



Norske mobilnett i 2022

CRNA - Center for Resilient Networks and Applications

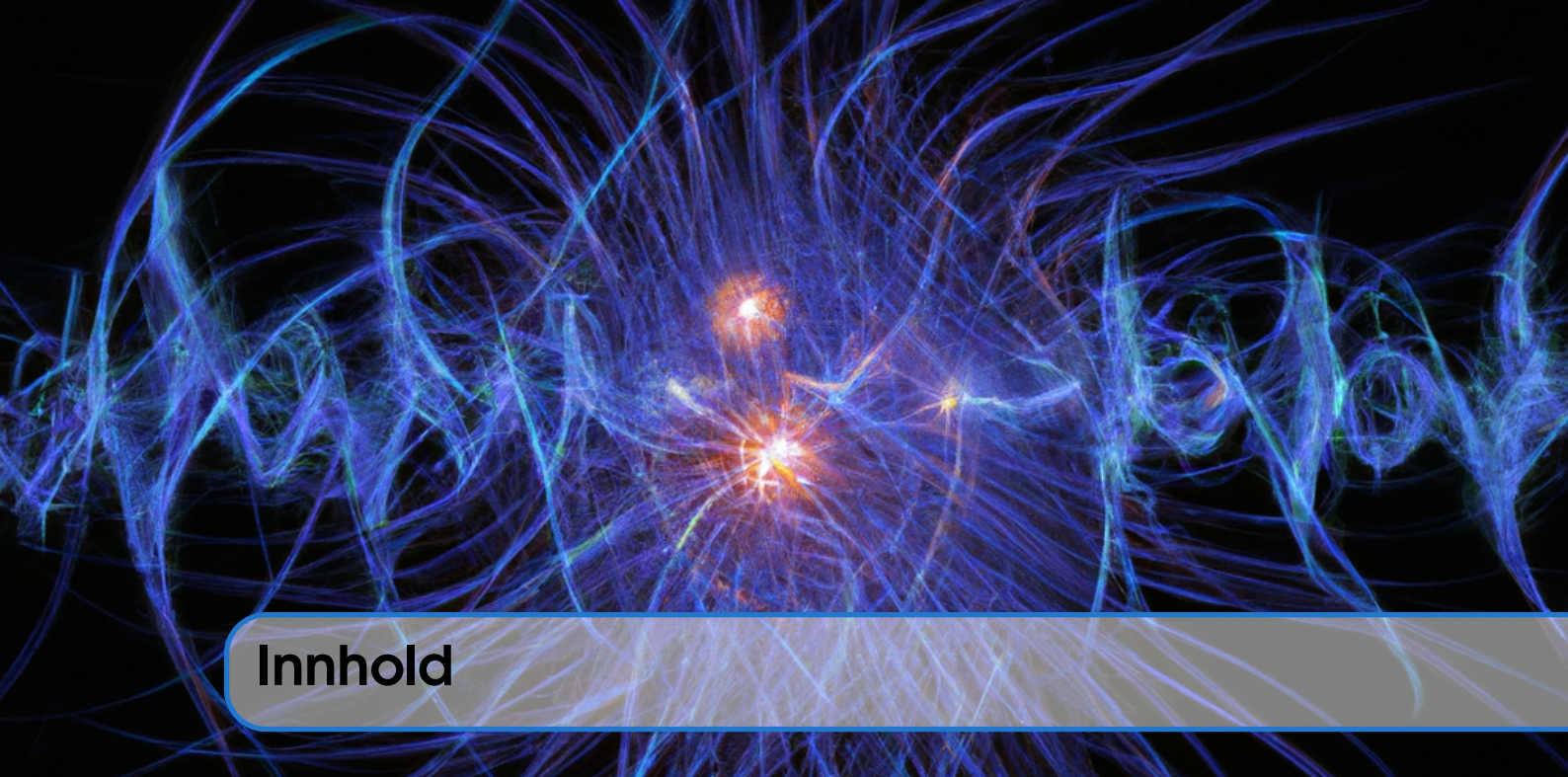


Norske mobilnett i 2022

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 Kommunal- og moderniseringsdepartementet. Senteret produserer en årlig rapport om tilstanden i norske mobilnett. Årets rapport er den tiende i rekken.

Ansvarlig for årets rapport	Dr. Tarik Čičić
Bidragstere	Dr. Amund Kvalbein Anas Saeed Al-Selwi Dr. Foivos Ioannis Michelinakis Dr. Thomas Dreibholz
Omslag	Laget ved hjelp av DALL·E 2, nøkkelord ”Telecom fjord digital art”
Publiseringsdato	27. april 2023
ISBN	978-82-92593-38-7
Økonomiske bidragstere	Kommunal- og distriktsdepartementet 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	Større hendelser	14
2.5	Utvikling over tid	14
3	Stabilitet i dataplanet	17
3.1	Tapsrate	17
3.2	Utvikling over tid	19
4	Stabil ytelse	21
4.1	Opplastings- og nedlastingshastighet i 4G	21
4.2	Opplastings- og nedlastingshastighet i 5G	23
4.3	Variasjon mellom forbindelser	23
4.4	Utvikling i hastighet gjennom 2022	26
4.5	Historisk utvikling i hastighet	26
4.6	Jitter	27
5	Bredbånd over satellitt	31
5.1	Forsinkelse	32
5.2	Pakketap	32

5.3	Hastighet	32
5.4	Diskusjon	33
6	Bakgrunn og metode	35
6.1	Mobilnettene vi måler	35
6.2	Nor-net Edge målenoder	37
6.3	Server-side infrastruktur	38
6.4	Metode	38
6.5	Ookla Speedtest	40



1. Sammendrag og hovedfunn

For norske mobilnett var 2022 preget av kraftig utbygging av 5G hos Telenor og Telia, og begynnelsen på 5G utbygging hos Ice. Mange brukere merket dette gjennom en økning i opp- og nedlastingshastigheten i deres geografiske område. Også 4G brukere oppnår bedre hastighet når 5G er bygget ut, på grunn av økt trådløs båndbredde, ny og bedre antennteknologi, og forbedringer i aksessnettet som følge av 5G-oppraderingen.

Stabiliteten i norske mobilnett har vært høy i 2022. Mange av våre målenoder har målt enda bedre tilgjengelighet sammenlignet med de siste to årene. Dette gjelder ikke alle nodene, noe som kanskje kan settes i sammenheng med 5G-utbyggingen. Totalt sett, den generelle trenden med positiv utvikling vi har observert gjennom flere år fortsetter.

I 2022 opplevde vi for siste gang at våre noder koble seg til 3G-nett: 19. januar for Telenor og 18. september for Telia. Begge operatørene har nå gjennomført avviklingen av 3G nett.

Når vi presenterer ned- og opplastningshastigheten i denne rapporten, skiller vi 4G- og 5G-kapable målenoder. De 5G-kapable målenodene oppnår vesentlig høyere hastigheter, men viser fortsatt noe varians og varierende grad av stabilitet i tilkoblingene. 5G-stabilitet hos Telenor har økt sammenlignet med 2021. I tiden som kommer vil vi fortsette å følge utviklingen i stabilitet mens mobilnettene fullfører oppgraderingen fra 4G til 5G.

Resultatene som presenteres i årets rapport er basert på aktive målinger fra 141 stasjonære målepunkter spredt over store deler av Norge gjennom hele 2022. 20 av disse målepunktene er 5G-kapable, og utstyrt med Telia og Telenor SIM-kort. Resten er kun 4G-kapable, og utstyrt med Telia, Telenor eller Ice mobil SIM-kort.

Årets rapport viderefører mange av målingene fra tidligere år. Vi ser på stabiliteten i tilkoblingen mellom målenoder og mobilnett, og utviklingen i pakketap. Vi måler også hastigheten som oppnås i de ulike mobilnettene. På et overordnet nivå fortsetter det positive bildet vi har sett de senere årene: norske mobilnett opplevde fortsatt få brudd og lavt pakketap. Når det gjelder oppnådd hastighet, skiller 2022 seg ut med en vesentlig forbedring over tidligere år, for alle operatørene.

Også i år inkluderer vi målinger av bredbånd over satellitt. Forbindelsen vi måler er fra tilbyderer Brdy (tidligere Bigblu), og realiseres over en geostasjonær satellitt. Målet med disse målingene er å forstå stabiliteten og ytelsen til satellittbasert bredbånd over tid. Satellittbredbånd er

i rivende utvikling, og nye tilbydere som benytter "Low Earth Orbit" (LEO) satellitteknologi har meldt seg i markedet. De utfordrer geostasjonære satellitter med lavere forsinkelse og ofte høyere båndbredde. Vi har begynt å samle data fra en slik tilbyder, som vi skal analysere til neste år.

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

Stabilitet i tilkoblingen

- Vi måler god stabilitet i tilkoblingen til mobilnettene. I sum er stabiliteten om lag den samme som i 2021 og 2020. Vi observerer et stort antall forbindelser som nesten aldri opplever brudd.
- De fleste forbindelser opplever en tilgjengelighet på over 99,99 %, noe som tilsvarer en nedetid på under 9 sekunder i døgnet. Over 70 % av forbindelsene hos Ice mobil og nesten 70 % hos Telia og Telenor oppnår en slik tilgjengelighet.
- Hele 68 % av forbindelsene hos Ice mobil gikk gjennom hele året uten en eneste dag med mer enn ett minutt nedetid. Tilsvarende tall for Telenor og Telia var 65 % og 59 %. Omlag 80 % av alle forbindelsene, for alle operatørene, hadde maksimalt én dag med ett minutt brudd eller lenger i løpet av 2022. Dette er en videre forbedring sammenlignet med 2021, og indikerer at større brudd i tilkoblingen begynner å bli en sjeldenhet for de aller fleste brukere.
- Vi observerer 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.

Stabilitet i dataplanet

- Det observerte pakketapet var om lag det samme i 2022 som i 2021, og det er små forskjeller mellom operatørene.
- Nytt i 2022 er at det er Ice mobil som har det laveste pakketapet. Dette er første gang siden vi har begynt målingene at Ice kommer best ut på denne metrikken.

Stabilitet i ytelse

- Våre 4G målenoder støtter LTE cat 6, og ikke den nyeste teknologien der man blant annet kan slå sammen kapasitet fra flere frekvensbånd. Derfor er ikke våre hastighetsmålinger egnet til å beskrive den maksimale hastigheten som kan leveres av mobilnettene. Våre målinger sier likevel noe om hvordan ytelse varierer over tid, hastigheter operatørene leverer under disse forhold, samt hvordan tilgjengelig hastighet påvirker brukeropplevelsen.
- Vi observerer en markant økning i nedlastingshastigheter fra 2021 til 2022 hos alle operatører. Prosentvis er denne økningen større enn i noen foregående år, og kan forklares med den intense infrastrukturbyggingen som begynte i 2021 og fortsatte gjennom 2022.
- Som i tidligere år måler vi fremdeles høyest hastighet hos Telenor, men forskjellene mellom operatørene er relativt små. Vi registrerer noe lavere varians i hastighetsmålingene i 2022 enn i 2021. Vi har tidligere vist at slik varians skyldes i stor grad at en målenode veksler mellom å koble seg til ulike basestasjoner som kan gi svært ulike brukeropplevelser. Den kan også skyldes oppgraderingen av radionettet i nodens område i løpet av måleperioden.
- Vi måler gode hastigheter på nodene som støtter 5G, med enklemålinger over 700 Mbps nedlastingshastighet og 140 Mbps opplastingshastighet hos både Telenor og Telia. Dette er vesentlig høyere ytelse enn i 4G. Det er noe mer variasjon i 5G-ytelsen hos Telia enn hos Telenor.
- I år analyserer vi også varians i forsinkelsen datapakkene opplever mellom våre målenoder og servere de kommuniserer med ("Jitter"). Denne metrikken anses som viktig for en del anvendelser, inklusivt videokonferanser og videospill der flere deltagere konkurrerer i sanntid.
- Våre jitter resultater viser ingen klare forskjeller mellom operatørene. Telenor har en marginalt lavere jitter enn Telia og Ice mobil.
- 5G-forbindelser viser lavere jitter enn 4G, noe som sannsynligvis kan tilskrives høyere kapasitet i nettet.

Satellitt

- Vi presenterer i år som i fjor målinger av satellittbasert bredbånd. Satellitt spiller ingen stor rolle i det norske bredbåndsmarkedet i dag, men kan være viktig for å gi et minimumstilbud til husstander som ikke har andre tilbud.
- Nedlastingshastigheten for den målte satellittforbindelsen varierer mellom 30 Mbps og 50 Mbps. Hastigheten varierer gjennom døgnet etter hvor mange brukere som er aktive, men har variert mindre i 2022 enn i 2021. Økningen i maksimalhastighet kan være forårsaket av konfigurasjonsendringer, mens mindre varians kan være relatert til en reduksjon i antall brukere.
- Opplastingshastigheten ligger normalt mellom 3 og 4,5 Mbps. Vi observerer en nedgang i opplastingshastighet i 2022 sammenlignet med 2021. Også dette tror vi kan skyldes konfigurasjonsendringer.
- Pakketapet i satellittforbindelsen er høyere enn i mobilnettene, og ligger normalt mellom 0 og 0,5 %. Målinger opp mot 1 % er ikke uvanlig, og enkelte dager kan pakketapet være over 2 %.
- Forbindelsen vi måler går over en geostasjonær satellitt. Den har derfor relativt høy forsinkelse, med en round-trip-time på om lag 650 ms. Forsinkelsen i 2022 har vært målbart lavere enn i 2021, noe som må skyldes lavere bruk av tilgjengelige resurser.



2. Stabilitet i tilkoblingen

I dette kapittelet undersøker vi stabiliteten til tilkoblingen mellom våre målnoder og mobilnett. Målnodene forsøker å opprettholde tilkoblingen til de ulike mobilnettene til en hver tid, og tilkoblingen brytes aldri aktivt fra målnodens side¹. Ettersom nodene kontinuerlig kommuniserer med omverdenen, skal det heller ikke forekomme at tilkoblingen tas ned pga. inaktivitet. Målnodene overvåker kontinuerlig tilkoblingen til de ulike mobilnettene, og logger status på denne. Dersom tilkoblingen brytes, vil målnoden umiddelbart forsøke å gjenopprette den. Den vil kontinuerlig og uten opphold gjenta forsøket helt til tilkoblingen kan gjenopprettes. Et brudd vil derfor resultere i en kortere eller lenger feilperiode hvor tilkoblingen er utilgjengelig. Resultatene i dette kapittelet skiller ikke mellom ulike teknologier som 4G eller 5G. Hver forbindelse vil til en hver tid velge den beste tilgjengelige teknologien, som forklart i kapittel 6.

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

Basert på overvåkningen 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 resultater for Telenor, Telia og Ice. For Ice rapporterer vi stabilitet for *Ice mobil*, som er samme type abonnement som Ice selger for bruk i mobiltelefoner. Ice mobil benytter Telias nett der Ice ikke har egen dekning.

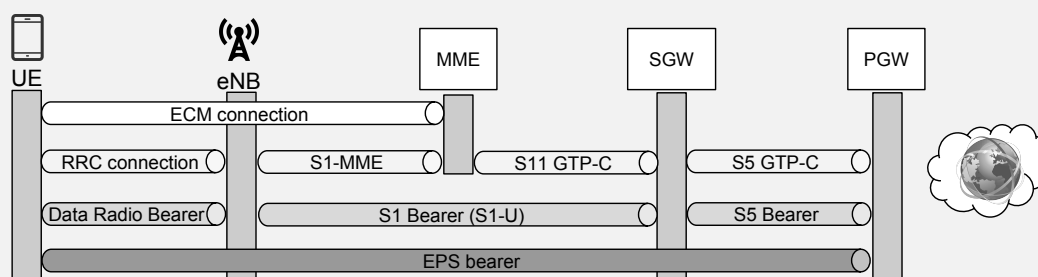
For å sikre at målingene i minst mulig grad påvirkes av feil i vår måleinfrastruktur, gjør vi en rekke filtreringssteg hvor vi fjerner nedetid som vi mistenker skyldes slike forhold. Dette innebærer først og fremst at vi fjerner nedetid knyttet til administrative omstarter av tilkoblingene etter vedlikeholds- eller feilrettingsoperasjoner. Vi opplever også av og til at våre forbindelser låser seg

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

i en tilstand der forbindelsen er aktiv men datatrafikk ikke kan sendes. Nedetid knyttet til slike hendelser filtreres bort.

Tilkobling i LTE-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.



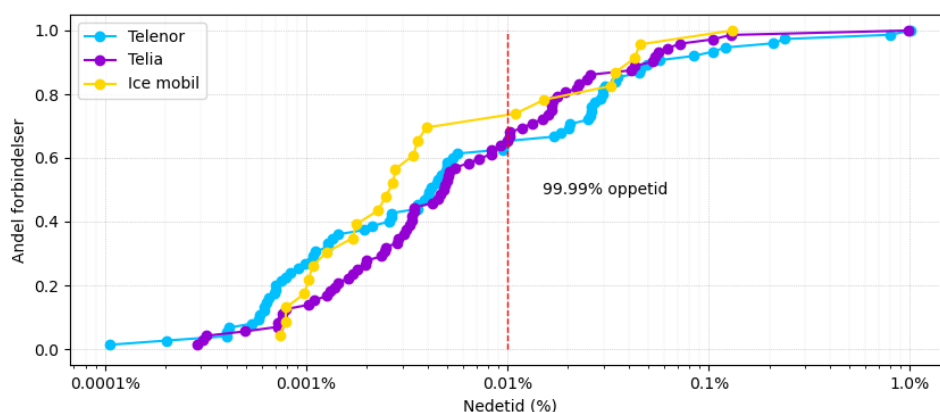
En EPS bærer realiseres over en serie med tunneller mellom brukerterminalen og en komponent i kjernenettet som kalles en Packet Gateway (PGW), som vist i figuren over. Disse tunnelene sørger blant annet for at tilkoblingen beholdes selv om brukerterminalen flytter seg fra et område til et annet. Vi måler 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, 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. Forskjellene i stabilitet mellom operatører er svært liten, og laveste på mange år. Den observerte stabiliteten var i hovedsak den samme i 2022 som i 2021 for alle operatører.

Som i fjor er det Ice mobil som har størst andel forbindelser med meget høy tilgjengelighet på 99,99 % eller mer. Den ligger på over 70 %, mens tilsvarende tall for Telia og Telenor er på like under 70 %. Oppetid på 99,99 % tilsvarer en nedetid på under 9 sekunder per døgn, og er uformelt



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

ansett som grensen som de aller fleste brukere og kommunikasjonstjenester bør kunne akseptere. Vi har markert den med rød stiplet linje i figur 2.1.

Ser man på andel forbindelser med nedetid på over 0,1 % (oppetid under 99,9 %, ikke særskilt merket i figuren), teller vi seks Telenor, tre Telia og én Ice mobil forbindelse. Forbindelser med nedetid på over 0,1 %, som tilsvarer gjennomsnittet på 86 sekunder i døgnet, vil kunne oppleves som ustabile i flere bruksscenarier.

Vi merker oss at Telenor tilordner offentlige IP adresser til våre noder, mens Telia og Ice tilordner private IP adresser. Dette kan tenkes å være medvirkende årsak til at Telenor har noen flere noder med mindre enn 99,99 % oppetid enn de andre operatørene — en algoritme som forvalter et begrenset ressurs som offentlige IP adresser vil normalt være mer aggressiv med å trekke dem tilbake til gjenbruk, når forbindelsen ser ut til å være ubrukt. Våre noder sender pakkestrømmer kontinuerlig minst hvert sekund, og det skal dermed ikke være grunn til å deaktivere en forbindelse pga. inaktivitet, for Telenor eller andre operatørene.

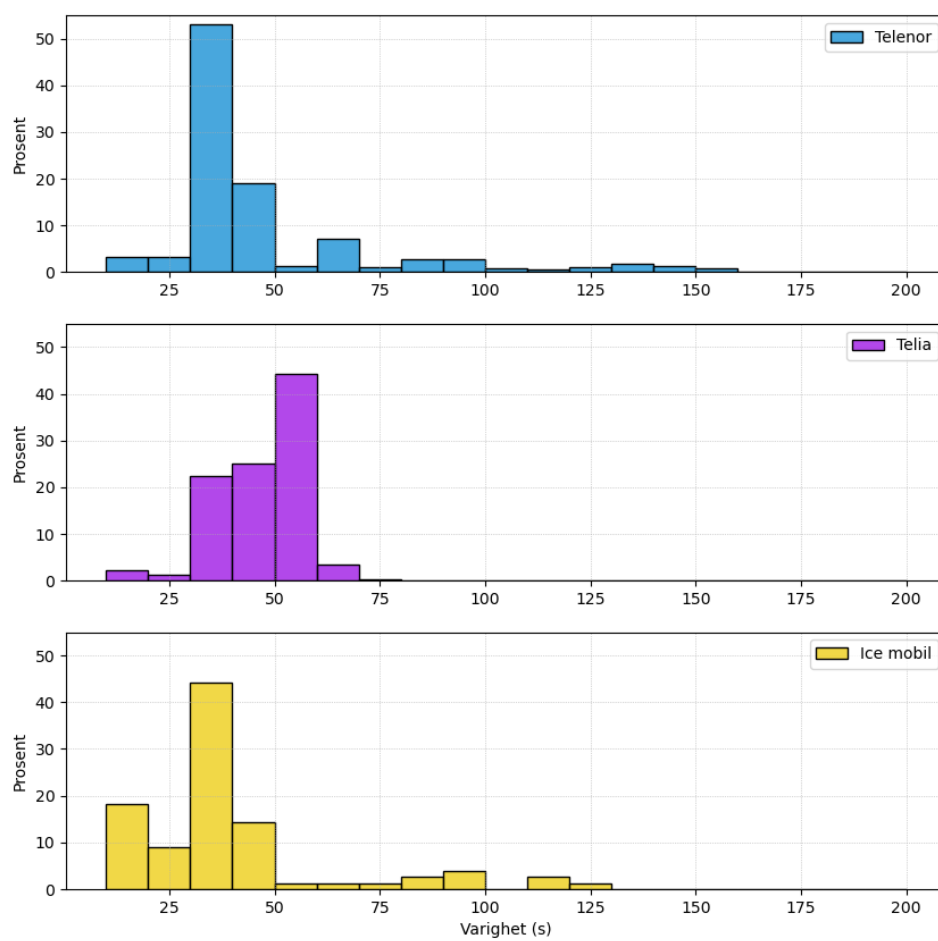
2.2 Varighet av brudd i tilkobling

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.

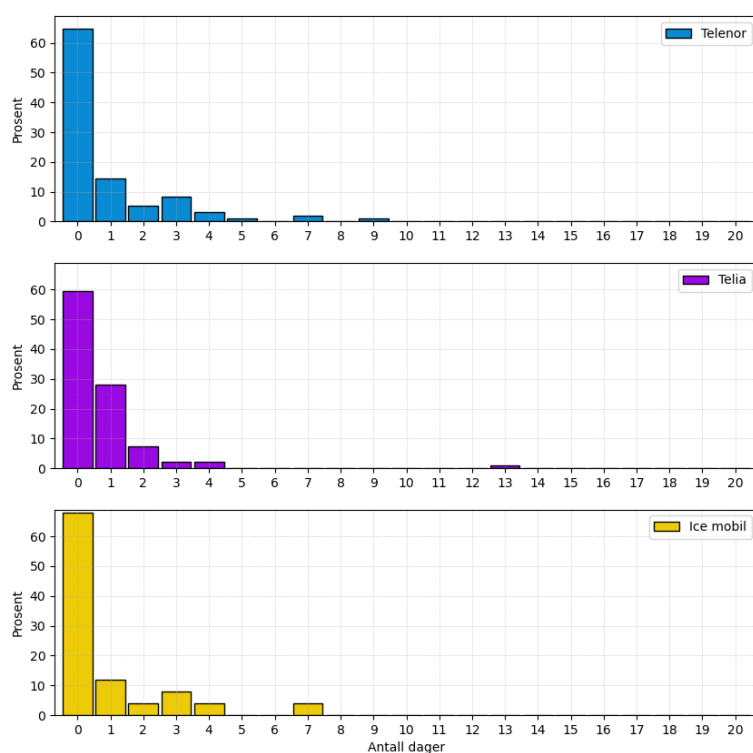
For alle operatører domineres fordelingen av brudd som har varighet fra 30 til 60 sekunder. Dette tilsvarer den typiske tiden det tar å gjennomføre en full tilkoblingsprosedyre mellom målenoden og nettverket, inkludert SIM-autentisering med PIN-kode og etablering av forbindelsen. Våre målenoder vil gjennomføre en slik prosedyre når forbindelsen av ulike årsaker ikke er tilgjengelig. Vi har tidligere observert at antallet slike re-etableringer er høyere hos Telenor enn hos de andre operatørene. Vi mistenker at samspillet mellom modemmet og nettverket gjør at tilstandsinformasjonen som er assosiert med forbindelsen i nettet av en eller annen grunn utløper og tvinger fram en ny tilkobling, og at dette skjer oftere i Telenors nett enn i de andre nettene.

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 antall dager med vesentlig nedetid er redusert fra 2021 til 2022. Henholdsvis 65 %, 59 % og 68 % av forbindelsene hos Telenor, Telia og Ice mobil opplevde ingen dager i 2022 med over ett minutt nedetid. For alle tre operatørene, omkring 80 % forbindelser



Figur 2.2: Varighet på brudd i tilkoblingen.



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

Operatør	Dato	Ca klokkeslett	Berørte forbindelser	Vedlikeholdsvindu?
Telenor	4. sept	23:10	8	Ja
Telia	26. jan	09:00	12	Nei
Telia	3. mars	03:00	10	Ja
Telia	21. mai	22:40	9	Nei
Ice mobil	29. mar	03:00	12	Ja
Ice mobil	7. nov	00:30	9	Ja

Tabell 2.1: Samtidig brudd i flere forbindelser fra en operatør, 2022.

opplevde én eller ingen dager med nedetid over ett minutt. Dette er meget gode tall, og en forbedring sammenlignet med tidligere år.

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). Slik var det også i 2022.

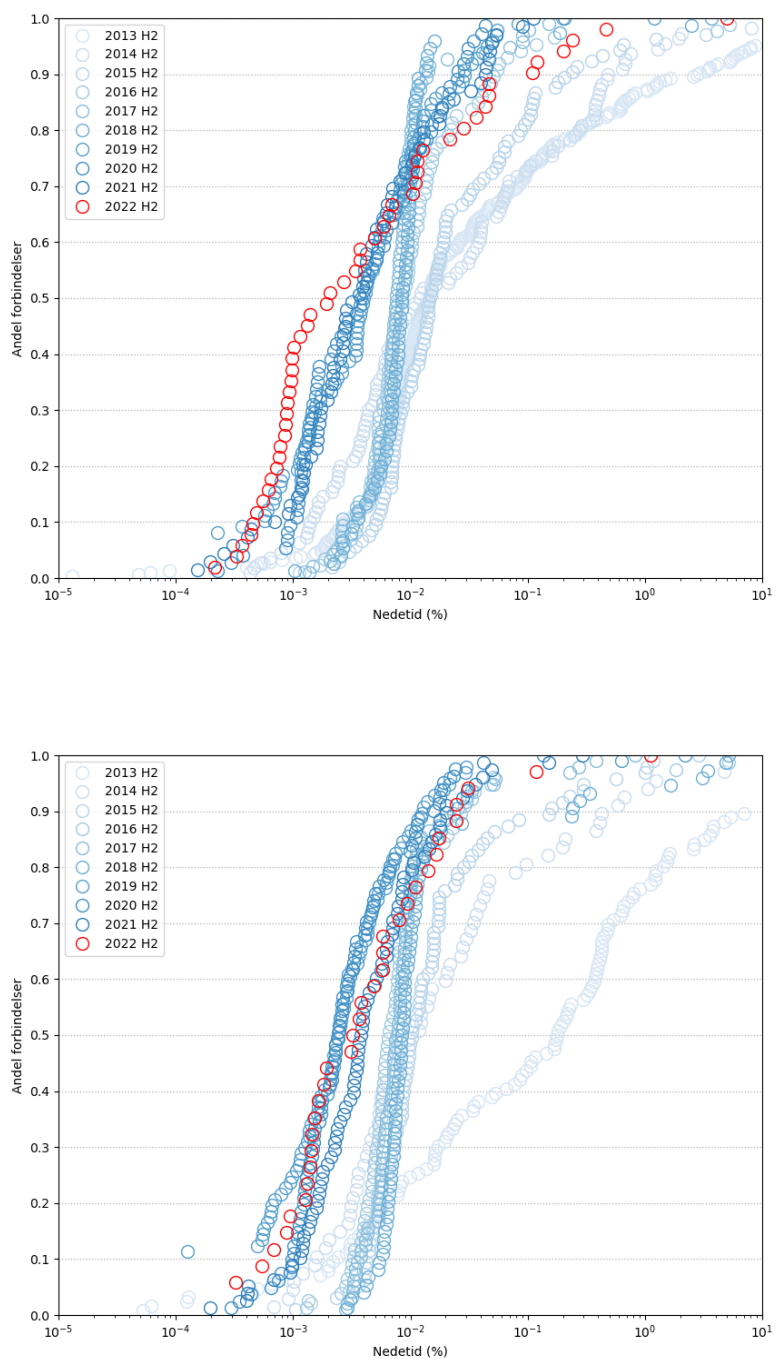
Tabell 2.1 viser en oversikt over vesentlige hendelser i 2022. Vi observerer en håndfull hendelser per operatør, og de fleste forekommer på tidspunkter på døgnet som gjør det naturlig å tro at de er forårsaket av vedlikehold. Det var kun hos Telia vi observerte hendelser utenfor vanlige vedlikeholdsvinduer. For de fleste av hendelsene var utfallene av relativt kort varighet.

2.5 Utvikling over tid

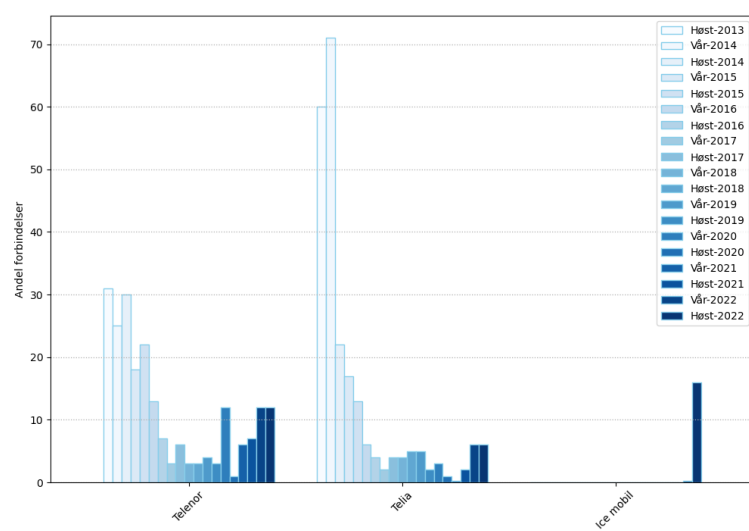
Figur 2.4 viser utviklingen i gjennomsnittlig nedetid fra 2013 til 2022 for Telenor og Telia. For historiske grunner er figuren basert på måldata fra andre halvår for hvert år. Grafene kan sammenlignes med figur 2.1. Figuren viser hvordan grafen "reiser seg" og beveger seg mot venstre i perioden 2013-2019, noe som betyr at en større andel av forbindelsene får en mindre nedetid. Siden 2019 har fordelingen av nedetid vært relativt stabil. Vi observerer at Telenor "reiser seg" raskt i 2022, dvs. har mange forbindelser med lav nedetid, men også har flere forbindelser med relativt lav oppetid sammenlignet med de siste årene.

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. 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 stabilt de siste årene, men vi merker allikevel en liten økning i 2022 for alle operatørene. Telenor hadde et noe høyere antall slike forbindelser 2020-2022 enn i perioden 2017-2019. I år inkluderer vi også Ice mobil, som hadde ingen slike forbindelser i første halvdel av 2022, og 3 i årets andre halvdel. Ettersom kun 19 Ice mobil noder har hatt tilstrekkelig oppetid i andre halvdel 2022 for denne analysen, tilsvarer dette en andel på 16 %. Vi kommer til å følge med utviklingen i årene som kommer.



Figur 2.4: Utvikling i nedetid hos Telenor (topp) og Telia (bunn) fra 2013 til 2022.



Figur 2.5: Andel forbindelser med gjennomsnittlig nedetid større enn 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 kjører 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 færre enn 7 døgn med målinger.

3.1 Tapsrate

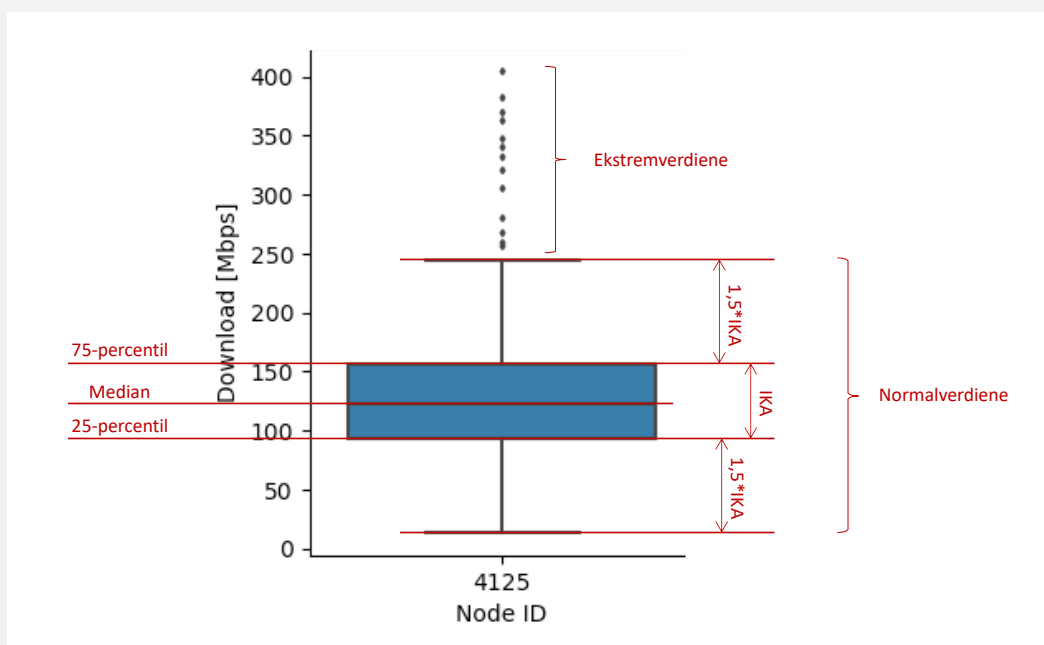
Tapsraten er definert som kvotient (tapte pakker)/(sendte pakker) og beregnes for hver enkelt forbindelse over hele måleperioden. For å beregne tapsraten for en operatør, sorterer vi alle forbindelsene etter pakketap for denne operatøren og ser på median og andre statistiske egenskaper.

Figur 3.1 og Tabell 3.1 viser en oppsummering av tapsraten hos Telenor, Telia og Ice mobil. Generelt observerer vi lavt pakketap hos alle operatører. Tapsraten for Telenor og Telia er marginalt høyere enn i 2021. Den mest tydelige og positive endringen i 2022 ser vi hos Ice mobil, som med tapsrate på 0,017 % yter best av alle tre operatører i 2022, og vesentlig bedre enn det de gjorde i tidligere år. I andre halvdel av 2022 registrerte vi tapsraten på kun 0,013 % for Ice mobil.

Hvordan tolkes boksplott?

Flere figurer i denne rapporten representerer måledata ved en boksplott (engelsk "box plot"). Boksplott er et nyttig verktøy når man raskt skal få oversikt over hovedstørrelser ved en statistisk variabel. Men hva viser de?

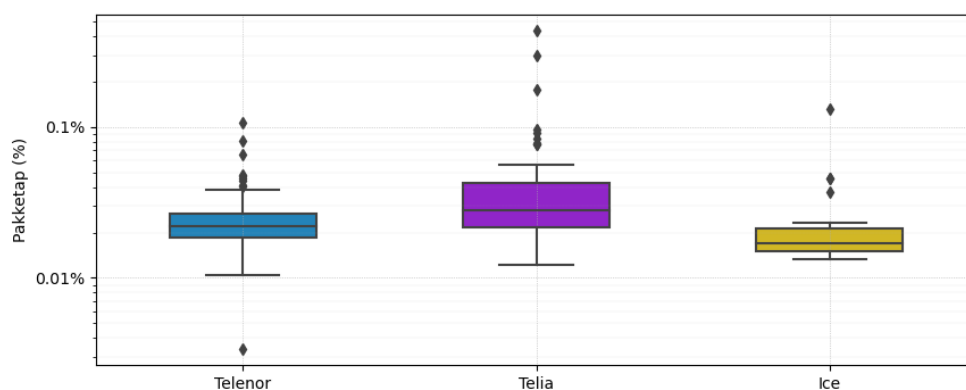
Et boksplott består av en farget/skravert del, en "boks", med en linje som deler den i to, samt to endestenger på hver sin side av denne boksen. Boksens minimale og maksimale verdi er plassert på nedre og øvre kvantilen (25- og 75-persentilen) til måleverdiene, mens delelinjen er på medianen (50-persentilen). Dette betyr at 50% av alle måleverdiene faller innenfor boksen. Lengden på denne boksen kaller vi interkvartilavstanden (IKA). Hvis medianen er synlig nærmere en av kvantilene, 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 på 1,5 ganger IKA, men dog i det målepunktet som befinner seg nærmest $1,5 * IKA$ på innsiden mellom boksen og stangen. Derfor vil man ofte se at endestangen er nærmere boksen enn 1,5 ganger IKA.

Intuisjonen 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 anses som ekstremverdier (engelsk "outliers"), og tegnes inn som små diamantformede punkter. Er det mange ekstremverdier, vil de visuelt kunne fremstå som en hel linje.

En mulig forklaring for noe høyere pakketap for Telenor og Telia siste to år sammenlignet med 2020 kan være den omfattende utbyggingen av radionett for å støtte 5G. På sin side har Ice mobil gjennomført en omfattende modernisering av mobilkjernenettet. Dette arbeidet ser ut til å være ferdig, med en positiv effekt.



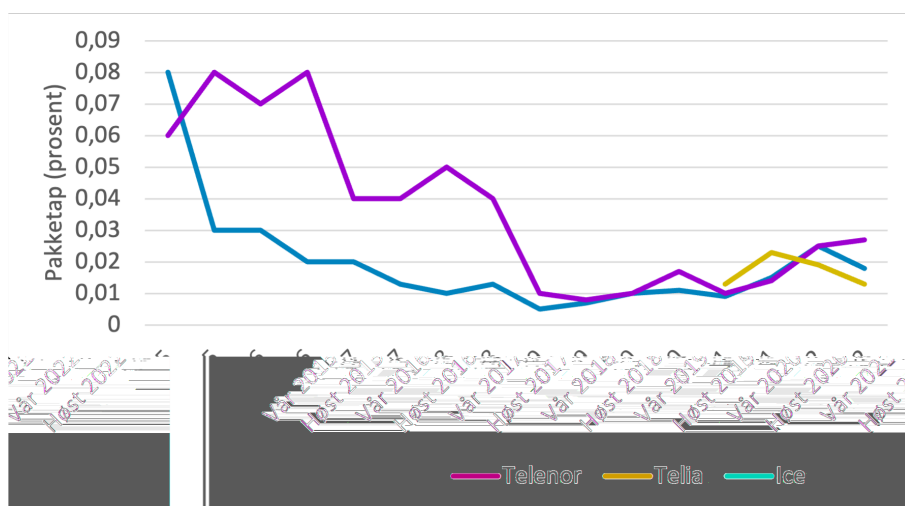
Figur 3.1: Pakketap per operatør

Operatør	10 persentil	Median	90 persentil	Gjennomsnitt
Telenor	0,016%	0,022%	0,038%	0,025%
Telia	0,019%	0,028%	0,056%	0,042%
Ice mobil	0,015%	0,017%	0,044%	0,027%

Tabell 3.1: Pakketapstatistikk i 2022.

3.2 Utvikling over tid

Figur 3.2 viser median pakketap hvert halvår de åtte siste årene for Telenor og Telia. For Ice mangler vi en sammenhengende tidsserie før 2021, men inkluderer 2021 og 2022. I det meste av perioden 2015-2022 har Telia hatt noe høyere pakketap enn Telenor. Pakketapet har vært noe høyere for Telenor og Telia 2021-2022 enn 2019-2020, men er fortsatt generelt lavt. Ice mobil har redusert tapsraten fra 2021 til 2022. Generelt kan man si at tapsraten er lav og uten vesentlige forskjeller mellom operatørene.



Figur 3.2: Utvikling i median tapsrate 2015-2022.



4. Stabil ytelse

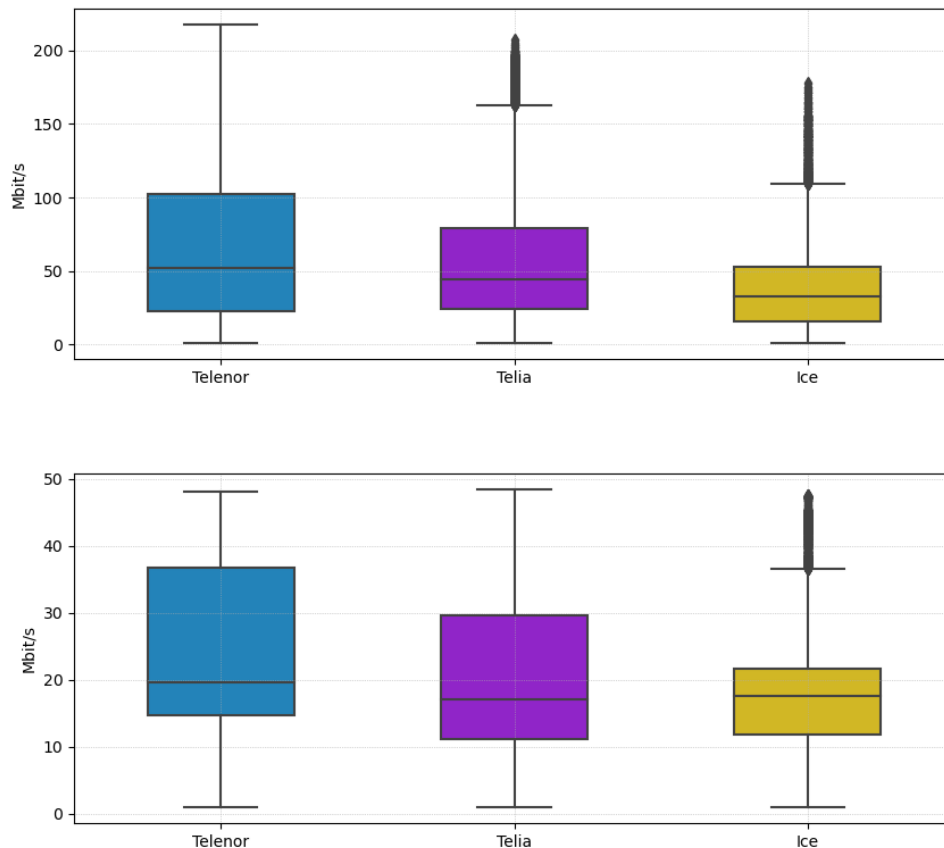
I dette kapittelet presenterer vi resultater knyttet til ytelse, i form av hvilken hastighet vi måler for opp- og nedlasting av data, samt hvordan målingene varierer. Merk at den brukeropplevde ytelsen avhenger av flere faktorer, som applikasjonskrav, dekningsforhold, antall samtidige brukere og interferens i området, samt ytelsen til fastnettet som forbinder operatøren med den brukte nettverkstjenesten. Resultatene som presenteres her vil være avhengige av de konkrete forholdene på de steder og de tidspunkt målingene er foretatt. Våre målenoder er plassert innendørs. Vi har ikke kontroll over lokale forhold som tykkelse på vegger, hvor i bygningen målenodene er plassert og lignende. Dette er forhold som kan ha stor innvirkning på dekningsforhold og dermed på ytelse. 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 ytelsen som kan forventes 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 anfører 300 Mbps som høyeste nedlastingshastighet, og 50 Mbps opplasting. Det betyr at vi i våre målinger ikke alltid vil oppnå den maksimale hastigheten som kan tilbys i nettene vi måler. Blant annet støtter ikke disse modemene aggregering av kapasitet fra mer enn to frekvensbånd. Resultatene bør tolkes med dette i mente. Våre resultater sier likevel noe om hastighetene som oppnås i mobilnettene, da disse ofte er vesentlig under det som modemmet støtter, samtidig som de tekniske forutsetningene er like for alle operatørene.

For 5G målinger bruker vi Quectel RM500Q, som støtter 3GPP release 15 med teoretisk nedlastningsrate opp til 2,5 Gbps, samt 600 Mbps opplastingsdatarate.

4.1 Opplastings- og nedlastingshastighet i 4G

Vi måler hastigheter ved bruk av Ookla Speedtest, som lar oss gjennomføre målinger fra våre målenoder mot Ooklas servere. Disse serverene er vanligvis plassert i nettet til en internettleverandør, og vi benytter kun servere lokalisert i Norge.



Figur 4.1: Nedlastingshastighet (øverst) og opplastingshastighet (nederst) for ulike operatører, 4G nett.

I motsetning til de andre målingene presentert i denne rapporten kjøres altså ikke hastighetsmålingene mot vår egen måleserver, men mot måleservere knyttet til Ooklas infrastruktur. Ookla leverer klientprogramvare som en standardpakke tilgjengelig i Linux distribusjoner, som vi installerer på våre målenoder. Klienten velger selv den optimale blant tilgjengelige måleservere gjennom en serie med ICMP ping innenfor et geografisk område. Deretter åpnes det parallelle nedlastningssessjoner over en periode på omlag 10 sekunder, og hastigheten måles. Prosedyren er tilsvarende ved måling av 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. I kapittel 6 diskuterer vi bruken av Ookla Speedtest til disse målingene.

For disse målingene benytter Ice sitt nett i 800, 900, 1800, 2100 og 2600 MHz båndene, men ikke frekvenser i 450 MHz-båndet. Telia og Telenor bruker i tillegg 700 Mhz båndet. Der Ice ikke har egen dekning, benyttes Telias nett gjennom avtale om nasjonal gjesting.

Figur 4.1 viser fordelingen av nedlastings- og opplastingshastigheter 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/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 vesentlig høyere nedlatningshastigheter i 2022 enn i 2021. Også opplastningshastigheten har økt, om i noe mindre grad. Telenor oppnår fremdeles høyere hastigheter enn Telia og Ice både nedstrøms og oppstrøms, men Telia følger tett. Median nedlastingshastighet er 52 Mbit/s i Telenors nett, 45 Mbit/s i Telias nett og 33 Mbit/s i Ice mobil sitt nett.

90 % av målingene i Telenors nett viser en nedlastingshastighet over 10 Mbit/s (en oppgang fra 81 % i 2021). Tilsvarende tall er 94 % (86 %) for Telia og 86 % (81 %) for Ice mobil. 51 % av målingene i Telenors nett viser en nedlastingshastighet over 50 Mbit/s (en økning fra 34 % i 2021). Tilsvarende tall er 44 % (25 %) for Telia og 27 % (15 %) for Ice mobil.

Median opplastingshastighet er 20 Mbit/s i Telenors nett (økning fra 17 Mbit/s i 2021), 17 (14) Mbit/s i Telias nett og 18 (11) Mbit/s i Ice mobil. 84 % av målingene i Telenors nett viser en opplastingshastighet over 10 Mbit/s (opp fra 80 % i 2021). Tilsvarende tall er 79 % (72 %) for Telia og 80 % (59 %) for Ice mobil.

4.2 Opplastings- og nedlastingshastighet i 5G

Vi har målt opplastings- og nedlastingshastighet i 5G nett fra våre 20 målenoder. Hver node er utstyrt med to 5G modemmer, én med Telenor og én med Telia SIM kort. Samme Ookla Speedtest metodikken er brukt som i 4G målingene. Ice 5G er ikke målt, ettersom Ice 5G dekning var vurdert for lav i 2022. Dette vil endres i fremtiden.

Figur 4.2 viser oppnådde ned- og opplastningshastigheter for Telenor og Telia. Telenor har en median nedlastningshastighet på 170 Mbit/s, mens Telias median nedlastningshastighet var på 150 Mbit/s. Tilsvarende verdier for opplastningshastigheter er 31 Mbit/s for Telenor og 32 Mbit/s for Telia. Nedslagsfeltet for normalverdier er noe større hos Telia, som indikerer større varians, noe vi skal se på i neste seksjon.

4.3 Variasjon mellom forbindelser

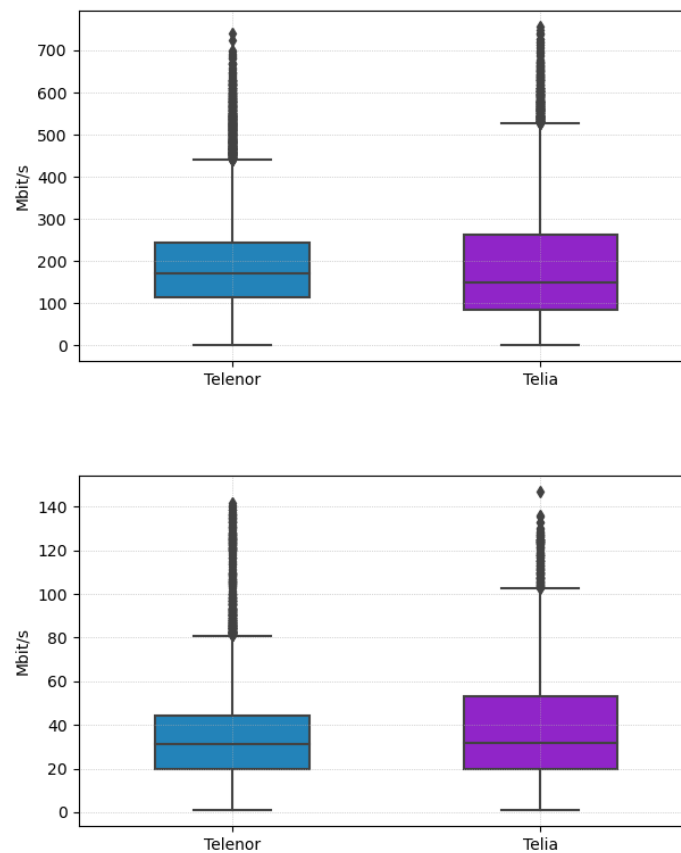
Figur 4.3 viser hvordan den målte nedlastingshastigheten varierer for hver enkelt forbindelse hos hver operatør. 5G-forbindelser er vist med en lysere farge, 4G med en mørkere. Ikke overraskende, viser 5G noder generelt høyere hastigheter enn 4G.

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 nedlastingshastigheten har blitt mer stabil.

Blant 4G noder i 2022, hadde 15 % av Telenor forbindelser, 11 % av Telia forbindelser, og 37 % av Ice mobil forbindelser en interkvartilavstand som er større enn medianen. Dette er en bedring sammenlignet med 2021 for alle operatørene, men fortsatt noe dårligere enn de beste historiske resultatene for Telenor og Ice mobil, oppsummert i tabell 4.1.

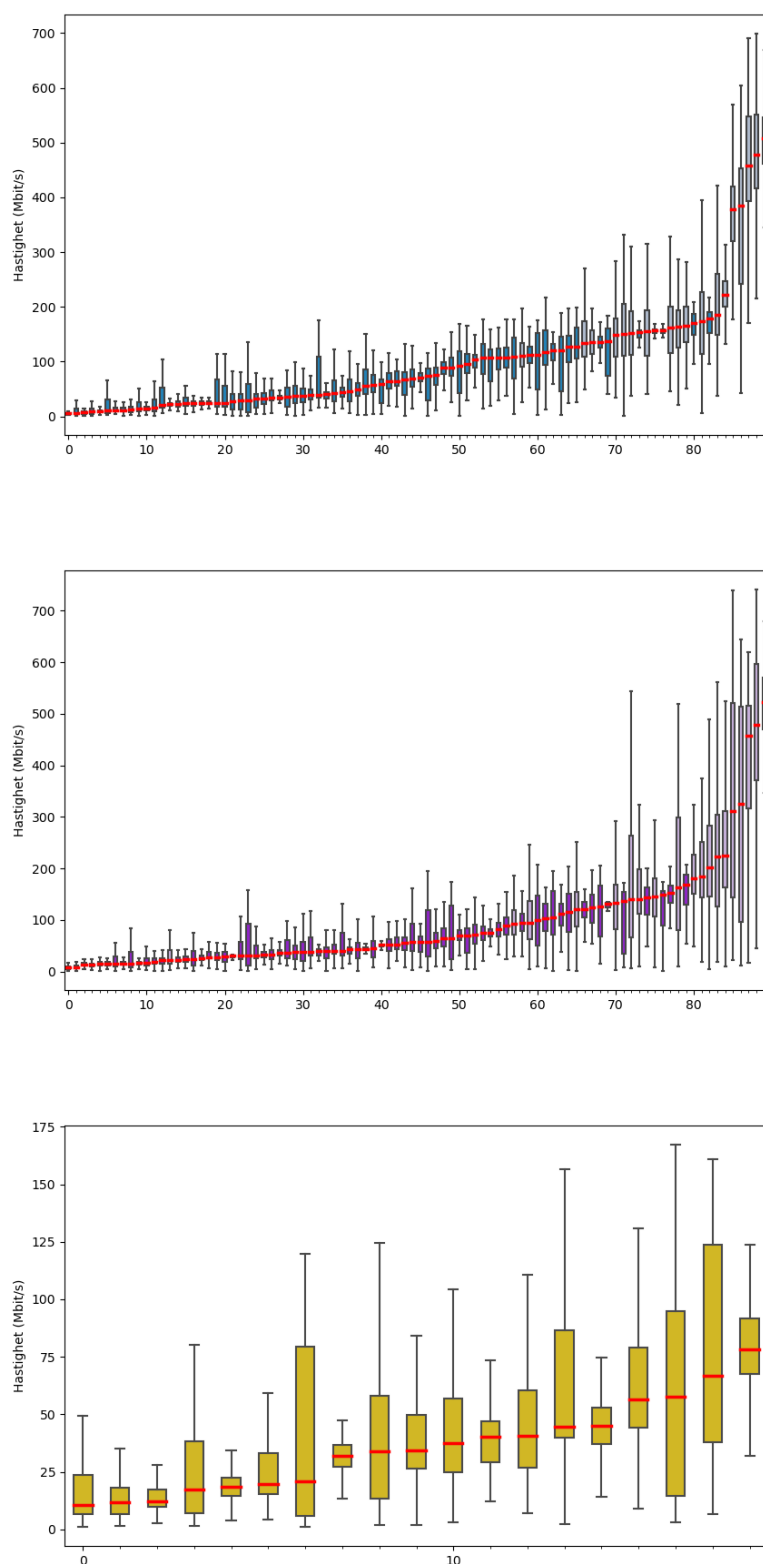
For 5G forbindelser hadde Telenor ingen noder der interkvartilavstanden var større enn medianen, noe som tyder på høy stabilitet i ytelsen. Tilsvarende tall for Telia 5G er ganske høy, som kan settes i sammenheng med relativt få målenoder — det kan tenkes at flere er lokalisert i områder der 5G utbyggingen fant sted i løpet av 2022, som i seg selv ville økt varians og interkvartilavstanden.



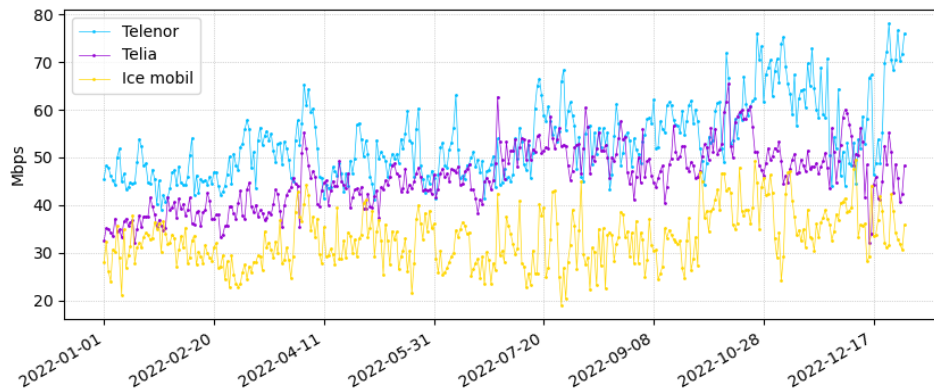
Figur 4.2: Nedlastingshastighet (øverst) og opplastingshastighet (nederst) for ulike operatører, 5G nett.

Operatør	2019	2020	2021	2022
Telenor, 4G	33%	13%	24%	15%
Telia, 4G	26%	21%	19%	11%
Ice mobil	12%	8%	41%	37%
Telenor, 5G				0%
Telia, 5G				21%

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.



Figur 4.3: Variasjon i nedlastingshastighet for målenoder med Telenor (øverst), Telia (midten) og Ice mobil (nederst). Hos Telenor og Telia representerer de mørkere stolpene 4G noder, de lysere 5G.



Figur 4.4: Utvikling i nedlastingshastighet gjennom 2022.

4.4 Utvikling i hastighet gjennom 2022

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.

Alle operatørene viser en klar økning gjennom 2022. Antydning til det så vi allerede i 2021, da vi merket en markant økning i nedlastingshastigheten hos operatørene, spesielt i det andre halvåret. Denne utviklingen har fortsatt i 2022, og i slutten av 2022 ser vi medianhastigheten nå 70 Mbps hos Telenor, med unntak for en periode i månedskifte november/ desember, der hastigheten faller tilbake til omkring 50 Mbps. Vi har ikke lyktes med å finne en sammenheng eller forklaring for dette fallet.

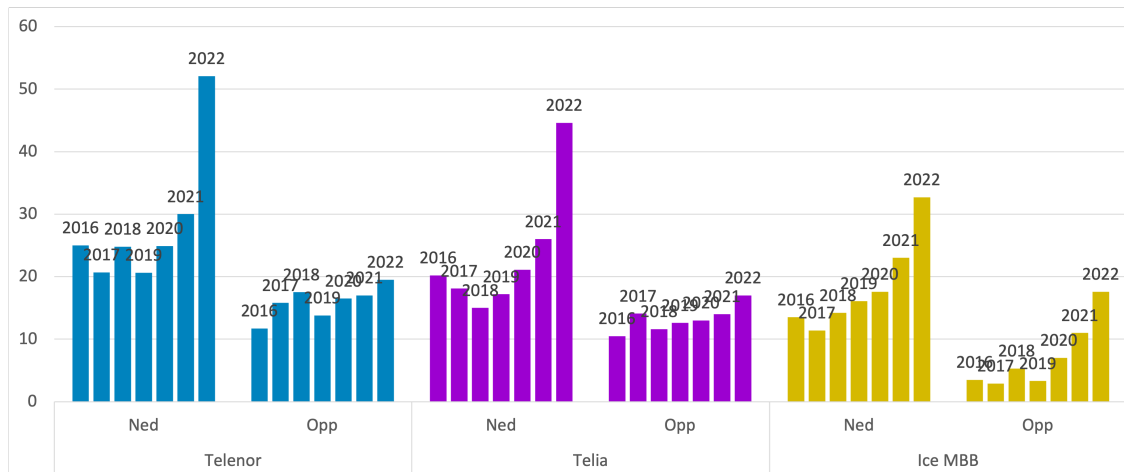
Økningen i hastighet kommer for målenoder i flere landsdeler, og det er vanskelig å finne et bestemt mønster i hvilke målenoder som opplever en slik økning. Både Telia og Telenor har fortsatt utskiftingen og oppgraderingen av basestasjoner i forbindelse med utrulling av 5G gjennom 2022. Dette innebærer 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. For enkelte noder har vi sett en klar forbedring i signalstyrke og nedlastingshastighet for de fleste målinger etter en spesifikk dato, der vi antar at 5G-omleggingen fant sted i området der noden er lokalisert.

4.5 Historisk utvikling i hastighet

Figur 4.5 viser utviklingen i median ned- og opplastingshastighet fra 2016 til 2022. Figuren må tolkes med noe varsomhet, siden målepunktene ikke er nøyaktig de samme hvert år. Vi har ikke historiske data for Ice mobil, så tallene fra 2016 - 2019 er for Ice MBB.

Figuren viser en markant positiv utvikling i målte hastigheter i 2022, både opplasting og nedlasting. Vi har sett en antydning til det også i de siste tre årene, mens utviklingen i 2022 når klart nye høyder, spesielt for nedlastingshastigheten samt opplastningshastigheten for Ice mobil.

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



Figur 4.5: Utvikling i ned- og opplastingshastighet 2016-2022.

4.6 Jitter

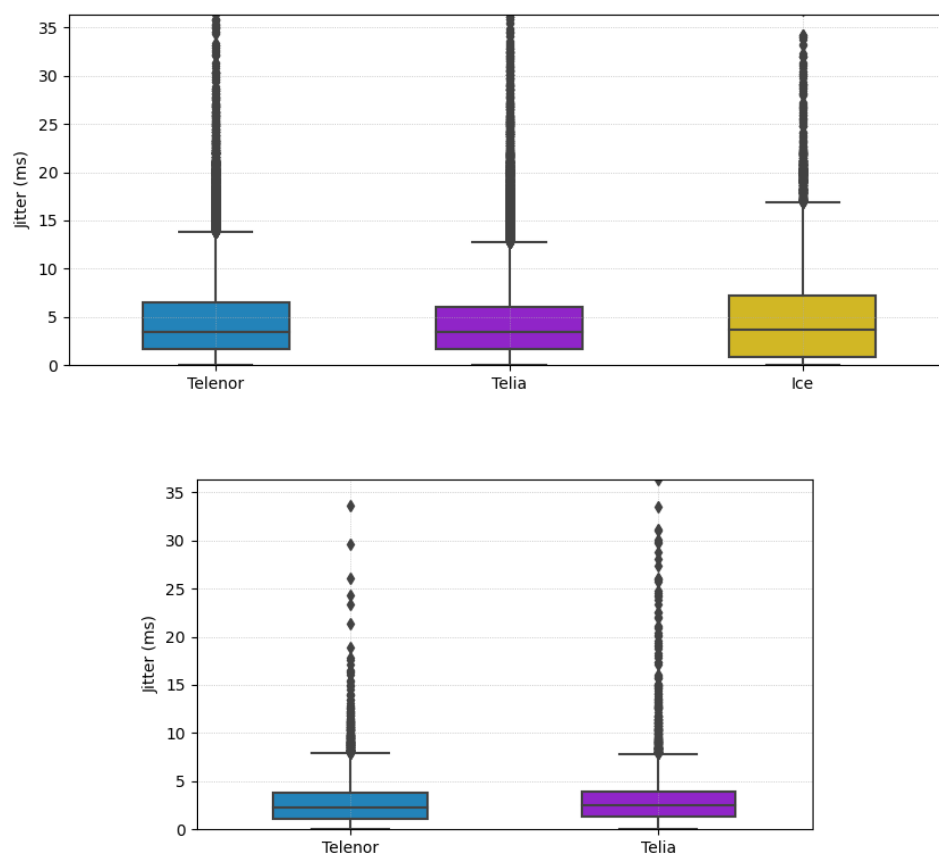
Datapakker i internett bruker forskjellig tid på sin reise fra kilde til destinasjon. Denne tiden kalles gjerne forsinkelse ("latency"), og varierer med avstand og tilstand i datanett. Blant annet vil høy trafikkbelastning i nettet gjøre at datapakker må vente i køer underveis i nettet, før de kan sendes videre. Variasjon av denne forsinkelsen over tid kalles for pakkejitter eller bare jitter. Jitter betegner gjerne pakker som sendes og mottas sekvensielt innen én datastrøm, og er altså en annen størrelse enn variasjonen vi så på i seksjon 4.3.

Jitter og har fått økt oppmerksomhet hos operatørene i det siste. Videokonferanser er et eksempel av sanntidsapplikasjoner som er følsomme for høy jitter, der bruken har økt dramatisk i de senere årene. Mobile nett brukes stadig mer til interaktive spill, der jitter kan bokstavelig talt bestemme hvorvidt et 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 tilsammen. Jitter er viktig også med tanke på nye, tidskritiske tjenester i 5G SA, som krever meget lav forsinkelse og variasjon.

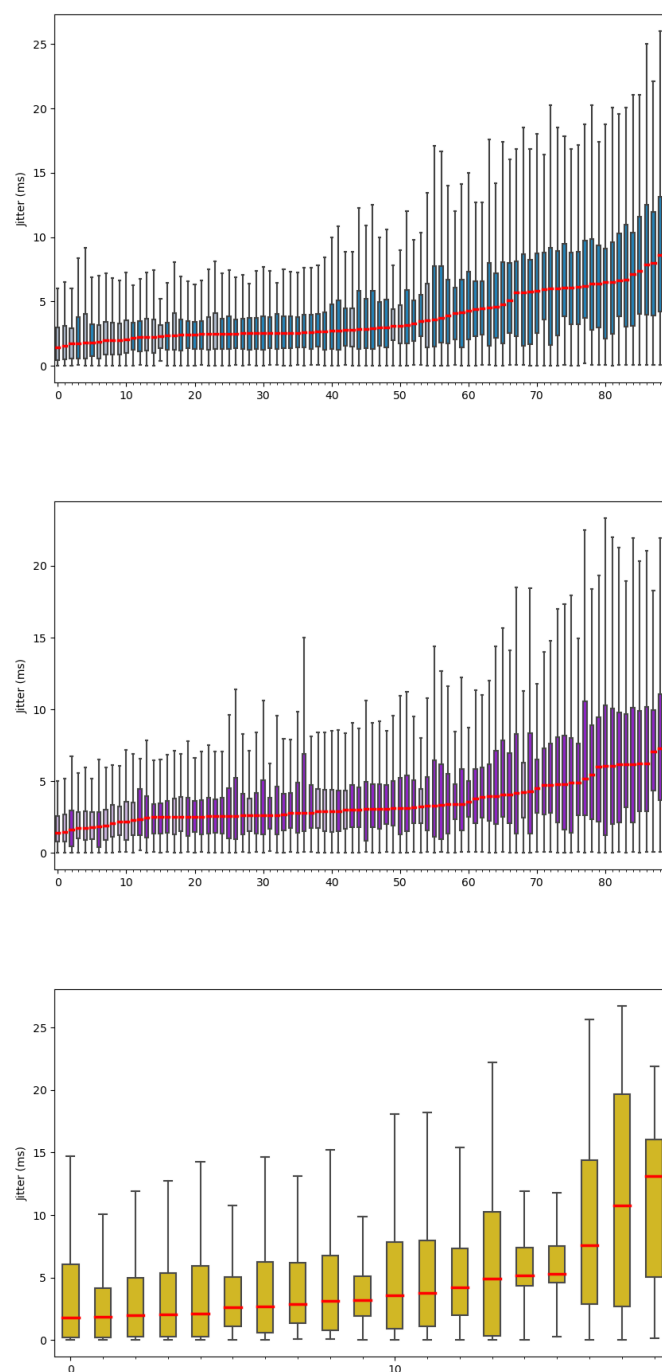
Det finnes flere måter å beregne jitter på. I denne rapporten viser vi tallene innrapportert i Ookla Speedtest, som er basert på målinger av forsinkelse i nettet, noe som foregår parallelt med selve hastighetsmålingen.

Figur 4.6 viser distribusjon av jitter for ulike operatører. Vi ser nokså like tall, med noe mer variasjon hos Ice mobil. Figurene omfatter 99% av alle målinger, dvs. under 1% av målingene har jitter over 36 ms. Vi merker oss at jitter-distribusjonen målt på denne måten har "lang hale", der noen målinger viser flere hundre millisekunder, for alle operatørene.

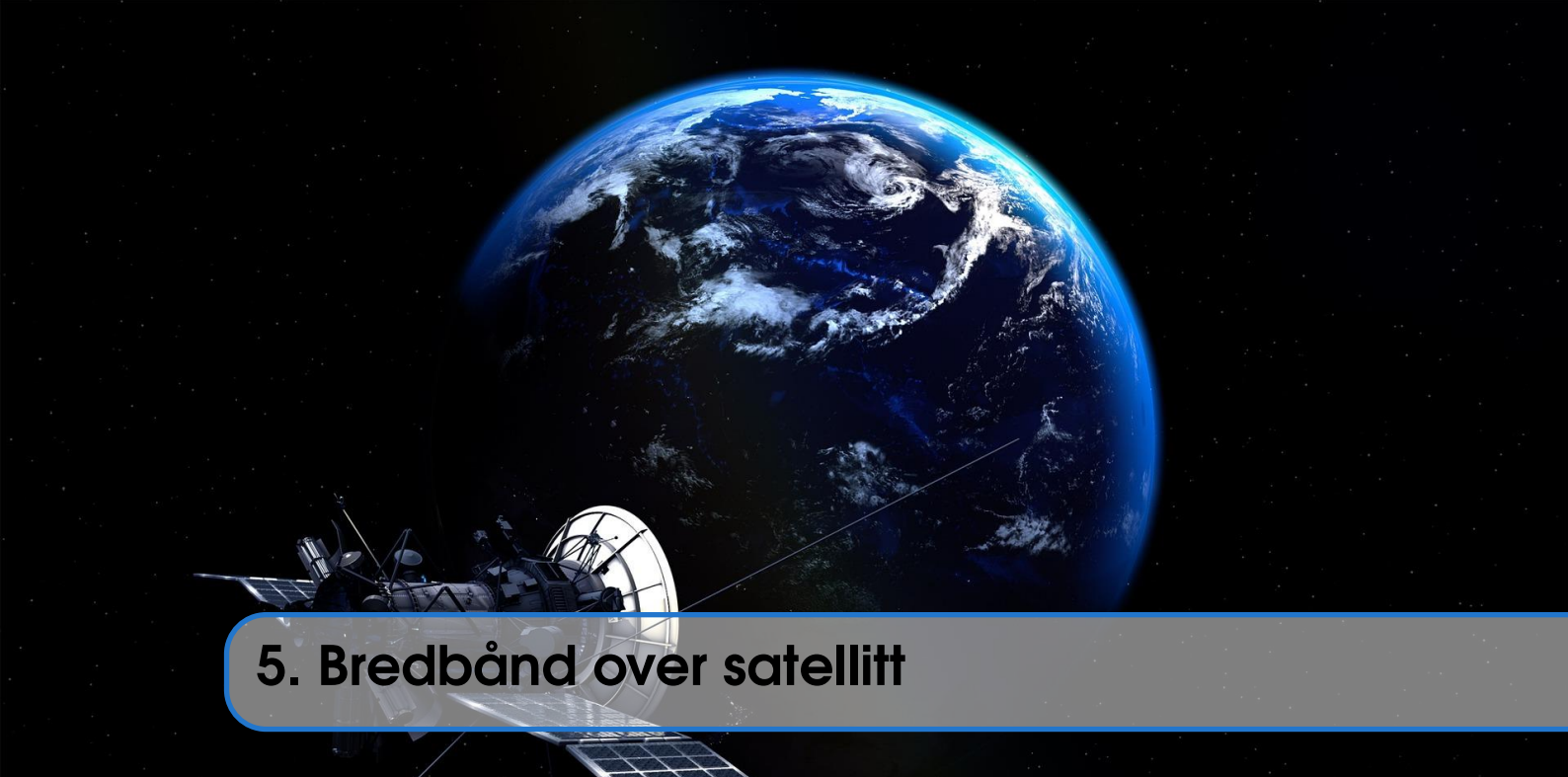
Figur 4.7 viser variasjon i jitter mellom ulike målenoder. Vi merker at 5G jitter er generelt lavere og varierer mindre enn 4G.



Figur 4.6: Jitter i 4G (øverst) og 5G (nederst) for ulike operatører.



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

A satellite with solar panels is shown in the foreground, pointing towards the Earth. The Earth is a large, blue and white sphere with visible clouds and continents, set against a black background of space with some distant stars.

5. Bredbånd over satellitt

I dette kapittelet presenterer vi målinger av bredbånd over satellitt. Vi startet med slike målinger i 2020, og fortsatte gjennom 2021 og 2022.

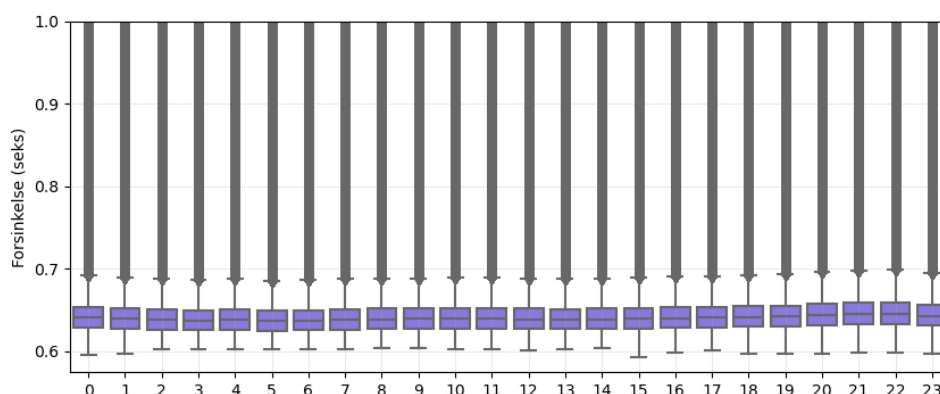
Satellittbredbånd spiller ingen viktig rolle i det norske bredbåndsmarkedet i dag, med kun noen tusen abonnenter. Det er likevel interessant å studere ytelsen for denne aksessformen. For det første kan satellitt gi et bredbåndstilbud i områder der det ikke finnes andre muligheter. For det andre kan satellittbaserte løsninger være en aktuell reserveløsning for virksomheter og kommuner med et særlig behov for pålitelig kommunikasjon.

Satellittforbindelsene som måles i denne rapporten er kommersielle forbindelser levert fra Brdy¹. Disse forbindelsene leveres over 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 sørøstnorge. 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 enkelt forbindelse. Siden alle satellitterminaler 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.

Våre målinger foretas fra den samme typen målenode som målingene av mobilnett. Målenoden er koblet til et satellittmodem via Ethernet. Modemet er igjen koblet direkte til en parabolantenne på taket av Simulas lokaler på Bislett i Oslo. Resultatene som vises her er basert på målinger foretatt i 2022.

Her rapporterer vi målinger av forsinkelse, pakketap og hastighet.

¹brdy.no, tidligere Bigblu.



Figur 5.1: Forsinkelse i satellittforbindelse

5.1 Forsinkelse

Geostasjonære satellitter har en omløpsti rundt jorda på 24 timer, og befinner seg derfor alltid vertikalt over det nøyaktig samme punktet på jorda. Dette er mulig kun 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 framsendelse 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. Forsinkelse 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. 600 og 700 ms. Medianverdien er nærmere 650 ms, som er noe lavere enn i 2021. Noen datapakker opplever ekstra høy forsinkelse, over ett sekund.

Forsinkelsen er lavest i perioder med lite trafikk (natt og tidlig morgen), og øker noe i perioder med høyere trafikkbelastning. Høyest er forsinkelsen om kvelden, omtrent kl 21. Vi observerer at forsinkelsen varierer vesentlig mindre gjennom døgnet i 2022, sammenlignet med tidligere år. I Figur 5.1 er det knapt mulig å se forskjellen, som var godt synlig i 2020 og 2021.

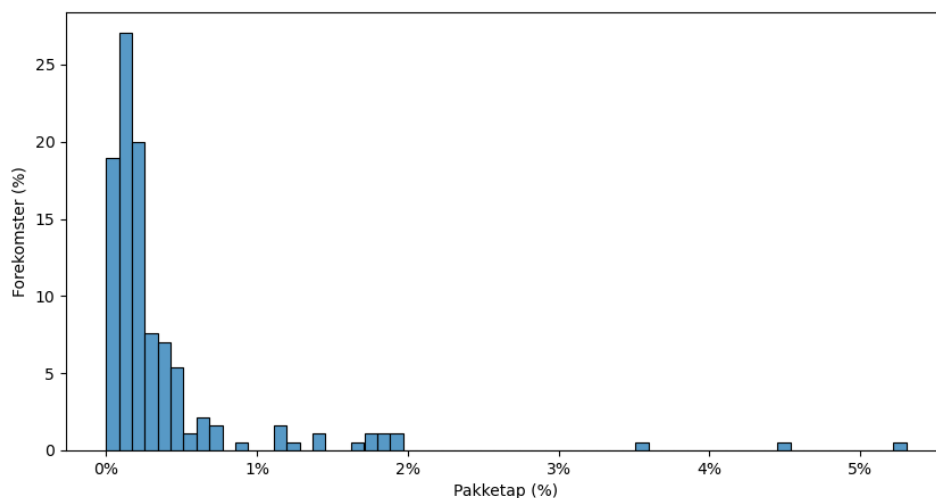
For mange applikasjoner vil en forsinkelse i dette området være akseptabel, men for interaktive applikasjoner (særlig spill) vil dette gi en klart dårligere opplevelse.

5.2 Pakketap

Figur 5.2 viser fordelingen av pakketap per dag i måleperioden. De fleste dager ligger pakketapet mellom 0 og 0,5 %, men enkelte dager var det høyere. Dette er vesentlig høyere enn pakketapet i mobilnettene presentert i kapittel 3. Enkelte dager kan pakketapet være opp mot 2 %. De ekstreme verdiene over 2 % er forårsaket av perioder med høy pakketap med varighet i 3–4 timer, på fire dager spredt over vår og sommer 2022. Vi har ikke funnet årsaken til dette. Vi observerer ingen klar forskjell på helger og ukedager i våre målinger.

5.3 Hastighet

Figur 5.3 viser hvordan nedlastingshastighet (øverst) og opplastingshastighet (nederst) varierer gjennom døgnet.



Figur 5.2: Pakketap i satellittforbindelse.

Median-nedlastingshastigheten ligger normalt mellom 40 Mbit/s og 50 Mbit/s, men faller ned til 32 Mbit/s ca. kl. 22 når bruken er antatt høyest². I perioder med lite trafikk opplever vi hastigheter på omtrent 50 Mbit/s, mens i perioder med høy trafikk kl. 19-23 opplever vi noe lavere hastigheter. Nedlastingshastigheten varierer fortsatt gjennom døgnet, men perioden med tilnærmet maksimal hastighet er klart lenger enn i tidligere år, og varer nesten 20 timer fra kl. 23-19. Dette er en klar forbedring fra 2020 og 2021, da vi observerte median nedlastingshastigheter på henholdsvis under 20 Mbit/s og 25 Mbit/s i de travleste timene.

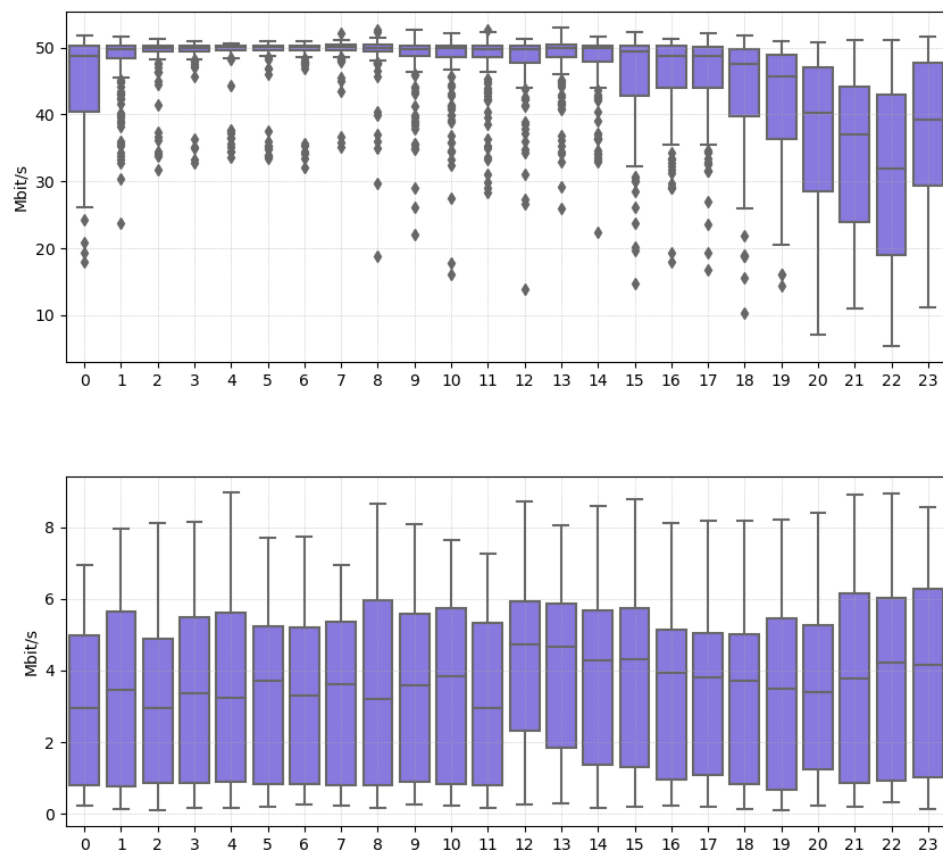
Vi observerer imidlertid en klar nedgang i opplastingshastighet fra i 2022. Mens denne lå stabilt opp mot 5 Mbit/s i 2020, og varierte noe mer i 2021, ser vi at denne hastigheten varierer nå 3-5 Mbit/s uten klar sammenheng med tid på døgnet.

5.4 Diskusjon

Målingene presentert her er som forklart foretatt i en av tre "beams" som dekker Norge. Vår målenode ligger i området med flest aktive brukere, så det er naturlig å forvente at brukere i andre deler av landet vil oppleve minst like god ytelse. Merk at at det totale antallet brukere som deler satellittens kapasitet er relativt lavt. Forskjellen i ytelse, særlig hastighet, mellom perioder med høy bruk og perioder med lav bruk synes å være synkende år etter år. Dette kan skyldes mindre bruk av dette kommunikasjonsmedium, kanskje til fordel for Low Earth Orbit (LEO) satellitter, som har lavere forsinkelse og er nå kommersielt tilgjengelig i Norge. Vi har forøvrig installert en Starlink antenne og måler dens ytelse. Vi planlegger å presentere målinger fra denne forbindelsen i neste års rapport.

Økningen av maksimal nedlastningshastighet og nedgangen i opplastningshastighet fra tidligere år 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 "kundefelleskapets beste". Det er mulig å prioritere nedlasting i tilgjengelige ressurser på bekostning av opplasting gjennom konfigurasjonsendringene, og våre funn kan tolkes i denne retningen.

²Sommertid er innberegnet i visningen, dvs. kl. 22 er samme tid sommer og vinter.



Figur 5.3: Nedlastingshastighet (øverst) og opplastingshastighet (nederst) over satellittforbindelse.



6. 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 Norge. Hver målnode er koblet til inntil 3 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 måldata.

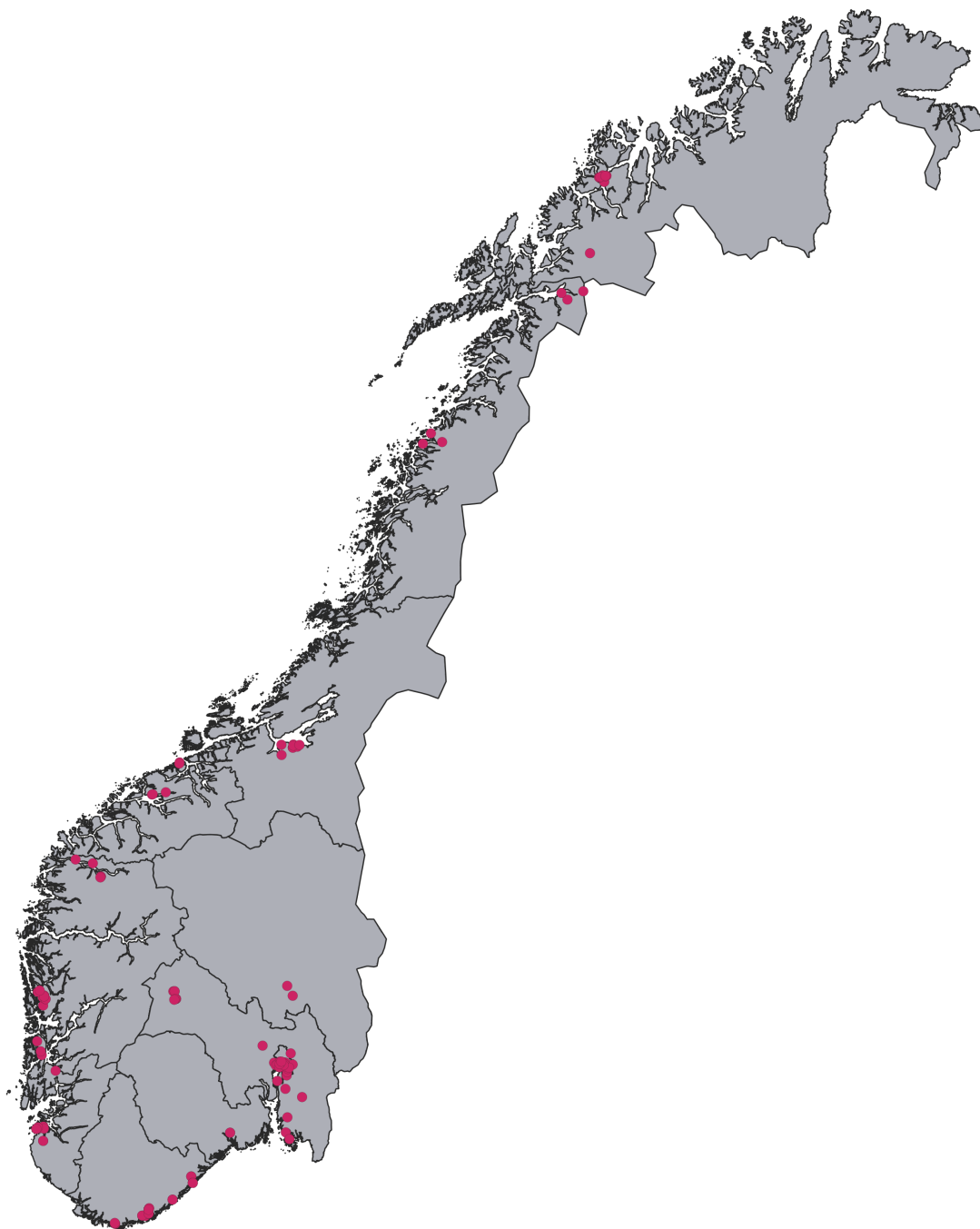
Center for Resilient Networks and Applications (CRNA) samarbeider med lokale partnere over hele landet som fungerer som vertskap for målnoder. Figur 6.1 gir et inntrykk av den geografiske fordelingen av målnoder. På grunn av et tidligere samarbeid med e-valgprosjektet i Kommunal- og Moderniseringsdepartementet, er mange målnoder plassert i valglokaler. Valglokaler er ofte skoler, sykehjem eller rådhus, og er som regel plassert i sentrumsnære områder. I tillegg samarbeider vi direkte med en rekke skoler, musikkorps og andre foreninger om utplassering av målnoder. Det er en overvekt av målnoder i en del større byer, spesielt i Oslo, Bergen og Trondheim. Våre målinger har dermed en skjevhet mot tettbygde strøk, og gir ikke nødvendigvis et korrekt bilde av forholdene langs veier eller utenfor tettbygde strøk. Det er imidlertid stor spredning i geografi og størrelse på tettstedene, og vi mener at våre målinger er rimelig representative for hva brukere kan forvente innendørs.

Antallet målnoder har ligget på rundt 100 gjennom året, men har variert noe gjennom måleperioden, som vist i figur 6.2. Vi har hatt noen tekniske utfordringer med backend i sommer 2022, som har forårsaket utilgjengelighet på noen noder frem til desember. Dette vises også i figur 6.2. Vi har stasjonære målnoder i alle landsdeler.

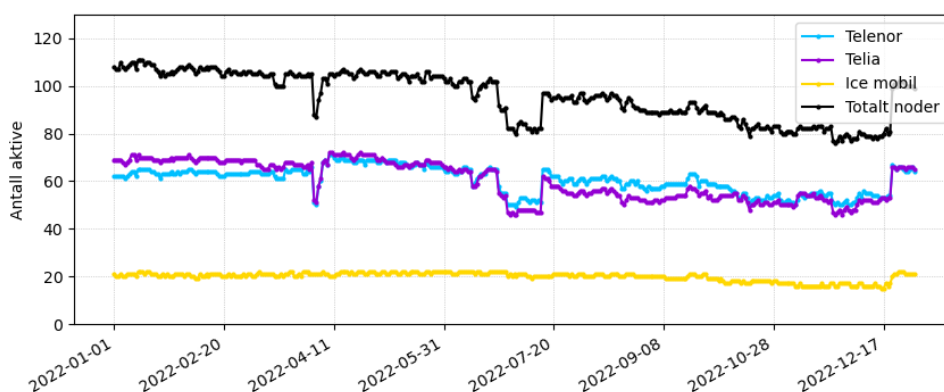
6.1 Mobilnettene vi måler

Vi gjør målinger i alle 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

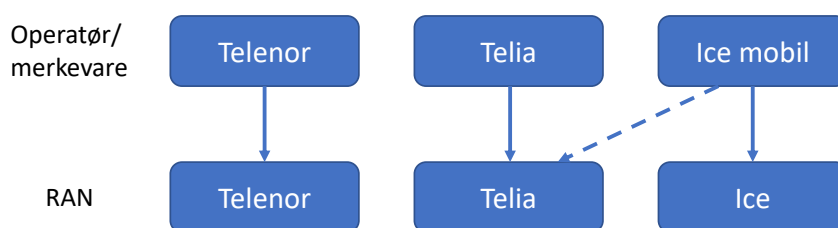
¹Nornet består i tillegg til Nornet Edge av Nornet Core, som brukes til målinger og eksperimenter i fastnett.



Figur 6.1: Geografisk fordeling av målenoder.



Figur 6.2: Antall aktive målenoder og forbindelser fra hver operatør gjennom 2021.



Figur 6.3: Operatører og nettverk behandlet i denne rapporten.

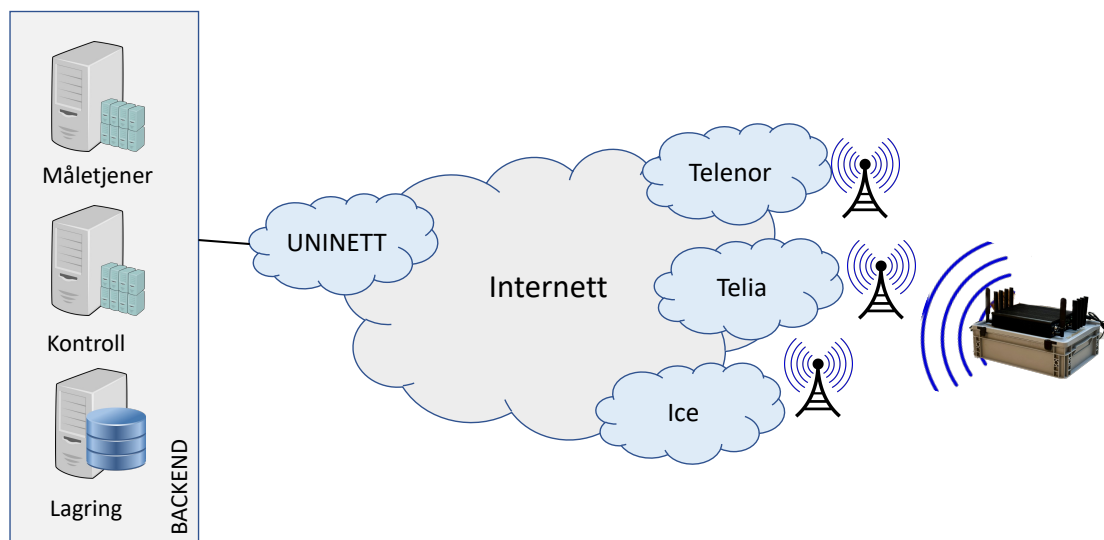
komponenter i andre mobilnett. Ice opererer det tredje norske mobilnettet, og gjennomførte i 2015 et teknologiskifte i sitt nett, fra CDMA til LTE. Dette nettet er et rent 4G (LTE) nett, i motsetning til Telenor og Telias nett som også støtter 2G (GSM), og etter hver også 5G. 3G (UMTS) ble i praksis faset ut i 2022. Vi presenterer kun målinger for Ice mobil i denne rapporten. Ice mobil benytter Telias nett dersom de er utenfor områder som Ice dekker med andre frekvenser.

Figur 6.3 viser sammenhengen mellom operatør/merkevare og hvilket radioaksessnett (RAN) operatøren bruker.

6.2 Nornet Edge målenoder

Våre målenoder har gjennomgått flere generasjonskifter gjennom årene. 4G-nodene vi bruker har vært i tjenesten siden 2018. De er basert på hyllevarekomponenter, og bruker interne PCI express modemer for å koble seg til mobilnettene. Målenodene har også en GSM-tilkobling som gjør at strømtilførselen kan kuttes via SMS, noe som vesentlig øker driftsstabiliteten til nodene. I likhet med første generasjon målenoder kjører de et standard Debian Linux operativsystem, og er derfor svært fleksible med tanke på hva slags målinger som kan støttes. Dette gjør også våre 5G-noder, som har vært i gradvis utrulling siden 2021.

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 6.4: Nornet Edge måleinfrastrukturen.

5G-målenodene er basert på Celerway Arcus plattform, men to 5G Quectel RM500Q modemer, som støtter 3GPP Release 15 og datarate opp til 2,5 Gbps nedlasting og 600 Mbps opplasting.

6.3 Server-side infrastruktur

Målenodene utfører målinger ved å sende trafikk til Simulas måleservere i Oslo, som vist i figur 6.4. Trafikk til og fra måleserverne rutes gjennom de ulike mobilnettene og videre gjennom UNINETT. Måleserverne har god kapasitet i form av minne, prosessering og nettverkstilknytning, for å unngå at de skal være en flaskehals i målingene.

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

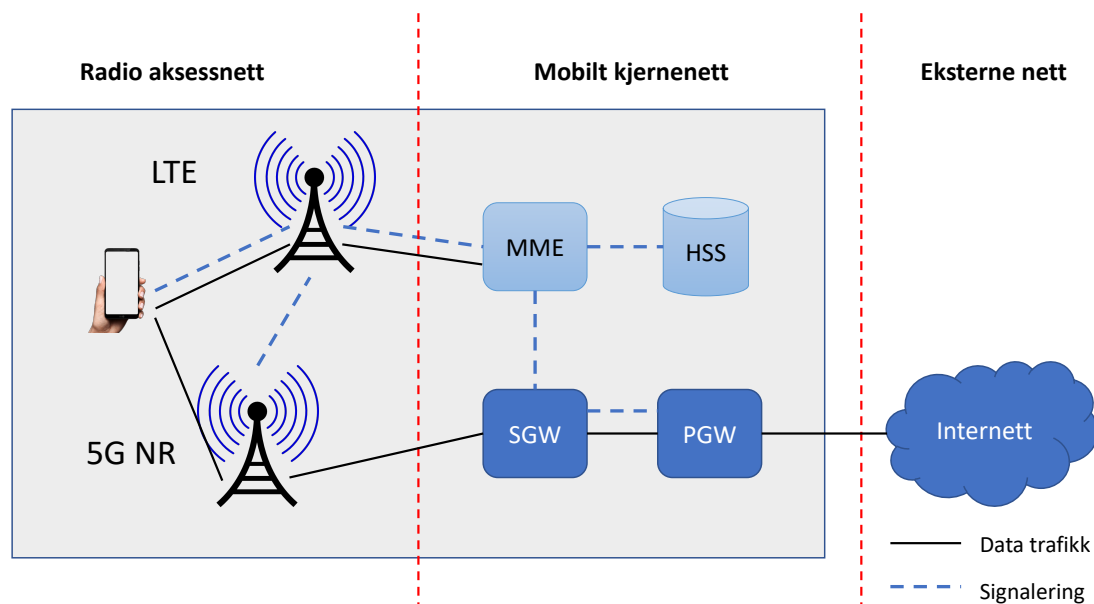
Nornet Edge omfatter også systemer for å monitorere, vedlikeholde og oppdatere målenodene, samt å orkestrere de ulike målingene som skal kjøres.

6.4 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. Dette kapittelet forklarer hvordan vi bryter det abstrakte begrepet *opplevd stabilitet* ned i mindre, lettere målbare metrikker, og hvilke tester vi bruker for å måle disse.

Figur 6.5 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 heholdsvise eNodeB i 4G og gNodeB i 5G). Kjernenettet inkluderer et antall sentrale funksjoner. 4G- og 5G-nettverk er rene datanettverk, og inkluderer ikke komponenter nødvendig for å produsere linjesvitsjet tale. Den viktigste delen



Figur 6.5: Hovedkomponentene i 4G (LTE) og 5G nettverk.

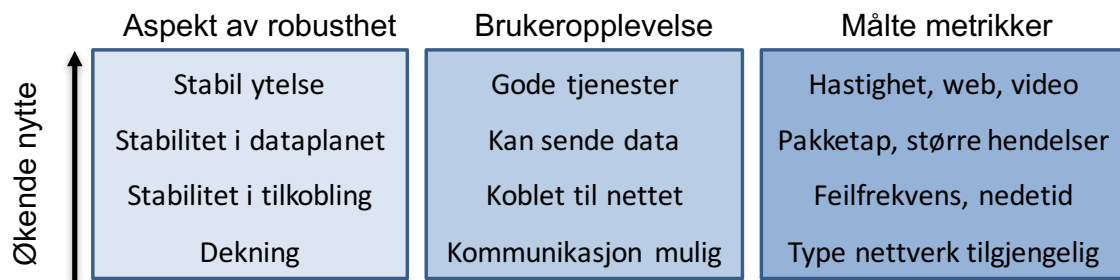
av kjernenettet for vår diskusjon er komponenten som forbinder mobilnettet med eksterne nett (Internett). Denne enheten kalles Packet Data Network Gateway (PGW).

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.

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 6.6. Disse er dekning, stabilitet i nettverkstilkoblingen, stabilitet i dataforbindelsen, og stabilitet i ytelse. De fire nivåene bygger på hverandre, og representerer økende grad av opplevd nytteverdi for 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 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 med stasjonære målenoder er derfor ikke



Figur 6.6: Rammeverk for å måle robusthet på flere nivåer.

egnet til å måle dekning.

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. 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 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.

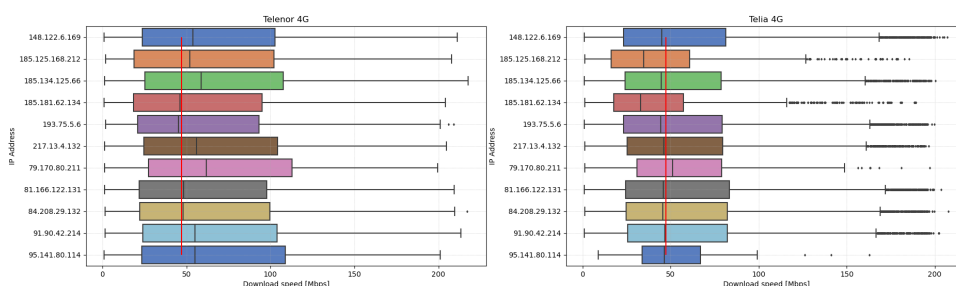
Stabil ytelse. Robusthet innebærer også en grad av stabilitet og forutsigbarhet i ytelsen til applikasjonene som kjører over det mobile bredbåndsnettet. Applikasjoner har ulike krav til nettverket. Noen applikasjoner krever høy båndbredde, andre lav forsinkelse eller lavt pakketap. I mobilnett avhenger 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.

6.5 Ookla Speedtest

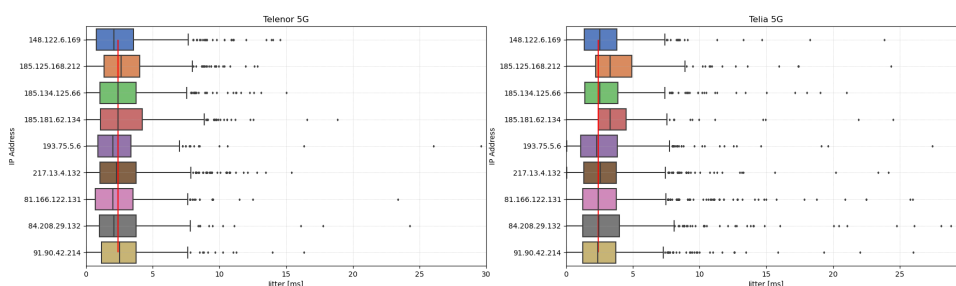
I vår analyse av ytelsen i mobile nett (kapitel 4) bruker vi Ookla Speedtest tjeneste, som har utpekt seg som en standard for dette formålet og brukes mye i hele verden. Det at tjenesten er populær betyr jo ikke nødvendigvis at den er formålstjenelig, og vi må stille oss spørsmål om vi kan stole på resultatene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

Det generelle publikum bruker gjerne enten den webbaserte løsningen til Ookla² eller deres app på mobil eller PC. Vi bruker den offisielle Ookla klient, som installeres gjennom pakkemanager på våre Linux målnoder ("apt install speedtest"). Klienten startes med riktige parametre

²<https://www.speedtest.net/>



Figur 6.7: Nedlastningshastighet per server.



Figur 6.8: Jitter per server.

til angitte tider gjennom et skeduleringskript. 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 velger selv den optimale måleserveren gjennom en serie med ICMP ping. Våre målenoder velger alltid servere lokalisert i Norge, og vi ser en god geografisk spredning over hele landet. Etter å ha valgt måleserver, åpnes det parallelle nedlastningssessjoner 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 resultatene per server. Vi har sett på nedlastningshastighet samt jitter for 4G og 5G. I figur 6.7 viser vi nedlastningshastigheten for 4G målinger for de mest brukte serverene (med minst 2000 målinger), og i figur 6.8 viser vi jitter for 5G målinger for servere med 500 eller flere målinger i 2022. Jitter for 4G og nedlastningshastighet for 5G viser samme tendens.

Vi ser stor overlap mellom måleverdiene for de forskjellige serverene, samt generelt bedre ytelse for Telenor, i tråd med resultatene presentert i kapittel 4. Litt større avvik ser man på serverne med IP adresser 185.125.168.212 og 185.181.62.134 (de oransje og mørkerøde boksene). Ved oppslag i åpne internettrutingdatabaser ser vi at begge tilhører den norske internettleverandøren Terrahost AS. Videre oppslag i Telia oppslagsverktøy på nett³ viser at Telia kommuniserer med

³Telia Looking Glass, <https://lg.telia.net/>.

Terrahost AS via Lyse/Altibox, nettverk nummer 29695. Vi kan ikke vite kjerneårsaken til problemet, men det kan tenke seg at nettverksforbindelsen mellom Telias mobilnett og Terrahost AS kan ha hatt kapasitetsutfordringer i 2022. Vår dypere analyse viser at problemet har vedvart gjennom hele året.

Så hva sier denne analysen om hvorvidt Ookla Speedtest er egnet til formålet som plattform for ytelsesanalyse? Terrahost Speedtest servere står for ca. 13 % av alle tester i år, og trekker Telia resultater ned. Vi avstår allikevel av 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 selv en tilsvarende løsning 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.