

Robusthet i norske mobilnett

Tilstandsrapport 2014, CRNA

LTE

CRNA Centre for Resilient
Networks & Applications

[**simula** . research laboratory]

Robusthet i norske mobilnett

Tilstandsrapport 2014

Centre for Resilient Networks and Applications

Ansvarlig for årets rapport	Dr. Ahmed Elmokashfi
Bidragstere	Dr. Amund Kvalbein Džiugas Baltrūnas Jonas Werme Erlend Arge
Omslag	Image Communication
Publiseringsdato	13. april 2015
ISBN	978-82-92593-16-5
Økonomiske bidragstere	Norges Forskningsråd Tele2 Norge Ice Norge

Hovedfunn

Årets rapport fra Center for Resilient Networks and Applications (CRNA) fokuserer på den brukeropplevde robustheten i norske mobilnett. Robusthet i mobilnett er en ullen størrelse, og er et resultat av en rekke faktorer som fysisk infrastruktur, nettverksprotokoller, konfigurasjonsvalg, rutiner, beredskap og så videre. Denne rapporten tar utgangspunkt i et brukerperspektiv, og beskriver stabiliteten i tjenesten endebbrukere opplever i mobilnettene.

Rapporten bygger på aktive og passive målinger av mobilt bredbånd fra 5 ulike mobiloperatører i Norge: **Telenor**, **Netcom**, **Tele2**, **Network Norway** og **Ice**. Målingene er foretatt kontinuerlig gjennom hele 2014, fra målenoder spredt over det meste av landet, med en hovedvekt på tettsteder og større byer. Datasettet består av målinger fra 859 forbindelser fordelt på 281 målenoder i 83 kommuner¹. Nytt i årets rapport er at den også inkluderer målinger i LTE-nett.

Opplevd robusthet måles på tre ulike nivåer i denne rapporten. *Stabilitet i tilkoblingen* fanger opp hvor ofte og hvor lenge en mobilforbindelse mister kontakten med mobilnett. *Stabilitet i dataplanet* fokuserer på evnen til å sende data gjennom mobilnett når kontakten er etablert. *Stabilitet i ytelse* beskriver evnen til å levere en jevn og forutsigbar ytelse til typiske applikasjoner som bruker mobilnett. Rapporten presenterer også en studie av potensialet for å øke robustheten ved å koble seg til flere operatørers nett samtidig, og en sammenligning av stabiliteten i 3G og LTE-nett.

En hovedobservasjon er at den brukeropplevde stabiliteten i norske mobilnett har blitt bedre fra 2013 til 2014. Målingene viser færre brudd i tilkoblingene, lavere pakketap og høyere og mer stabil ytelse. Særlig er forbedringen sterk i Telenors nettverk. Dette skyldes primært endringer i konfigurasjonen av deres mobilnett som ble foretatt i juni 2014. Denne konfigurasjonsendringen har gitt vesentlige positive utslag på flere av våre målinger.

Andre viktige funn som presenteres i rapporten er:

Stabilitet i tilkoblingen

- Forbindelsen mellom målenoder og mobilnett er mer stabil i 2014 enn i 2013. Mellom 5% (**Network Norway**) og 14% (**Netcom**) av forbindelsene mister tilkoblingen mer enn 10 minutter per dag i gjennomsnitt. Tilsvarende tall for 2013 var 15-37% av forbindelsene avhengig av operatør.
- Forskjellene i feilmønster mellom operatørene er mindre i 2014 enn i 2013. Antallet korte avbrudd er vesentlig redusert hos **Telenor** og **Network**

¹Ikke alle noder har vært aktive gjennom hele året

Norway. **Netcom** opplever fremdeles noe færre men mer langvarige avbrudd enn de andre operatørene.

Stabilitet i dataplanet

- Pakketap har blitt betydelig redusert fra 2013 til 2014. For **Telenor** og **Netcom** er både gjennomsnittlig og median pakketap mer enn halvert.
- **Tele2** og **Network Norway** opplever også en betydelig reduksjon, og har de laveste tapsratene. **Ice** har en marginalt høyere tapsrate enn GSM-operatørene.
- Vi observerer færre større hendelser i 2014 enn i 2013. Større hendelser er perioder der mange forbindelser samtidig opplever nedetid eller unormalt høyt pakketap. Ved den mest alvorlige hendelsen mistet alle kundene hos den berørte operatøren forbindelsen i nesten 8 timer. Større hendelser som berører mange forbindelser forekommer i ulikt omfang hos operatørene.

Stabilitet i ytelse

- Vi måler stabilitet i ytelse blant annet gjennom en test der vi laster ned en fil på 1 MB. Andelen nedlastingsforsøk som feiler har blitt redusert betraktelig fra 2013 til 2014. For de fleste forbindelsene er nedlastingen så godt som alltid vellykket. Svært få forbindelser har en feilrate over 3%.
- Evnen til å gjennomføre en IP-telefonsamtale over mobilt bredbånd har også øket betraktelig. Fra de fleste målepunktene er andel mislykkede samtaler under 1% hos alle operatører. 10% av forbindelsene opplever fortsatt en feilrate på over 5%.
- GSM-operatørene har høyere stabil båndbredde enn **Ice**. 80% av forbindelsene hos alle GSM-operatørene oppnår minst 1 Mbit/s nedlastingshastighet i mer enn 95% av forsøkene.

Sammenligning av 3G og LTE

- Det er liten eller ingen forskjell i stabiliteten i tilkoblingen mellom 3G og LTE.
- Pakketapet er lavere i LTE enn i 3G. 87% av LTE-forbindelsene hos både **Telenor** og **Netcom** har et pakketap på unker 0,1%. Tilsvarende tall for 3G er 75% hos begge operatører.
- Oppnådd hastighet er over dobbelt så stor i LTE som i 3G ved nedlasting av filer på 1-4 MB.

Øket robusthet gjennom multihoming

- Nedetid kan reduseres med en faktor 10 ved å koble seg til to ulike mobilnett.
- Ved å koble seg til to uavhengige nettverk, kan over 50% av målenodene oppnå *five nines* oppetid i tilkoblingen, altså at de har tilkobling til minst ett nett 99,999% av tiden.

Innhold

1 Om denne rapporten	2
2 Måleinfrastrukturen - Nornet Edge	5
2.1 Mobilnettene vi måler	7
2.2 Nornet Edge målenoder	8
2.3 Server-side infrastruktur	9
3 Robusthet i mobile bredbåndsnett	10
3.1 Kort introduksjon til mobile bredbåndsnett	10
3.2 Rammeverk for måling av robusthet	10
4 Stabilitet i tilkoblingen	14
4.1 Analyse av stabilitet i tilkoblingen	16
4.2 Utvikling over tid	18
5 Stabilitet i dataplanet	21
5.1 Tapsrate	21
5.2 Utvikling i tapsrate over tid	22
6 Større hendelser	25
7 Stabil ytelse	29
7.1 Nedlasting over HTTP	29
7.2 IP-telefoni	31
8 Sammenligning av 3G og LTE	33
8.1 Metode	33
8.2 Stabilitet i tilkoblingen	33
8.3 Pakketap	34
8.4 Ytelse	34
9 Øket robusthet gjennom multihoming	38
10 Oppsummering og veien videre	40

1. Om denne rapporten

Denne rapporten er utarbeidet av Center for Resilient Networks and Applications (CRNA), som er en del av Simula Research Laboratory. CRNA driver grunnleggende forskning innen robusthet og sikkerhet i nettverk på mandat fra Samferdselsdepartementet. Som en del av sin aktivitet vedlikeholder CRNA Nor-net¹ [3, 5], en omfattende infrastruktur for å utføre målinger og eksperimenter i operative kommunikasjonsnettverk. Senteret skal som en del av sitt mandat produsere en årlig rapport om tilstanden i den norske kommunikasjonsinfrastrukturen, basert på disse målingene. Den første utgaven av denne rapporten [2] kom ut i februar 2014, og var det første forsøket på å beskrive robusthet i mobilnett på en nasjonal skala ved hjelp av ende-til-ende målinger.

Årets rapport er den andre i rekken av slike rapporter, og er basert på målinger utført gjennom hele 2014. I likhet med fjorårets rapport fokuserer den på opplevd robusthet i mobilnett. Resultatene som presenteres er basert på målinger gjort i alle fire operative mobilnettverk i Norge: Telenor, Netcom, Mobile Norway og Ice. Målingene fokuserer kun på datatrafikk ("mobilt bredbånd"), og ikke på andre tjenester mobilnettene tilbyr (tale og SMS/MMS).

Robusthet er en kompleks størrelse, og det finnes foreløpig ingen entydig og alment akseptert metode for å måle og kvantifisere robusthet i mobilnett. Arbeidet ved Robuste Nett senteret er i så måte nybrottsarbeid. Feilfrekvens i ulike nettverkskomponenter og støttesystemer, endringer i dekningsforhold, vedlikeholdsrutiner, stabilitet i tilkoblingen til nettet, pakketap, og stabilitet i ytelse er alle parametere som sier noe om den totale robustheten i et mobilnett.

Målet for denne rapporten er å gi et realistisk bilde av hvilken stabilitet og kvalitet en sluttbruker kan forvente fra mobilnettene. Rapporten bygger derfor på målinger fra et brukerperspektiv, og ikke på en teoretisk analyse av ulike komponenter og feilkilder i et mobilnettverk. Begge disse tilnærmingene er verdifulle, og de kan begge bidra til å gi en bedre forståelse av robusthet og sårbarheter. Det vil imidlertid aldri være mulig å gi et fullstendig bilde av brukeropplevelsen uten representative ende-til-ende målinger. Til det er kompleksiteten i systemene for stor, og modellene for hvordan dekning, interferens og trafikk mønstre samvirker for unøyaktige.

Denne rapporten bygger på omfattende målinger gjennom hele 2014. Målingene er utført med standard brukerstyr for mobilt bredbånd, tilsvarende det som tilbys av operatørene som måles. En nærmere beskrivelse av infrastrukturen som er brukt gis i kapittel 2. En rekke ulike målinger gjøres for å fange opp ulike aspekter av robusthetsbegrepet, fra en grunnleggende tilkobling mellom

¹<http://nornet-testbed.no>

brukerutstyr og mobilnett til stabiliteten i brukeropplevelsen. Disse aspektene presenteres nærmere i kapittel 3.

Et eksempel på en annen tilnærming til robusthet i mobilnett er Post- og Teletilsynets rapport fra 2012 [1], som gir en bred analyse av tekniske og organisatoriske forhold som kan bidra til økt sårbarhet i norske mobilnett. På europeisk nivå publiserer European Union Agency for Network and Information Security (ENISA) årlige hendelsesrapporter basert på meldinger om større utfall i kommunikasjonsnettverk i medlemslandene [4].

Nytt i årets rapport er at vi også inkluderer målinger i operatørens LTE-nett. Disse nettverkene bygges raskt ut, og er i ferd med å bli de viktigste nettverkene for overføring av mobil data. Særlig etter at frekvensene i 800 MHz-båndet ble tatt i bruk, har LTE-dekningen øket kraftig. Telenor meldte i november 2014 at trafikken i deres LTE-nett hadde seksdoblet seg på ett år, og at over 50% av den mobile datatrafikken nå går over LTE. I denne rapporten måler vi opplevd stabilitet og kvalitet i LTE-nett, og sammenligner denne med tilsvarende tall for 3G-nett. Sammenligningen presenteres i kapittel 8

Våre målinger har pågått i sin nåværende form siden juli 2013. Dette gir oss grunnlag for å begynne å analysere utvikling i robusthet over tid. Gjennom denne måleperioden kan vi observere flere konkrete endringer og trender i stabilitet og ytelse i mobilnettene. Vi belyser og diskuterer en del av disse endringene.

Med denne rapporten ønsker vi å bidra til økt fokus på robusthet i norske mobilnett. Mobilnettene har i løpet av de siste ti årene blitt *kritisk infrastruktur*, og spiller en sentral rolle for privatpersoner, offentlige instanser og næringsliv i hverdag og krise. Vi forventer at mobilnettets rolle bare vil øke i omfang og viktighet etterhvert som mobilkommunikasjon blir stadig tettere integrert i produkter, tjenester og andre infrastrukturer. Det er derfor nødvendig med økt kunnskap om styrker og svakheter i dagens nettverk, for å kunne vurdere hvilke tiltak som kan settes inn for å øke robustheten. Vi har erfart at forrige års rapport bidro med kunnskap som er nyttig i dette henseende, og som har hjulpet operatørene til å utvilke enda bedre tjenester.

Målingene i årets rapport er for en stor del de samme som ble presentert i fjorårets rapport, og de fleste resultatene er direkte sammenlignbare. Vi kommenterer og diskuterer endringer fra forrige rapport, men vi gjentar bare i begrenset grad tidligere resultater. Dersom man ønsker å gjøre en mer detaljert sammenligning, kan det være en fordel å laste ned fjorårets rapport, som er tilgjengelig på våre nettsider.

Følgende forhold og begrensninger er viktige å være klar over når man leser denne rapporten.

Måleinfrastrukturen dekker ikke alle deler av landet like godt. Vår infrastruktur består av i alt 281 dedikerte målenoder spredt omkring i norske kommuner. Antallet aktive noder og plasseringen varierer noe over tid. Tettheten av målepunkter gjenspeiler i noen grad befolkningstettheten, med flest målenoder i noen større byer (Oslo, Bergen, Trondheim). Det er imidlertid deler av landet der det er langt mellom målepunktene, og større regionale hendelser (feks utfall av basestasjoner eller lokale strømbrudd) kan derfor forekomme uten at de fanges opp av våre målinger.

Vi måler ikke dekning direkte. Med et hundretalls målepunkter kan vi ikke gi noe komplett bilde av dekningen til de ulike mobilnettene, som hver for seg består av flere tusen basestasjoner.

Målepunktene som er brukt i denne rapporten er stasjonære. Våre målinger fanger derfor ikke opp endringer i ytelse og stabilitet som skyldes mobilitet. Det finnes en rekke slike forhold som endring i signalforhold og interferens, handover mellom basestasjoner og så videre som ikke reflekteres i våre målinger. Vi har i dag et mindre antall aktive mobile målenoder. Vi håper å kunne inkludere noen resultater fra disse i neste års rapport.

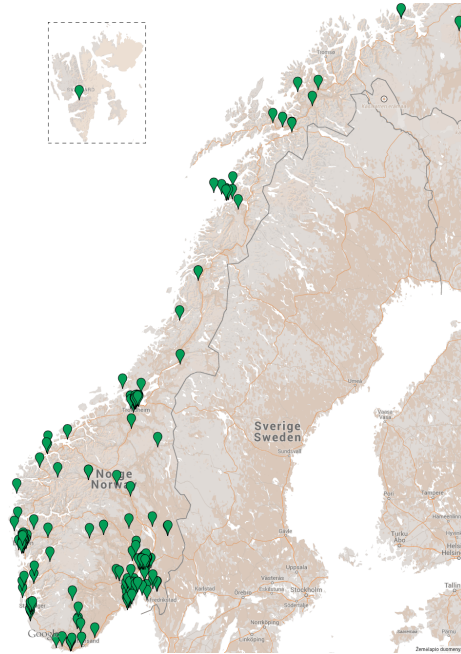
2. Måleinfrastrukturen - Nornet Edge

Målingene som presenteres i denne rapporten er utført ved hjelp av Nornet Edge. Nornet Edge er en infrastruktur for målinger og eksperimentering i mobile bredbåndsnett, delvis finansiert av Norges Forskningsråd¹. Infrastrukturen består av et hundretalls målnoder spredt rundt i Norge. Hver målnode er koblet til 2-5 mobiloperatører, og samler kontinuerlig inn data om dekningsforhold, status for tilkoblingen og ytelse for hver forbindelse. Infrastrukturen omfatter også et antall servere plassert på Simula som tar i mot, prosesserer og lagrer måledata.

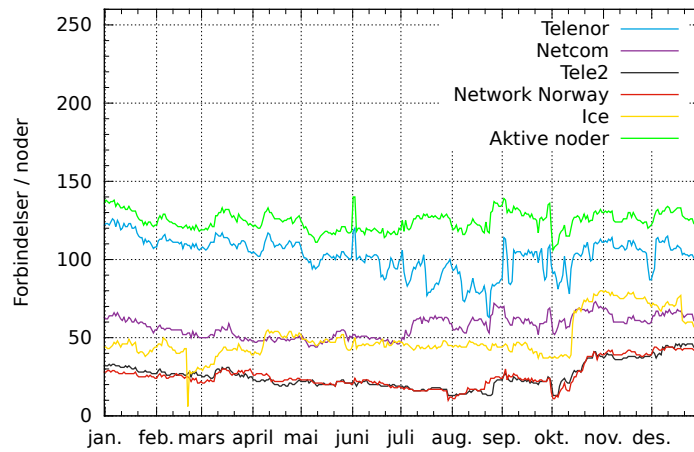
CRNA samarbeider med lokale partnere over hele landet som fungerer som vertskap for målnoder. Målnodene er plassert i alle deler av landet, fra Mandal i sør til Hammerfest og Longyearbyen i nord. Figur 2.1 gir et inntrykk av den geografiske fordelingen av målnoder. På grunn av et tidligere samarbeid 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 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.

I løpet av måleperioden har vi hatt aktive målnoder i 83 kommuner. Antallet målnoder har variert gjennom måleperioden, som vist i figur 2.2. Totalt har vi målinger fra 859 forbindelser fordelt på 281 distinkte målnoder.

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



Figur 2.1: Geografisk fordeling av målenoder.



Figur 2.2: Antall aktive målenoder og forbindelser fra hver operatør gjennom måleperioden.

MONROE - målinger i andre europeiske land

Simula har foretatt målinger av norske mobilnett ved hjelp av Nornet-infrastrukturen siden sommeren 2013. Nornet eies, bygges og opereres av CRNA-senteret ved Simula Research Laboratory, med finansiell støtte fra Norges Forskningsråd, Tele2 Norge og Ice Norge. Utviklingen av måleinfrastrukturen, inkludert nye metoder for å måle brukeropplevelsen i mobilnettverk er en viktig del av forskningen ved CRNA-senteret. Ny innsikt i form av nye rammeverk, målemetoder og konkrete måleresultater har blitt publisert i flere ledende vitenskapelige journaler og konferanser.

Nornet som infrastruktur for ende-til-ende målinger av kvalitet og ytelse i mobilnettverk er unik i verden, og blitt møtt med stor interesse i forskningsmiljøer internasjonalt. Over de neste årene vil infrastrukturen utvides og spres til flere europeiske land gjennom EU-prosjektet MONROE. MONROE vil i stor grad basere seg på Nornet-teknologi, og vil installere målenoder i Sverige, Spania og Italia i tillegg til Norge. Målet er å kunne tilby en plattform for skreddersydde målinger i mobilnett i de aktuelle landene. Bedrifter og forskere fra hele Europa skal kunne utvikle sine egne målinger, som deretter distribueres og kjøres fra målenoder i utvalgte nettverk og områder. Dette vil gi stor fleksibilitet og mulighet for å sammenligne nettverk på en langt større skala. En del av målenodene i MONROE vil plasseres på tog og busser, slik at man kan måle hvordan ytelse og stabilitet påvirkes av mobilitet.

Partnere i MONROE er Simula (Norge), IMDEA (Spania), Karlstads Universitet (Sverige), Politecnico di Torino (Italia), Celerway Communications (Norge), Telenor ASA (Norge), Net1 (Sverige) og Nextworks (Italia). MONROE ledes av dr. Özgü Alay ved Simula.

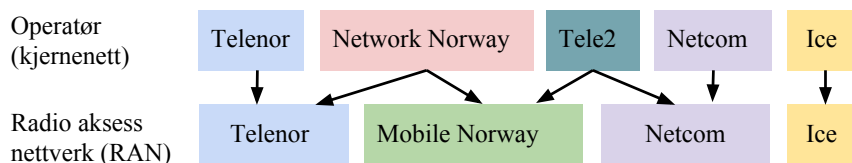
2.1 Mobilnettene vi måler

Vi gjør målinger i alle kommersielle mobilnett i Norge: Telenor, Netcom, Tele2, Network Norway og Ice. Vi gjør ikke målinger hos rene virtuelle operatører uten eget radionett, såkalte MVNO. Av praktiske og økonomiske årsaker har ikke alle målenoder forbindelse til alle mobilnettene vi måler. Hver målenode er koblet til mellom 2 og 5 mobiloperatører. Antallet abonnementer vi har hos hver operatør er forskjellig, og varierer noe over tid. Figur 2.2 viser antall aktive målesesjoner mot hver av operatørene gjennom måleperioden.

Alle operatørene vi måler opererer sitt eget kjernenett. Telenor og Netcom opererer hvert sitt landsdekkende radionett basert på GSM standarden². Tele2 og Network Norway opererer i fellesskap et tredje GSM-nett, Mobile Norway, med en noe mer begrenset dekning. Når Tele2- og Network Norway-abbonnenter beveger seg utenfor Mobile Norways dekningsområde, vil de koble seg til henholdsvis Netcoms og Telenors nettverk gjennom såkalt nasjonal gjesting³. Denne

²Vi bruker for enkelthets skyld GSM og GSM-operatører som en samlebetegnelse på nett basert på familien av standarder utviklet av 3GPP-konsortiet. Dette inkluderer GSM (2G), UMTS (3G) og LTE (4G) teknologier.

³Dette gjelder i hele måleperioden. Bildet er nå i ferd med å endre seg etter at Tele2



Figur 2.3: Operatører og nettverk behandlet i denne rapporten.

ordningen er illustrert i figur 2.3. En del av effektene vi måler vil avhenge av hvilket radionett en forbindelse er koblet til, mens andre effekter bestemmes av kjernenettet. Ice opererer et nettverk basert på CDMA standarden i 450 MHz frekvensbåndet, og kan dermed oppnå svært god arealdekning med vesentlig færre basestasjoner enn GSM-operatørene. Ice skiller seg også ut ved at de kun tilbyr en datatjeneste, og ikke noen tradisjonell taletjeneste.

2.2 Nornet Edge målenoder

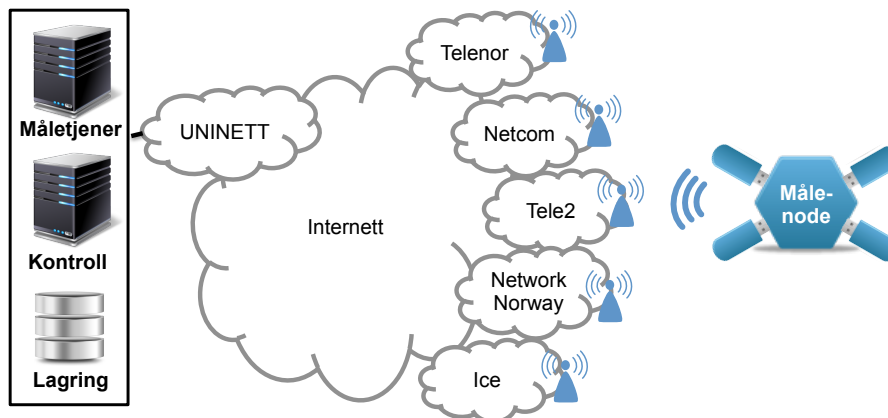
Nornet Edge målenoder er små ARM-baserte datamaskiner som er spesialutviklet for dette formålet. Målenodene har en Samsung Cortex A8 prosessor på 1GHz, 256 MB RAM, og 16 GB lagringskapasitet på et minnekort. De kjører et standard Debian Linux operativsystem, og er derfor svært fleksible med tanke på hva slags målinger som kan støttes.

Målenodene kobler seg til GSM-nettene gjennom USB modemer. Tre ulike USB modemmodeller benyttes: Huawei E392, Huawei E353-u2 og Huawei E3131. Disse modellene ble valgt fordi de kan eksportere detaljert informasjon om tilkoblingen til mobilnettet.

Av de tre modellene er det kun Huawei E392 som støtter LTE/4G standarden. De andre modellene støtter 3G teknologier opp til HSDPA-DC (E353-u2) og HSPA+ (Huawei 3131). Utskifting av eldre modemer uten LTE-støtte har vært en pågående prosess gjennom hele året, og andelen LTE-modemer er økende. Ved utgangen av 2014 hadde 49% av modemene i GSM-nettene støtte for LTE. Vi bruker alltid samme modemtype for alle operatører på en målenode, for å unngå forskjeller som skyldes ulik maskinvare.

For Ice bruker vi hovedsakelig deres D35 og R90 bredbåndsrutere. D35 støtter CDMA datastandarden Ev-Do 1x Rev A, mens R90 også støtter den nyere Ev-Do 1x Rev B. Rev B gir en høyere teoretisk datarate. D35 og R90 er frittstående enheter med sitt eget operativsystem. Våre målenoder er koblet til disse via Ethernet, og all uthenting av informasjon om forbindelsen skjer gjennom et webgrensesnitt. Dette grensesnittet tilgjengeliggjør bare svært begrenset informasjon om tilkoblingen. En økende andel av målenodene er derfor i stedet utstyrt med et USB-basert modem også for Ice, kalt U90. Dette modemmet gir oss mulighet til å hente ut mer informasjon om tilstanden til tilkoblingen, og tillater dermed en mer direkte sammenligning med GSM-nettene. Ved utgangen av 2014 benyttet 26% av Ice-forbindelsene U90 modemer.

har blitt kjøpt opp av TeliaSonera (Netcom). Network Norway har blitt solgt til Ice, og har foreløpig en avtale om roaming i Netcom sitt nettverk.



Figur 2.4: Nornet Edge måleinfrastrukturen.

2.3 Server-side infrastruktur

Målenodene utfører målinger ved å sende trafikk til måleservere i Simulas lokaler på Fornebu, som vist i figur 2.4. Trafikk til og fra måleserverne rutes 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. Det totale datasettet fra måleperioden består av over 11 milliarder datapunkter. De innsamlede dataene behandles og filtreres for å fjerne perioder der vi opplevde problemer i server-side infrastrukturen.

Nornet Edge omfatter også et omfattende system for å monitorere, vedlikeholde og oppdatere målenodene, samt å orkestrere de ulike målingene som skal kjøres [5].

3. Robusthet i mobile bredbåndsnett

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

3.1 Kort introduksjon til mobile bredbåndsnett

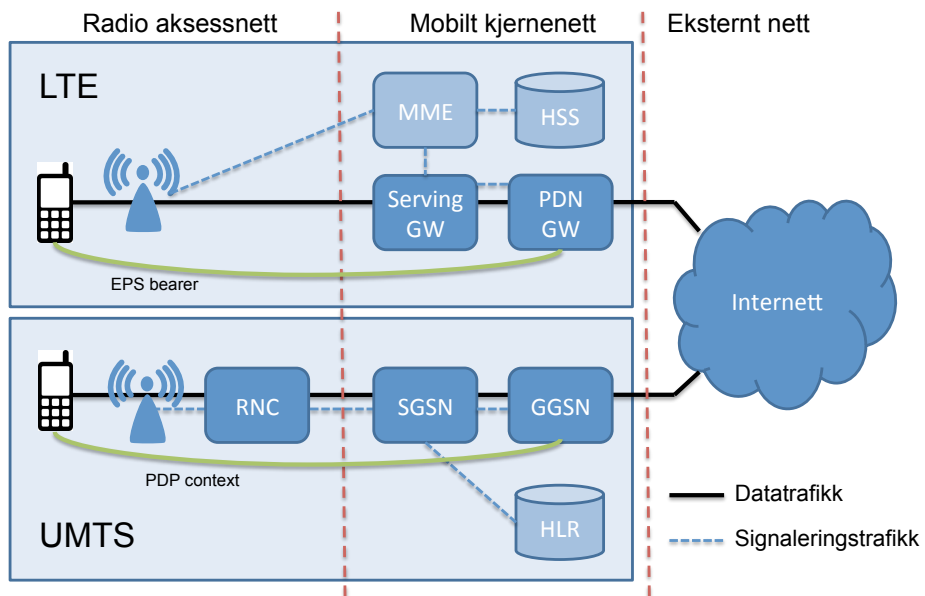
Figur 3.1 viser en forenklet framstilling av de viktigste komponentene i et LTE og et 3G mobilnett. Begge nettverkene består av et radio aksessnettverk, kalt henholdsvis UTRAN i 3G og EUTRAN (Evolved UTRAN) i LTE, og et kjerne-nett. Radionettet inkluderer brukerterminaler og basestasjoner. I 3G nettverk inkluderer det også et antall Radio Network Controllers (RNC) som hver kontrollerer et antall basestasjoner. I LTE nettverk er RNC-funksjonaliteten i hovedsak flyttet ut i basestasjonene.

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

Før en brukerterminal kan sende data, må det opprettes en datasesjon. En slik datasesjon kalles en PDP kontekst i 3G eller en EPS bearer i LTE, og kan forstås som en tunnel mellom brukerterminalen og GGSN (eller PDN gateway). En av de faktorene vi undersøker i denne rapporten, er hvor ofte og hvor lenge slike datasesjoner brytes, og hvor lang tid det tar før de kan gjenopprettes.

3.2 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 tre nivåer, som vist i figur 3.2. Disse er stabilitet i nettverkstilkoblingen, stabilitet i dataforbindelsen, og stabilitet i ytelse. De tre nivåene bygger på hverandre, og representerer økende grad av opplevd nytteverdi for endebbrukeren. 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 robustheten over tid.



Figur 3.1: Hovedkomponentene i UMTS og LTE nettverk.

	Aspekt av robusthet	Brukeropplevelse	Målte metrikker
Økende nytte ↑	Stabil ytelse	Gode tjenester	HTTP hastighet, SIP suksessrate
	Stabilitet i dataplanet	Kan sende data	Pakketap, utfall, større hendelser
	Stabilitet i tilkobling	Koblet til nettet	Feilfrekvens, nedetid

Figur 3.2: Rammeverk for å måle robusthet på flere nivåer.

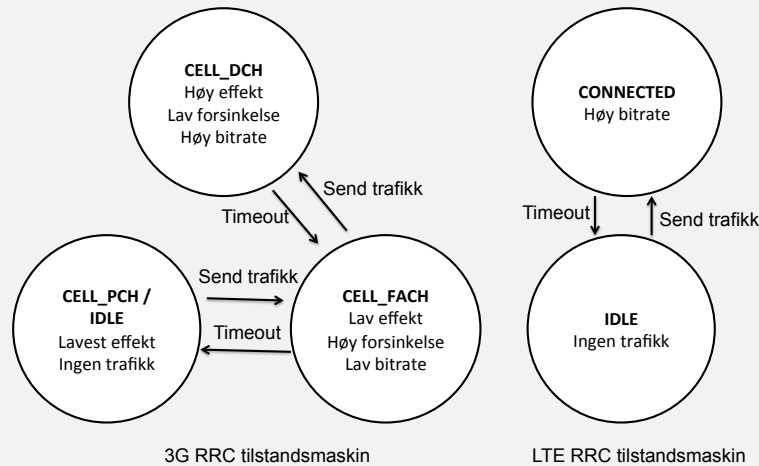
Stabilitet i tilkoblingen. En stabil nettverkstilkobling er grunnlaget for en robust brukeropplevelse. Med tilkobling mener vi i denne sammenhengen at det er etablert en PDP kontekst (eller EPN bearer) i GGSN (eller PDN gateway) og i brukerterminalen. Fra brukerens ståsted vil dette som regel bety at terminalen har en tildelt IP-adresse. Stabiliteten til tilkoblingen bestemmes av både RAN og kjernenettet. En tilknytning kan brytes på grunn av manglende dekning, feil i basestasjonen eller transmisjonsnettet, eller kapasitetsproblemer i sentrale komponenter som SGSN eller GGSN/PDN gateway. 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. Vi ser også på hvordan forhold som signalstyrke, interferens og type tilkobling påvirker stabiliteten.

Stabilitet i dataplanet. Selv om brukerterminalen har en tildelt IP-adresse, er det ikke sikkert at den har en velfungerende forbindelse til Internett. Interferens, endringer i signalstyrke eller metning i nettet kan gi høyt pakketap eller avbrudd hvor data ikke kan sendes eller mottas. I denne rapporten ser vi på ulike aspekter av pakketap for å karakterisere stabilitet i dataplanet. Vi sammenligner pakketap hos de ulike operatørene, og ser på hvordan dette henger sammen med signalstyrke og interferens. Vi bruker også målingene av pakketap til å identifisere hendelser der mange forbindelser hos en operatør opplever unormalt stort pakketap samtidig. Slike hendelser er som regel forårsaket av feil i sentrale deler av mobilnettet.

Stabil ytelse. Robusthet innebærer også en grad av stabilitet og forutsigbarhet i ytelsen til applikasjonene som kjører over det mobile bredbåndsnettet. Applikasjoner har ulike krav til nettverket. Noen applikasjoner krever høy båndbredde, andre lav forsinkelse eller lavt pakketap. I mobilnett avhenger disse parametrene 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 denne rapporten ser vi på stabilitet i ytelse for to typiske applikasjoner. Den første er HTTP nedlasting, som inngår i mange applikasjoner, for eksempel websurfing. Den andre er IP-telefoni. Vi viser hvor ofte disse applikasjonene fungerer tilfredsstillende i de ulike mobilnettene, og hvor stabil ytelsen er.

RRC tilstandsmaskin

En mobilforbindelse er til enhver tid i en av flere mulige radiotilstander, avhengig av hvor mye trafikk som sendes over forbindelsen. Når lite eller ingen data sendes, sparer man strøm og nettverksressurser ved å sette forbindelsen i en tilstand der terminalen bruker lite strøm.



Disse tilstandene styres av en såkalt Radio Resource Control (RRC) tilstandsmaskin, som vist i figuren. Denne tilstandsmaskinen er forskjellig i 3G og LTE nettverk.

I 3G-nettverk er det vanlig å benytte 3 ulike radiotilstander, kalt CELL_DCH, CELL_FACH og IDLE. En forbindelse blir oppgradert til en høyere radiotilstand når mer trafikk sendes, og blir nedgradert etter en viss tid uten trafikk. Forskjellige operatører bruker forskjellige grenseverdier for når en forbindelse oppgraderes, og for hvor lang tid det tar før den faller tilbake til en lavere radiotilstand. Blant de norske operatørene bruker Telenor en høyere terskelverdi enn de andre operatørene, slik at mer trafikk må sendes før en forbindelse får en dedikert kanal og kan sende med høy bitrate. En oppgradering krever at det er ledige ressurser i nettverket. Oppgraderingen krever også signalering i nettet, og tar derfor en del tid.

LTE-nettverk har bare 2 radiotilstander. Så lenge en dataforbindelse er aktiv, vil den holde seg i CONNECTED tilstand. I denne tilstanden kan data sendes umiddelbart, uten behov for ekstra signalering i nettet. Som vi skal se i kapittel 8, er denne forskjellen viktig for opplevd forsinkelse i 3G vs LTE nett.

4. Stabilitet i tilkoblingen

I dette kapitlet undersøker vi stabiliteten til tilkoblingen mellom våre målnoder og mobilnettene. Målnodene forsøker å opprettholde tilkoblingen til de ulike mobilnettene til en hver tid. Tilkoblingen brytes aldri aktivt fra målnodens side¹. 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.

Noen ganger vil forsøket på å gjenopprette tilkoblingen lykkes, for så å oppleve at tilkoblingen feiler på nytt etter kort tid. Slike forbindelser som veksler hurtig mellom å være tilgjengelige og utilgjengelige er av liten verdi for endebbrukeren. Vi krever derfor at en tilkobling er tilgjengelig i minst 3 minutter etter en feil før vi sier at den er gjenopprettet². Etter å fjernet slike korte gjenopprettelser, sitter vi igjen med en tidsserie av ned"og "opp"hendelser for hver målte forbindelse, hvor tilkoblingen blir henholdsvis brutt og gjenopprettet. Basert på disse tidsseriene kan vi beregne tre viktige størrelser for hver forbindelse:

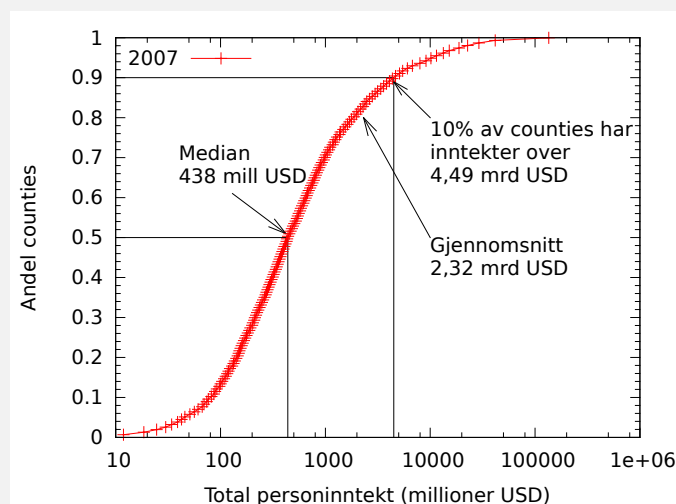
1. Mean Time Between Failures (MTBF) beskriver hvor lenge en forbindelse i gjennomsnitt er tilgjengelig før tilkoblingen blir brutt. Stabile forbindelser vil ha en høy MTBF.
2. Mean Time To Repair (MTTR) beskriver hvor lenge en feilperiode i gjennomsnitt varer. En forbindelse med en høy MTTR vil ha opplevd lengre avbrudd i løpet av måleperioden.
3. Nedetid er beregnet som den totale andelen av måleperioden en tilkobling var utilgjengelig.

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

²Vi har også forsøkt å sette denne grenseverdien til 1 minutt eller 5 minutter, uten at det påvirker resultatne nevneverdig.

Hvordan lese grafene brukt i denne rapporten

Mange av resultatene i denne rapporten presenteres i form av kumulative distribusjoner. Slike grafer gjør det mulig å presentere mye informasjon på en kompakt måte. Kumulative distribusjoner beskriver hvor stor andel av de målte verdiene (på y-aksen) som er mindre enn en gitt verdi (på x-aksen). Formelt har vi at $F_X(x) = P(X \leq x)$, altså at verdien på y-aksen angir sannsynligheten for at et tilfeldig medlem i målesettet er mindre enn verdien på x-aksen.



Denne figuren viser et eksempel på en kumulativ distribusjon. Grafen viser total personinntekt i alle counties i USA i 2007. Som mange av distribusjonene vi beskriver i denne rapporten, er dette en fordeling med såkalt tung hale (heavy tail), der en del verdier er mye høyere enn de "vanlige" verdiene. Vi bruker derfor logaritmisk skala på x-aksen for å kunne vise hele fordelingen.

I figuren viser vi et par eksempler på informasjon vi kan lese ut av grafen. Vi ser for eksempel at 90% av counties (0.9 på y-aksen) har inntekter under 4,49 milliarder USD (på x-aksen). Vi sier at 90-percentilen er 4,49 milliarder USD. Halvparten av alle counties har inntekter over 438 millioner USD (medianverdien), mens gjennomsnittsinntekten er så høy som 2,32 milliarder USD. I dette eksempelet er altså gjennomsnittsverdien mye høyere enn medianen, og det er derfor misvisende å kun fokusere på gjennomsnittet. Slik vil det alltid være i tunghalede fordelinger. I denne rapporten vil vi derfor forsøke å beskrive hele fordelingen eller trekke ut beskrivende eksempler av verdiene vi måler, i stedet for å kun oppgi gjennomsnittsverdier.

Vi måler disse størrelsene for Telenor, Netcom, Tele2 og Network Norway. I motsetning til i rapporten for 2013, skiller vi ikke mellom Tele2- og Network Norway-forbindelser som er knyttet til henholdsvis eget nett (Mobile Norway) og gjestenett (Netcom eller Telenor). Vi oppgir stabilitet i tilkoblingen for hver operatør uavhengig av hvilket RAN forbindelsen går gjennom, i tråd med hva

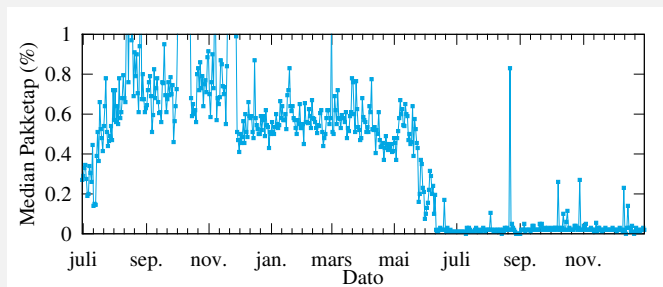
disse operatørens kunder vil oppleve. Merk at resultatene i dette kapitlet ikke skiller mellom ulike teknologier som 2G, 3G og LTE. Hver forbindelse vil til en hver tid velge den beste tilgjengelige teknologien. En sammenligning av stabilitet i 3G og LTE er gitt i kapittel 8.

Ice benytter hovedsaklig frittstående modemer med sitt eget operativsystem. De fleste av våre måleforbindelser for Ice bruker også slike modemer. Disse modemene eksporterer ikke den nødvendige informasjonen for å beregne MTBF, MTTR og nedetid. Vi kan derfor ikke inkludere resultater for Ice i dette kapitlet.

Endringer i Telenors mobilnett juni 2014

Vår rapport om robustheten i norske mobilnett i 2013 avdekket en del svakheter i Telenors mobilnett. Blant annet rapporterte vi at telenorforbindelser relativt ofte opplever hyppige men kortvarige brudd i tilkoblingen. Telenor hadde også høyere pakketap enn de andre operatørene, og en høyere feilrate for filnedlastinger og VoIP-samtaler.

Etter at rapporten ble publisert har Telenor gjort flere konfigurasjonendringer i sitt nett. Disse dreier seg i hovedsak om to ting. For det første har de øket kapasiteten i FACH-kanalen, som benyttes til signalering og dataoverføring av små datamengder. For det andre har de gjort endringer i RRC tilstandsmaskinen for å unngå at forbindelser som sender lite data mister tilkoblingen til nettverket.

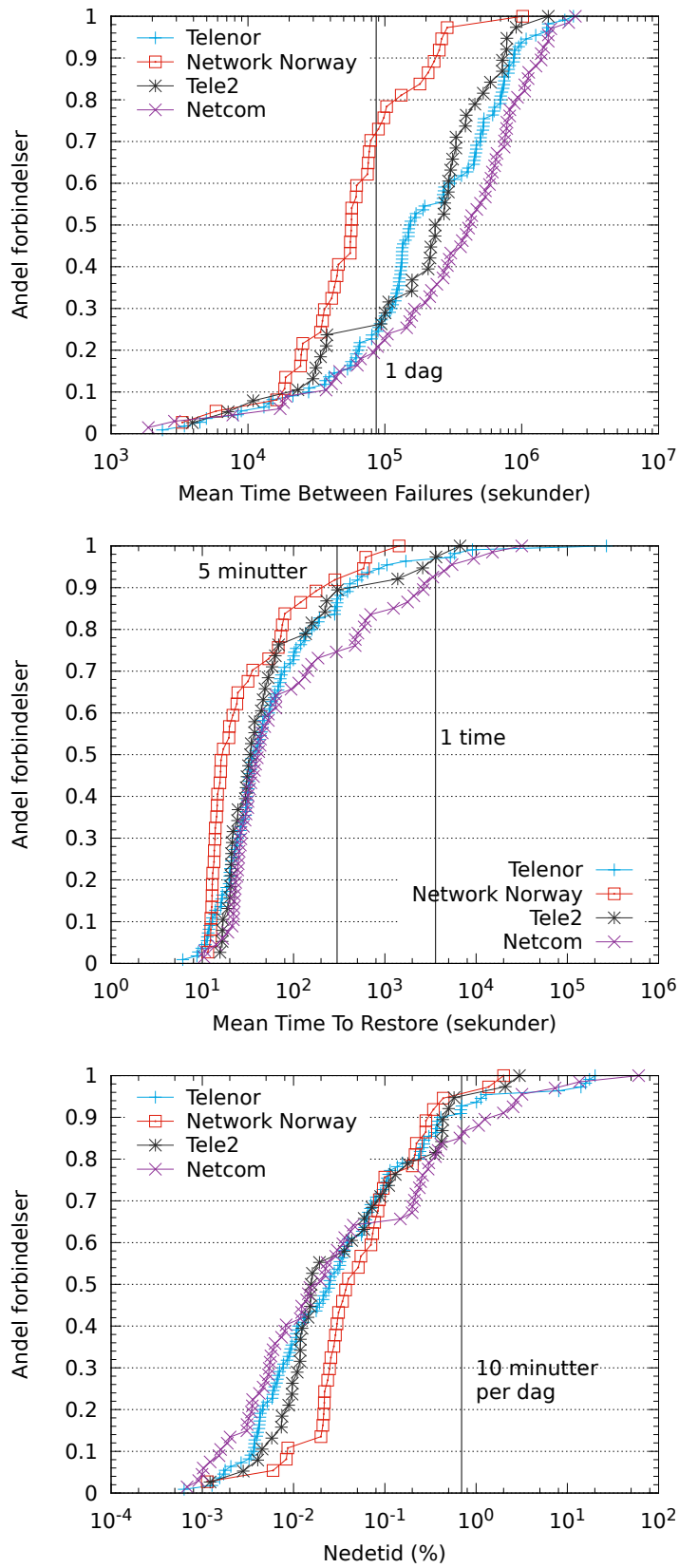


Disse endringene, som ble gjennomført i juni 2014, har hatt en markant innvirkning på mange av resultatene vi presenterer i årets rapport. Den klare effekten kan best illustreres ved å se på pakketapet observert i Telenor før og etter endringene, som vist i figuren over. Denne figuren og andre aspekter av pakketap diskuteres nærmere i kapittel 5.

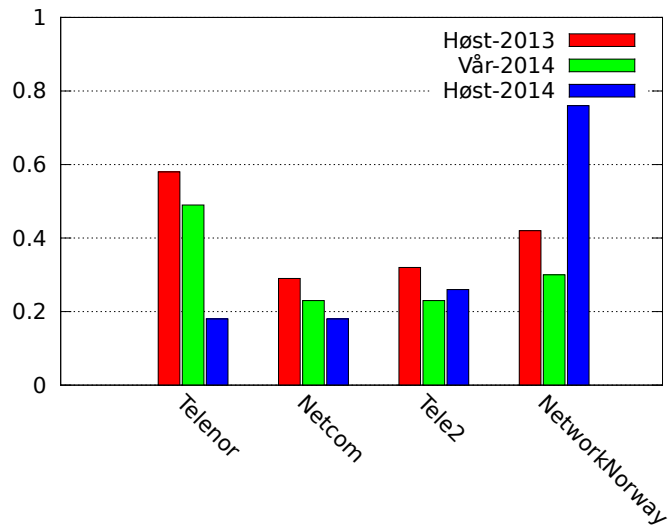
4.1 Analyse av stabilitet i tilkoblingen

Figur 4.1 viser kumulative distribusjoner for MTBF, MTTR og nedetid for hver operatør. En overordnet observasjon er at forskjellene mellom operatørene er mindre i 2014 enn de var i 2013.

Det øverste plottet i figur 4.1 forteller oss at Network Norways forbindelser mister tilkoblingen oftere enn hos de andre operatørene. 72% av Network Norways forbindelser har en MTBF på under 1 dag. Tilsvarende andel for de andre operatørene er 30-39%. Ved nærmere analyse finner vi at den høye feilfrekvensen



Figur 4.1: MTBF (topp), MTTR (midt) og nedetid (bunn) for hver operatør.



Figur 4.2: Andel forbindelser med MTBF < 1 dag.

i Network Norway skyldes en periode på noen få dager i november 2014. Fra 1. til 5. november ble nesten alle Network Norways forbindelser brutt en gang i timen. Network Norway har bekreftet at dette skyldtes en timer som var satt til feil verdi i en av deres kjernekomponenter. Dersom vi ser bort fra disse dagene, er MTBF om lag den samme for Network Norway som for de andre operatørene.

De fleste bruddene i tilkobling er kortvarige hos alle operatører. Over 60% av forbindelsene har en MTTR på mindre enn 1 minutt. En del brudd er i midlertid mer langvarige. Særlig Netcom har en høyere andel langvarige brudd i tilkoblingen. 25% av Netcomforbindelsene har en MTTR på over 5 minutter, noe som betyr at de har hatt et eller flere langvarige brudd.

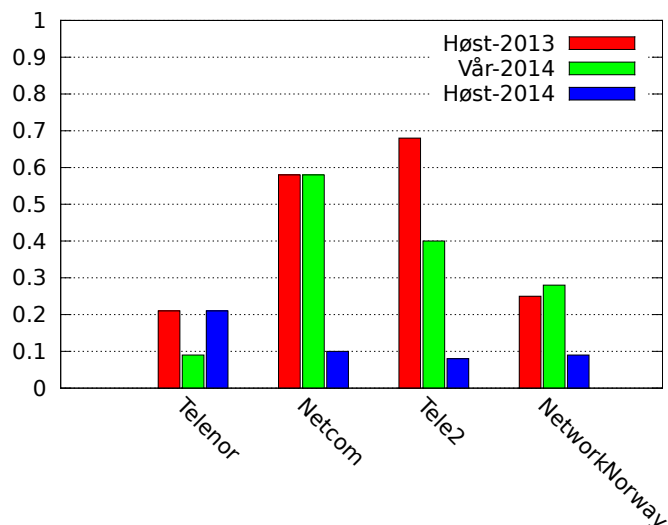
Det er det små forskjeller i stabilitet i tilkoblingen mellom operatørene. Mellom 5% og 15% av forbindelsene har en nedetid på mer enn 10 minutter per dag.

4.2 Utvikling over tid

Sammenlignet med situasjonen 2013, ble stabiliteten i tilkoblingen bedre i 2014. Telenor og Network Norway³ opplevde færre av de kortvarige forbindelsesbruddene som ble rapportert for 2013. Netcom og Tele2 opplevde færre langvarige forbindelsesbrudd, særlig i andre halvdel av 2014.

Figur 4.2 viser hvordan andelen forbindelser som i snitt mister tilkoblingen mer enn en gang hver dag har utviklet seg fra våre målinger startet i juli 2013 til desember 2014. Perioden er delt opp i tre halvår. For Telenor har andelen forbindelser som mister tilkoblingen ofte sunket jevnt gjennom perioden. I 2013 mistet 58% av forbindelsene tilkoblingen mer enn en gang i døgnet i gjennomsnitt. Dette tallet synker til 49% i første halvdel av 2014, og videre til 18% i

³Med unntak av de nevnte hyppige bruddene i november for Network Norway.



Figur 4.3: Andel forbindelser med MTTR > 5 minutter.

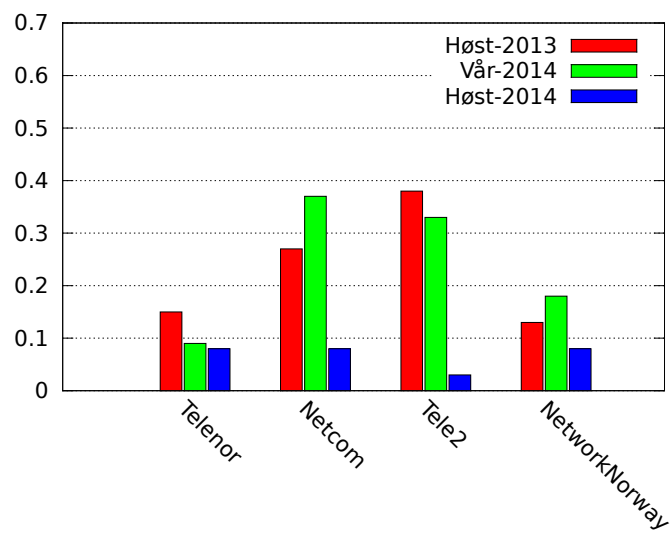
andre halvdel. Som diskutert i forrige års rapport, opplevde Telenor i 2013 mange brudd i tilkoblingen når en forbindelse ikke kunne oppgraderes til en dedikert datakanal. Konfigurasjonendringene som ble gjennomført i juni 2014 (beskrevet over) har ført til at antallet slike brudd er minimalt i andre halvdel av 2014.

Netcom og delvis også Tele2 viser også en nedgang i feilfrekvens. Network Norway viser en sterk økning i gjennomsnittlig feilrate, grunnet de hyppige bruddene i november 2014. Dersom vi ser bort i fra perioden 1. 5. november, har 30% av Network Norways forbindelser en MTBF under 1 dag i andre halvdel av 2014.

Figur 4.3 viser utviklingen i andel forbindelser der gjennomsnittlig varighet på avbrudd i tilkoblingen var over 5 minutter. Figuren illustrerer hvordan antall langvarige feil har blitt redusert i Netcom og Tele2. Særlig er reduksjonen for disse to operatørene sterk i andre halvdel av 2014. I første halvdel trekkes gjennomsnittlig feilrettingstid opp av et lite antall langvarige utfall som rammet en stor del av Netcom og Tele2s forbindelser (beskrevet i kapittel 6). Den økte andelen langvarige feil i Telenor i andre halvdel av 2014 skyldes i hovedsak nedgangen i antall korte brudd i tilkoblingen.

I sum observerer vi en reduksjon i nedetid hos alle operatører fra 2013 til 2014. I andre halvdel av 2014 var andel forbindelser som var nede mer enn 10 minutter per dag i gjennomsnitt under 10% for alle operatører. For Netcom og Tele2 ble nedetide trukket opp av noen få langvarige utfall i første halvdel.

En viktig årsak til den økte stabiliteten i tilkoblingene er konfigurasjonsendringene hos Telenor i juni 2014 beskrevet over. Resultatene tyder på at også andre operatører har gjort endringer i sine nett som virker positivt på stabiliteten. Merk at den opplevde stabiliteten fortsatt kan variere over tid. For eksempel har vi i 2014 opplevd få store hendelser som har berørt mange forbindelser samtidig. Slike store hendelser kan gi klare utslag i våre resultater.



Figur 4.4: Andel forbindelser med gjennomsnittlig nedetid > 10 minutter per dag.

5. Stabilitet i dataplanet

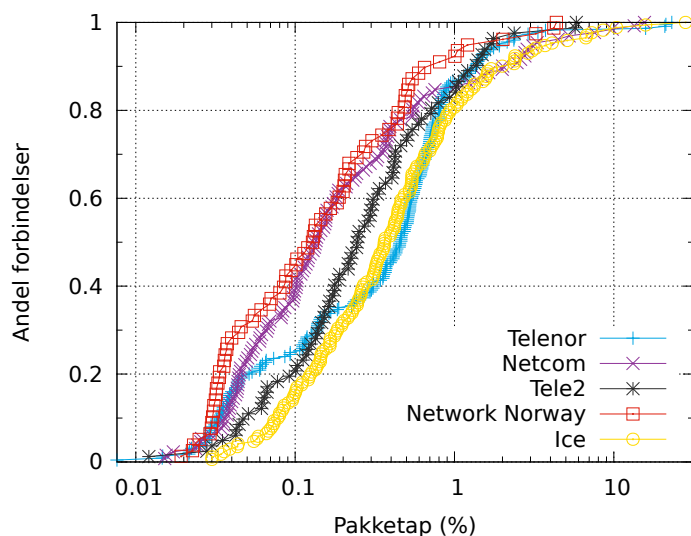
I dette kapitlet ser vi på nettverkens evne til å gi en stabil ende-til-ende forbindelse med lavt pakketap. Vi måler dette ved å sende en kontinuerlig strøm av små datapakker over forbindelsene. Basert på disse målingene analyserer vi tapsrate og varigheten av perioder der forbindelsen er oppe men ingen pakker kommer gjennom. 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 vår måleserver hvert sekund. Måleserveren sender den samme pakken tilbake umiddelbart. For hver pakke registrerer vi hvor lang tid det tok før svarpakken kom tilbake. Dersom ingen svarpakke kom 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. Totalt har vi registrert mer enn 11 milliarder målepunkter fra våre forbindelser i løpet av måleperioden. Lengden på måleperioden for hver forbindelse varierer. I denne analysen har vi sett bort fra forbindelser hvor vi har mindre enn 240 timer med målinger.

5.1 Tapsrate

Figur 5.1 viser den totale tapsraten hos Telenor, Netcom, Tele2, Network Norway og Ice. Denne tapsraten er definert for hver forbindelse som (tapte pakker)/(sendte pakker) over hele måleperioden. Hvert punkt på grafen tilsvarer en forbindelse. Dersom en forbindelse har høyt pakketap, kan det enten skyldes at pakketapet har vært jevnt høyt gjennom hele 2014, eller at pakketapet var høyere enn normalt i bare deler av perioden. Vi ser nærmere på denne forskjellen senere i diskusjonen.

Vår første observasjon er at pakketap er relativt beskjedent i det store flertallet av forbindelser. Omtrent 80% av forbindelsene har mindre enn 1% pakketap for alle operatører. Det er likevel forskjeller mellom operatørene. Netcom og Network Norway har noe lavere pakketap enn de andre operatørene i de fleste forbindelsene. 62% av Netcomforbindelsene og 62% av Network Norway forbindelsene har et pakketap under 0,2%. Til sammenligning kan kun 33% av Telenors forbindelser og 31% Ice sine forbindelser skilte med et like lavt pakketap. Samtidig har Netcom en del forbindelser med høyt pakketap. De 10% dårligste Netcomforbindelsene har et pakketap på over 2%. Ice har også en del forbindelser med høyt pakketap - 10% av disse har et pakketap over 2%. Bare 3-5% av forbindelsene til Telenor, Network Norway og Tele2 har et pakketap på over 2%.



Figur 5.1: Pakketap

Operatør	10 percentil	Median	90 percentil	Gjennomsnitt
Telenor	0,03%	0,46%	1,37%	0,89%
Netcom	0,04%	0,14%	2,00%	0,81%
Tele2	0,05%	0,24%	1,37%	0,56%
Network Norway	0,03%	0,13%	0,65%	0,38%
Ice	0,08%	0,36%	2,00%	1,08%

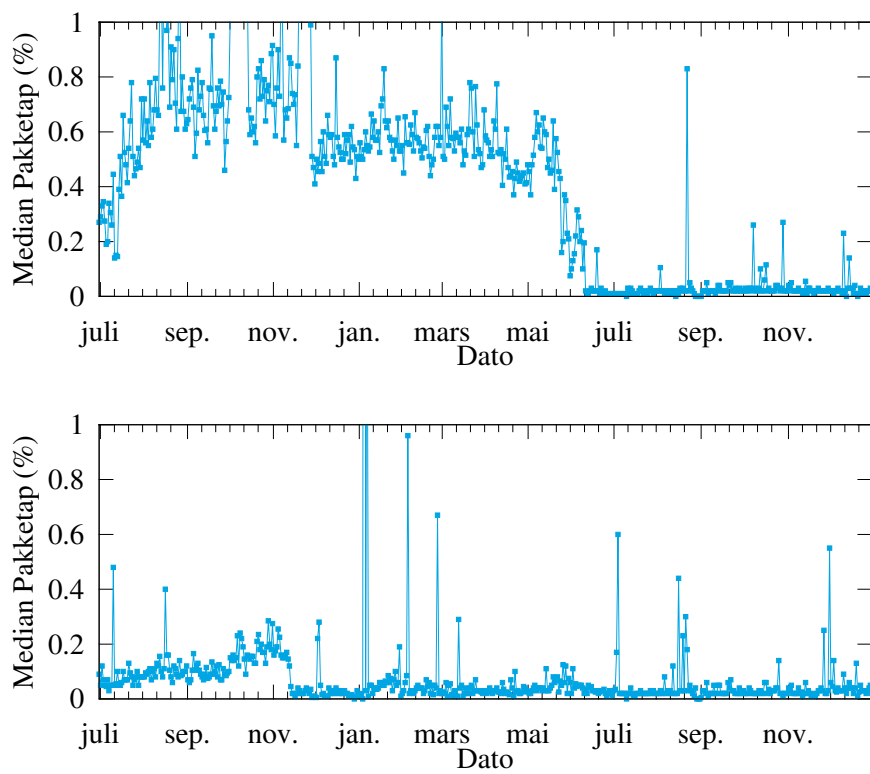
Tabell 5.1: Pakketap

Tabell 5.1 oppsummerer noen observasjoner om pakketapet i hver operatør. For flere operatører finnes det noen få forbindelser med svært høy tapsrate. Disse vil trekke opp gjennomsnittlig tapsrate, som dermed ikke er representativt for en typisk forbindelse. I stedet vil medianen ofte gi et bedre bilde av pakketapet for en operatør. Medianen (50 percentilen) tilsvarer tapsraten til den midterste forbindelsen når alle forbindelsene til en operatør sorteres etter tapsrate.

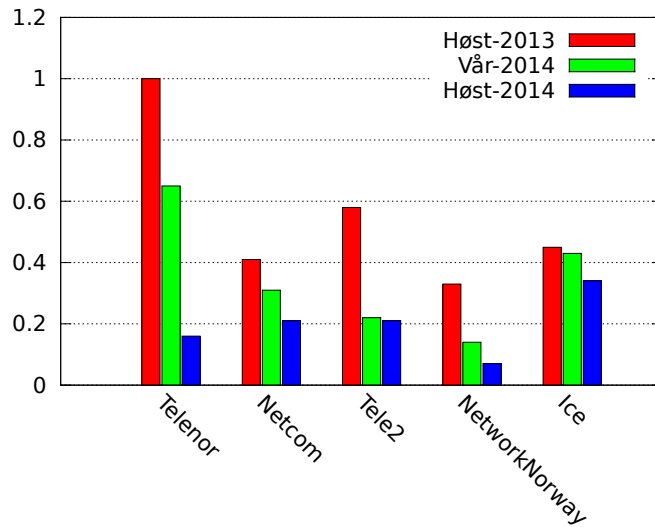
5.2 Utvikling i tapsrate over tid

Vi observerer redusert pakketap hos alle operatører i 2014 sammenlignet med 2013. Særlig er denne utviklingen tydelig hos Telenor og Netcom, hvor tapsraten (både gjennomsnitt og median) har blitt mer enn halvert. Tele2 og Network Norway har de laveste tapsratene, og opplever også en sterk reduksjon sammenlignet med 2013. Dette skyldes primært at mange av deres forbindelser benytter Telenor og Netcoms RAN og nyter godt av lavere pakketap her.

Figur 5.2 viser utviklingen i tapsrate fra 1. juli 2013 til 31. desember 2014 for Telenor og Netcom. Figurene viser median tapsrate for hver dag, over alle forbindelser.



Figur 5.2: Utvikling i tapsrate hos Telenor (øverst) og Netcom (nederst) over tid.



Figur 5.3: Utvikling i median tapsrate

For Telenor ser vi en markant endring i tapsrate fra midten av juni 2014. Før dette varierte medianverdien normalt mellom 0,4% og 0,8%, men fra midten av juni er den redusert til godt under 0,1%. Årsaken til denne sterke reduksjonen er konfigurasjonsendringer i Telenors nettverk (se faktaboks på side 16).

For Netcom ser vi en tilsvarende (men mindre) endring tidlig i november 2013. Vi kjenner ikke årsaken til denne endringen, men det er nærliggende å tro at Netcom gjorde endringer i sitt nettverk på denne tiden. Legg også merke til at median tapsrate på noen enkeltdager er vesentlig høyere enn normalt. Slike store utslag henger ofte sammen med *store hendelser* som diskuteres under. For eksempel hadde Netcom store problemer med sitt nettverk den 5. januar 2014, noe som ga en median tapsrate på 17,5% den dagen.

Figur 5.3 viser median pakketap i hvert halvår vi har målinger for, for hver operatør. Figuren bekrefter den sterke reduksjonen i pakketap i Telenors nettverk i andre halvår 2014. For Netcom trekkes verdien for første halvår 2014 opp av den store hendelsen den 5. januar. Reduksjonen i tapsrate hos Tele2 og Network Norway faller i hovedsak sammen med endringene i nettverkene de kjøper kapasitet i.

6. Større hendelser

Måledata fra det samme eksperimentet som beskrevet i forrige kapittel kan også brukes til å identifiserer *større hendelser*, der mange forbindelser fra den samme operatøren opplever unormalt stort pakketap. Slike hendelser forårsakes som regel av feil i sentrale deler av mobilnettene. Større hendelser er interessante fra et robusthetsperspektiv på grunn av den direkte innvirkningen de har på brukeropplevelsen. Det er imidlertid vel så viktig å oppdage og kartlegge slike hendelser med tanke på å identifisere underliggende svakheter i mobilnettene slik at disse kan utbedres.

For å identifisere større hendelser deler vi våre måleserier inn i 5 minutters intervaller, og beregner pakketapet for hver forbindelse i hvert intervall. Vi definerer en større hendelse som ett eller flere intervaller der minst 10% av de målte forbindelsene til en operatør opplever minst 10% pakketap. Figuren på neste side gir et visuelt inntrykk av alle større hendelser i måleperioden. Hver hendelse x er representert som en sirkel, og flere hendelser på den samme dagen er slått sammen til en sirkel. Sirkelens diameter D_x representerer alvorlighetsgraden til hendelsen, og kan forstås som det totale volumet av trafikk som gikk tapt. La p_x representere andelen forbindelser som opplever mer enn 10% pakketap, q_x representere gjennomsnittlig pakketap for de berørte forbindelsene, og r_x representere varigheten (antall 5-minutters intervaller) av hendelsen. Diameteren er da definert som $D_x = p_x q_x r_x$. Andelen berørte forbindelser er også angitt på y-aksen i figuren¹.

Figuren viser at operatørene opplever større hendelser med ulik frekvens og alvorlighetsgrad. Korte hendelser med begrenset pakketap i 10-20% av forbindelsene forekommer ukentlig hos alle operatører. Slike hendelser kan skyldes kortvarig metning, og kan ses på som en del av normal drift. Vi observerer imidlertid også flere større hendelser som skyldes feil eller utfall i nettene. Generelt observerer vi færre og mindre omfattende større hendelser i 2014 enn i 2013.

Målingene kan ofte gi en god indikasjon på hva som forårsaker større hendelser. Ved å se på den geografiske distribusjonen av rammede forbindelser, hvilket RAN forbindelsene er koblet til, intensiteten i pakketapet og andre parametre, er kan vi ofte skille mellom feil i transmisjon, kjernenett eller forbindelsen mellom operatører.

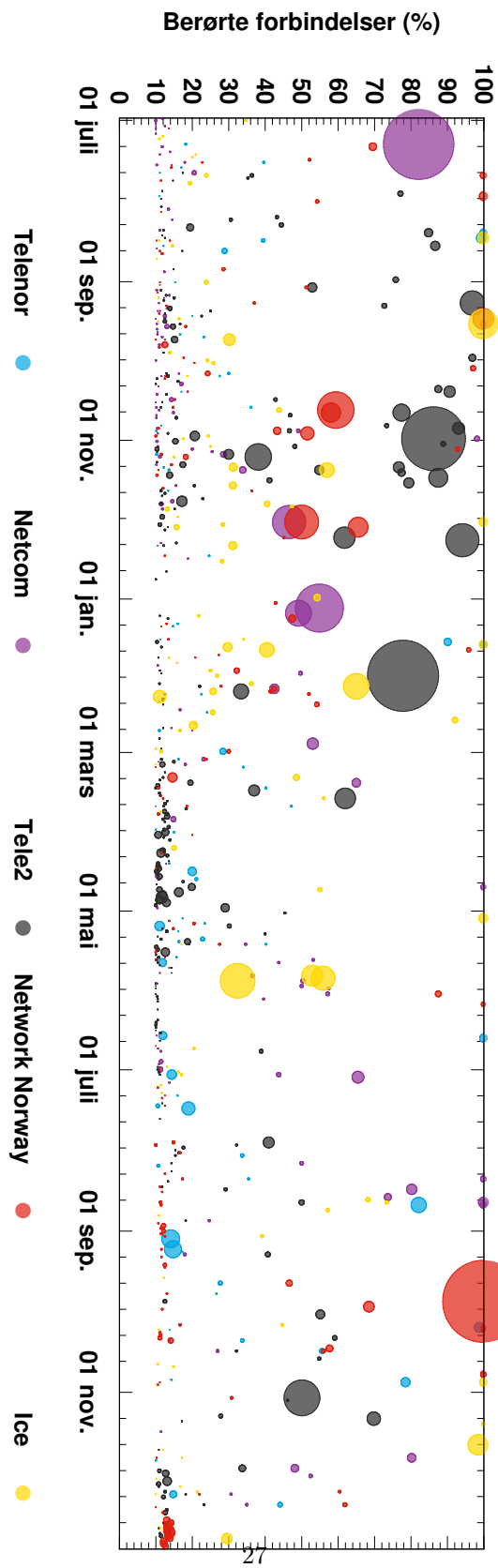
Våre målinger er begrenset til mobil datatrafikk, og vil derfor kun fange opp feil og utfall som berører datatrafikken. Dette er ikke alltid de samme hendelsene som rammer mobil tale eller andre tjenester som SMS. Et eksempel på dette fikk vi se den 30. oktober, da en feil i en sentral komponent i Telenors mobilnett førte

¹y-aksen angir det maksimale antallet forbindelsene som ble berørt i det samme 5-minutters intervallet, mens p_x er beregnet basert på gjennomsnittlig antall berørte forbindelser i løpet av hendelsen.

til at over 3 millioner kunder ikke kunne ringe eller sende SMS i over 2 timer. Denne feilen påvirket imidlertid ikke etablerte mobildataforbindelser, og dermed ser vi ikke noe utslag av denne feilen i våre måledata. En lignende situasjon oppsto under det store utfallet i Telenors mobilnett under pinseflommen 10. juni 2011. Også den gang ble tale slått ut i mange timer, mens mobil datatrafikk gikk omtrent som normalt.

I tabellen under gir vi en nærmere beskrivelse av noen av de største hendelsene vi har observert i 2014. Noen av disse eksemplene viser hvordan ende-til-ende målinger kan brukes til å avdekke problemer og utfall hos operatørene som ikke nødvendigvis fanges opp av dagens rapporteringsrutiner.

<p>Operatør: Netcom Dato: 5. januar Varighet: 01:15 - 05:30 Berørte forbindelser: 70% ² Pakketap: 100%. Kommentar: Feilen berørte forbindelser fra hele landet, og var derfor trolig forårsaket av en sentral komponent i mobilnettet. Tidspunktet tyder på at feilen oppsto som følge av vedlikehold eller oppgradering.</p>
<p>Operatør: Netcom Dato: 7. januar Varighet: 21:35 - 23:10 Berørte forbindelser: 50% Pakketap: 100% Kommentar: Feilen berørte forbindelser fra hele landet, og var derfor trolig forårsaket av en sentral komponent i mobilnettet.</p>
<p>Operatør: Tele2 Dato: 31. januar Varighet: 01:15 - 05:35 Berørte forbindelser: 80% Pakketap: 100% Kommentar: Feilen berørte forbindelser fra hele landet, og var derfor trolig forårsaket av en sentral komponent i mobilnettet. Tidspunktet tyder på at feilen oppsto som følge av vedlikehold eller oppgradering.</p>
<p>Operatør: Network Norway Dato: 28.-29. september Varighet: 19:10 - 02:45 Berørte forbindelser: Alle forbindelser. Pakketap: Rundt 100% Kommentar: Feilen berørte forbindelser fra hele landet. Tele2 anslo i følge Nrk at opptil 800000 kunder ble berørt av utfallet, som skyldtes en feil i en sentral server³.</p>



Figur 6.1: Hendelser med stort pakketap

Operatør: Tele2

Dato: 4. november

Varighet: 01:15 - 04:10 og 04:50 - 04:55

Berørte forbindelser: 80-100%

Pakketap: 100%

Kommentar: Alle forbindelser mistet tilkoblingen rundt kl 01:15. Noen forbindelser kunne gjenopprettes etter kort tid, mens det store flertallet forble utilgjengelige til ca kl 04:10. Alle forbindelsene mistet igjen tilkoblingen kortvarig rundt kl 04:50. Feilen berørte forbindelser fra hele landet, og var derfor trolig forårsaket av en sentral komponent i mobilnettet. Tidspunktet tyder på at feilen oppsto som følge av vedlikehold eller oppgradering.

7. Stabil ytelse

Stabil og tilstrekkelig ytelse er et viktig aspekt av opplevd robusthet. Et robust mobilnett bør være i stand til å kjøre typiske applikasjoner med høy grad av forutsigbarhet i ytelsen. I denne rapporten ser vi på to typiske applikasjoner med ulike krav til nettverket. Den første, HTTP nedlasting, spiller en sentral rolle i mange sammenhenger, fra nettsurfing til videostreaming. Den andre, IP-telefoni, representerer en klasse interaktive applikasjoner som krever jevn ytelse med lav forsinkelse.

7.1 Nedlasting over HTTP

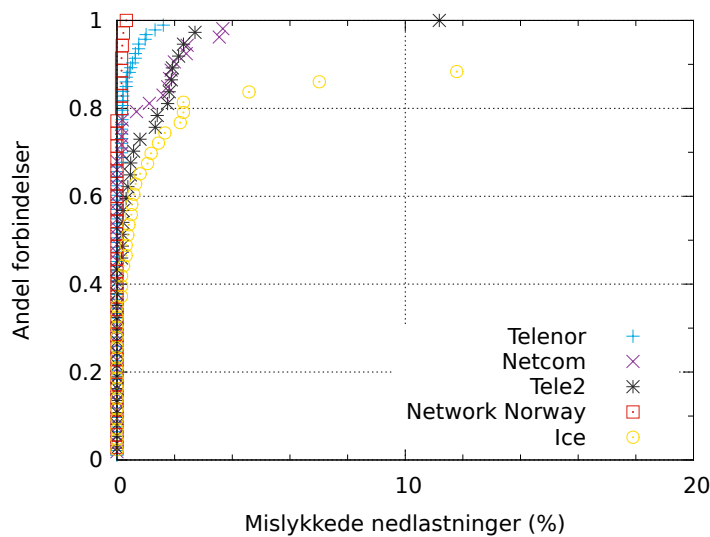
Vi rapporterer resultater fra en enkel test der vi bruker HTTP GET til å laste ned en fil på 1 MB. Denne testen ble gjennomført over alle aktive forbindelser hver time i fire uker i november-desember 2014. For de aller fleste forbindelsene har vi dermed mellom 500 og 650 repetisjoner av målingen. For hver repetisjon noterer vi hvorvidt nedlastingen kunne fullføres, hvor lang tid nedlastingen tok, og eventuelle feilkoder. Basert på målingene rapporterer vi to ulike metrikker for hver forbindelse: sannsynligheten for at en nedlasting kunne fullføres, og sannsynligheten for at den oppnådde båndbredden var over 1 Mbps.

Merk at vi ikke gjør noe forsøk på å måle den maksimale hastigheten som kan oppnås over hver forbindelse. En slik måling ville kreve en annen tilnærming enn en HTTP GET nedlasting. Netto hastighet i en HTTP nedlasting vil avhenge av flere faktorer som er uavhengig av nettverket. Blant annet vil filstørrelsen og konfigurasjonen av transportlagsprotokollen TCP spille en viktig rolle. Særlig ved høyere hastigheter kan slike forhold ha stor innvirkning på nedlastingshastigheten. Våre målinger kan derfor ikke brukes til å evaluere maksimal hastighet i de ulike nettverkene. De kan likevel brukes til å sammenligne de ulike nettverkene, siden testoppsettet er det samme for alle operatører. En mer detaljert evaluering av forskjellene på 3G og LTE er gitt i kapittel 8.

Feilrate for nedlastinger. Figur 7.1 viser andelen mislykkede nedlastingsforsøk for hver forbindelse. Figuren leses som at "y forbindelser har en feilrate på mindre enn x%".

Vi observerer at Ice har en noe høyere feilrate enn GSM-operatørene. Mens de fleste Ice-forbindelsene har en lav feilrat, har omlag hver fente forbindelse en feilrate over 2% - noen vesentlig høyere. Ved nærmere analyse viser det seg at det særlig er Ice-forbindelsene som benytter U90 modemer som opplever høy feilrate. For Ice-forbindelser med frittstående modemer er feilraten like lav eller lavere enn for GSM-operatørene.

Hos alle GSM-operatørene er nedlastingen alltid vellykket i mer enn 50% av



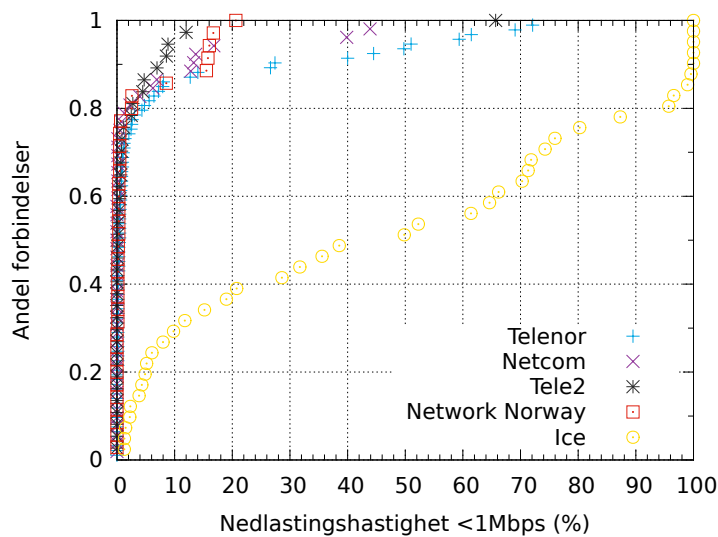
Figur 7.1: Mislykkede forsøk på nedlasting

forbindelsene. 3 av 4 operatører har mer enn 70% forbindelser hvor nedlastingen alltid er vellykket. Hos Netcom og Tele2 opplever henholdsvid 18% og 24% av forbindelsene at nedlastingen feiler i mer enn 1 % av forsøkene. Telenor og Network Norway har lavest andel mislykkede nedlastinger. Telenor har under 5% forbindelser med en feilrate over 1 %, mens den høyeste målte feilraten i Network Norway er 0,3%.

Særlig Telenor utmerker seg med en stor forbedring fra 2013 til 2014. I 2013 hadde Telenor den klart høyeste feilraten i våre målinger. Dette skyldtes i hovedsak en begrensning i deres nettverk som førte til at forbindelsen noen ganger ble brutt når en nedlasting ble startet. De tidligere omtalte konfigurasjonsendringene hos Telenor har fjernet dette problemet, og vi ser ikke lenger den samme typen feilmeldinger.

Stabilitet i båndbredde. Figur 7.2 viser andelen vellykkede nedlastinger som oppnådde en gjennomsnittlig båndbredde på minst 1 Mbps for hver forbindelse. Figuren leses som at "y% av forbindelsene oppnådde mindre enn 1Mbps i opptil x% av forsøkene". Kun 3G og LTE-forbindelser er inkludert i denne figuren, siden 2G-forbindelser aldri oppnår denne hastigheten.

Hos GSM-operatørene (Telenor, Netcom, Tele2 og Network Norway) oppnår de fleste forbindelsene en stabil ytelse over den valgte grenseverdien. Over 73% av forbindelsene hos alle GSM-operatørene oppnår over 1 Mbps i minst 98% av forsøkene. 88-98% av GSM-forbindelsene oppnår over 1 Mbps i minst 80% av forsøkene. Stabiliteten i ytelse er dermed merkbart bedre i 2014 enn i 2013 for alle GSM-operatørene. Særlig er forbedringen stor for Telenor. I 2013 var det kun 10% av de målte telenorforbindelsene som oppnådde 1 Mbps i 98% av forsøkene. I 2014 gjelder dette 73% av telenorforbindelsene. De svake resultatene for Telenor i 2013 skyldtes trolig høyt pakketap. Som diskutert i kapittel 5, har tapsraten i Telenors nettverk blitt betydelig redusert i løpet av 2014, og den økte stabiliteten i ytelse henger trolig sammen med dette. Telenor har imidlertid



Figur 7.2: Andel nedlastinger med lavere båndbredde enn 1 Mbps

fremdeles en høyere andel forbindelser med ustabil ytelse enn de andre GSM-operatørene. 12% av telenorforbindelsene oppnår under 1 Mbps i mer enn hvert fjerde nedlastingsforsøk.

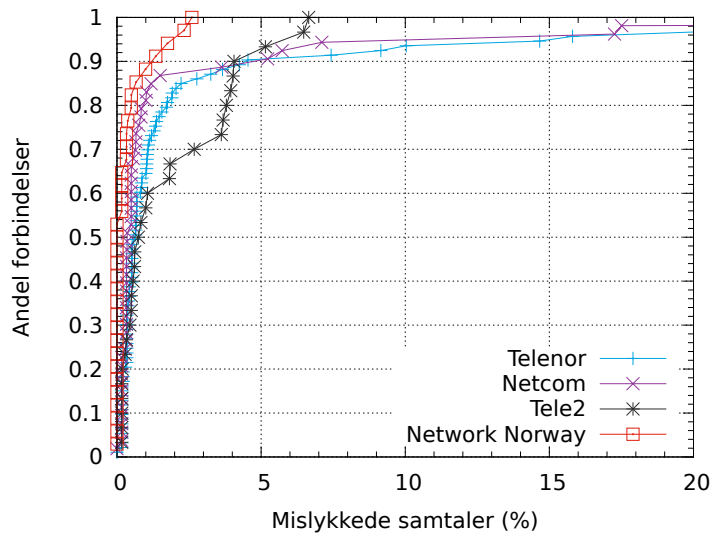
Ice oppnår gjennomgående lavere hastigheter enn UMTS-operatørene. 10% av Ice sine forbindelser oppnår aldri 1Mbps, og kun 30% oppnår denne båndbredden i minst 90% av forsøkene. Det er liten endring i disse resultatene fra 2013 til 2014.

7.2 IP-telefoni

Applikasjoner som Lync, Skype og Google Talk bidrar til at IP-telefoni (VoIP) er i ferd med å bli en populær applikasjon i mobile bredbåndnett. For å evaluere mobilnettens pålitelighet når det gjelder å sette opp og fullføre en VoIP-samtale, har vi utført målinger som emulerer en ekte samtale. Målingen består av en klient som kjører på målenodene, og en Asterisk PBX¹ som kjører på en sentral server. Klienten initierer en VoIP-samtale ved hjelp av SIP, og spiller så av en 1 minutt lang lydfil. Serveren spiller deretter den samme lydfilen tilbake og avslutter samtalen. Lydformatet vi bruker gir en senderate på omtrent 50 pakker per sekund. Vi gjentar målingen hver time i fire uker i november-desember 2014, noe som gir oss opptil 576 samtaler per forbindelse. Av tekniske årsaker har vi ikke kunnet gjennomføre dette eksperimentet i Ice sitt nett. Ice sitt nett har brannvegginnstillinger som gjør at vårt trafikkmønster blir blokkert.

For hver måling noterer vi hvorvidt samtalen kunne etableres og fullføres normalt. Figur 7.3 viser andelen samtaler som ikke kunne fullføres. Det er relativt beskjedne forskjeller mellom GSM-operatørene. Tele2 har den høyeste feilraten - 27% av Tele2-forbindelsene har en feilrate over 3%. Hos de andre operatørene

¹<http://www.asterisk.org/>



Figur 7.3: Andel mislykkede VoIP-samtaler

har under 20% av forbindelsene en feilrate over 2%. Noen få forbindelser har en relativt høy feilrate - 10% av forbindelsene hos Telenor, Netcom og Tele2 opplever at mer enn 5% av samtalene feiler.

Samtlige operatører viser en klar forbedring fra 2013, da 20-70% av forbindelsene hos de ulike operatørene hadde en feilrate over 5%. Igjen er forbedringen særlig stor hos Telenor, som i 2013 hadde en feilrate på over 10% i 50% av sine forbindelser. Vi tror at årsaken til den høye feilraten for IP-samtaler hos Telenor i 2013 var den samme som for HTTP nedlastninger, og at årsaken til den store forbedringen dermed også er den samme.

8. Sammenligning av 3G og LTE

Resultatene rapportert så langt i denne rapporten har vært basert på en blanding av 3G og LTE forbindelser. I dette kapitlet ser vi nærmere på forskjellen i ytelse og stabilitet mellom disse to teknologiene. Kun to av mobilnettene i Norge (Telenor og Netcom) tilbyr LTE i vår måleperiode. Tele2 og Network Norway tilbyr også LTE til sine kunder, men da bare gjennom gjesting i Telenors eller Netcoms nett. Vår diskusjon i dette kapitlet er derfor begrenset til Telenor og Netcom.

8.1 Metode

Sammenligningen av 3G og LTE er gjort fra målenoder utrustet med Huawei E392 modemer, som støtter både 3G og LTE. Totalt 38 målenoder er benyttet i sammenligningen, med en overvekt av noder i Oslo og Trondheim.

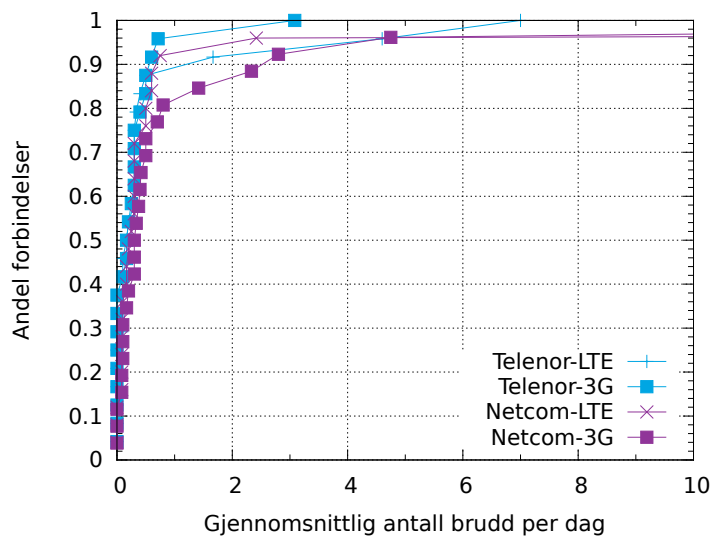
Normalt står målenodene i en modus hvor de automatisk velger det beste tilgjengelige nettverket. De foretrekker LTE over 3G over 2G. De fleste telefoner og modemer står normalt i denne modusen. Normalt vil derfor LTE-kapable modemer med LTE-dekning gjøre målinger på LTE, mens 3G-modemer og modemer utenfor LTE-dekning vil måle på 3G eller 2G.

Når vi skal sammenligne stabilitet og ytelse i 3G og LTE, ville en mulighet være å kjøre den samme testen på alle noder, for deretter å analysere resultater på 3G og LTE hver for seg. En slik tilnærming ville imidlertid sammenligne målinger fra forskjellige lokasjoner i 3G og LTE. For eksempel er LTE ofte best bygget ut i sentrale strøk, hvor også 3G-dekningen er god. Målenoder i slike områder vil da som regel stå i LTE-modus, og vi vil ikke få like mange 3G-målinger herfra. Dette vil kunne føre til skjevhet i målingene.

For å sikre sammenlignbare resultater, gjør vi i stedet målinger fra de samme målenodene i 3G og i LTE. Vi gjør dette ved å tvinge modemene til å stå vekselvis i 3G og LTE-modus. Målingene som danner grunnlaget for resultatene i dette kapitlet er gjennomført i perioden 9. - 31. desember 2014. I denne perioden veksler målenodene mellom 3G og LTE en gang i døgnet. Alle målingene er dermed foretatt fra målenoder med LTE-kapable modemer og i områder med LTE-dekning.

8.2 Stabilitet i tilkoblingen

På grunn av metoden beskrevet over, kan vi ikke bruke de samme metrikkene som i kapittel 4 for å beskrive stabiliteten i tilkoblingen. Siden tilkoblingen brytes hver dag for å veksle mellom 3G og LTE, gir det ikke mening å måle MTBF. I



Figur 8.1: Brudd i tilkoblingen i 3G vs LTE

stedet fokuserer vi på en relatert metrikk, nemlig gjennomsnittlig antall brudd i tilkoblingen per dag.

Figur 8.1 viser gjennomsnittlig antall brudd i tilkoblingen per dag for 3G og LTE i Telenor og Netcom. For de fleste forbindelser er dette tallet lavt. Over 60% av alle forbindelser av begge teknologier og i begge nettverk mister tilkoblingen mindre enn 0,5 ganger per dag i gjennomsnitt. Noen få forbindelser mister tilkoblingen flere ganger per dag i gjennomsnitt. Dette er i hovedsak forbindelser med dårlige signalforhold.

Vi observerer ingen klare forskjeller mellom 3G og LTE i antall brudd. Netcom har noen flere brudd i 3G, mens Telenor har noe flere brudd i LTE.

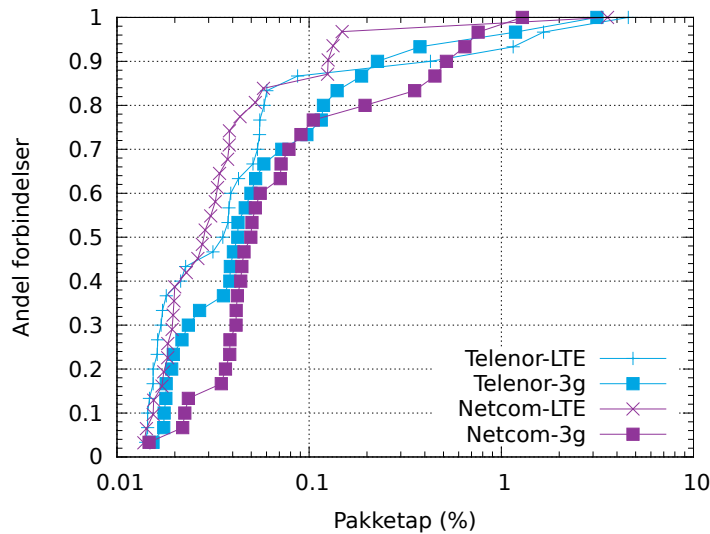
8.3 Pakketap

Figur 8.2 viser gjennomsnittlig pakketap per forbindelse i Telenor og Netcom, for 3G og LTE. Merk at resultatene i figur 8.2 ikke direkte kan sammenlignes med figur 5.1, siden figur 5.1 er basert på et større antall noder med en annen geografisk distribusjon.

En hovedobservasjon er at pakketapet er noe mindre i LTE enn i 3G. Dette gjelder for begge operatører, men forskjellen mellom 3G og LTE er større i Netcom enn i Telenor. Dette kan tyde på at kapasiteten i LTE-nettene er noe bedre relativt til trafikkmengden.

8.4 Ytelse

Vi ser på stabilitet og forskjeller i ytelse i 3G og LTE. Figur 8.3 viser oppnådde hastigheter i vår HTTP nedlasting beskrevet i kapittel 7. Øverst viser vi hastigheten når vi laster ned en fil på 1 MB, nederst er filstørrelsen 4 MB. Hastigheten



Figur 8.2: Pakketap i 3G vs LTE

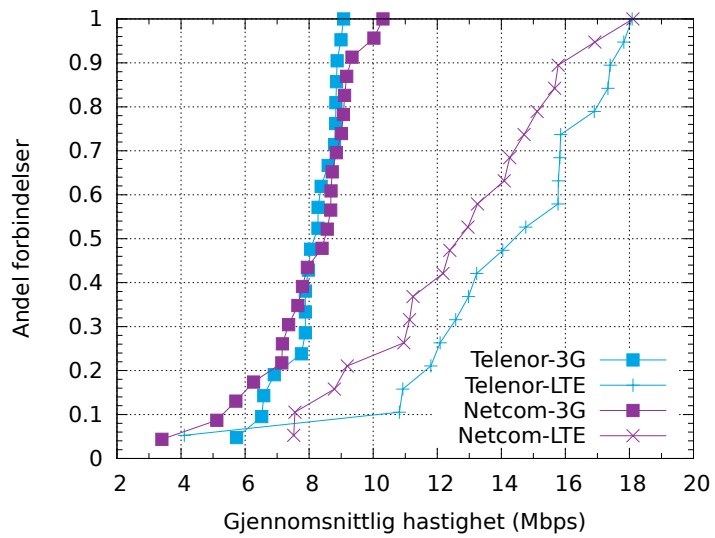
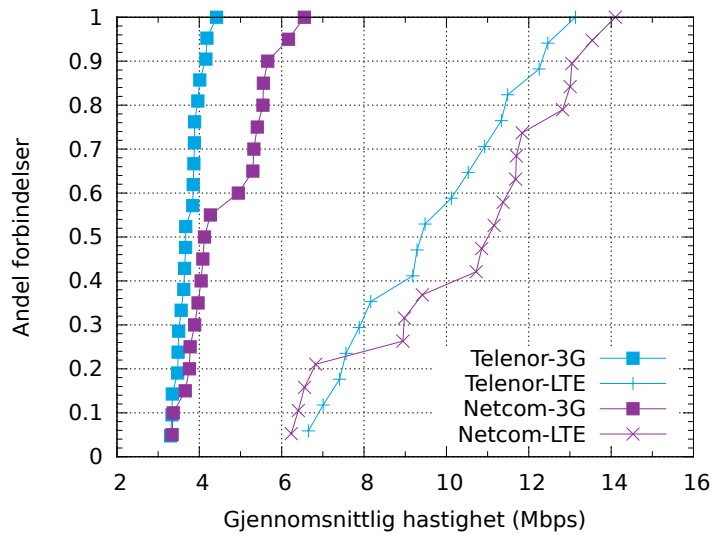
som er oppgitt er beregnet som filstørrelse delt på nedlastingstid. Den uttrykker altså ikke den maksimale instantane hastigheten vi har observert, men viser i stedet den effektive hastigheten som en bruker opplever under en slik nedlasting. Dette er i tråd med den brukersentriske tilnærmingen i hele denne rapporten.

Det er flere interessante observasjoner som kan gjøres fra figur 8.3. Den mest åpenbare er at LTE gir vesentlig raskere overføring av data enn 3G. Den oppnådde hastigheten i LTE er oftest 2-3 ganger høyere enn i 3G.

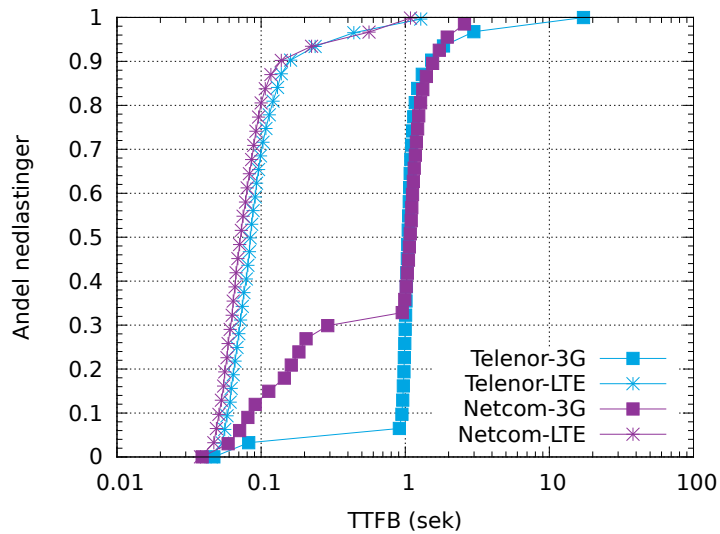
En annen viktig observasjon er at den oppnådde hastigheten avhenger av størrelsen på filen som lastes ned. Mens gjennomsnittlig nedlastingshastighet for 1 MB filen varierer fra 3 Mbit/s til 7 Mbit/s for 3G og 6 Mbit/s til 14 Mbit/s for LTE, ligger den fra 5 Mbit/s til 10 Mbit/s for 3G og 7 Mbit/s til 18 Mbit/s for filen på 4 MB. Dette illustrerer et viktig poeng, nemlig at den opplevde hastigheten ikke bare avhenger av nettverket, men også av operativsystem og nettverksprotokoller. Hovedgrunnen til forskjellen i dette tilfellet er at transportlagsprotokollen TCP bruker tid på å komme opp i fart", slik at nettverkets fulle potensiale ikke utnyttes fullt ut fra første sekund. Dermed blir den opplevde hastigheten høyere for større filer. Dersom vi hadde lastet ned en fil på 10 MB, ville den opplevde hastigheten vært ennå høyere.

En interessant observasjon når det gjelder LTE, er at filstørrelsen påvirker opplevd hastighet sterkere hos Telenor enn hos Netcom. For filer på 1 MB måler vi oftest noe høyere hastighet i Netcomforbindelser enn i Telenorforbindelser, mens situasjonen for filer på 4 MB er motsatt. En mulig forklaring er at Netcom bruker en såkalt TCP-proxy i sitt nett. Dette er en enhet i mobilnettet som forsøker å forbedre ytelsen ved å glatte over variasjoner i forsinkelse. Det er imidlertid kjent at slike enheter kan ha en negativ effekt på ytelsen i noen tilfeller [6].

Figur 8.4 viser Time-to-First-Byte (TTFB) for alle HTTP-nedlastingene. TTFB er tiden det tar fra applikasjonen sender forespørsel om data, til den



Figur 8.3: Nedlastingshastighet for 1MB (topp) og 4MB (bunn) i 3G vs LTE



Figur 8.4: Oppstartstid for nedlastinger i 3G vs LTE

første datapakken mottas. Den består hovedsakelig tiden det tar å utveksle de protokollmeldingene som behøves for å etablere en TCP-forbindelse til serveren. TTFB kan utgjøre en vesentlig del av den opplevde responstiden, og spiller derfor en viktig rolle for brukeropplevelsen, særlig for mindre filer.

Som vist i figuren er TTFB vesentlig lavere for LTE enn for 3G. Dette skyldes delvis at LTE har en generelt lavere forsinkelse enn 3G. Den viktigste årsaken er imidlertid forskjeller i RRC tilstandsmaskinen mellom 3G og LTE, som forklart i kapittel 3. Så lenge det sendes noe trafikk over en LTE-forbindelse, vil den være i CONNECTED tilstand. Dette er alltid tilfelle for våre forbindelser. I denne tilstanden kan data sendes med en gang uten noen form for signalering i mobilnettet, noe som gir en lav TTFB. 3G-nettverk på den annen side, har tre mulige tilstander i sin tilstandsmaskin. Så lenge kun små datamengder overføres, holdes forbindelsen i en lavere tilstand for å redusere strømforbruk og spare ressurser i nettverket. Når mer data skal sendes, oppgraderes forbindelsen til en såkalt dedikert kanal. Denne oppgraderingen involverer signalering mellom brukerterminalen og nettverket, og tar derfor lang tid.

Figur 8.4 viser klart hvordan TTFB over 3G-forbindelser avhenger av hvilken RRC-tilstand forbindelsen er i når overføringen initieres. Når forbindelsen er i CELL_DCH tilstand, ser vi en TTFB på noen titalls eller hundretalls millisekunder. Når forbindelsen er i CELL_FACH tilstand, øker TTFB til rundt 1 sekund. Netcomforbindelsene starter noe oftere i CELL_DCH enn Telenorforbindelsene i vårt oppsett. Dette skyldes primært forskjeller i konfigurasjonen av grenseverdier i de to nettene.

9. Øket robusthet gjennom multihoming

Så langt i denne rapporten har vi fokusert på opplevd robusthet i hver operatør for seg selv. Det er imidlertid også interessant å se på hvordan robusthet kan økes ved å koble seg til flere operatører i parallell. I fjorårets rapport presenterte vi resultater som viste stor grad av uavhengighet i signalforhold, feilmønstre og pakkeap mellom operatørene. Dette betyr at potensialet for øket robusthet gjennom såkal *multihoming* er stort.

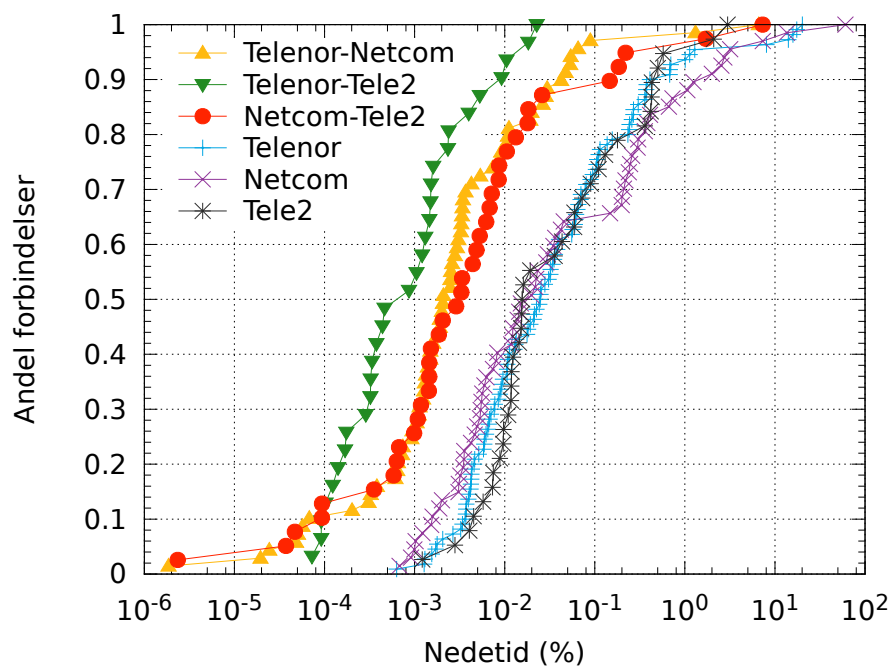
I årets rapport gjentar og oppdaterer vi målinger av korrelasjon i nedetid mellom operatørene. Vi ser igjen på nedetid som diskutert i kapittel 4, og diskuterer potensialet for å redusere nedetid ved å benytte flere operatører samtidig. For hvert par av forbindelser fra en målnode identifiserer vi tidsperiodene der begge forbindelsene var utilgjengelige. Den felles nedetiden vil være en nedre grense for nedetiden som kan oppnås dersom en bruker kan utnytte begge forbindelsene sømløst (uten at noe tid går tapt til å veksle mellom de to forbindelsene).

Figur 9.1 viser felles nedetid for 3 par av forbindelser (Telenor/Netcom, Telenor/Tele2 og Netcom/Tele2). Figuren viser også nedetid for disse operatørene alene for sammeligning (gjentatt fra figur 4.1). Vi har for få datapunkter til å inkludere de øvrige kombinasjonene av forbindelser.

Figuren viser at nedetid kan reduseres betydelig ved å koble to forbindelser. Kombinasjonen Telenor/Tele2 kan potensielt gi *five nines* (99,999%) oppetid fra over 50% av målnodene. Svært få enkeltforbindelser (1% for Telenor, 5% for Netcom og 0% for Tele2) oppnår en slik oppetid alene. For de aller fleste målnoder reduseres nedetiden med over 90% ved å kombinere forbindelser fra Telenor/Netcom eller Telenor/Tele2 eller Netcom/Tele2. Dette viser det store potensialet for øket robusthet gjennom multihoming.

Kombinasjonen Telenor/Netcom viser en noe høyere nedetid i 2014 enn i 2013. Vi har ikke analysert datagrunnlaget i detalj for å finne en forklaring på dette. Kombinasjonen Netcom/Tele2 viser en lavere nedetid i 2014 enn i 2013. Dette skyldes i hovedsak to forhold. For det første har nedetiden i både Netcom og Tele2 blitt redusert kraftig i 2014. For det andre har vi relativt flere Tele2-forbindelser som er knyttet til Mobile Norways eget nett i 2014, og som dermed ikke deler RAN med Netcom.

Manglende data gjør at vi ikke kan inkludere Ice i denne figuren. Det er grunn til å tro at reduksjonen i nedetid når Ice kombineres med en av de andre operatørene vil være minst like stor som for kombinasjonene vist i figur 9.1.



Figur 9.1: Korrelasjon i nedetid

10. Oppsummering og veien videre

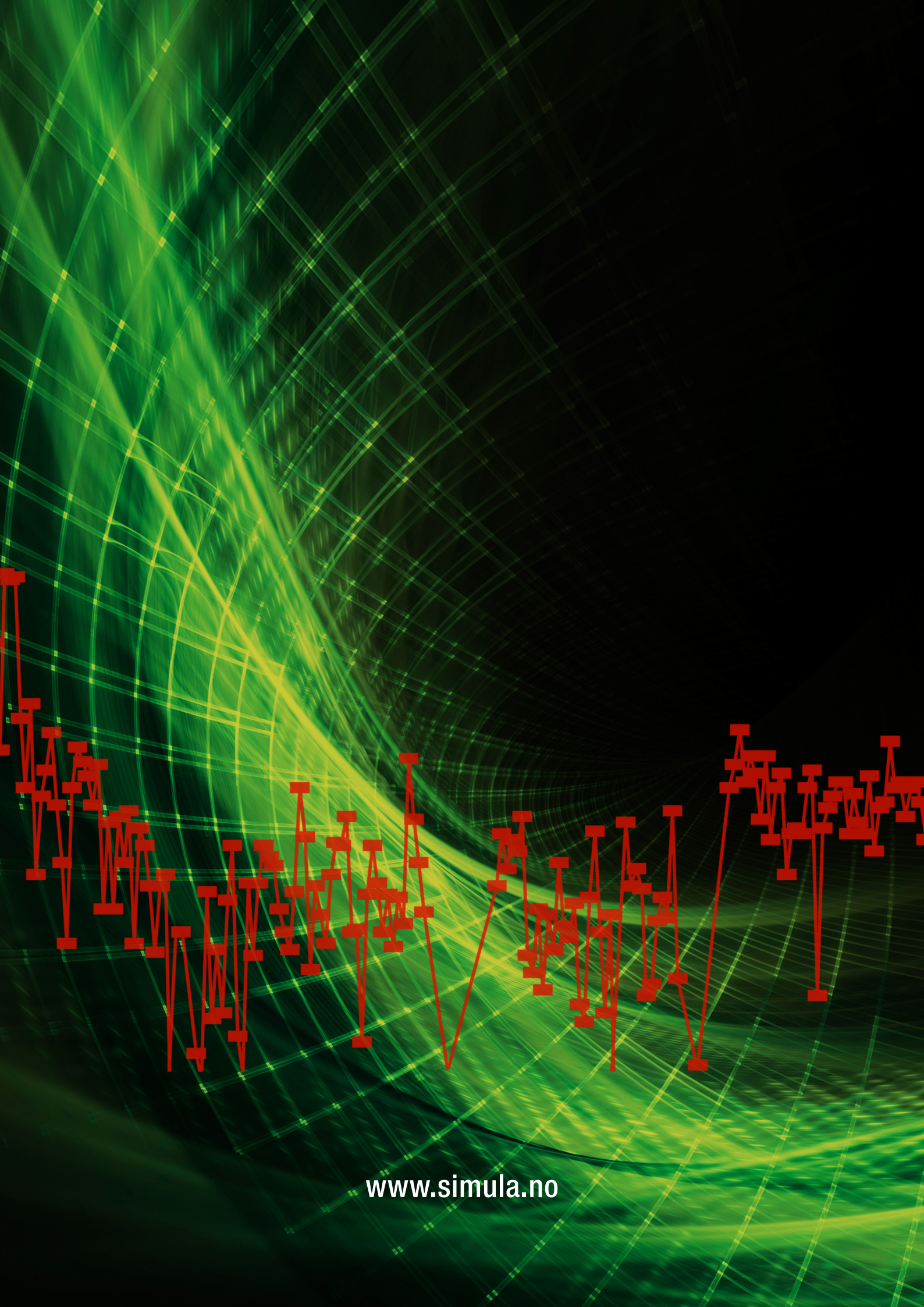
Årets rapport har i likhet med fjorårets fokusert på robusthet i mobilnett gjennom ende-til-ende målinger. Robustheten har blitt beskrevet på flere nivåer og gjennom en rekke ulike metrikker. Nytt av året er at vi også inkluderer målinger i operatørens LTE-nett.

En hovedobservasjon i årets rapport er at den målte robustheten har blitt bedre fra 2014. Målingene viser færre brudd i tilkoblingene, lavere pakketap og høyere og mer stabil ytelse. Særlig er forbedringen sterk i Telenors nettverk. Dette skyldes primært endringer i konfigurasjonen av deres mobilnett som ble foretatt i juni 2014.

CRNA vil fortsette å vedlikeholde og videreutvikle sin infrastruktur for målinger i mobilnett. Sentralt i tiden framover blir utvidelsen av infrastrukturen til også å omfatte andre europeiske land gjennom EU-prosjektet MONROE. Det jobbes også med å inkludere målinger fra mobile noder i neste versjon av rapporten. CRNA har i samarbeid med NSB plassert en håndfull målenoder på tog. Disse kartlegger dekningsforhold og måler ytelse i fart langs det meste av det norske jernbanenettet. Mobiltjenester på tog har i det siste blitt trukket fram som et viktig satsingsområde. Simulas målinger gjøre det mulig å måle effekten av de initiativer som nå er underveis for å gi de kollektivreisende et bedre tilbud.

Bibliografi

- [1] Sårbarhetsanalyse av mobilnettene i norge. Technical Report 1, Post- og Teletilsynet, Januar 2012.
- [2] CRNA. Robusthet i norske mobilnett 2013. Technical report, Simula Research Laboratory, February 2014.
- [3] Ernst Gunnar Gran, Thomas Dreibholz, and Amund Kvalbein. NorNet Core - A Multi-Homed Research Testbed. *Elsevier Computer Networks special issue on Future Internet Testbeds*, 2013.
- [4] Christoffer Karsberg, Christina Skouloudi, and Marnix Dekker. Annual incidents report 2013. Technical report, ENISA, September 2014.
- [5] Amund Kvalbein, Džiugas Baltrūnas, Jie Xiang, Kristian Riktor Evensen, Ahmed Elmokashfi, and Simone Ferlin-Oliveira. The Nornet Edge platform for mobile broadband measurements. *Elsevier Computer Networks special issue on Future Internet Testbeds*, 2014.
- [6] Xing Xu, Yurong Jiang, Tobias Flach, Ethan Katz-Bassett, David Choffnes, and Ramesh Govindan. Investigating transparent web proxies in cellular networks. In *Proceedings of the Passive and Active Measurement Conference (PAM '15)*, March 2015.



www.simula.no