinger på utstyr som ikke støtter 5G. I tillegg til disse stasjonære målepunktene, analyserer vi ytelsen til mobile noder på tog i Oslo-området, samt satellittbasert bredbånd.

Årets rapport viderefører mange av målingene fra tidligere år. Vi undersøker stabiliteten i tilkoblingen mellom målenoder og mobilnett, og utviklingen i pakketap. Vi måler også hastigheten som oppnås i de ulike mobilnettene. I år ser vi for første gang separat på større hendelser i mobilnettene som kan karakteriseres som nedetid—der flere noder mister tilkoblingen samtidig—og på hendelser med nedsatt kvalitet i tjenesten som brukerne vil kunne merke—der flere noder registrerer merkbart høyere pakketap over 10 minutter eller mer.

Vi har utvidet målinger på tog til seks 5G-kapable noder på intercitytog i området Stor-Oslo. I tillegg til dekning, måler vi i år også brukeropplevelse på terminaler ombord på tog.

Også i år inkluderer vi målinger av bredbånd over satellitt, implementert over både geostasjonær satellitt og satellitter i lav jordbane (LEO, fra engelsk: *Low Earth Orbit*). Den geostasjonære forbindelsen vi måler er fra Brdy, som leveres over Eutelsat, mens lav jordbanetjeneste måles på Starlink. Formålet med disse målingene er å forstå stabiliteten og ytelsen til satellittbasert bredbånd over tid, og se hvordan disse tjenestene forholder seg til andre tilbud som mobilt og trådløst bredbånd.

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

Stabilitet i tilkoblingen

- Vi måler god stabilitet i tilkoblingen våre målenoder har til mobilnettene i 2024. Samlet sett er stabiliteten omtrent på samme nivå som de siste årene. Vi observerer et stort antall tilkoblinger som nesten aldri opplever brudd.
- Over to tredjedeler av tilkoblinger opplever en tilgjengelighet på over 99,99 %, noe som tilsvarer en nedetid på under 9 sekunder i døgnet.
- I år ser vi noe bedre stabilitet hos Ice enn hos Telenor og Telia. Brudd i tilkoblingen varer typisk kortere hos Ice enn hos Telenor eller Telia.
- Større brudd i tilkoblingen begynner å bli en sjeldenhet for de aller fleste brukere, men forekommer fortsatt. Noen av hendelsene kan lokaliseres geografisk til spesifikke deler av landet.

Stabilitet i dataplanet

- Det observerte pakketapet er omtrent uendret i 2024 sammenlignet med 2023, og det er små forskjeller mellom operatørene.
- Som de to siste årene, er det fortsatt Ice som har det laveste pakketapet. Stabiliteten i Ice tilkobling og dataplan kan skyldes både gunstige teknologiske valg og nasjonal gjesting, hvor Ice sine terminaler kan benytte Telia sitt nett der det er tilgjengelig.

Stabilitet i ytelse

- I 5G-nett observerer vi en moderat økning i ned- og opplastningshastighet for alle operatørene. I 2024 er det sjeldnere at 5G-kapable noder må falle tilbake til 4G-tjeneste. Blant våre noder som kun er 4G-kapable observerer vi en marginal økning i nedlastingshastigheten fra 2023 til 2024 hos Telenor og marginal nedgang hos Telia, begge innenfor feilmarginene. Ice viser en økning på 4G, men ligger fortsatt noe under de andre operatørene.
- Det er rimelig å se økningen i hastighet i sammenheng med 5G-utbyggingen i landet. Vi vet at også 4G-brukere drar nytte av denne utbyggingen, på grunn av økt trådløs båndbredde, ny og bedre antennteknologi, og forbedringer i aksessnett. Likevel ser vi at store økninger uteblir i 2024, noe som tyder på at 5G-utbyggingen i våre måleområder i stor grad er fullført.
- Vi registrerer fortsatt best stabilitet i ytelsen (lavest varians i målingene) hos Telenor. Ice på 4G er på den andre enden av skalaen og har klat høyest varians i målingene. Vi antar at flere av Ice sine målenoder veksler mellom 4G- og 5G-kapable nett, noe som gir merkbare endringer i medianhastigheten også fra dag til dag.
- Vi måler gode hastigheter på nodene som støtter 5G, med enkeltmålinger over 800 Mbps nedlastingshastighet og 250 Mbps opplastningshastighet hos både Telenor og Telia. Ice oppnår tilsvarende maksimale verdier på rett under 600 og 200 Mbps. Dette representerer en vesentlig ytelsesforbedring sammenlignet med 4G.
- Våre resultater viser små forskjeller i jitter mellom operatørene. Når det gjelder 5G har Telia i 2024 marginalt lavere median jitter enn Telenor og Ice. Alle operatørene har over 2 % av målingene med jitter over 20 ms, som kan regnes som høyt og vil kunne merkes i enkelte bruksområder.
- 5G-forbindelser viser lavere jitter enn 4G, noe som muligens kan tilskrives høyere overkapasitet i nettet.

Satellitt

- Vi presenterer i år målinger fra to bredbåndtjenester implementert over satellitt: én basert på satellitter i lav jordbane (Starlink), og én basert på geostasjonær satellitt (Eutelsat).
- Starlink leverer lav forsinkelse i forbindelsen. Vi har registrert nedgang i median round-trip-time ned i 60-65 ms fra sommeren 2024, vesentlig lavere enn det vi målte i 2023 da samme forsinkelsen var på 75-80 ms.

- Også på oppnådd båndbredde viser Starlink gode resultater, med en median nedlastningshastighet på 150 Mbps. Dette er om lag tre ganger høyere enn den geostasjonære løsningen, men lavere enn det vi målte på Starlink i 2023.
- Starlink viser fortsatt høyere pakketap i forbindelsen enn den geostasjonære løsningen, men vesentlig lavere enn i 2023. Denne forbedringen kan tilskrives både flere satellitter i omløp over nordområder og forbedret teknologi.
- Pakketapet ligger gjennomsnittlig mellom 0 og 1 % per døgn for de fleste dager, både på forbindelsen over den geostasjonære satellitten og Starlink. For geostasjonær er pakketapet normalt under 0.2 % per døgn. For Starlink ligger samme metrikk på under 0.5 %. Dette betyr at begge teknologiene har høyere pakketap enn det vi måler i mobilnettene.
- I 2024 observerte vi tydelig varians i målingene på Starlink avhengig av tiden på døgnet. I periodene med antatt lavere bruk, som tidlige morgentimer, ser vi bedre ytelse. Dette kan tyde på et økt antall brukere på Starlink, og at man nærmer seg kapasitetsgrensene et satellittbasert bredbåndssystem nødvendigvis har.

Mobil på tog

- Vi presenterer mobildekning og brukeropplevelse man kan oppleve som mobilbruker på tog i Oslo-området.
- Våre funn indikerer generelt god dekning, men potensielle kapasitetsutfordringer for mer krevende applikasjoner, spesielt i rushtiden.



2. Stabilitet i tilkoblingen

I dette kapittelet undersøker vi stabiliteten til tilkoblingen mellom våre målenoder og mobilnettet. Målenodene forsøker å opprettholde tilkoblingen til de ulike mobilnettene til enhver tid, og tilkoblingen brytes aldri aktivt fra målenodens side¹. Ettersom nodene kontinuerlig kommuniserer med omverdenen, skal det heller ikke forekomme at tilkoblingen tas ned på grunn av inaktivitet. Målenodene overvåker tilkoblingen til de ulike mobilnettene kontinuerlig, og logger statusen på denne. Dersom tilkoblingen brytes, vil målenoden umiddelbart forsøke å gjenopprette den. Den vil forsøke kontinuerlig og uten opphold, helt til tilkoblingen kan gjenopprettes. Et brudd vil derfor resultere i en kortere eller lengre feilperiode hvor tilkoblingen er utilgjengelig. Det er disse bruddene vi analyserer. Resultatene i dette kapittelet skiller ikke mellom ulike teknologier som 4G eller 5G. Hver forbindelse vil til enhver tid velge den beste tilgjengelige teknologien, som forklart i kapittel 7.

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, antall samtidige brudd, lokasjonen til målenodene som opplever brudd, varighet av brudd og så videre, kan gi verdifull innsikt i den underliggende årsaken til feilen. Vi benytter denne informasjonen i vår analyse av utfall i 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 analyserer total nedetid for hver forbindelse, varigheten av et tilkoblingsavbrudd, samt hvor ofte en forbindelse opplever et vesentlig avbrudd i tilkoblingen. Vi viser resultater for Telenor, Telia og Ice, for samme type abonnement som selges for bruk i mobiltelefoner. Ice benytter Telias nett der Ice ikke har egen dekning.

For å sikre at målingene i minst mulig grad påvirkes av feil i vår måleinfrastruktur, gjennomfører vi en rekke filtreringssteg hvor vi fjerner nedetid som vi mistenker skyldes slike forhold. Dette innebærer først og fremst at vi fjerner nedetid knyttet til administrative omstarter av tilkoblingene

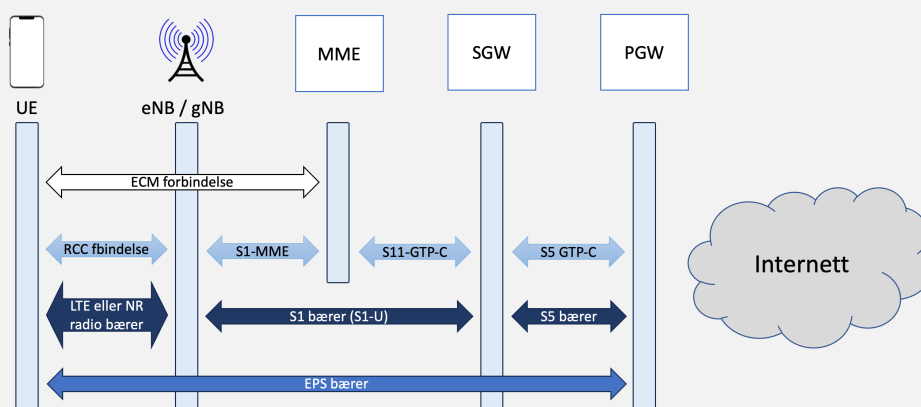
¹ Unntaket er i feilsituasjoner der tilkoblingen eller noden må startes om som en del av en feilrettingsprosess.

etter vedlikeholds- eller feilrettingsoperasjoner. Av og til opplever vi også at våre forbindelser låser seg i en tilstand der forbindelsen er aktiv, men datatrafikk ikke kan sendes. Nedetid knyttet til slike hendelser filtreres bort.

I år som i fjor rapporterer vi stabiliteten til våre 4G- og 5G-kapable noder samlet.

Tilkobling i mobilnettverk

Mobilnett som brukes i dag har en sentralisert arkitektur. All trafikk som utveksles må passere gjennom 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 kalles en "Evolved Packet System" (EPS) bærer. En EPS-bærer inneholder informasjon om IP-adressen til brukerterminalen, hvilken tjenestekvalitet tilkoblingen forventer, og hvilket datanett tilkoblingen tilhører, definert ved et "Access Point Name" (APN). En EPS bærer må alltid være på plass før trafikk kan sendes over mobilnettet. EPS bærere brukes i både 4G og 5G "non-stand alone" (NSA), som er 5G-teknologi som brukes av norske operatører i dag. I 5G NSA, er 5G "New Radio" (NR) lagt til det eksisterende 4G-nettverket for å øke datahastigheten og kapasiteten. Men kontrollinformasjonen, som signalering og oppsett av forbindelser, håndteres fortsatt av 4G-kjernenett.

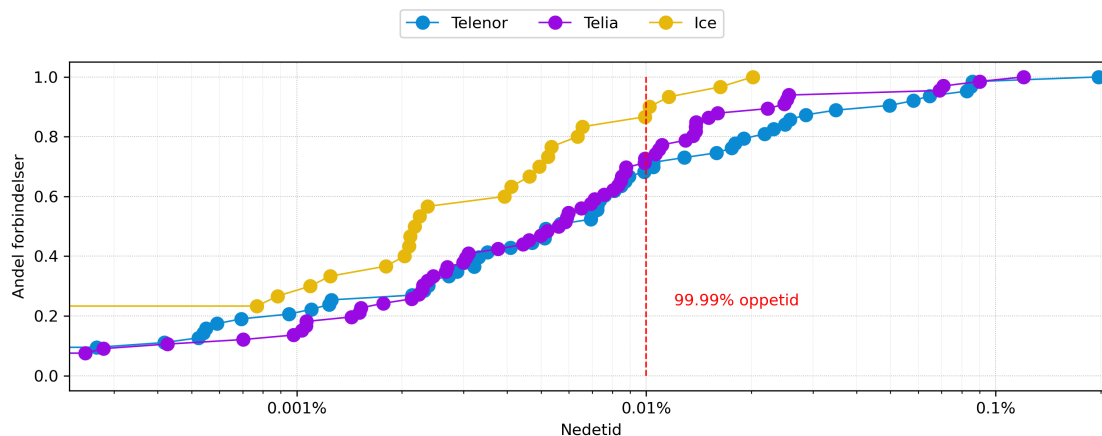


En EPS-bærer realiseres over en serie med tunneler mellom brukerterminalen og en komponent i kjernenettet som kalles en "Packet Gateway" (PGW), som vist i figuren over. Disse tunnelene sikrer at tilkoblingen opprettholdes selv om brukerterminalen flytter seg fra et område til et annet. Vi måler stabiliteten 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, 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



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

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. I våre analyser velger vi å se på 99,99 % oppetid som en viktig markør. Oppetid på 99,99 % tilsvarer en gjennomsnittlig nedetid på under 9 sekunder per døgn, og er uformelt ansett som grensen de aller fleste brukere og kommunikasjonstjenester bør kunne akseptere. Vi har markert den med rød stiplet linje i figur 2.1. I år har 87 % av Ice målnoder en oppetid på 99,99 % eller bedre, som er høyere enn tilsvarende andel for Telia og Telenor, som ligger på henholdsvis 73 % og 68 %. Bedre stabilitet hos Ice kan kanskje tilskrives deres investeringer i infrastruktur de senere årene, men også den nasjonale gjestingen de bruker—om en Ice målnode skulle miste nettforbindelsen mens Telia fortsatt er tilgjengelig, vil den koble seg til Telia sitt nett og fortsette operasjonen etter et kort avbrudd.

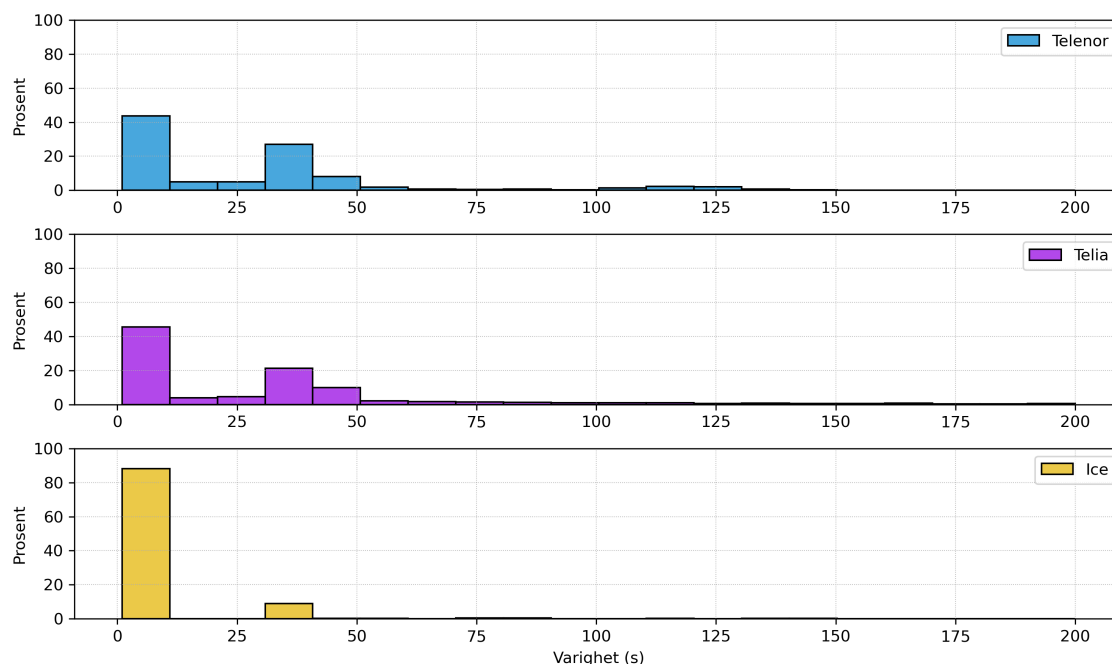
Noen noder har ingen registrert nedetid som med sikkerhet kan tilskrives utfordringene hos operatøren. Det er fem slike noder hos Telenor, fire hos Telia og seks hos Ice. Disse nodene forårsaker at grafene starter til venstre ”utenfor” visst område i figur 2.1. Det at en node kan ha ingen registrert nedetid skyldes bl.a. at flere noder har vært relativt kort tid i drift, eller at all nedetid har vært for nær våre vedlikeholdsaktiviteter og er derfor filtrert bort. Uansett kan man si at disse nodene har hatt utmerket tilgjengelighet i 2024.

Ser man på andel forbindelser med nedetid på over 0,1 % (oppetid under 99,9 %, ikke særskilt markert i figuren), teller vi kun én Telenor- og én Telia-forbindelse. Forbindelser med nedetid på over 0,1 %, som tilsvarer gjennomsnittet på 86 sekunder i døgnet, vil kunne oppleves som ustabile i noen bruksscenarioer.

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.

For alle operatører domineres fordelingen av korte brudd mellom 1-10 sekunder, spesielt Ice. Den andre synlige gruppen er brudd som har varighet fra 30 til 60 sekunder. Dette tilsvarer den typiske tiden det tar å gjennomføre en full tilkoblingsprosedyre mellom målnoden og nettverket, inkludert SIM-autentisering og etablering av EPS-bæreren. Våre målnoder vil gjennomføre en slik prosedyre når forbindelsen av ulike årsaker blir utilgjengelig.



Figur 2.2: Varighet på brudd i tilkoblingen.

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 operatørene opplever få slike dager, og 40-50 % opplever ingen slike dager. Vi ser kun små forskjeller mellom operatørene og marginal bedring fra 2023.

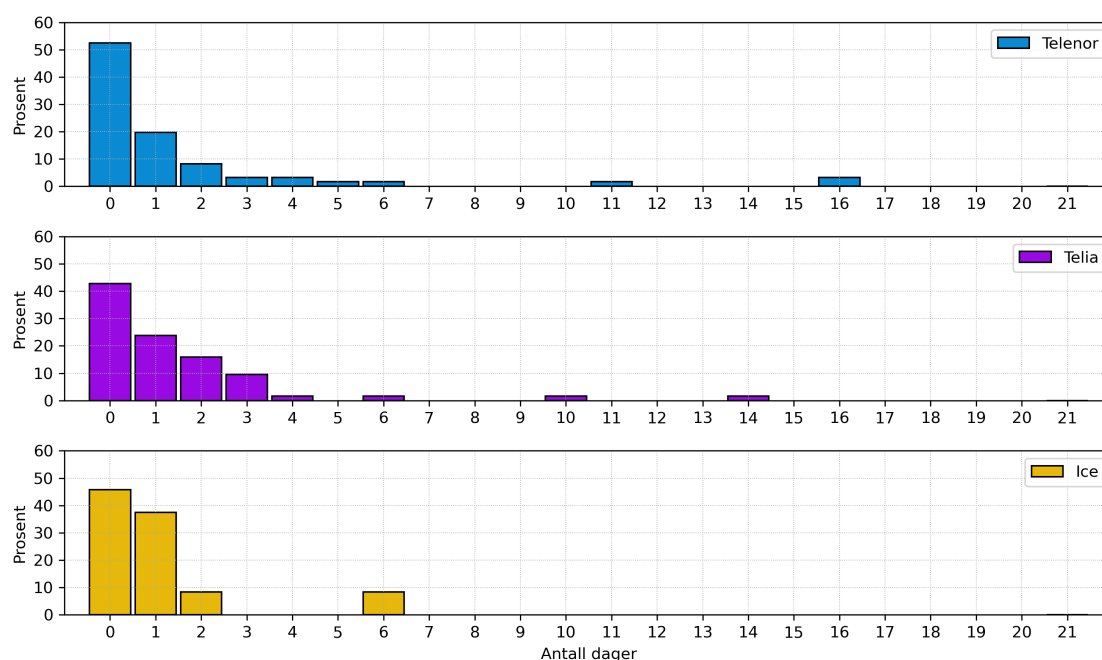
2.4 Større hendelser

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 årene har antallet hendelser generelt vært lavt, og de hendelsene vi har observert har som regel funnet sted i typiske vedlikeholdsvinduer (om natten).

Med "større hendelse" mener vi situasjoner der fem eller flere noder mister forbindelsen samtidig for én operatør. Husk at alle våre noder har to operatører—om noden mister forbindelsen med begge operatørene, antar vi at feilen skyldes vårt målesystem og slike hendelser inngår ikke i denne statistikken. Vi grupperer målingene i 5-minutters intervaller. Tabell 2.1 viser de registrerte større hendelsene. Varighet på for eksempel 10 minutter betyr at to intervaller er registrert uten forbindelse, som dermed har vart i minst 10 minutter. For varighet på 10 minutter eller lengre, vises det også hvordan antallet målepunkter har variert mellom intervallene.

I 2024 er det observert få større hendelser: tre for Telenor, fem for Telia og tre for Ice. De har funnet sted utenfor vedlikeholdsvinduer i større grad enn tidligere. Det at relativt få hendelser er registrert i løpet av det som normalt ansees som tider på døgnet egnet for vedlikehold (kl. 23-06), tyder på at operatørene utnytter redundansen i sine systemer godt, og opprettholder tjenester selv om vedlikehold på deler av systemene pågår.

Vi har analysert data og observerer at Ice-hendelsen 11. april har rammet alle våre Ice-



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

målepunkter. Telia-hendelsen 8. februar har rammet Sørøst-Norge, 12. februar Agder og Rogaland, mens hendelsene 5. november og 18. desember primært har rammet Oslo og Akershus. Vi har ikke kunnet finne noen geografiske avhengigheter for de øvrige hendelsene.

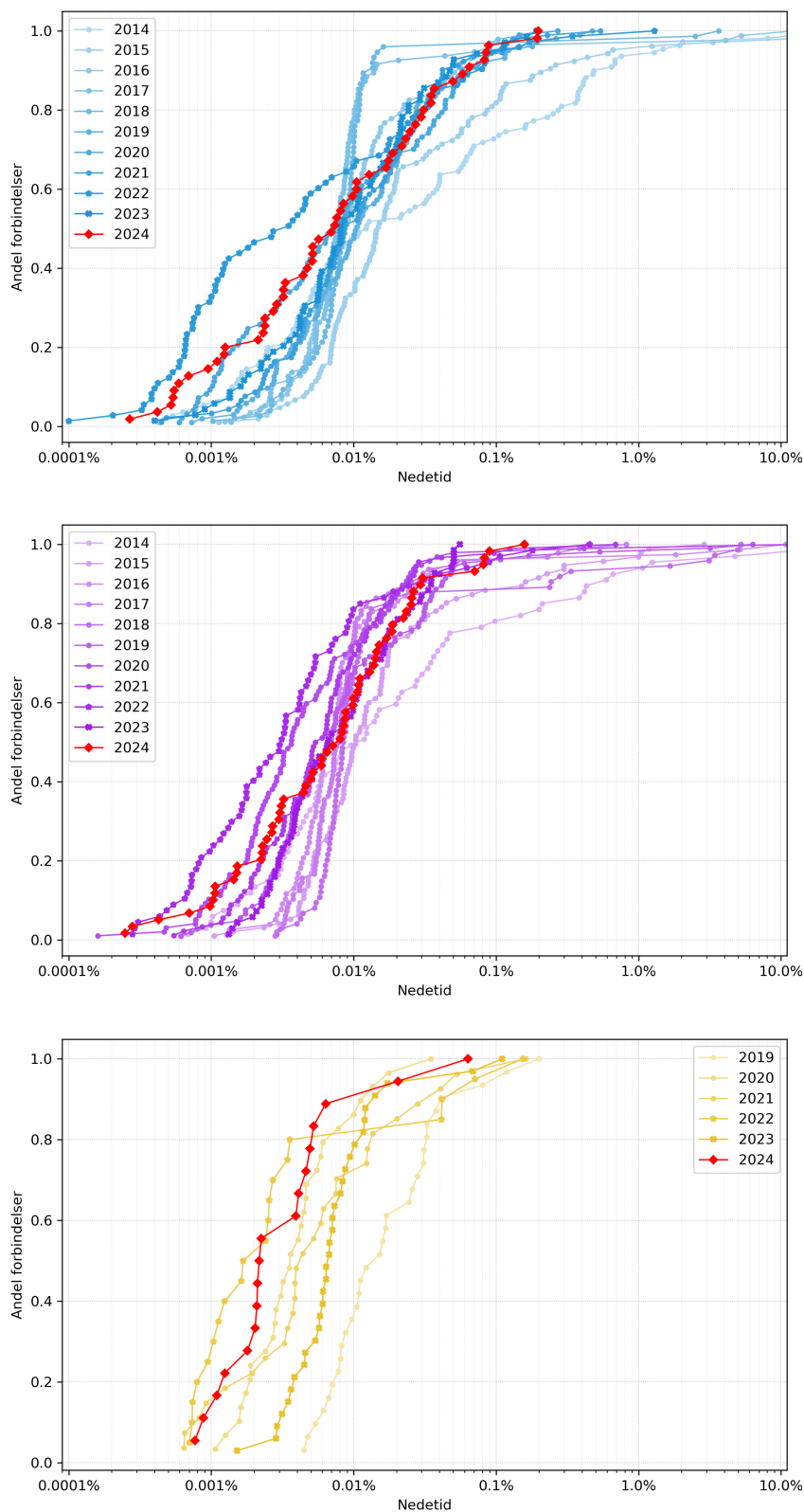
2.5 Utvikling over tid

Figur 2.4 viser utviklingen i gjennomsnittlig nedetid fra 2013 til 2024 for Telenor, Telia og Ice. Av historiske grunner er måledata 2013-2018 fra andre halvår for hvert år. For 2019 og nyere er måledata for hele året analysert. For Ice mangler vi data for år 2018 og tidligere. Data i disse grafene er direkte sammenlignbar med data presentert i figur 2.1.

Vi ser at nedetiden i 2024 er på nivå eller noe dårligere enn i årene 2019-2023, og bedre enn alle år 2018 og tidligere. Figuren viser hvordan grafen "reiser seg" og beveger seg mot venstre raskere enn i perioden 2013-2018, noe som betyr at en større andel av forbindelsene får en lavere nedetid. Siden 2019 har fordelingen av nedetid vært relativt stabil. Merk at skalaen på x-aksen er logaritmisk, og at et stort flertall noder siden 2019 har nedetid under 0,01 %.

Figur 2.5 viser hvordan andel forbindelser som i gjennomsnitt har mer enn ett minutt nedetid per dag har utviklet seg fra våre målinger startet i 2013 til i dag. Av historiske grunner, inkluderer årene 2013-2021 kun Telia og Telenor. Målingene fra 2022 og nyere inkluderer også Ice. Denne metrikken er ikke direkte sammenlignbar med figur 2.3, ettersom den inkluderer også kortere nedetidsperioder enn 60 s.

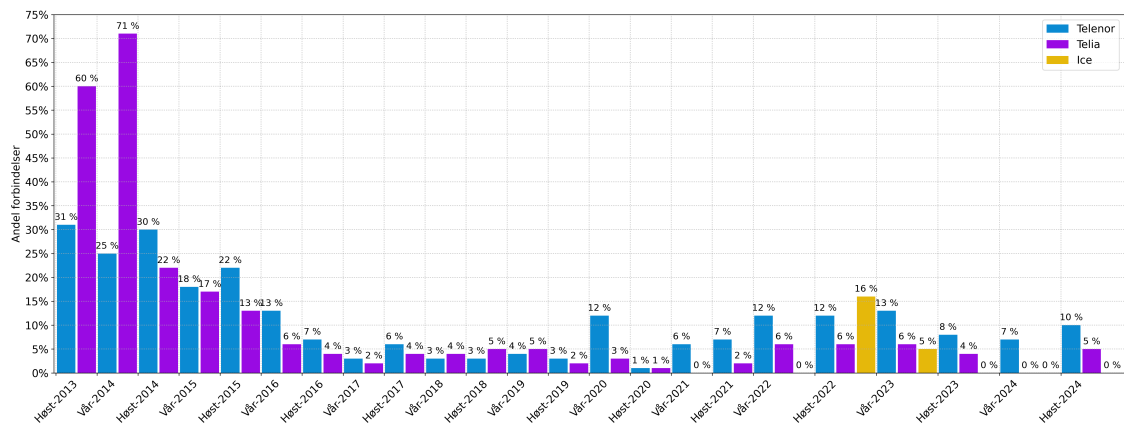
Andelen forbindelser med over ett minutt nedetid i gjennomsnitt har vært relativt stabil de siste årene, men 2024 viser de laveste tallene siden 2021. Telia og Ice hadde ingen forbindelser der vi målte over 60 sekunder nedetid per dag våren 2024, og Ice hadde heller ingen slike forbindelser høsten 2024.



Figur 2.4: Utvikling i nedetid hos Telenor (topp), Telia (midten) og Ice (bunn) fra 2019 til 2024.

Nettverk	Hendelsestid	Varighet	Berørte målepunkter
Telenor	18. mai 19:35	10 min	5-7
Telenor	09. juli 13:45	5 min	6
Telenor	02. september 02:35	5 min	5
Telia	08. februar 09:15	80 min	12-20
Telia	12. februar 22:15	20 min	12-14
Telia	05. november 14:20	25 min	6-11
Telia	18. desember 01:25	15 min	5-6
Telia	31. desember 14:10	5 min	9
Ice	11. april 00:25	125 min	15-18
Ice	29. juni 19:20	5 min	5
Ice	31. desember 14:10	5 min	6

Tabell 2.1: Samtidig brudd i flere forbindelser per operatør, 2024.



Figur 2.5: Andel forbindelser med gjennomsnittlig nedetid større enn 1 minutt per dag over tid.



3. Stabilitet i dataplanet

I dette kapittelet undersøker vi mobilnettverkenes kapasitet til å opprettholde en stabil ende-til-ende forbindelse med minimalt pakketap. Vi måler dette ved å sende en kontinuerlig strøm av små datapakker fra alle testnodene og registrere antallet som går tapt underveis. Dette gjør vi for hver node og operatør, som sammen utgjør en forbindelse. Basert på disse målingene analyserer vi *tapsraten*, altså hvor stort pakketap vi opplever for hver forbindelse. Mens det forrige kapittelet diskuterte stabiliteten og tilgjengeligheten til forbindelsens tilkobling til nettet, gir denne analysen innsikt i kvaliteten på ende-til-ende forbindelsene i den perioden de er tilkoblet.

Vår analyse er basert på måletrafikk bestående av små (20 Byte) UDP-pakker som sendes til en sentral server hvert sekund. Serveren returnerer den samme pakken umiddelbart. For hver pakke registrerer vi tiden det tar før responspakken kommer tilbake. Hvis ingen responspakke returneres innen 60 sekunder, betrakter vi pakken som tapt. Denne typen målinger utføres kontinuerlig på alle forbindelser så lenge de er tilkoblet nettet. Måleperiodens lengde for hver forbindelse varierer, ettersom ikke alle målenodene har vært aktive hele året. I denne analysen har vi utelatt forbindelser hvor vi har færre enn 7 døgn med målinger.

3.1 Tapsrate

Tapsraten er definert som kvotient (tapte pakker)/(sendte pakker) og beregnes for hver enkelt forbindelse over hele måleperioden. For å beregne tapsraten for en operatør, sorterer vi alle forbindelsene etter pakketap for denne operatøren og ser på median og andre statistiske egenskaper.

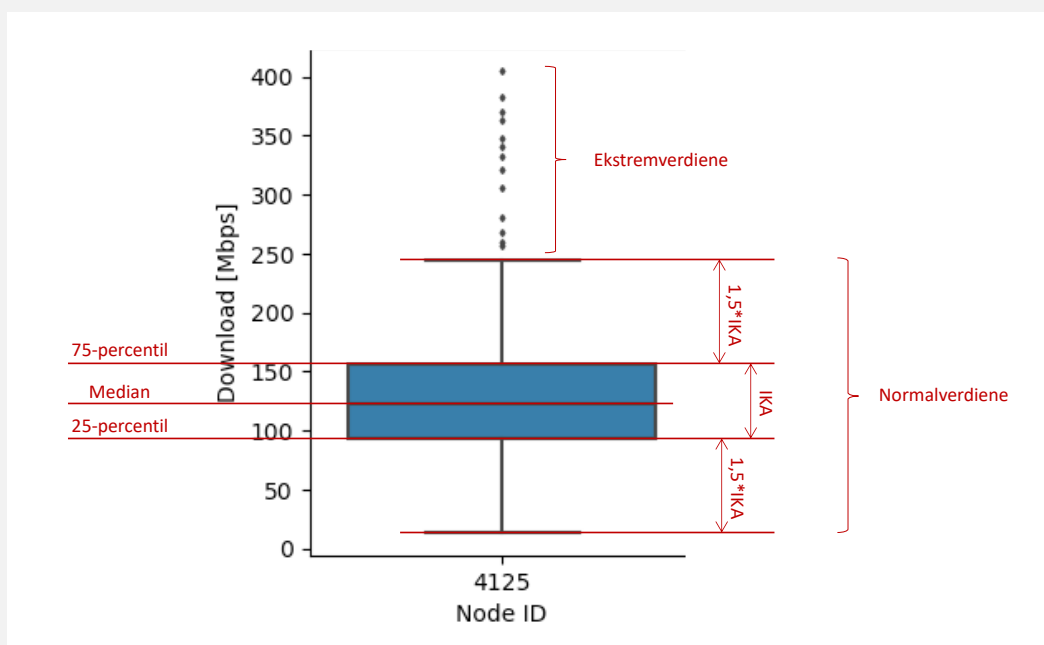
Figur 3.1 og tabell 3.1 viser en oppsummering av tapsraten hos Telenor, Telia og Ice. Telia har lavere tapsrate i 2024 enn i 2023, mens de andre to operatørene har marginalt høyere tapsrate i 2024. Som i 2023, er det Ice mobil som har den laveste tapsraten med median på 0,011 %. Generelt observerer vi lavt pakketap hos alle operatører, som ikke vil kunne merkes under vanlig bruk av mobiltjenesten. I seksjon 3.2 nedenfor analyserer vi hendelser som kunne merkes av brukere.

Ice har i de siste årene foretatt betydelige oppgraderinger i sitt radionett og kjernenett, og vi antar at ressursene fortsatt er overprovisjonert. I tillegg opererer Ice kun 4G- og 5G-nett, og har følgelig lavere kompleksitet i operasjonene. Disse faktorene kan tenkes å ha innvirkning på de gode resultatene Ice viser når vi måler stabiliteten i dataplanet.

Hvordan tolkes boksplott?

Flere figurer i denne rapporten representerer måledata ved hjelp av boksplott (engelsk "box plot"). Boksplott er et effektivt verktøy for å raskt få oversikt over hovedtrekkene ved en statistisk variabel. Men hva illustrerer det egentlig?

Et boksplott består av en farget/skravert del, en "boks", med en linje som deler den i to, samt to endestenger på hver sin side av denne boksen. Boksens minimum- og maksimum-verdier er plassert på den nedre og øvre kvartilen (25- og 75-persentilen) til måleverdiene, mens delelinjen er på medianen (50-persentilen). Dette betyr at 50 % av alle måleverdiene faller innenfor boksen. Lengden på denne boksen kalles interkvartilavstanden (IKA). Hvis medianen er nærmere en av kvartilene, viser det skjevhet i distribusjonen—husk at 25 % av måleverdiene ligger på hver sin side av delelinjen i boksen.

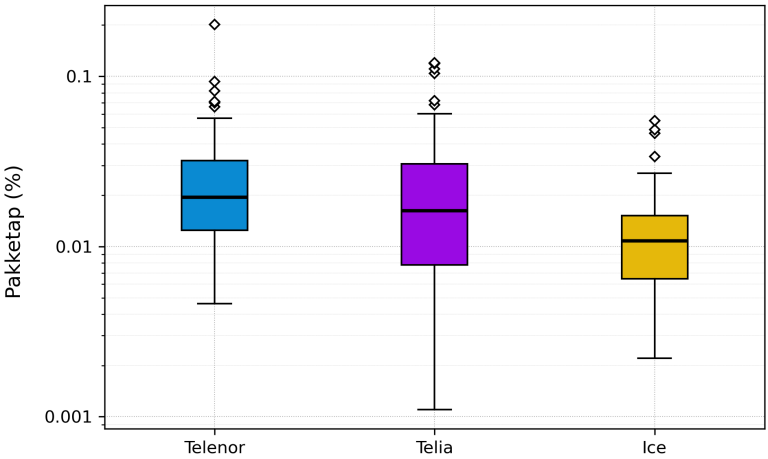


Endestengene over og under boksen settes i det målepunktet som er nærmest $1,5 \cdot \text{IKA}$ på innsiden mellom boksen og stangen. Derfor vil endestengene være maksimalt $1,5 \cdot \text{IKA}$ unna boksen. Hvis distribusjonen er skjev, vil man i noen tilfeller kunne se at endestangen er nærmere boksen enn $1,5$ ganger IKA.

Intensjonen med endestengene er å vise det som kan anses som "normalverdier" i distribusjonen. I noen datasett vil noen av verdiene falle utenfor stengene. Disse kan betraktes som ekstremverdier (engelsk "outliers"), og tegnes inn som små diamantformede punkter. Hvis det er mange ekstremverdier, vil de visuelt kunne fremstå som en hel linje ettersom de overlapper.

3.2 Hendelser med forhøyet pakketap

Vi har foretatt en analyse av situasjoner der målt pakketap avviker betydelig fra normalen for et større antall noder hos en operatør. Denne analysen kan sammenlignes med den i seksjon 2.4, hvor vi undersøkte betydelige nedetidshendelser. Her ser vi på hendelsene der nettforbindelsen ikke er



Figur 3.1: Pakketap per operatør.

Operatør	10-persentil	Median	90-persentil	Gjennomsnitt
Telenor	0.009	0.020	0.050	0.027
Telia	0.004	0.016	0.055	0.025
Ice mobil	0.004	0.011	0.024	0.013

Tabell 3.1: Pakketapstatistikk i 2024, i prosent.

Nettverk	Hendelsestid	Varighet	Berørte målepunkter	Pakketap
Telenor	25. mars 04:00	60 min	9	4.98 %
Telenor	26. mars 04:55	20 min	9	4.64 %
Telenor	31. mars 06:10	10 min	9	4.78 %
Telenor	01. april 05:30	30 min	9	5.00 %
Telenor	03. april 04:45	35 min	9	5.03 %
Telenor	04. april 03:45	60 min	8	5.18 %
Telenor	05. april 04:10	35 min	8	5.18 %
Telenor	08. april 03:25	10 min	9	7.54 %
Telenor	06. juni 23:15	40 min	56	3.90 %
Telenor	19. august 00:00	45 min	59	8.69 %
Telenor	07. oktober 00:20	10 min	25	6.54 %
Telia	13. juni 18:45	10 min	30	4.83 %
Telia	17. desember 01:00	10 min	63	32.78 %
Ice	18. mai 18:45	205 min	6	22.60 %
Ice	29. juni 19:20	65 min	18	29.79 %

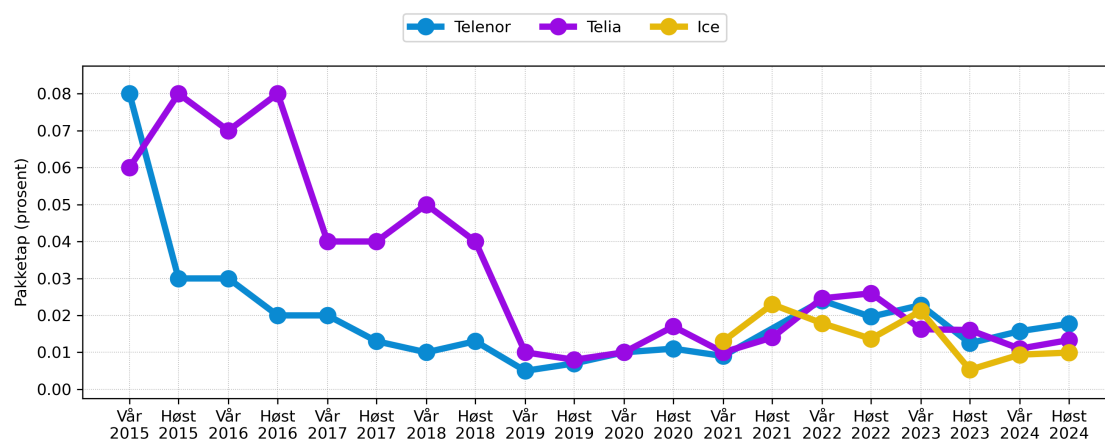
Tabell 3.2: Større pakketapshendelser i 2024.

brutt, men hvor det likevel registreres et pakketap på 3 % eller mer på flere målenoder samtidig over en periode på minst ti minutter.

Tabell 3.2 viser hendelsene vi har registrert i 2024 for alle operatørene. Vi ser at disse varierer både i varighet, antall berørte målenoder, og nivå. I perioden 25. mars til 8. april 2024 målte vi pakketap på ca. 5 % i tidlige morgentimene på Telenor-noder i Agder. Ice hadde en betydelig hendelse 18. mai, der våre målenoder vest og nord i landet (Bergen, Trøndelag og nordover) var påvirket. For de øvrige hendelsene har vi ikke funnet noen geografisk sammenheng, og de kan anses som landsomfattende. Hendelser med færre berørte noder, lokalisert til enkelte deler av landet, kan skyldes metning i distribusjonsnett, mens de som involverer mange noder typisk har rotårsak i kjernenettet eller operatørens internettilkobling.

3.3 Utvikling over tid

Figur 3.2 viser median pakketap for alle målenoder hvert halvår de siste årene. For Telenor og Telia har vi data fra 2015, og for Ice fra 2021. Det litt forhøyede pakketapet vi har målt under 5G-utbygging i årene 2021-2023 ser ut til å ha normalisert seg i 2024. Generelt sett er pakketapet i norske mobilnett lavt og uten vesentlige forskjeller mellom operatørene.



Figur 3.2: Utvikling i tapsrate 2015-2024.



4. Stabil ytelse

I dette kapittelet presenterer vi resultater relatert til ytelse, mer spesifikt hastigheten vi måler for opplastning og nedlastning av data, samt hvordan disse målingene varierer. Vær oppmerksom på at den brukeropplevde ytelsen er avhengig av flere faktorer, som applikasjonskrav, dekningsforhold, antall samtidige brukere og interferens i området, samt ytelsen til fastnettet som kobler operatøren til den brukte nettverkstjenesten. Resultatene som presenteres her vil være påvirket av de spesifikke forholdene på de stedene og tidspunktene målingene er utført.

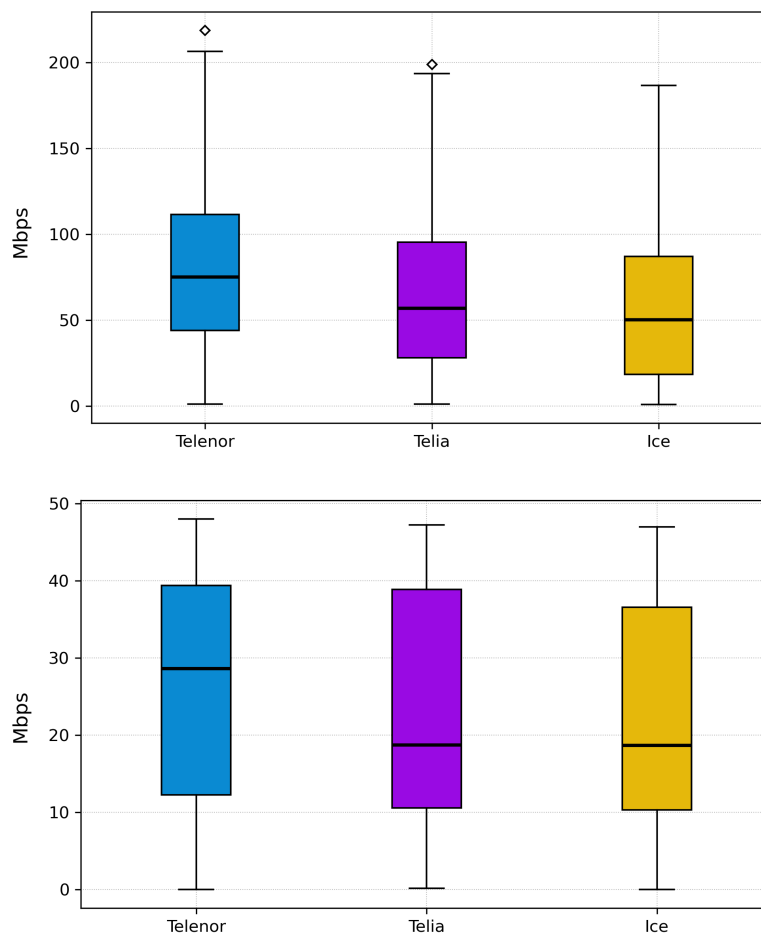
Våre målenoder er plassert innendørs. Vi har ingen kontroll over lokale forhold som veggtykkelse, plasseringen av målenodene i bygningen og lignende. Dette er faktorer som kan ha stor innvirkning på dekningsforholdene og dermed på ytelsen, så vi instruerer våre verter å vise hensyn til plasseringen og velge et egnet sted. Dekningsforholdene vil variere fra node til node, men alle målenodene er plassert på steder med god dekning i henhold til operatørenes dekningskart. Vi mener at antallet målenoder og den geografiske spredningen gjør at resultatene gir et representativt bilde av den forventede ytelsen i mobilnettene.

4G-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. LTE Cat 6 oppgir 300 Mbps som høyeste nedlastningshastighet, og 50 Mbps opplastning. Det betyr at vi i våre målinger ikke alltid vil oppnå den maksimale hastigheten som kan tilbys i 4G-nettene vi måler. Blant annet støtter ikke disse modemene aggregering av kapasitet fra mer enn to frekvensbånd. Resultatene bør tolkes med dette i betraktning. Våre resultater gir likevel en indikasjon på hastighetene som oppnås i mobilnettene, da disse ofte er betydelig under det modemmet støtter, samtidig som de tekniske forutsetningene er like for alle operatørene.

For 5G-målinger bruker vi Quectel RM50xQ-serie modemmer, som støtter 3GPP Release 15 med teoretisk nedlastningshastighet opp til 2,5 Gbps, samt 600 Mbps opplastningshastighet.

4.1 Opplastnings- og nedlastningshastighet i 4G

Vi måler opplastningshastighet og nedlastningshastighet ved bruk av Ookla Speedtest, som lar oss gjennomføre målinger fra våre målenoder mot Ooklas servere. Disse serverene er vanligvis plassert



Figur 4.1: Nedlastningshastighet (øverst) og opplastningshastighet (nederst) for ulike operatører, 4G-nett.

i nettverket til en internettleverandør, og vi benytter kun servere lokalisert i Norge.

I motsetning til de andre målingene presentert i denne rapporten utføres ikke hastighetsmålingene mot vår egen måleserver, men mot måleservere knyttet til Ooklas infrastruktur. Ookla leverer klientprogramvare som en standardpakke tilgjengelig i Linux-distribusjoner, som vi installerer på våre målenoder. Klienten velger selv den optimale blant de tilgjengelige måleservere innenfor et geografisk område. Deretter åpnes det parallelle nedlastningssesjoner over en periode på omlag 10 sekunder, og hastigheten måles. Prosedyren er tilsvarende ved måling av opplastningshastighet. 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. I kapittel 7 diskuterer vi bruken av Ookla Speedtest til disse målingene.

Når det gjelder LTE-bånd, har vi registrert at alle operatørene bruker 700, 800, 900, 1800, 2100 og 2600 MHz-båndene. På 5G-kapable noder er også 3,6 GHz bånd brukt. Der Ice ikke har egen dekning, benytter de Telias nett gjennom deres avtale om nasjonal gjesting ("roaming").

Figur 4.1 viser fordelingen av nedlastnings- og opplastningshastigheter for hver av operatørene i 4G-nettet. Den svarte linjen som deler den fargede boksen i to viser *median* hastighet, det vil si at halvparten av alle målingene i det aktuelle mobilnettet oppnådde en hastighet som ligger over denne verdien, mens halvparten ligger under denne verdien. De fargede boksene viser området

hvor halvparten av målingene i et mobilnett ligger. 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 grense¹.

Målingene viser kun marginal forbedring i nedlastningshastigheter i 2024 sammenlignet med 2023. Opplastningshastigheten har økt for Telenor og er uforandret for de andre operatørene. Telenor oppnår fremdeles høyere hastigheter enn Telia og Ice både nedstrøms og oppstrøms, men Telia følger tett. Median nedlastningshastighet er 78 Mbps i Telenors nett, 57 Mbps i Telias nett og 50 Mbps i Ice sitt nett.

98 % av målingene i Telenors nett viser en nedlastningshastighet over 10 Mbps (en oppgang fra 94 % i 2023). Tilsvarende tall er 98 % (96 %) for Telia og 81 % (78 %) for Ice. 78 % av målingene i Telenors nett viser en nedlastningshastighet over 50 Mbps (en økning fra 69 % i 2023). Tilsvarende tall er 54 % (59 %) for Telia og 56 % (28 %) for Ice.

Median opplastningshastighet er 29 Mbps i Telenors nett, mens både Telia og Ice har en median opplastningshastighet på 19 Mbps. Dette er omtrent samme verdier som i 2023—kun en marginal økning som man kan se i figur 4.5. 87 % av målingene i Telenors nett viser en opplastningshastighet over 10 Mbps (uendret fra 2023). Tilsvarende tall er 80 % (82 %) for Telia og 75 % (67 %) for Ice.

4.2 Opplastnings- og nedlastningshastighet i 5G

Vi har målt opplastnings- og nedlastningshastighet i 5G-nett fra våre 82 5G-kapable målenoder. Hver node er utstyrt med to 5G-modemer, med SIM-kort fra to ulike operatører blant Telenor, Telia og Ice. Det ble brukt den samme Ookla Speedtest-metodikken som i 4G-målingene.

Figur 4.2 viser oppnådde ned- og opplastningshastigheter for Telenor og Telia. Telenor har en median nedlastningshastighet på 230 Mbps i 2024, som er en oppgang fra 193 Mbps i 2023. Telias median nedlastningshastighet var på 185 Mbps, oppgang fra 176 Mbps i 2023. Ice median nedlastningshastighet var på 78 Mbps, en økning fra 56 Mbps i 2023. Tilsvarende verdier for opplastningshastigheter er 35 Mbps for Telenor, 32 Mbps for Telia og 24 Mbps for Ice, omtrent uforandret fra 2023. Det er henholdsvis 32 %, 40 % og 21 % av noder med over 50 Mbps opplastningshastighet, for henholdsvis Telenor, Telia og Ice.

Dette er andre år på rad der vi måler 5G-hastighetene for Ice. Resultatene er forbedret i forhold til 2023, men fortsatt lavere for nedlastningshastigheter enn Telenor og Telia. Vi har fortsatt færre Ice noder, og deres lokalisering kan være en faktor i dette. Vi ser mange målinger med gode resultater, og ser frem til å følge med utviklingen i årene fremover.

4.3 Variasjon mellom forbindelser

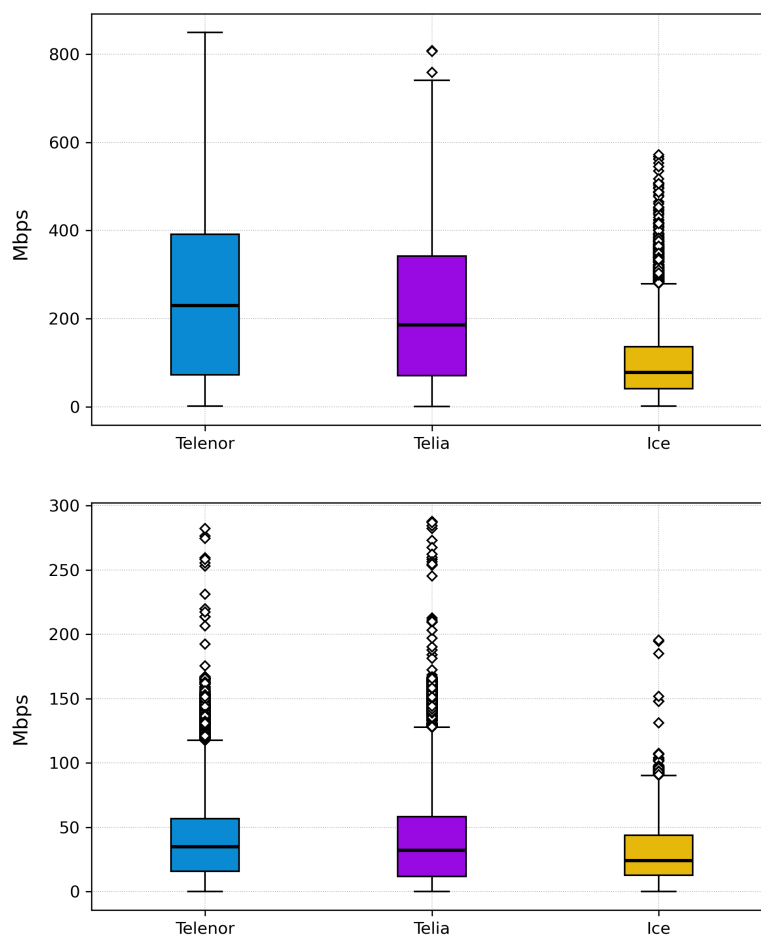
Figur 4.3 viser hvordan den målte nedlastningshastigheten varierer for hver enkelt forbindelse per operatør. 5G-forbindelser er vist med en mørkere farge, 4G med en lysere. Ikke overraskende, viser 5G-noder generelt høyere hastigheter enn 4G.

Den røde markøren viser median hastighet, altså ligger halvparten av de målte verdiene over og halvparten under dette nivået. De tykke markørene er smale boksplott, og deres høyde representerer interkvartilavstanden.

Dersom interkvartilavstanden er høy i forhold til ”typisk” oppnådd hastighet, som målt ved medianverdien, betyr dette at den oppnådde hastigheten varierer mye fra måling til måling. Denne variansen har blitt mindre de siste årene, noe som betyr at den oppnådde nedlastningshastigheten har blitt mer stabil.

Blant 4G-noder i 2024, hadde 2 % av Telenors forbindelser, 11 % av Telias forbindelser, og 44 % av Ice sine forbindelser en interkvartilavstand som er større enn medianen. Resultatene er på

¹For en fullstendig forklaring hvordan boksplott tolkes, vennligst se side 18.



Figur 4.2: Nedlastningshastighet (øverst) og opplastningshastighet (nederst) for ulike operatører, 5G-nett.

Operatør	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Telenor, 4G	33 %	13 %	24 %	15 %	2 %	2 %
Telia, 4G	26 %	21 %	19 %	11 %	8 %	11 %
Ice, 4G	12 %	8 %	41 %	37 %	33 %	44 %
Telenor, 5G				0 %	14 %	6 %
Telia, 5G				21 %	8 %	12 %
Ice, 5G					0 %	9 %

Tabell 4.1: Variasjon av resultater per forbindelse. Tallene viser prosentvis hvor mange forbindelser for hver operatør og teknologi som hadde en interkvartilavstand større enn median nedlastningshastighet.

nivå med 2023, og det er kun Ice som har større varians, noe man også kan se i figur 4.4. Resultatene for 2024 og tidligere år er oppsummert i tabell 4.1.

For 5G-forbindelser hadde Telenor 6 % noder der interkvartilavstanden var større enn medianen, mens Telia hadde 12 % og Ice 9 %. Dette er lave tall som tyder på høy stabilitet i ytelsen. Ice 4G har fortsatt høy variabilitet, som også kan sees i grafen i figur 4.4 som store endringer dag-for-dag.

4.4 Historisk utvikling i hastighet

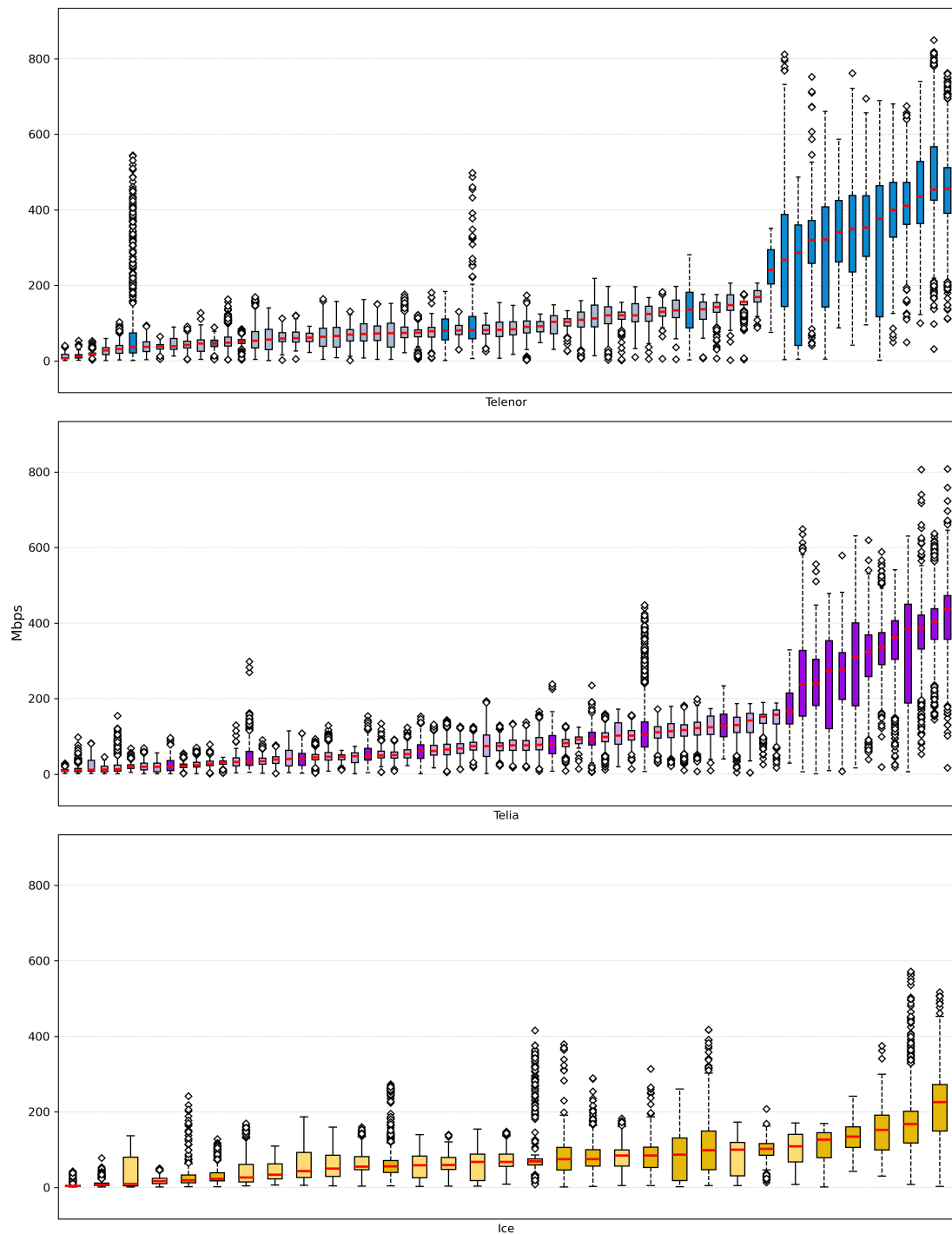
Figur 4.4 viser hvordan median 4G-nedlastningshastighet har utviklet seg gjennom de siste seks årene for hver operatør. Hvert punkt i grafen viser median hastighet over alle målingene som ble foretatt for det aktuelle nettet gjennom ett døgn.

Allerede i 2020 ser man en økning i gjennomsnittlig hastighet for Telenor, som virkelig skyter fart i 2022, etterfulgt av Telia. Fra 2023 stabiliserer utviklingen seg for Telenor og Telia, mens Ice opplever en betydelig vekst mot slutten av 2023 og gjennom 2024. Dette samsvarer godt med den meldte aktiviteten i Ice sin 5G-utbygging. Overordnet sett er vår forståelse at økningen i målt 4G-hastighet kan krediteres omdisponering av frekvensene tidligere brukt i 3G-nettet, samt innføring av ny teknologi i forbindelse med 5G-utbyggingen hos operatørene.

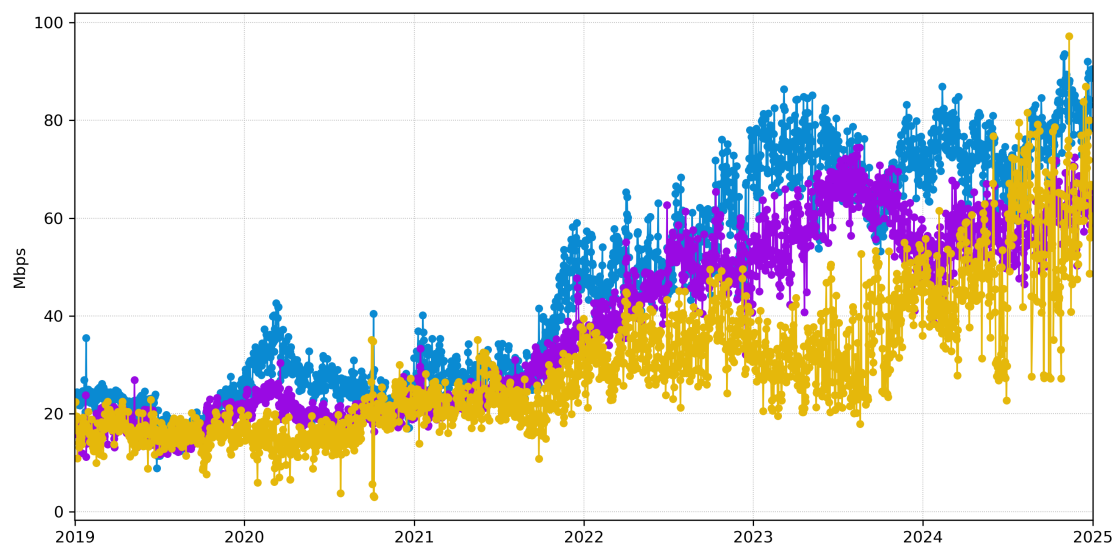
Utrulling av 5G innebærer introduksjon av mer avanserte antenner (4x4 MIMO), og gjenbruk av 3G-frekvenser til 5G. Denne utskiftingen er trolig en viktig årsak til den opplevde økningen i hastighet også i 4G-nett. For enkelte noder har vi sett en klar forbedring i signalstyrke og nedlastningshastighet for de fleste målinger etter en spesifikk dato, der vi antar at 5G-omleggingen fant sted i området der noden er lokalisert.

Figur 4.5 viser utviklingen i median ned- og opplastningshastighet fra 2016 til 2024. Figuren må tolkes med noe varsomhet, siden målepunktene ikke er nøyaktig de samme hvert år. Vi har ikke historiske data for Ice (med nasjonal gjesting) før 2020, så tallene fra 2016 - 2019 er for Ice MBB.

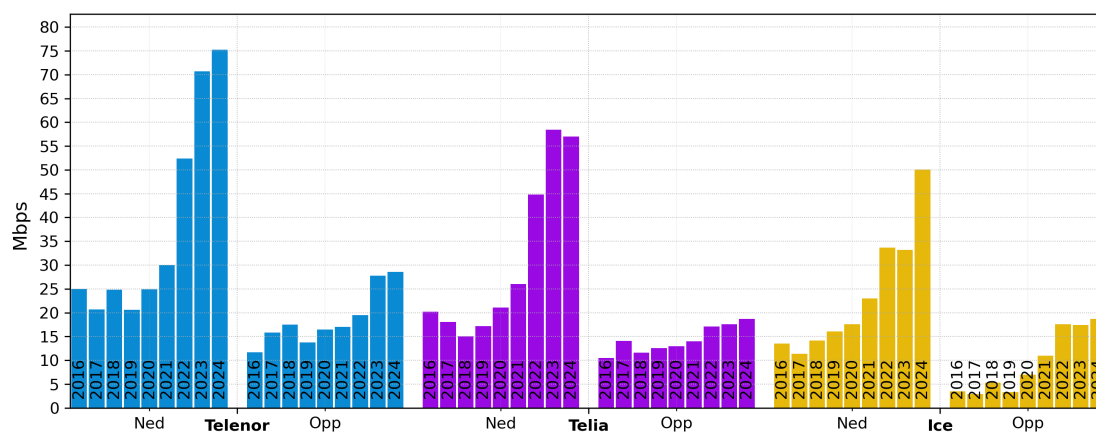
Figuren viser en utflating for Telenor og Telia i 2024, etter den kraftige økningen i 2023. Dette kan tyde på at gevinstene fra 5G-utbyggingen og tilhørende infrastrukturoppgraderinger nå er realisert. Ice sin 5G-utbygging er derimot i full gang, som gjenspeiles i økningen i 4G-hastigheter i 2024.



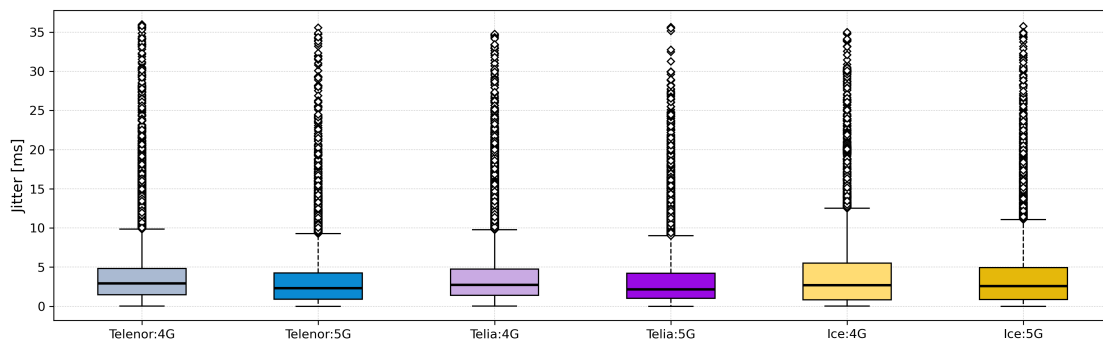
Figur 4.3: Variasjon i nedlastningshastighet for målnoder med Telenor (øverst), Telia (midten) og Ice (nederst). De mørkere stolpene representerer 5G noder, de lysere 4G.



Figur 4.4: Utvikling i 4G nedlastningshastighet 2019-2024.



Figur 4.5: Utvikling i ned- og opplastningshastighet 2016-2024.



Figur 4.6: Jitter i 2024, alle operatørene.

4.5 Jitter

Tiden datapakker i internett bruker på sin reise fra kilde til destinasjon varierer. Denne tiden er ofte referert til som forsinkelse ("latency"), og varierer med avstand og tilstand i datanett. Høy trafikkbelastning i nettverket kan for eksempel føre til at datapakker må vente i køer underveis i nettverket før de kan sendes videre. Variasjon av denne forsinkelsen over tid kalles for pakkejitter, eller bare jitter. Jitter viser til variasjon i forsinkelsen mellom datapakker som sendes og mottas i rekkefølge innen én datastrøm. Dette er en annen type variasjon enn den vi undersøkte i seksjon 4.3.

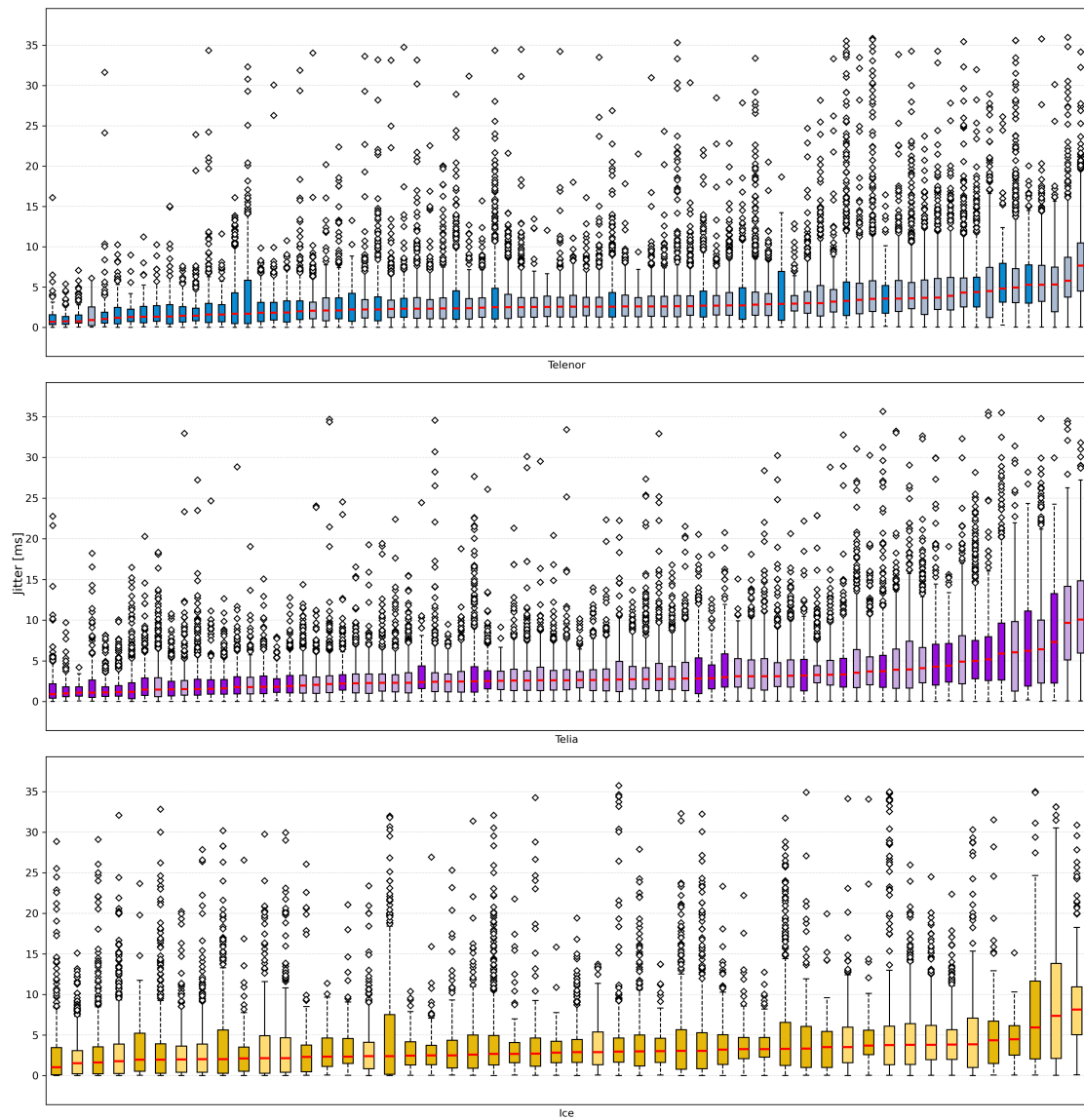
Jitter har fått økt oppmerksomhet hos operatørene i det siste. Videokonferanser er et eksempel på sanntidsapplikasjoner som er følsomme for høy jitter, og bruken av disse har økt dramatisk i de senere årene. Mobile nettverk brukes stadig mer til interaktive spill, der jitter bokstavelig talt kan bestemme hvorvidt en spillkarakter skal leve eller dø. Dette kan høres trivielt ut, men er viktig for mange, og gir næring til den viktige spillindustrien som globalt ser ut til å ha passert omsetningen til film- og musikkindustrien til sammen. Jitter er viktig også med tanke på nye, tidskritiske tjenester i 5G SA, som krever meget lav forsinkelse og variasjon.

Det finnes flere måter å beregne jitter på. I denne rapporten viser vi tallene innrapportert i Ookla Speedtest, som er basert på målinger av forsinkelse i nettet, noe som foregår parallelt med selve hastighetsmålingen. Hva som kan regnes som gode jitter-verdier avhenger av applikasjon, men lavere verdier er generelt å foretrekke fremfor høyere.

Figur 4.6 viser distribusjon av jitter for ulike operatører over alle målinger. Vi ser nokså like tall, med noe mer variasjon hos Ice. Medianverdiene for 4G er i samme størrelsesorden som i tidligere år, 2,91 ms, 2,75 ms og 2,7 ms for henholdsvis Telenor, Telia og Ice i 4G nett. For nodene med 5G-støtte er tilsvarende tall 2,3 ms, 2,17 ms og 2,59 ms.

Distribusjonene i figur 4.6 omfatter 99,5 % av alle målinger, dvs. under 0,5 % av målingene har jitter over 36 ms og er dermed ikke synlige i figuren. Vi merker oss at jitter-distribusjonen målt på denne måten har "lang hale", der noen målinger viser flere hundre millisekunder, for alle operatørene. Vi merker oss at alle tre operatørene har nesten 3 % jittermålinger over 20 ms for 4G, og over 2 % slike målinger for 5G.

Figur 4.7 viser variasjon i jitter mellom ulike målenoder. Vi merker at 5G-jitter generelt er lavere og varierer mindre enn 4G, men forskjellene er mindre enn når vi analyserer hastighet.



Figur 4.7: Variasjon i jitter hos Telenor (øverst), Telia (midten) og Ice (nederst). Mørkere stolper representerer 5G-noder, lysere 4G.



5. Bredbånd over satellitt

I dette kapittelet presenterer vi målinger av bredbånd over satellitt. Vi startet med målinger av en slik tjeneste implementert over en geostasjonær satellitt i 2020. Fra 2023 har vi også målt og analysert en tjeneste implementert over satellitter i lav jordbane, så i år er det andre året på rad vi kan se på deres tilgjengelighet og ytelse.

Satellittbredbånd spiller begrenset rolle i det norske bredbåndsmarkedet. Allikevel har lav jordbane-satellitter bidratt til en økning i interesse og popularitet, som kan begrunnes med relativt lav pris, gjør-det-selv installasjon, god ytelse og mange anvendelsesområder. Dette gjelder både private og næringsliv. Det er derfor interessant å studere stabiliteten og ytelsen for denne aksessformen. For det første kan satellitt gi et bredbåndstilbud i områder der det ikke finnes andre muligheter. For det andre kan satellittbaserte løsninger være en aktuell reserveløsning for virksomheter og kommuner med et særlig behov for pålitelig kommunikasjon.

Satellittforbindelsene som måles i denne rapporten er levert kommersielt Brdy¹ og Starlink². For Starlink bruker vi det enkleste ”privatabonnementet”.

Brdy sin tjeneste er basert på en geostasjonær satellitt tilhørende Eutelsat, og opererer i det såkalte Ka-båndet. Denne satellitten dekker det meste av Europa med et system av rettede antenner (såkalte *beams*). Norge dekkes av tre slike rettede antenner, som grovt sett dekker vest, øst og nord i landet. Vår målenode er lokalisert i Oslo, og representerer således ytelsen i antennen som dekker Sørøst-Norge. Dette er den antennen som opplever størst trafikk, og det er derfor grunn til å anta at ytelsen i andre deler av landet vil være minst like god som i dette området. Alle målingene er foretatt over en enkel forbindelse. Siden alle satellitterterminaler i samme område er knyttet til den samme ”basestasjonen” (samme transponder på satellitten) og deler på ressurser i denne, forventer vi ikke at resultatene ville sett vesentlig annerledes ut dersom vi økte antall målenoder i samme område. Brukerterminalen består av en parabolantenne og tilhørende modem med Ethernet-tilkobling.

Starlink hadde sin debut i 2019 og har vært operativ i Norge siden slutten av 2022. Tjenesten baserer seg i skrivende stund på over 7000 satellitter i lav jordbane, og dette antallet er planlagt økt til ca. 12000, med muligheter for ytterligere økning til over 30000. Kun et mindretall av de

¹<https://www.brdy.no>, tidligere Bigblu.

²<https://www.starlink.com/>

7000 satellittene er synlige i Norge, men antallet øker. Starlink satellittene er i omløpsbane rundt Jorden på ca. 550 km høyde og tar ca. 95 minutter for et fullt omløp. Brukerterminalen består av en selvstyrt bevegelig antenne, som selv finner optimal vinkel mot himmelen slik at synlighet av satellitter er best. Når denne vinkelen er funnet og finjustert, noe som kan ta opp til 24 timer, er det ingen flere bevegelser, og satellittene følges ved bruk av mange små antennelementer som er oppsatt i litt forskjellige vinkler, såkalt "fase-arrangert" antenne. Elektronikken styrer hvilket antenneelement som brukes til enhver tid, slik at satellitten følges over himmelen. Når den forlater horisonten, skal en annen satellitt være synlig, så sant det er stort sett uinnskrenket utsyn mot himmelen. Antennen kobles til en modemenhet med WLAN og Ethernet-kontakt. Brukerterminalen og satellittene kommuniserer over Ka- og Ku-band.

Våre målinger foretas fra den samme typen målenode som målingene av mobilnett, og kjører samme tester av dataplanet og ytelsen. Målenoden er koblet til et satellittmodem via 1 Gbps Ethernet-forbindelse. Både Brdy- og Starlink-antenne er plassert på taket av en bygg tilhørende OsloMet-campus på Bislett i Oslo, med uinnskrenket utsyn mot himmelen. Resultatene som vises her er basert på målinger foretatt i 2024. Vi rapporterer målinger av forsinkelse, pakketap og hastighet. Vi måler hastigheten hver time for å analysere variasjoner i løpet av døgnet.

5.1 Forsinkelse

5.1.1 Geostasjonær satellitt

Geostasjonære satellitter har en omløpstid rundt jorda på 24 timer, og befinner seg derfor alltid vertikalt over det nøyaktig samme punktet på jordoverflaten. Dette er kun mulig dersom satellitten flyr på en nøyaktig beregnet høyde på omtrent 36 000 km. Dette betyr at dersom to brukere på jorda skal kommunisere via en satellitt, vil den minimale forsinkelsen (round-trip time) mellom disse ligge på over et halvt sekund. Forsinkelse knyttet til prosessering og videre framsending i bakkebaserte nett gjør at den opplevde forsinkelsen normalt vil ligge et stykke over dette.

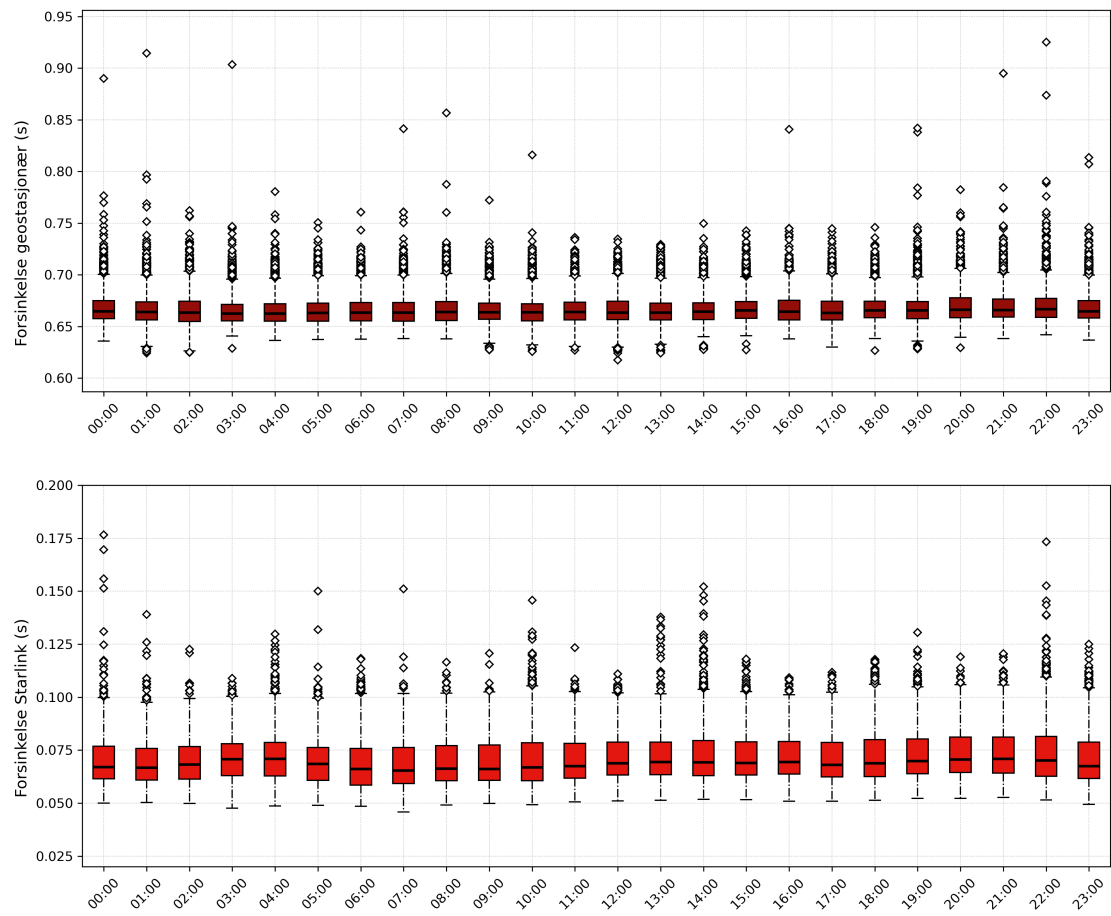
Figur 5.1 viser hvordan opplevd forsinkelse varierer gjennom døgnet. Forsinkelsen her er definert som tiden det tar fra en datapakke sendes fra vår målenode til denne mottar svar fra vår måletjener. Figuren viser at forsinkelsen normalt ligger mellom ca. 630 og 700 ms. Medianverdien i 2024 ligger på 664 ms, som er noe lavere enn i 2023. Det er færre pakker med lengre forsinkelse enn i tidligere år, som tyder på mindre metning i forbindelsen.

Forsinkelsen varierer lite gjennom døgnet. Den er lavest i perioder med lite trafikk (natt og tidlig morgen), og øker noe i perioder med høyere trafikkbelastning, spesielt kl. 21-22. Vi observerer at forsinkelsen varierer stadig mindre år for år. I figur 5.1 er det knapt mulig å se forskjellen, som var godt synlig i 2020 og 2021.

5.1.2 Satellitter i lav jordbane

Med sin lave jordbane på ca. 550 km over jordens overflate, har Starlink sine satellitter vesentlig lavere forsinkelse i kommunikasjonen enn den geostasjonære løsningen. Medianverdien vi har målt i 2024 var på 69 ms. Dette er hele 9 ms lavere verdi enn det vi målte i 2023. Gjennomgang av data viser at forsinkelsen har stabilisert seg mellom 60-65 ms fra 8. juni 2024. Slik vesentlig forbedring i forsinkelse kan forklares med flere satellitter, sjeldnere behov for transmisjon (ruting) fra en til annen satellitt for å nå jordstasjon, eller endring i lokasjon av jordstasjonen. Ettersom vår testinstallasjon fortsatt bruker jordstasjonen i Tyskland, tror vi at en vesentlig endring i Starlink inntraff på den dato, som for eksempel at flere satellitter i polarbane ble tatt i bruk.

Som vi ser i figur 5.1, er det også her noe variasjon gjennom døgnet, med marginalt større forsinkelse på ettermiddag / kveld. Vi illustrerer reduksjonen i forsinkelsen fra juni i figur 5.2, som viser et utvalg enkeltmålinger gruppert etter måned, samt medianverdier. Fra juni 2024 ser vi enkeltmålinger helt ned i 40 ms, som er en meget lav verdi og sammenlignbar med forsinkelse



Figur 5.1: Forsinkelse i geostasjonær (oppe) og lav jordbane (nede) satellittforbindelse ved ulike tider på døgnet. Y-aksen er kappet.

mellom Norge og Tyskland i vanlig internett basert på fiberoptiske kabler.

5.2 Pakketap

Figur 5.3 viser fordelingen av pakketap per dag i 2024, både geostasjonær og lav jordbane. Vi ser ingen vesentlige endringer for geostasjonær satellitt i forhold til målingene vi har hatt i tidligere år. De fleste dager ligger pakketapet mellom 0 og 0,5 %, men enkelte dager var det høyere.

Starlink har fortsatt høyere pakketap enn det vi har målt på den geostasjonære forbindelsen. Det er ingen dager med pakketap under 0,1 %, og pakketap på 0,2-0,6 % per dag er det mest vanlige i 2024. Dette er allikevel vesentlig lavere pakketap enn det vi har målt på Starlink i 2023: for ett år siden registrerte vi 0,5-1,5 % pakketap på Starlink på en "vanlig" dag. Vi viser fjorårets resultat innfelt i figur 5.3.

Vi har analysert pakketapdata for Starlink, og identifisert mange perioder med lengre pakketap. Situasjonen er imidlertid en helt annen enn i 2023—pakketap som varer i 15 sekunder eller mer er nå en sjeldenhet. Vi observerte kun 852 slike perioder (mot 7023 i 2023), derav 25 på 5 minutter eller lengre (mot 30 i 2023). Vi har observert forhøyet pakketap i dagene 6-8. juni, når en større omkonfigurering av Starlink kan ha funnet sted, som også resulterte i lavere forsinkelse (seksjon 5.1.2). Det er fortsatt ingen klar periodisitet i når disse lengre avbrudd forekommer.

5.3 Hastighet

Figur 5.5 viser hvordan nedlastningshastighet varierer gjennom døgnet for den geostasjonære tjenesten og tjenesten implementert over satellitter i lav jordbane. Tilsvarende tall for opplastningshastighet vises i figur 5.7.

5.3.1 Geostasjonær satellitt

Median-nedlastningshastigheten har økt sammenlignet med 2023, og ligger opp til 60 Mbps gjennom hele døgnet. Den faller noe ned ca. kl. 21 når bruken er antatt høyest³, men det fallet er langt lavere enn det vi har målt i tidligere år, da vi observerte median nedlastningshastigheter helt ned til 20 Mbps i de travleste timene.

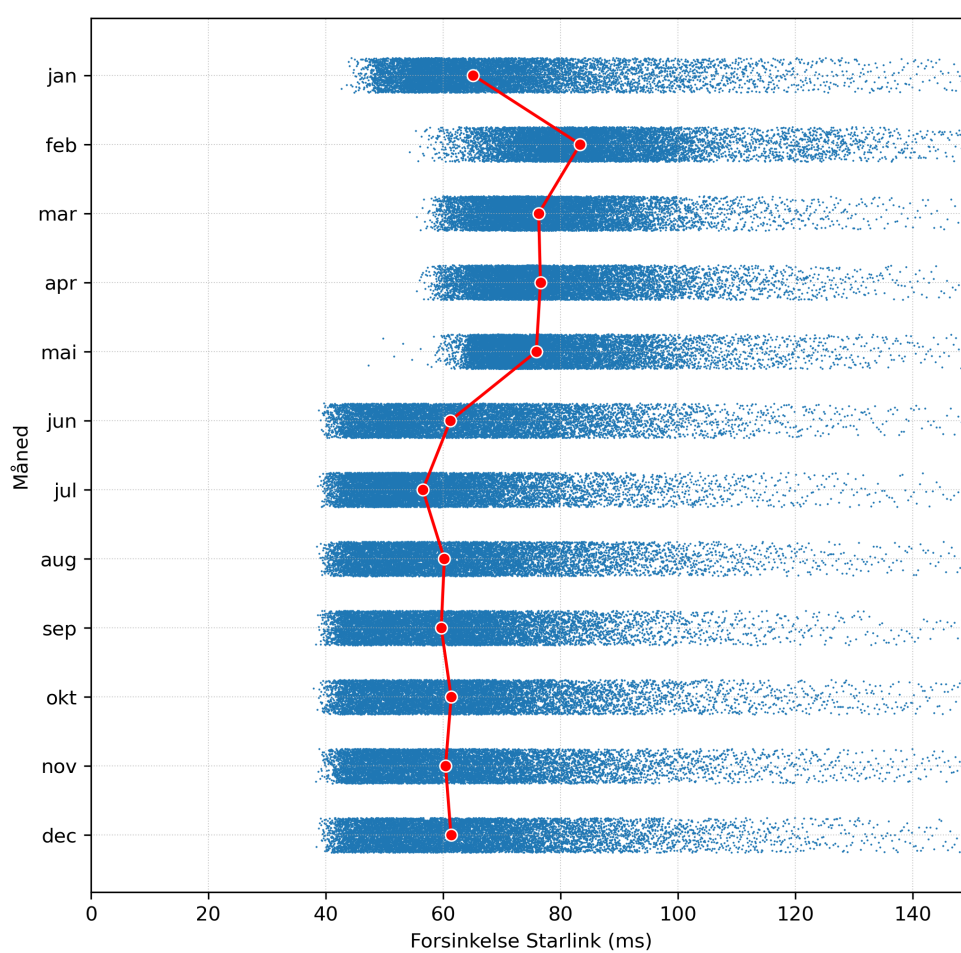
Median opplastningshastighet ligger på under 5 Mbps, som er noe lavere enn i 2023. Det er interessant at vi måler noe forskjellig fra år til år, og at lavere opplastningshastighet som regel sammentreffer med høyere opplastningshastighet, og omvendt. Variasjonen i opplastningshastighet gjennom døgnet er lav.

5.3.2 Satellitter i lav jordbane

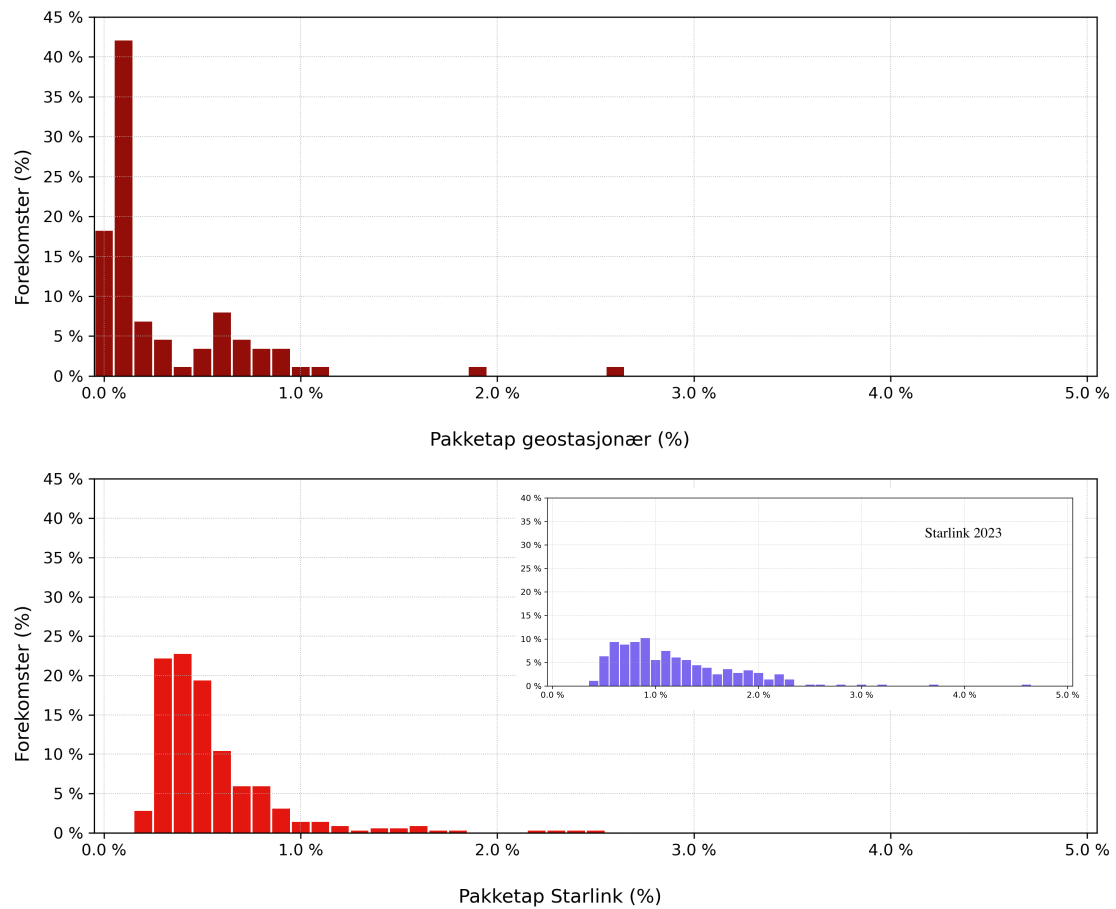
Medianmålinger for nedlastningshastighet for Starlink ligger på ca. 80-210 Mbps, med betydelig variasjon gjennom døgnet. Hastigheten faller ganske tydelig i tid på døgnet når bruken er antatt høy, som kl. 20-21, og øker i de tidlige morgentimene. Det indikerer en høyere utnyttelse av Starlink infrastrukturen i 2023 enn i 2024. Vi ser ingen klar fall i nedlastningshastighet måned-for-måned (figur 5.6). 50 % av alle resultatene i 2024 faller i 84-204 Mbps interval, med median på 150 Mbps, som er lavere enn det vi målte i 2023 (130-230 Mbps interval, median 180 Mbps).

Starlink er meget aktiv med utskytning av nye satellitter, og setter stadig flere i tilnærmet polarbane. Mange av disse satellittene kommer norske kunder til gode. Det kan se ut som at den gjennomsnittlige nedlastningshastigheten har økt noe gjennom året (figur 5.6), riktignok med en dipp i juli.

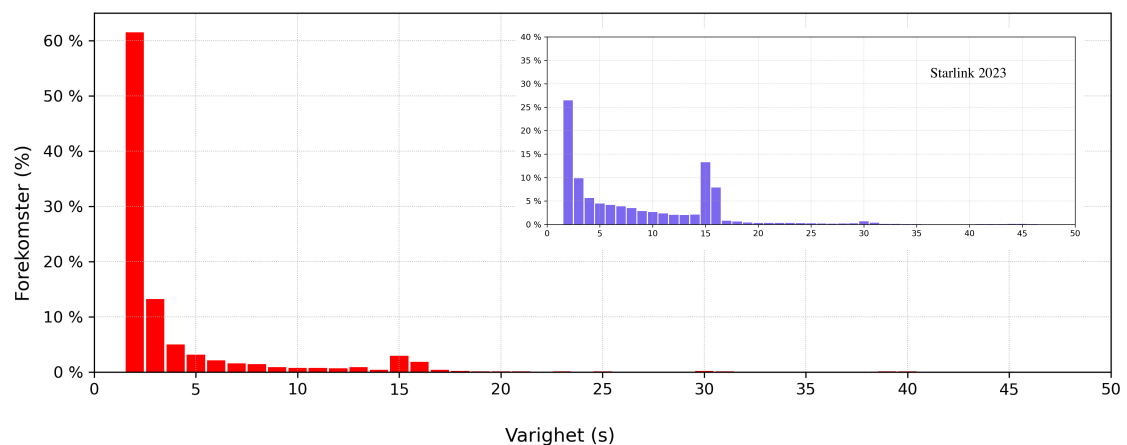
³Sommertid er innberegnet i visningen, dvs. kl. 21 er samme tid sommer og vinter.



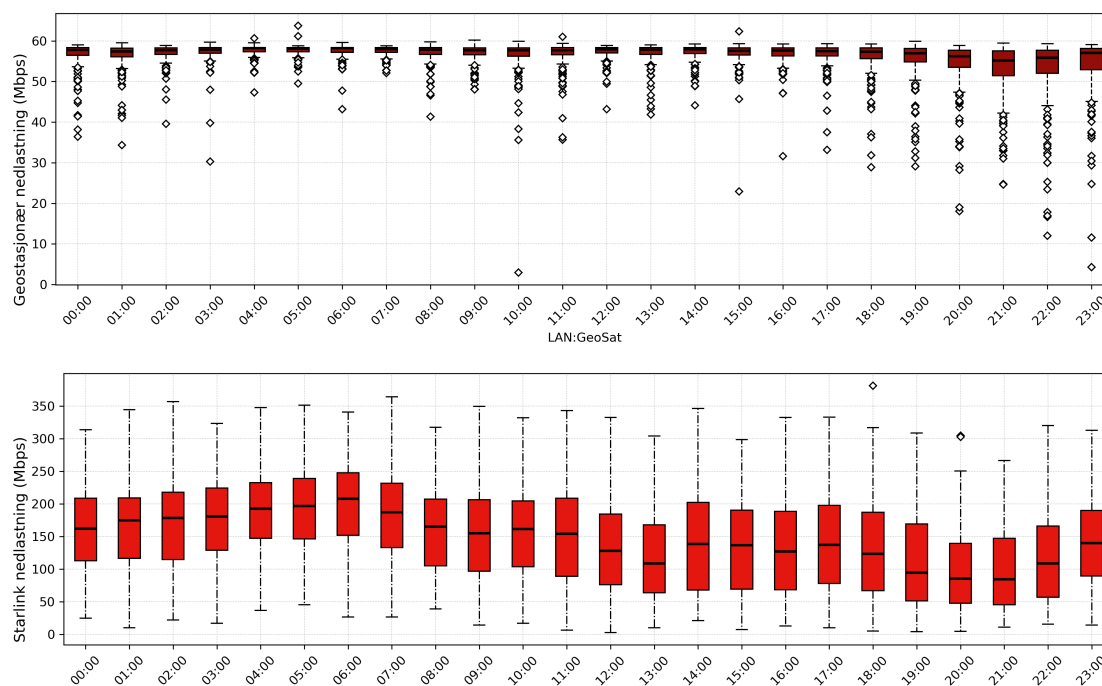
Figur 5.2: Forsinkelse i lav jordbane satellittforbindelse, enkeltmålinger gruppert etter måned. Reduksjonen i forsinkelsen fra juni 2024 er klart synlig.



Figur 5.3: Pakketap i satellittforbindelse, fordeling av daglige gjennomsnitt, geostasjonær (oppe) og lav jordbane (nede). Til sammenligning viser vi også lav jordbane 2023 (innfelt).



Figur 5.4: Distribusjon av kontinuerlig pakketap med varighet 2 sekunder eller mer, Starlink 2024 (bakgrunn) og 2023 (innfelt).



Figur 5.5: Nedlastningshastighet geostasjonær (øverst) og lav jordbane (nederst).

Medianverdien for opplastningshastighet for Starlink er målt til 13 Mbps, og 50 % av verdiene varierer i 10-17 Mbps interval. Det er igjen noe variasjon gjennom døgnet, med klar sammenheng med forventet trafikkmønster. Ytelsen er marginalt lavere enn i 2023.

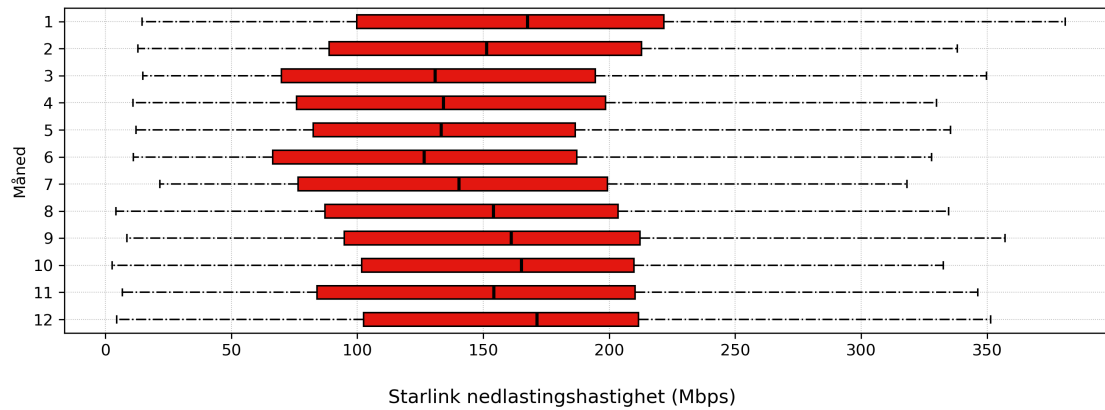
5.4 Diskusjon

Det er økende offentlig interesse for kommunikasjonsløsninger basert på satellitter i lav- og mellomjordbane, som allerede brukes eller vurderes brukt i en rekke sammenhenger. Man har fått et forholdsvis rimelig bredbåndsalternativ som kan benyttes praktisk talt overalt, enten som hoved- eller reserveforbindelse. SpaceX sitt Starlink-system og tjeneste har vært sentrale i denne utviklingen, som teknologipionerer og den første tilbyderen i global skala. Vi har analysert Starlink i to år og vil fortsette med det. Det finnes også andre tilbydere som kan benyttes i Norge, og vi arbeider med å etablere målesystemer for disse.

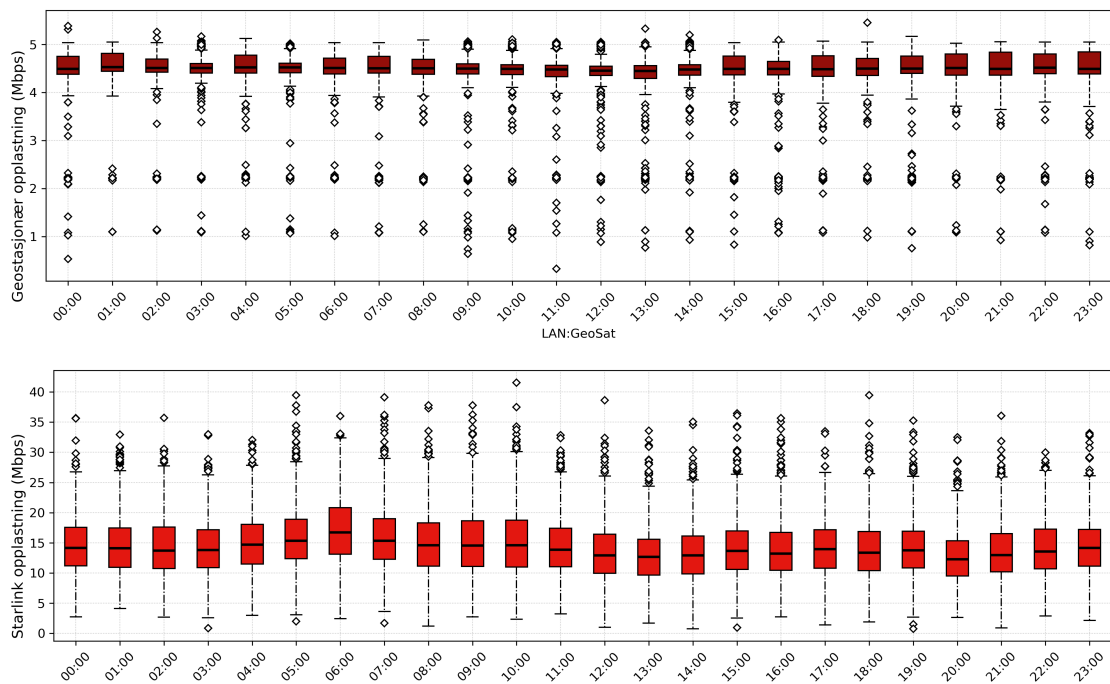
Starlink leverer en tjeneste med svært lav forsinkelse, nesten ti ganger lavere enn det vi måler på den geostasjonære løsningen. Forsinkelsen er også målbart lavere enn i 2023, sannsynligvis som følge av flere satellitter i omløp og optimalisert ruting mellom satellitter og bakkestasjonen. Den geostasjonære forsinkelsen på 630–700 ms kan være akseptabel for enkelte tjenester, men er en ulempe for interaktive applikasjoner som videokonferanser, og uakseptabel for spill og mange industrielle anvendelser. Med en forsinkelse på 60–70 ms kan Starlink brukes i langt flere sammenhenger, med god brukeropplevelse.

Variasjon og forhøyet forsinkelse i datakommunikasjon på enkelte tider av døgnet er som regel forbundet med metning i forbindelser, som varierer i takt med at flertallet av brukere jobber, hviler eller driver med fritidsaktiviteter. Nettverktilbydere investerer i kommunikasjonskapasiteten slik at det akkurat er nok kapasitet i nettverket når belastningen er på sitt høyeste. Dette fører til noe kødannelse i buffere og økt trafikkforsinkelse ved høy belastning.

Det at vår geostasjonære satellittforbindelse har stadig kortere perioder i døgnet med nedsatt



Figur 5.6: Nedlastningshastighet lav jordbane (Starlink), måned for måned i 2024.



Figur 5.7: Opplastningshastighet geostasjonær (øverst) og lav jordbane (nederst).

ytelse eller forhøyet forsinkelse, tyder på forbedret kapasitet i forhold til bruk. Dette kan skyldes enten utbygging av kapasitet eller en nedgang i antall brukere. Da det er klare grenser for hvor mye man kan forbedre kapasitet på et objekt allerede i geostasjonær jordbane, er det sterke indisier på at dette produktet er på vei ned i popularitet i markedet.

Det nye vi ser i 2024, sammenlignet med i fjor, er at nå Starlink begynner å få synlig forskjell i forsinkelse og ytelse på ulike tider av døgnet. I tillegg er ytelsen noe redusert, uten økt pakketap, som tyder på en administrativ innstramning av tilgjengelig kapasitet per bruker. Ved å redusere tilgjengelig båndbredde per bruker, kan systemet støtte et proporsjonalt høyere antall brukere. Samtidig vil de færreste merke en reduksjon fra 180 til 150 Mbps tilgjengelig båndbredde til nedlastning, eller 15 til 13 Mbps opplasting.

Når det gjelder ytelse som opp- og nedlastningshastighet, leverer Starlink i størrelsesorden tre ganger høyere tall enn den geostasjonære løsningen. Det åpner for en hel del nye anvendelser. Det er i tillegg enkelt å installere en Starlink-terminal, uten montør eller eksperthjelp. Begge løsninger har jordstasjoner utenfor Norge, men presenterer brukeren med norske IP-adresser, slik at tjenester med lokasjonbegrensning som NRK TV kan brukes.

Starlink viser en betydelig reduksjon i pakketap fra 2023 til 2024. Selv om sannsynligheten for pakketap fortsatt er høyere enn på tilsvarende geostasjonært eller mobil bredbånd, begynner nivået å bli tilstrekkelig for stadig flere anvendelser. Antallet lengre brudd på 10 sekunder eller mer er kun ca. en tidel av det vi har målt i 2023.

Variasjon i ned- og opplastningshastighet over lengre tid (måneder eller år) på satellittforbindelser kan skyldes konfigurasjonsendringer. Brdy bekrefter at slike endringer foretas fra tid til annen, men nøyaktig hva satellittoperatøren gjør er konfidensielt. Endringene er alltid i tråd med ”rettferdig brukspolicy”, og ment å tjene ”kunde felleskapets beste”. Det er mulig å prioritere nedlastning i tilgjengelige ressurser på bekostning av opplasting gjennom konfigurasjonsendringene, og våre funn kan tolkes i denne retningen.

Også hos Starlink er endringene konfidensielle, og de skjer relativt hyppig, ettersom det kontinuerlig skytes opp nye satellitter, settes i bane og justeres. Starlink sine justeringer er drevet av et overordnet mål om å øke kapasitet, tilgjengelighet og tjenestekvalitet i stadig flere områder over hele verden.



6. Mobildekning på tog

I dette kapittelet presenterer vi målinger av mobildekning om bord på tog. Målingene er gjennomført ved å plassere NorNet målenoder på lokaltog som brukes på InterCity-strekninger i Stor-Oslo, i samarbeid med Norske tog. I motsetning til målingene utført i 2019 og 2021, bruker vi nå 5G-kapable noder.

Det er seks noder vi har samlet data fra i 2024, med to 5G-modemer hver, som ga oss fire datakilder for hver av Telenor, Telia og Ice. Alle togene vi har benyttet har signalforsterkere installert om bord (se faktaboks). På togsettene vi har installert utstyret på i 2024, er det "Commscope Node AM" signalforsterkere som brukes. Disse kan forsterke signal i fire band samtidig, opp til 40 dB, og har innebygd funksjonalitet til å justere signalstyrke i togsettet for å bl.a. redusere interferens med sterke signaler fra basestasjoner som befinner seg i nærheten av toget.

I vår analyse av målingene av signalstyrke deler vi kartet over det geografiske området der målingene er utført i segmenter på 1x1 km, og slår sammen alle målinger av dekning og ytelse i hvert segment. Antallet måleravlesninger vi har i hvert segment vil variere med togsettets reisemønster. Vi krever en minimum oppholdstid for en operatør for å ta med det aktuelle segmentet i vår analyse.

For hvert intervall beregner vi dekningen gjennom målt signalstyrke. 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 1 km-intervall. Dekning i denne sammenhengen betyr altså at vår målenode var i stand til å opprettholde en tilkobling til mobilnettet. Dette betyr ikke alltid at den opplevde tjenstekvaliteten vil være tilstrekkelig til å benytte alle slags applikasjoner. Merk også at Ice har en avtale om nasjonal gjesting i Telias nett der de ikke har egen radiodekning. Den rapporterte dekningen for Ice vil derfor også inneholde noe dekning fra Telia.

Hver målenode rapporterer status for forbindelsen til sine mobilnett flere 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 jernbanenettet. I tidligere analyser av mobildekning på tog har vi undersøkt hvilken teknologi forbindelsen går over. Dette kan være 4G eller ingen tjeneste. I 2024 observerer vi mobiltjeneste overalt i måleområdet. Aktiv tjeneste veksler mellom 4G og 5G. Dessverre bruker operatørene forskjellige algoritmer for å indikere tilstedeværelse av 5G, slik at vi ikke kan bruke våre målinger

til å presentere 5G utbyggingsgrad på en riktig måte.

Signalforsterkere på tog

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. Det er 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 3 dB 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 20 dB 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.

Mobiloperatørene, Bane NOR og Norske tog har et samarbeid om å forbedre mobiltjenester på tog. Avtalen innebærer at mobilselskapene skal prioritere dekning langs jernbanestrekningene, Bane NOR skal bygge dekning i tunneler, og Norske tog 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 bedre dekning og brukeropplevelse. Alle målenodene våre er plassert på tog hvor det er installert signalforsterkere.

6.1 Mobil dekning

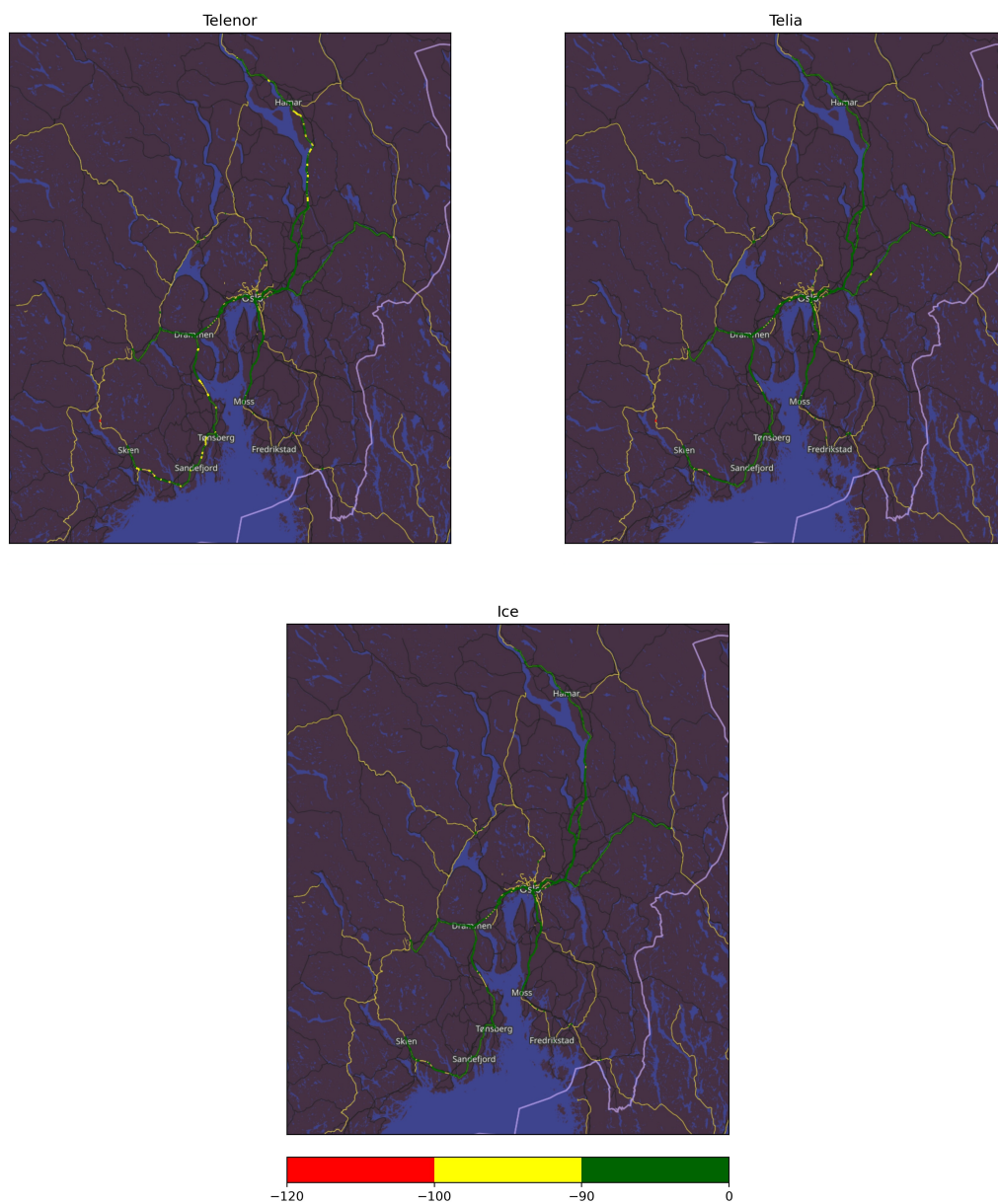
I måleperioden har togene beveget seg mellom Lillehammer i nord og Skien i sør, og strekningene som ble dekket varierer noe mellom operatørene. Figur 6.1 viser målt signalstyrke (RSRP) der vi har tilstrekkelig antall målinger. Fargekodene viser median signalstyrkeverdi, der gul er ”tilfredsstillende” og grønn er ”god” signalstyrke på -90 dBm eller bedre .

Resultatene viser jevnt over tilfredsstillende eller bra mobildekning på tog i stor-Osloområdet.

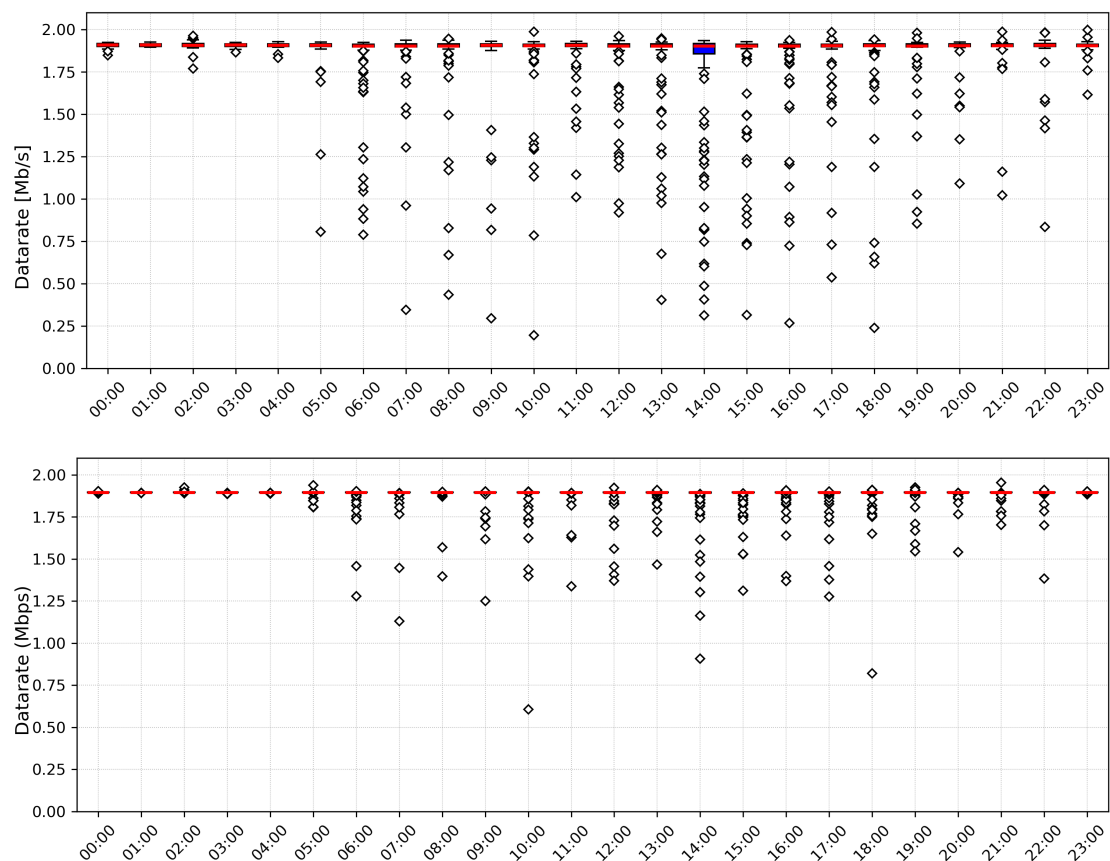
6.2 Brukeropplevelse

Hva betyr ”tilfredsstillende” signalstyrke for en bruker? Vi prøver å finne svaret på det spørsmålet ved å emulere typisk videokonferanse slik man kan tenke seg å ha på sin laptop mens man reiser med tog i Oslo-området. Videokonferanser er utvilsomt blant de mest krevende applikasjonene man kan forsøke å bruke på tog, men mange vil forvente at det skal være mulig å gjennomføre dem med tilfredsstillende kvalitet.

Vi emulerer en videokonferanse med normal ”høy” kvalitet, som for eksempel i Microsoft Teams eller Google Meet. Disse krever omtrent 2 Mbps båndbredde i begge retninger, dersom man også sender egen video. For denne testen benyttet vi verktøyet ”Netperfometer”, utviklet av Simula, og konfigurerte det til å sende en 60 sekunder lang UDP-datastrøm to ganger i timen gjennom hele døgnet. Netperfometer sender pakkene 30 ganger per sekund i grupper (”bursts”), tilsvarende det en typisk videokonferanseapplikasjon gjør. Pakkene sendes til en server, som returnerer de mottatte



Figur 6.1: Målt signalstyrke og kvalitet for Telenor, Telia og Ice, på strekningene der vi har tilstrekkelig antall målinger.

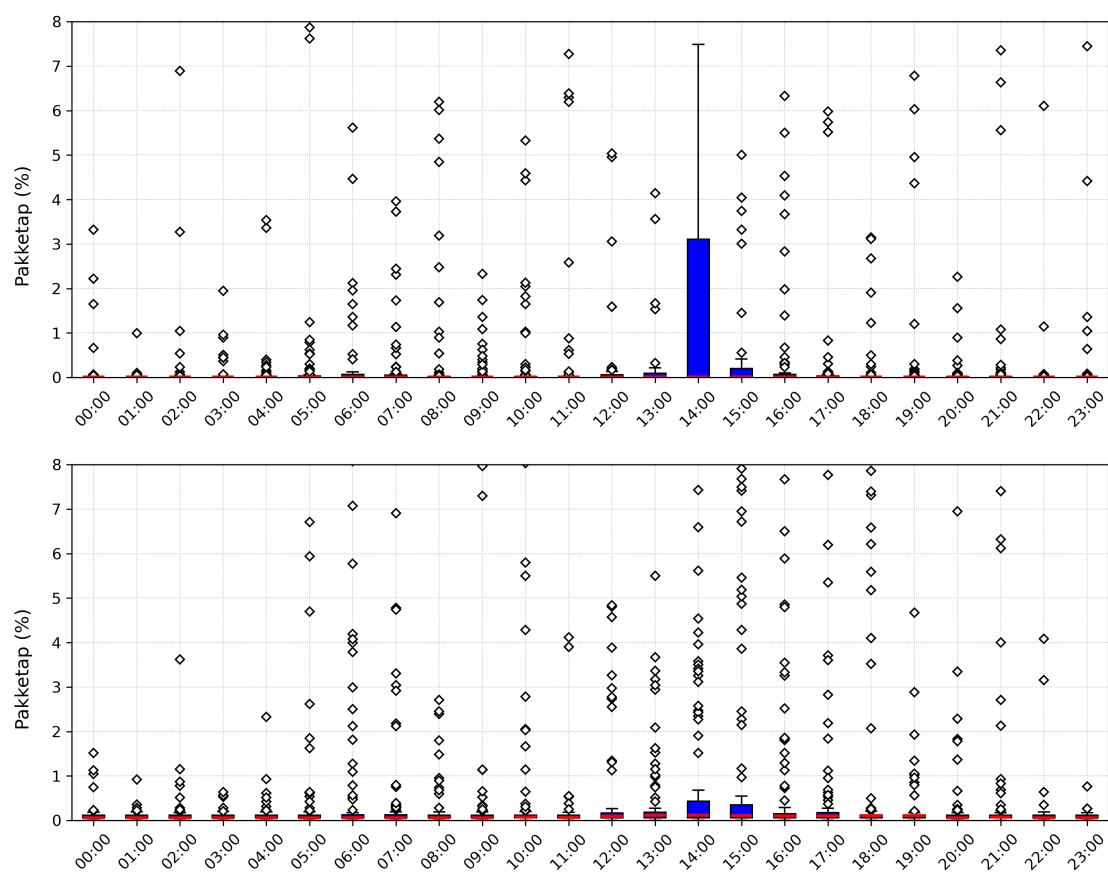


Figur 6.2: Oppnådd datarate for emulert 1,95 Mbps videostrøm på tog, fra toget til serveren (oppe) og fra serveren til toget (nede). Figurene er basert på data fra alle mobiloperatørene.

pakkene tilbake til målenoden. Vi registrerer og måler pakketap og mottatt datarate på begge sider. I tillegg til målinger på tog, har vi gjennomført tilsvarende målinger på en kontrollgruppe med statiske noder.

Testing av nettverkkvalitet og spesielt brukeropplevelse på tog er vanskelig å gjennomføre i praksis, på grunn av ulike avbrudd i datainnsamlingen (ikke relatert til mobiloperatørene), utilgjengelige målenoder og logistikkutfordringer. Vi har samlet et begrenset datagrunnlag, som ikke lar seg knytte til spesifikke lokasjoner. Vi velger å presentere resultatene samlet for alle tre mobiloperatører — det begrensede datagrunnlaget gir oss ikke anledning til å presentere pålitelige resultater per operatør.

Figur 6.2 viser oppnådd datarate som generelt vil gi god videokvalitet, med unntak for perioden kl. 14-15, hvor det i enkelte tilfeller er målt redusert datarate. Dette kan ha sammenheng med rushtid og kapasitetsbegrensninger i nettet. I tidsrommet kl. 00-05, når togene i tillegg står rolig på togdepot, oppnås stort sett full datarate. Vi observerer også større variasjon og svakere resultater på datastrømmer fra toget til serveren, altså opplastningshastigheten, enn andre veien. Dette er i samsvar med vår analyse i kapittel 4, som viser at opplastningshastigheten normalt er lavere enn nedlastningshastigheten. Når vi ser på pakketap i videostrømmene (figur 6.3), finner vi at omlag 25 % av testene registrerte opp til 3 % pakketap i perioden kl. 14-15. Dette vil kunne merkes på videokvaliteten. Merk at median pakketap er tilnærmet null, som betyr at halvparten av testene hadde utmerket resultat også i denne perioden.



Figur 6.3: Pakketap i emulert 1,95 Mbps videostrøm på tog, fra toget til serveren (oppe) og fra serveren til toget (nede). Figurene er basert på data fra alle mobiloperatørene.

Å delta i en videokonferanse er kanskje det mest krevende bruksområde man kan forvente vil lykkes på et tog. Våre resultater viser at dette stort sett er gjennomførbart, men avbrudd må påregnes, og det kan være hensiktsmessig å unngå å sende egen video. De generelt gode resultatene viser at andre bruksområder—nedlasting av dokumenter, nettsurfing og lydsamtaler—sannsynligvis vil gi en god brukeropplevelse på tog. Simula jobber med å etablere en mer stabil og driftsikker testinfrastruktur for videre tester i tiden fremover.



7. Bakgrunn og metode

Målingene som presenteres i denne rapporten er utført ved hjelp av NorNet Edge, en infrastruktur for målinger og eksperimentering i mobile bredbåndnett¹. Infrastrukturen består av et hundretalls målnoder spredt rundt i hele Norge. Hver målnode er koblet til 2 mobiloperatører, og samler kontinuerlig inn data om dekningsforhold, status for tilkoblingen og ytelse for hver forbindelse. Infrastrukturen omfatter også en backend plassert hos Simula, som tar i mot, prosesserer og lagrer måledata som vi bruker til å lage denne rapporten.

Center for Resilient Networks and Applications (CRNA) samarbeider med lokale partnere over hele landet som fungerer som vertskap for målnoder. Vi samarbeider direkte med en rekke skoler, musikkorps og andre frivillige foreninger om utplassering av målnoder. Noen noder befinner seg også i forskjellige hyttefelt. Alle lokasjonene har i det minste "tilfredstillende" radiodekning, i følge operatørene selv. Figur 7.1 gir et inntrykk av den geografiske fordelingen 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 utbygde 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.

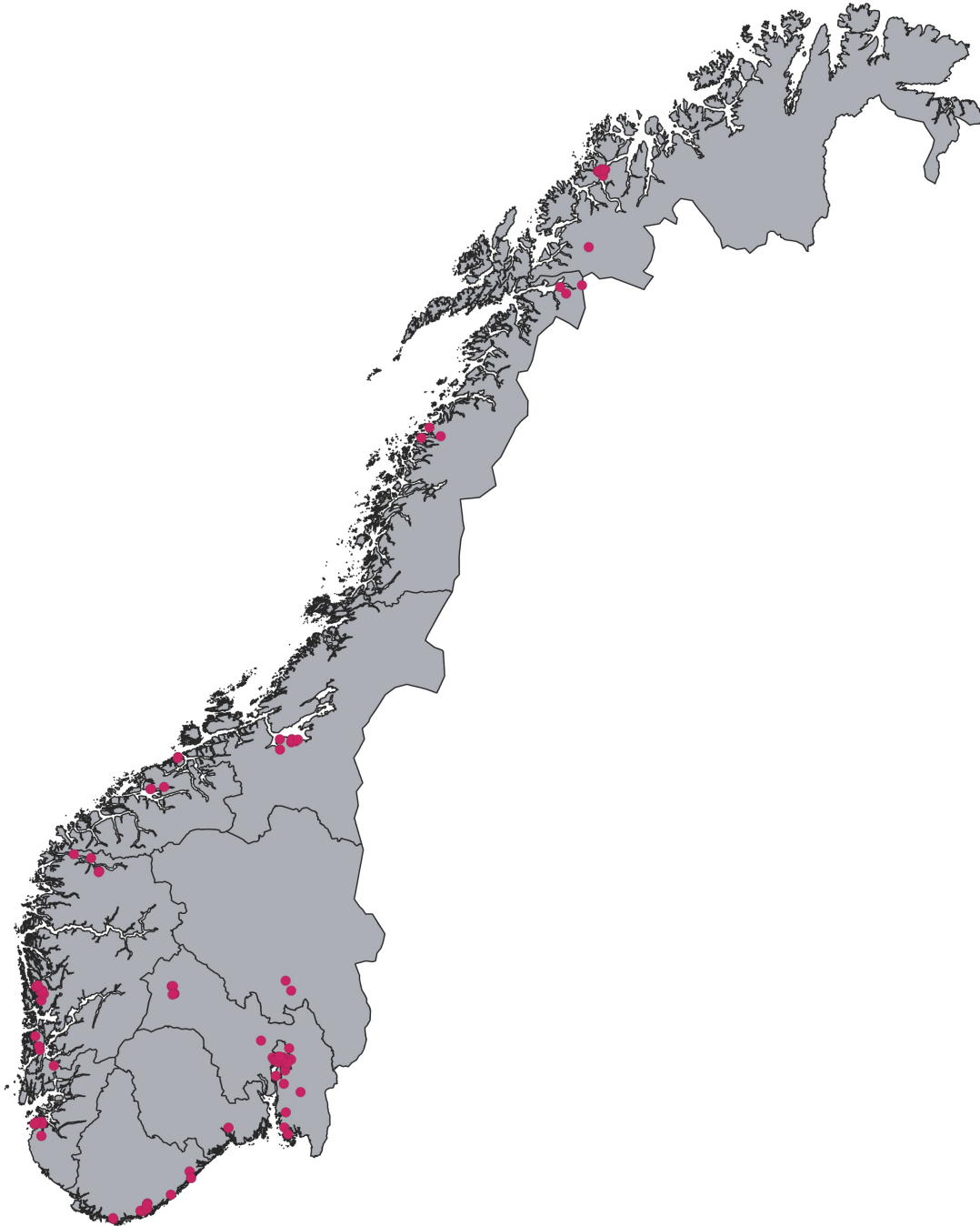
Antallet målnoder har ligget på rundt 100 gjennom året, men har variert noe gjennom måleperioden, som vist i figur 7.2. Vi har stasjonære målnoder i alle landsdeler².

7.1 Mobilnettene vi måler

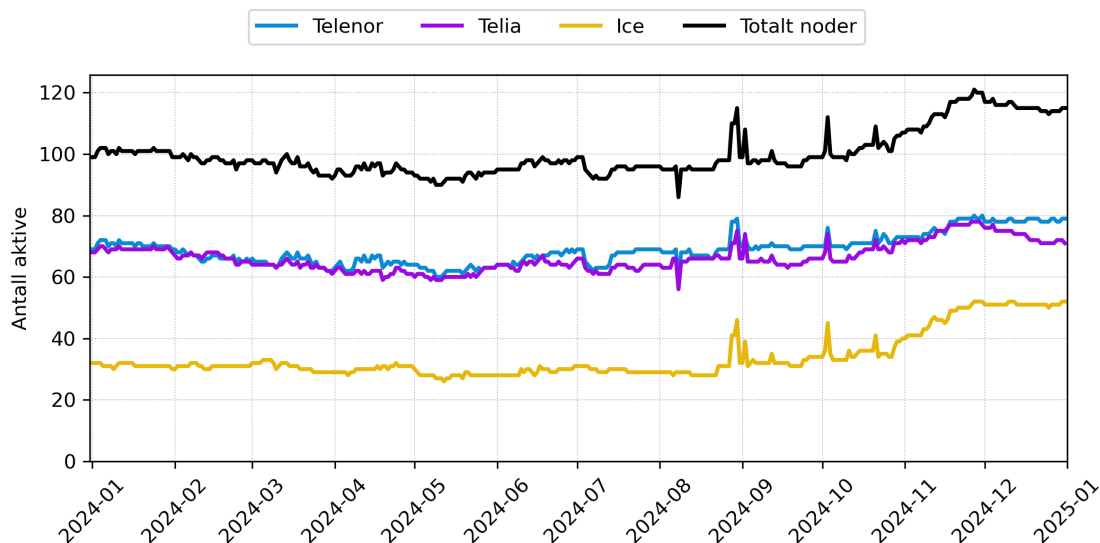
Vi gjør målinger i alle tre kommersielle mobilnett i Norge med eget radionett, det vil si Telenor, Telia og Ice. Telenor og Telia opererer hvert sitt landsdekkende mobilnett. Disse operatørene har sitt eget kjernenett og sitt eget radioaksessnett, og forbindelser i disse nettene er aldri avhengige av komponenter i andre mobilnett. Ice opererer det tredje norske mobilnettet, fra 2015 basert på LTE (4G). I 2022 introduserte også Ice 5G i sitt nett. I denne rapporten presenterer vi målinger for

¹For mer informasjon, se <https://www.simulamet.no/research/research-departments/center-resilient-networks-and-applications> og <https://robustenett.no/map>.

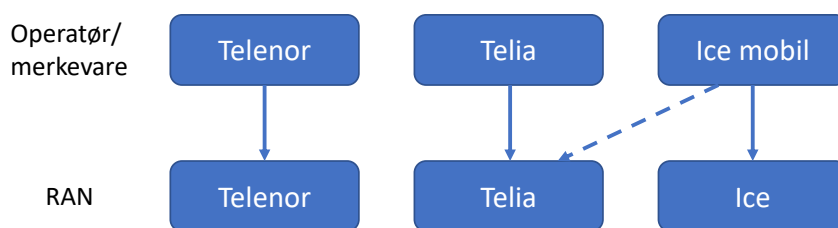
²Om du kan tenke deg å være vert for en målnode, ta kontakt med tarik@simula.no.



Figur 7.1: Geografisk fordeling av målenoder.



Figur 7.2: Antall aktive målenoder samt forbindelser fra hver operatør, per dag i 2024.



Figur 7.3: Operatører og nettverk behandlet i denne rapporten.

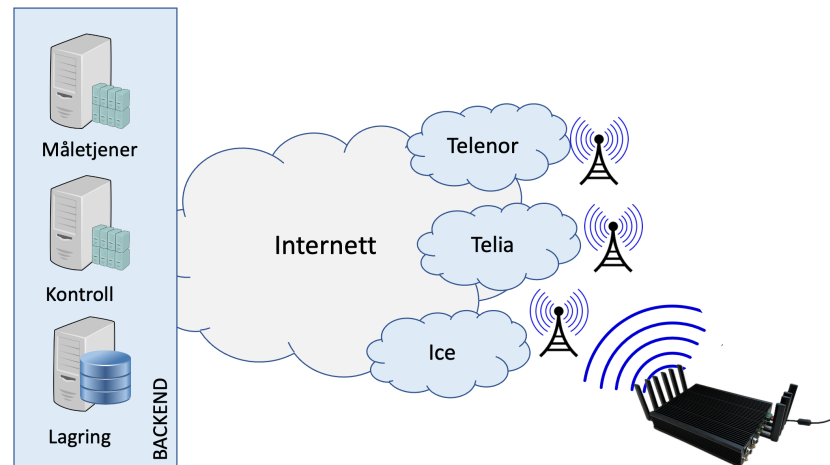
Ice-tjenesten med nasjonal gjesting. Med andre ord, Ice benytter Telias nett, dersom måleutstyret er utenfor områder som Ice dekker med egne antenner.

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

7.2 NorNet Edge målenoder

Våre målenoder har gjennomgått flere generasjonskifter gjennom årene. 4G-nodene vi bruker har vært i tjeneste siden 2018. De er basert på hyllevarekomponenter, og bruker interne PCI express modemer for å koble seg til mobilnettene. Målenodenes strømforsyning er koblet til en fjernstyrt av/på bryter, som gjør at strømtilførselen kan kuttes via SMS og dermed re-starte noden, noe som vesentlig øker driftsstabiliteten til nodene. 4G-nodene kjører et standard Debian Linux operativsystem, og er derfor svært fleksible med tanke på hva slags målinger som kan støttes.

Teknisk er 4G-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.



Figur 7.4: NorNet Edge måleinfrastuktur.

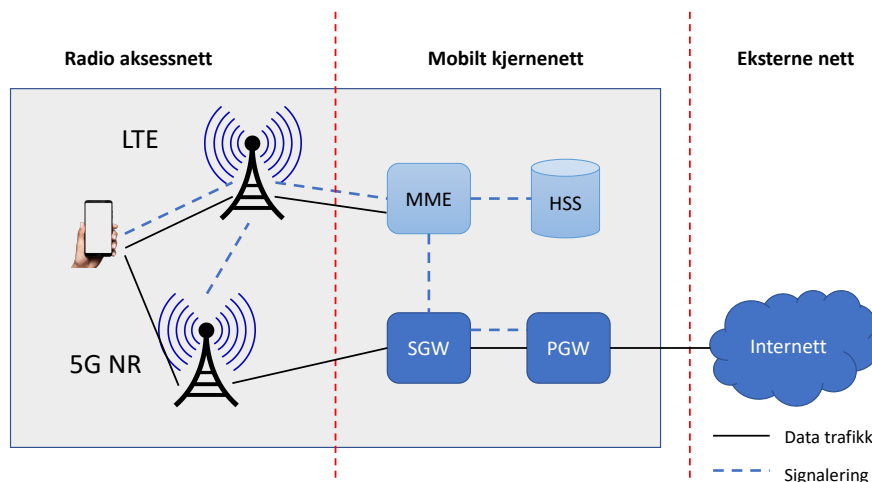
Vår 5G-måleinfrastuktur har vært under gradvis utrulling siden 2021. 5G-målenodene som ble anskaffet frem til 2023, er basert på Celerway Arcus-plattformen, med to 5G Quectel RM50xQ-modemer i hver node. For å øke utrullingshastigheten til våre 5G målenoder, har vi fra 2024 tatt i bruk den rimeligere Celerway Stratus, en ARM-basert OpenWRT Linux-plattform. Stratus-maskinvaren er noe mer begrenset enn Arcus, men tilstrekkelig for våre målinger. Også Stratus er utstyrt med to Quectel RM50xQ-modemer. Disse modemene støtter 3GPP Release 15 og datarater på opptil 2,5Gbps nedlasting og 600Mbps opplasting. Ved utgangen av 2024 hadde vi totalt 82 aktive 5G-noder.

Våre 5G-målenoder er det vi omtaler som 5G-kapable, det vil si at de benytter 5G der det er tilgjengelig, og ellers faller tilbake på 4G-nettet. 3G (UMTS) er faset ut i alle norske mobilnett i løpet av 2021. I 2024 tilbys det fortsatt kun 5G-NSA ("*Non-Standalone*") som kommersiell mobiltjeneste i Norge. Denne teknologien bruker 5G-radio sammen med 4G-kjernenett. Fullverdig 5G-SA ("*Standalone*"), som baserer seg på en egen 5G-kjerne, er forventet tilgjengelig i de kommende årene. Våre 5G-målenoder er allerede klargjort for 5G-SA.

7.3 Server-side infrastruktur

Målenodene utfører målinger av kvaliteten i dataplanet 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 vår internettleverandør. Måleserverne er utstyrt med god kapasitet i form av minne, prosessorkraft og nettverkstilkobling, for å sikre at de ikke blir en begrensende faktor i målingene. Deres helse og ytelse overvåkes kontinuerlig.

Målenodene overfører resultater fra målingene til en sentral server, hvor dataene behandles og lagres i en database. De samlede dataene blir behandlet og filtrert for å fjerne perioder der vi opplevde problemer med infrastrukturen på serversiden. NorNet Edge omfatter også systemer for å overvåke, vedlikeholde og oppdatere målenodene, samt for å koordinere de ulike målingene som skal utføres.



Figur 7.5: Hovedkomponentene i 4G (LTE) og 5G-NSA (NR) nettverk.

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 i mobilnettet, gjennom å måle den opplevde nedlastings- og opplastingshastigheten.

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

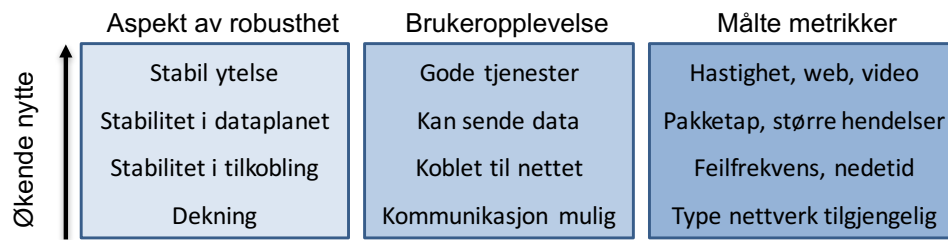
7.4.1 Mobile bredbåndsnett

Figur 7.5 viser en forenklet framstilling av de viktigste komponentene i et 4G (LTE) eller 5G NSA mobilnett. Begge nettverkene består av et radio aksessnettverk og et kjernenett. Radionettet inkluderer brukerterminaler og basestasjoner (kalt henholdsvis eNodeB i 4G og gNodeB i 5G). Kjernenettet inkluderer et antall sentrale funksjoner. 4G- og 5G-nettverk er rene datanettverk, og inkluderer ikke spesielle komponenter for å produsere linjesvitsjet tale som i 3G og eldre teknologier. En viktig del av kjernenettet for våre analyser er komponenten som forbinder mobilnettet med eksterne nett (internett). Denne enheten kalles Packet Data Network Gateway (PGW).

De første 5G-nettverkene er såkalte Non-Standalone (NSA) nettverk, som er en inkrementell utvikling fra 4G-nettene. 5G NSA gjør det mulig å raskere etablere et nettverk som oppfyller deler av 5G-visjonen. 5G-basestasjoner etableres parallelt med 4G-basestasjoner. 4G-basestasjonene fungerer som en primærforbindelse for kontrolltrafikk, og all signalering forbundet med å etablere kommunikasjon i både 4G og 5G går over denne forbindelsen. 5G-forbindelsen styres via 4G, og er en ren kapasitetsforbindelse som gir brukere tilgang til økt båndbredde. Annen funksjonalitet, som svært lav forsinkelse og støtte for svært mange samtidige tilkoblinger på en basestasjon, støttes ikke i 5G NSA. Disse egenskapene kommer først senere når hele 5G kjernenettet er på plass i såkalt Standalone (SA) modus.

7.4.2 Rammeverk for måling av robusthet

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



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

nivåene bygger på hverandre, og representerer økende grad av opplevd nytteverdi for endebrukeren. 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 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, 4G eller 5G. I denne rapporten sier vi at vi har dekning i et område så lenge en målnode 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 etablerer, modifiserer eller fjerner basestasjoner. Vårt oppsett med stasjonære målnoder er derfor ikke egnet til å måle dekning. Vi rapporterer derfor kun dekningsmålinger fra mobile målnoder, altså noder montert på tog.

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 i PGW og i brukerterminalen (se faktaboks side 10). Fra brukerens ståsted vil dette som regel bety at terminalen har en tildelt gyldig 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 SGW eller PGW. I denne rapporten ser vi på den tildelte IP-adressen som et mål på hvor stabil nettverkstilknytningen er. Vi måler hvor ofte en målnode 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 målnoder. Til det formålet bruker vi klient-server infrastrukturen levert av selskapet Ookla, som spesialiserer seg på nettverksmålinger

og analyse.

7.5 Ookla Speedtest

I vår analyse av ytelsen i mobile nett (kapitel 4) bruker vi Ookla Speedtest tjeneste, som har utpekt seg som en standard for dette formålet og brukes mye i hele verden. Det at tjenesten er populær betyr ikke nødvendigvis at den er formålstjenelig, og vi må stille oss spørsmål om vi kan stole på resultatene denne tjenesten gir oss. Det som er spesielt relevant for oss er om denne tjenesten av en eller annen grunn skulle favorisere noen operatører fremfor andre.

Det brede publikum bruker gjerne enten den webbaserede løsningen til Ookla³ eller deres app på mobil eller PC. Vi bruker den offisielle Ookla klienten, som installeres gjennom pakkemanager på våre Linux målnoder (`apt install speedtest`). Klienten startes med riktige parametre til angitte tider gjennom et skeduleringsskript. Det utføres én måling per eksekvering. Etter utført måling, leverer klienten en JSON-fil med måledata som resultat, som prosesseres og lagres i vårt backend.

Ookla deler ikke tekniske detaljer om hvordan deres algoritme er implementert, men det er klart at server-siden informerer klienten om tilgjengelige måleservere i klientens geografiske område, der klienten selv velger den optimale måleserveren gjennom en serie med ICMP ping. Våre målnoder velger alltid servere lokalisert i Norge, og vi ser en akseptabel geografisk spredning over landet. Siden mobilnett har en sentralisert arkitektur der all trafikk må gjennom sentralt plasserte kjernekomponenter, befinner disse serverne seg dermed typisk i sørlige deler av landet. Etter å ha valgt måleserver, åpnes det parallelle nedlastningssesjoner over en periode på omlag 10 sekunder, og hastigheten måles. Prosedyren gjentas for målinger av både nedlastings- og opplastingshastighet.

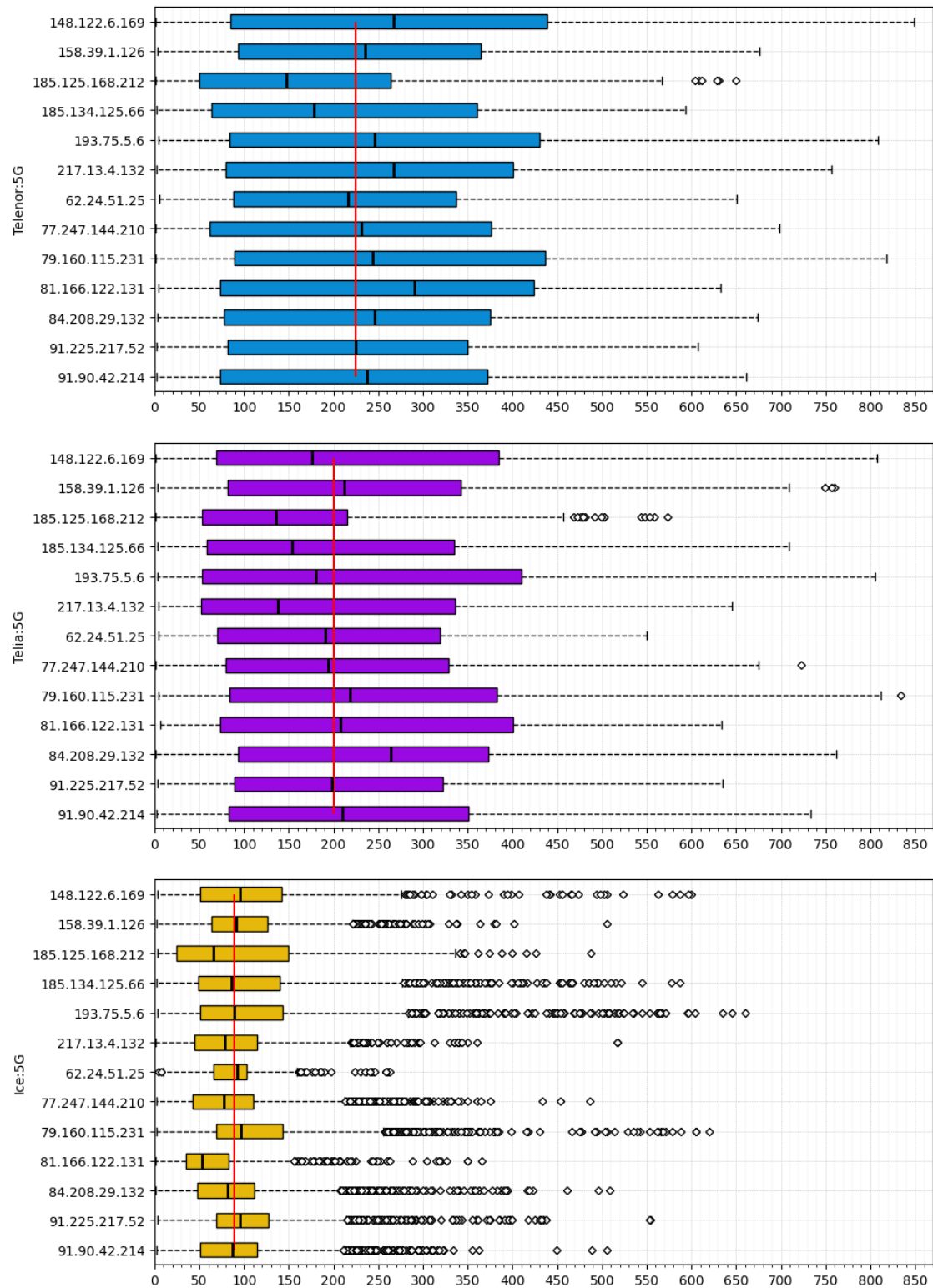
Ookla Speedtest-klienten som vi bruker i våre automatiserte målinger returnerer resultatet som en JSON-fil, med data som inkluderer bl.a. opplastningshastighet, nedlastningshastighet, jitter, og server IP-adresse. Det er disse verdiene vi analyserer og presenterer.

Det at Ookla resultater viser hvilken server som var brukt for den enkelte målingen, gir oss mulighet å analysere hvordan ytelsen varierer mellom forskjellige Ookla-servere, for forskjellige mobiloperatører. Vi har sett på nedlastningshastighet samt jitter for 4G og 5G. I figur 7.7 viser vi nedlastningshastigheten for 5G-målinger, og i figur 7.8 viser vi jitter for 5G-målinger. Begge er vist for mye brukte servere med 200 eller flere målinger for hver operatør i 2024. Den røde linjen viser medianen per operatør, tilsvarende verdiene presentert i kapittel 4.

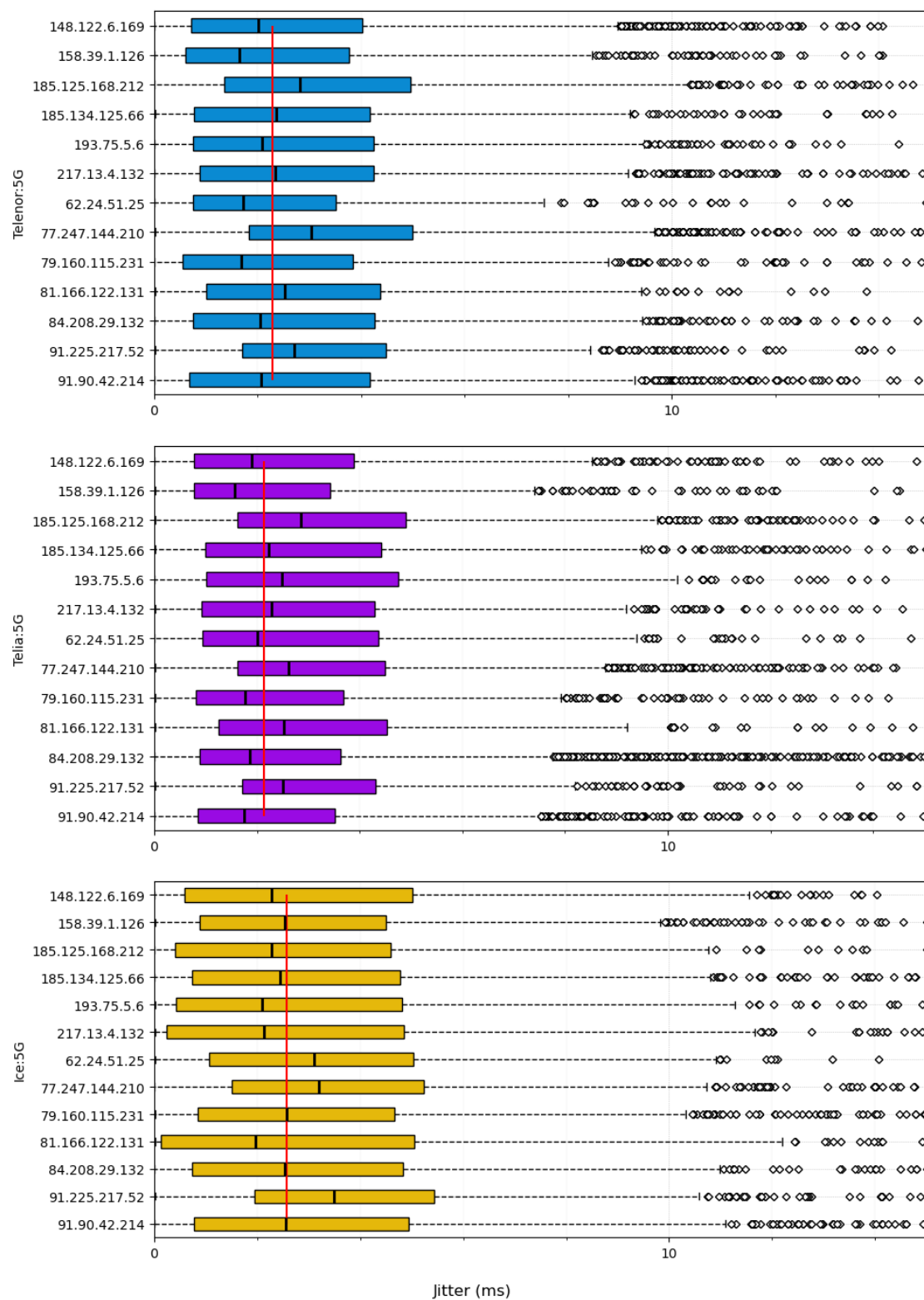
Vi ser stor overlapp mellom måleverdiene for de forskjellige serverne, samt generelt bedre ytelse for Telenor, i tråd med resultatene presentert i kapittel 4. Det er noe forventet variasjon i ytelsen, og eneste større avvik vi ser er på serveren med IP adresse 81.166.122.131, som har dårligere ytelse for Ice enn for Telia eller Telenor. Ved oppslag i åpne internettrutingdatabaser ser vi at IP adressen tilhører Lyse, tidligere Altiboks. Vi kan ikke vite kjerneårsaken til problemet, men denne analysen antyder kapasitetutfordringer mellom Ice kjernenett og Altiboks IP nett internt hos Lyse, samtidig som deres transittkapasitet mot Telia og Telenor er utmerket.

Så hva sier denne analysen om hvorvidt Ookla Speedtest er egnet til formålet som plattform for ytelsesanalyse? Til tross for at enkelte servere ser ut til å yte bedre for noen operatører enn de andre, avstår vi fra manuell korrigering av resultatene, på grunn av komplikasjoner det kan medføre og tilsvarende risiko for selv å forårsake skjevheter i resultatene. Ookla Speedtest gir oss en praktisk måte å evaluere ytelsen, og plattformen i seg selv skiller ikke mellom nettverkene eller plattformbrukerne. Det å implementere en tilsvarende løsning selv hadde vært et stort og kostbart prosjekt, og det er ikke gitt at resultatene ville vært like eller mer troverdige. Derfor mener vi Ookla Speedtest tjener godt formålet som måleplattform for stabil ytelse i denne rapporten.

³<https://www.speedtest.net/>



Figur 7.7: Nedlastningshastighet 5G for Telenor, Telia og Ice, per Ookla-server brukt.



Figur 7.8: Jitter 5G for Telenor, Telia og Ice, per Ookla-server brukt.

