

# Robusthet i norske mobilnett

## Tilstandsrapport 2013, CRNA



**CRNA** Centre for Resilient  
Networks & Applications

[ **simula** . research laboratory ]

**Ansvarlig for årets rapport** Dr. Amund Kvalbein

**Bidragstere** Dr. Stein Erlend Arge  
Džiugas Baltrūnas  
Dr. Ahmed Elmokashfi  
Professor Olav Lysne

**Omslag** Image Communication

**Publiseringdato** 24. februar 2014

**ISBN** 978-82-92593-13-4

**Økonomiske bidragstere** Norges Forskningsråd  
Tele2 Norge  
Ice Norge

# Hovedfunn

Årets rapport fra Center for Resilient Networks and Applications (CRNA) fokuserer på den opplevde 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 endebrukere 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 i perioden juli-desember 2013, fra målenoder spredt over det meste av landet, med en hovedvekt på tettsteder og større byer. Datasettet består av målinger fra 852 forbindelser fordelt på 307 målenoder i 85 kommuner.

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.

Hovedfunn i rapporten er:

## Stabilitet i tilkoblingen

- Mange forbindelser opplever signifikant nedetid, hvor tilkoblingen til mobilnett er brutt. Mellom 15% (**Telenor** og **Network Norway**) og 37% (**Tele2**) av forbindelsene mister tilkoblingen mer enn 10 minutter per dag i gjennomsnitt.
- Det er store forskjeller i feilmønstre mellom operatører. Mens forbindelser fra **Telenor** og **Network Norway** opplever hyppige og korte avbrudd, opplever forbindelser fra **Netcom** og **Tele2** sjeldnere men mer langvarige avbrudd.
- 2G-forbindelser har en mindre stabil tilkobling enn 3G-forbindelser hos alle operatører. De målte 2G-forbindelsene opplever å miste tilkoblingen i 10% av alle timer, mens 3G-forbindelser mister tilkoblingen i 4% av alle timer.
- Det er en sterk sammenheng mellom stabilitet i tilkoblingen og signalkvalitet. Forbindelser med svakt signal og/eller høy interferens opplever flere og lengere avbrudd. Målingene viser imidlertid ingen systematiske forskjeller i signalkvalitet mellom operatørene.

## Stabilitet i dataplanet

- Mange forbindelser opplever forholdsvis høyt pakketap. Mellom 18% (**Ice**) og 49% (**Telenor**) av alle forbindelser har et gjennomsnittlig pakketap på over 1%.
- Det er vesentlige forskjeller mellom operatørene når det gjelder pakketap. **Ice** og **Network Norway** har det laveste pakketapet. **Netcom** og **Tele2** har lavt pakketap i de fleste forbindelser, men en del forbindelser med svært høyt pakketap. **Telenor** har høyere pakketap enn de andre operatørene i de fleste forbindelser, men har få forbindelser med svært høyt pakketap.
- Pakketap varierer gjennom døgnet hos alle operatører, og er høyere når trafikkbelastningen er høy.
- Vi observerer et antall større hendelser i løpet av måleperioden, hvor mange av våre målepunkter opplever unormalt høyt pakketap. Ved de mest alvorlige hendelsene mistet flertallet av den berørte operatørens forbindelse tilkoblingen til nettet i opptil 12 timer. Større hendelser som berører mange forbindelser forekommer i ulikt omfang hos operatørene. **Telenor** opplevde færre slike hendelser enn de øvrige operatørene i måleperioden.

## Stabilitet i ytelse

- En test der vi laster ned en fil på 1 MB viser store forskjeller mellom operatørene. 7,4% av nedlastingsforsøkene kunne ikke fullføres hos **Telenor**. I motsatt ende av skalaen finner vi **Ice**, der 1,1% av nedlastingsforsøkene mislyktes.
- Et forsøk som etterligner en IP-telefonsamtale viser at for halvparten av **Telenors** forbindelser feiler minst 10% av samtalene. For de andre UMTS-operatørene opplever mellom 11% of 17% av forbindelsene feilrate over 10%.
- Vi opplever høyere stabil båndbredde hos UMTS-operatørene enn hos **Ice**.

## Øket robusthet gjennom multihoming

- Det er stor grad av uavhengighet i signalkvalitet mellom ulike operatører på det samme geografiske stedet. Dette er positivt med tanke på potensialet for økt robusthet gjennom såkalt multihoming, altså å koble seg til flere operatører samtidig.
- 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.
- Det er relativt høy grad av uavhengighet i pakketap mellom forbindelser til ulike operatører på den samme målenoden. Avhengigheten er større mellom operatører som deler nettverksinfrastruktur, og lavere mellom **Ice** og UMTS-operatørene.

# Innhold

<b>1 Om denne rapporten</b>	<b>2</b>
<b>2 Måleinfrastrukturen - Nornet Edge</b>	<b>4</b>
2.1 Mobilnettene vi måler . . . . .	6
2.2 Nornet Edge målenoder . . . . .	7
2.3 Server-side infrastruktur . . . . .	8
<b>3 Hvordan måle robusthet?</b>	<b>9</b>
3.1 Kort introduksjon til mobile bredbåndsnett . . . . .	9
3.2 Rammeverk for måling av robusthet . . . . .	11
<b>4 Stabilitet i tilkoblingen</b>	<b>13</b>
4.1 Analyse av stabilitet i tilkoblingen . . . . .	16
4.2 Forbindelsestype og signalforhold . . . . .	18
<b>5 Stabilitet i dataplanet</b>	<b>21</b>
5.1 Tapsrate . . . . .	21
5.2 Pakketap, nedetid og signalforhold . . . . .	23
5.3 Varighet av pakketap . . . . .	24
<b>6 Større hendelser</b>	<b>26</b>
<b>7 Stabil ytelse</b>	<b>30</b>
7.1 Nedlasting over HTTP . . . . .	30
7.2 IP-telefoni . . . . .	32
<b>8 Øket robusthet gjennom multihoming</b>	<b>34</b>
8.1 Korrelasjon i signalforhold . . . . .	34
8.2 Korrelasjon i nedetid . . . . .	35
8.3 Korrelasjon i pakketap . . . . .	36

# 1. Om denne rapporten

Denne rapporten er utarbeidet av Center for Resilient Networks and Applications (CRNA) ved 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 Nornet<sup>1</sup> [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. Denne rapporten er den første i rekken av slike rapporter, og er basert på målinger utført i andre halvdel av 2013.

Årets rapport fokuserer på opplevd robusthet i mobilnett, og 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 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 direkte målinger av brukeropplevelsen, 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 seks måneder (juli-desember) i 2013. 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 brukerstyr 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

---

<sup>1</sup>nornet-testbed.no

europaisk nivå publiserer European Union Agency for Network and Information Security (ENISA) årlige hendelsesrapporter basert på meldinger om større utfall i kommunikasjonsnettverk i medlemslandene [2].

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, etater og næringsliv i hverdag og krise. Vi forventer at mobilnettene 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 håper med denne rapporten å bidra med kunnskap som er nyttig i dette henseende, og som kan hjelpe operatørene til å utvikle enda bedre tjenester i framtiden.

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 rundt 300 dedikerte målenoder spredt omkring i norske kommuner. Antallet og plasseringen varierer noe over tid. Tettheten av målepunkter gjenspeiler i noen grad befolkningstettheten, med flest målenoder i noen større byer (Oslo, Bergen, Trondheim, Fredrikstad og Larvik). 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. Med våre målepunkter kan vi likevel gjøre noen generelle observasjoner av signalforholdene, se kapittel 4.

**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 gjør ikke målinger i 4G-nettene.** Modemene i dagens målenoder støtter kun 2G og 3G (opp til HSPA+) teknologi. Vi planlegger å gradvis innføre 4G (LTE) modemer i våre målenoder i løpet av 2014.

## 2. Måleinfrastrukturen - Nornet Edge

Målingene som presenteres i denne rapporten er utført ved hjelp av Nornet Edge<sup>1</sup>. Nornet Edge er en infrastruktur for målinger og eksperimentering i mobile bredbåndsnett, delvis finansiert av Norges Forskningsråd. Infrastrukturen består av et hundretalls målenoder spredt rundt i Norge. Hver målenode er koblet til 2-5 mobiloperatører. Infrastrukturen omfatter også et antall servere plassert på Simula som tar i mot, prosesserer og lagrer måledata.

CRNA samarbeider med e-valgprosjektet i Kommunal- og Moderniseringsdepartementet om utplassering av målenoder. Målenodene er plassert i valg- og forhåndsstemmelokaler i norske kommuner, og har fungert som reserveløsning for kommunikasjon under stortingsvalget i september 2013. Målenodene 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 målenoder. Det er en overvekt av målenoder i fem større byer; Oslo, Bergen, Trondheim, Fredrikstad<sup>2</sup> og Larvik. Valglokaler er ofte skoler, sykehjem eller rådhus, og er som regel plassert i sentrumsnære områder. 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.

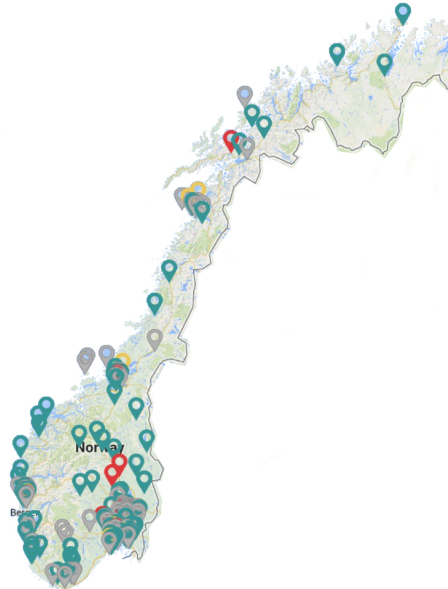
I løpet av måleperioden har vi hatt aktive målenoder i 85 kommuner. Antallet målenoder har variert gjennom måleperioden, som vist i figur 2.2. Totalt har vi målinger fra 852 forbindelser fordelt på 307 distinkte målenoder. Det høyeste antallet samtidig aktive målepunkter ble nådd like før stortingsvalget, med 254 aktive noder.

---

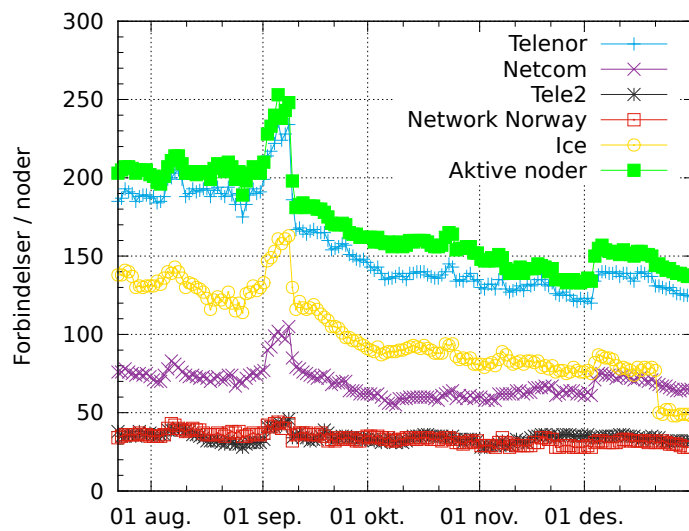
<sup>1</sup>Nornet består i tillegg til Nornet Edge av Nornet Core, som brukes til målinger og eksperimenter i fastnett.

<sup>2</sup>Målenodene i Fredrikstad ble fjernet etter stortingsvalget.

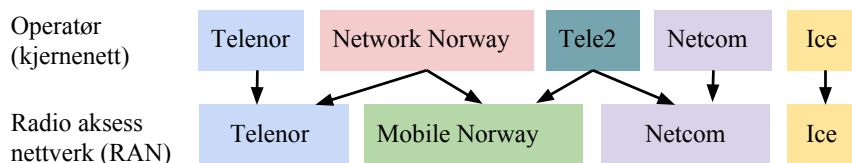




Figur 2.1: Geografisk fordeling av målenoder.



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



Figur 2.3: Operatører og nettverk behandlet i denne rapporten.

#### Nornet Edge som reserveløsning under valget

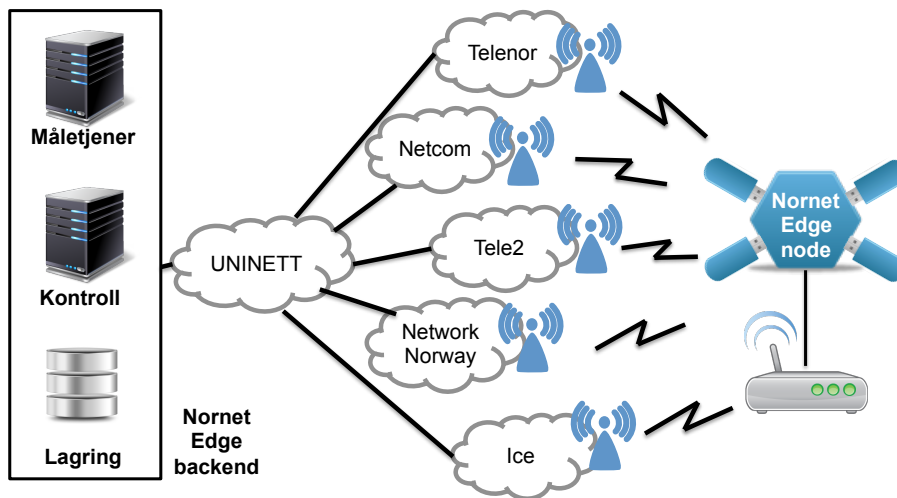
Som en del av samarbeidet med e-valgprosjektet har målenodene fungert som reserveløsning for internettforbindelse under gjennomføringen av Stortingsvalget i 2013. En stabil internettforbindelse er en forutsetning for å kunne ta i bruk elektronisk avkryssning i manntallet, som er en del av den nye elektroniske valgsystemet. Nornet Edge målenoder er velegnet til dette formålet, siden de er koblet til flere operatører og kan gi internettforbindelse så lenge minst en av disse er operativ.

På valgdagen fikk vi en demonstrasjon av hvor viktig det er med slike reserveløsninger. 15 minutter før valglokalene åpnet, førte anleggsarbeid til at en fiberkabel ble brutt i Larvik sentrum. Dette satte hele det kommunale nettet, inkludert både internett og telefoni, ut av spill. Larvik måtte derfor gjennomføre valget med Nornet Edge målenoder som eneste internettforbindelse i 11 av 12 valglokaler. Dette fungerte godt, og Larvik valgte å fortsette på reserveløsningen også etter at fiberforbindelsen var reparert.

## 2.1 Mobilnettene vi måler

Hver målenode er koblet til mellom 2 og 5 mobiloperatører. Av praktiske og økonomiske årsaker varierer antallet abonnenter vi har hos hver operatør. De aller fleste målenodene er koblet til både Telenor og Ice, mens en del målenoder i tillegg er koblet til Netcom, Tele2 og/eller Network Norway. 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 nett basert på UMTS standarden. Tele2 og Network Norway bygger i fellesskap et tredje UMTS-nett, Mobile Norway, som foreløpig ikke dekker alle deler av landet. Når Tele2- og Network Norway-abbonenter beverger seg utenfor Mobile Norways dekningsområde, vil de koble seg til henholdsvis Netcoms og Telenors nettverk gjennom såkalt nasjonal gjesting. Denne ordningen er illustrert i figur 2.3, og er viktig for å forstå mange av måleresultatene i denne rapporten. 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 UMTS-operatørene. Ice skiller seg også ut ved at de



Figur 2.4: Nornet Edge måleinfrastrukturen.

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 UMTS-nettene gjennom 3G USB modemer, og til Ice gjennom en frittstående mobil bredbåndsruter. To ulike USB modemmodeller benyttes for UMTS-operatørene: Huawei E353-u2 og Huawei E3131. Disse modellene ble valgt fordi de kan eksportere detaljert informasjon om tilkoblingen til mobilnettene. Modemene støtter 3G teknologier opp til HSDPA-DC (E353-u2) og HSPA+ (Huawei 3131), men altså ikke 4G. Vi bruker alltid samme modemtype for alle operatører på en målenode, for å unngå forskjeller som skyldes ulike maskinvare.

For Ice bruker vi hovedsakelig deres D35 bredbåndsruter. Denne ruterer støtter CDMA datastandarden Ev-Do 1x Rev A. På en del målenoder bruker vi i stedet R90, som også støtter den nyere Ev-Do 1x Rev B. Rev B støtter 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. Vi kan derfor ikke inkludere Ice i alle mållingene.

## 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 8 mrd 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].

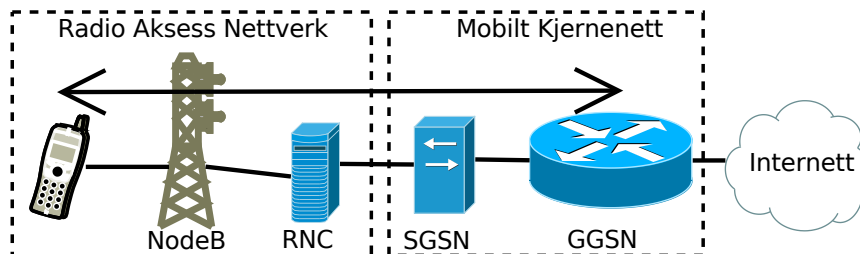
## 3. Hvordan måle robusthet?

Denne rapporten fokuserer på den bruker-opplevde robustheten og stabiliteten til norske mobilnett. Den opplevde stabiliteten er en kompleks størrelse som påvirkes av en rekke forhold. Hvor ofte mister jeg forbindelsen med mobilnettet? Hvor lenge varer slike utfall? Har jeg kontakt med de internettjenestene jeg ønsker å bruke? Får jeg en stabil og forutsigbar ytelse slik at jeg for eksempel kan surfe på nettet eller bruke IP-telefoni? 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 UMTS mobilnett. Nettet består av et Radio Aksess Nettverk (RAN), og et kjernenett. RAN inkluderer brukerterminaler, basestasjoner (NodeB i UMTS terminologi) og et antall Radio Network Controllers (RNC) som hver kontrollerer et antall basestasjoner. Kjernenettet inkluderer et antall sentrale funksjoner. Den viktigste for vår diskusjon kalles Gateway GPRS Service Node (GGSN), og fungerer som en gateway for all trafikk mellom brukerterminaler og Internett.

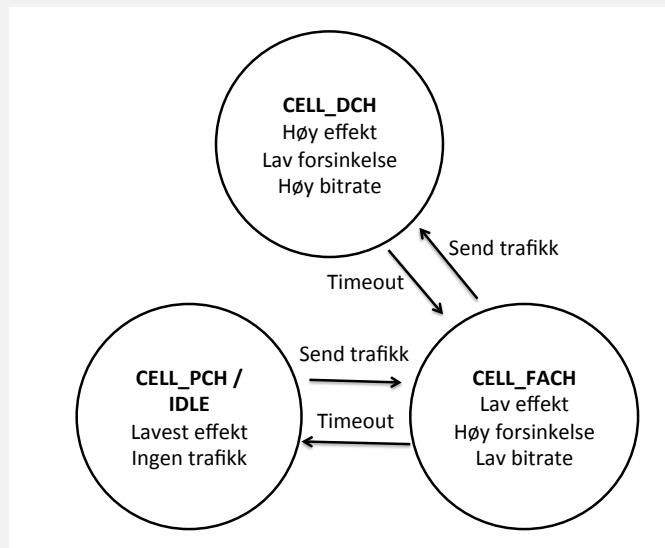
Før en brukerterminal kan sende data, må det opprettes en datasesjon. En slik datasesjon kalles en PDP kontekst, og kan forstås som en tunnel mellom brukerterminalen og GGSN. En av de faktorene vi undersøker i denne rapporten, er hvor ofte lenge slike datasesjoner brytes, og hvor lang tid det tar før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



Figur 3.1: Hovedkomponentene i et UMTS nettverk.

### 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. Når trafikken øker, blir forbindelsen tildelt en dedikert kanal”, hvor data kan sendes og mottas på en høyere bitrate.



Disse tilstandene styres av en såkalt Radio Resource Control (RRC) tilstandsmaskin, som vist i figuren. 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. Som vi skal se i kapittel 7, hender det at slike ressurser ikke er tilgjengelige, noe som vil ha negativ innvirkning på brukeropplevelsen.

	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, radioforhold

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

## 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 endebrukeren. 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.

**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 i GGSN og i brukerterminalen. Fra brukerens ståsted vil dette som regel bety at terminalen har en tildelt IP-adresse. Stabiliteten til tilkoblingen bestemmes av både RAN og kjernenettet. En tilknytning kan brytes på grunn av manglende dekning, feil i basestasjonen eller transmisjonsnettet, eller kapasitetsproblemer i sentrale komponenter som SGSN eller GGSN. 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.



## 4. Stabilitet i tilkoblingen

I dette kapitlet undersøker vi stabiliteten til tilkoblingen mellom våre målenoder og mobilnettet. Denne diskusjonen omhandler kun UMTS-operatørene, siden vi ikke har de nødvendige data for å gjøre tilsvarende analyse for Ice.

Målenodene overvåker kontinuerlig tilkoblingen til de ulike mobilnettene. Dersom tilkoblingen brytes, vil målenoden umiddelbart forsøke å gjenopprette den. Den vil kontinuerlig 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 gjenopprettet<sup>1</sup>. 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.

Stabiliteten til en tilkobling avhenger i stor grad av RAN-delen av en operatørs nett. Som vist i figur 2.3, bruker noen operatører flere RAN i sin tjenesteproduksjon. I den følgende analysen skiller vi derfor mellom 5 logiske nett: Telenor, Netcom, Mobile Norway (som inkluderer Tele2 og Network Norway-forbindelser koblet til Mobile Norways RAN), Tele2@Netcom (Tele2-forbindelser koblet til Netcom sitt RAN), og Network Norway@Telenor (Network Norway forbindelser koblet til Telenor sitt RAN). Vi bruker informasjon fra modemet for å avgjøre hvilket RAN en forbindelse går gjennom. Vi sier, for eksempel, at

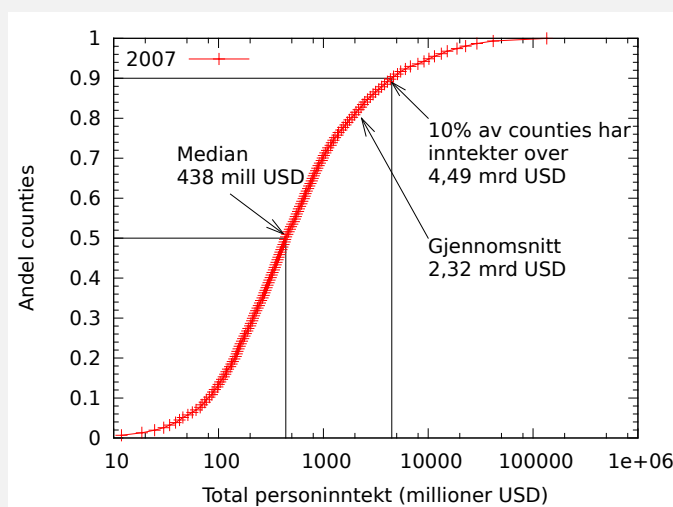
---

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

en Tele2-forbindelse hører til Tele2@Netcom dersom den er knyttet til Netcom sitt RAN mer enn halvparten av måleperioden<sup>2</sup>.

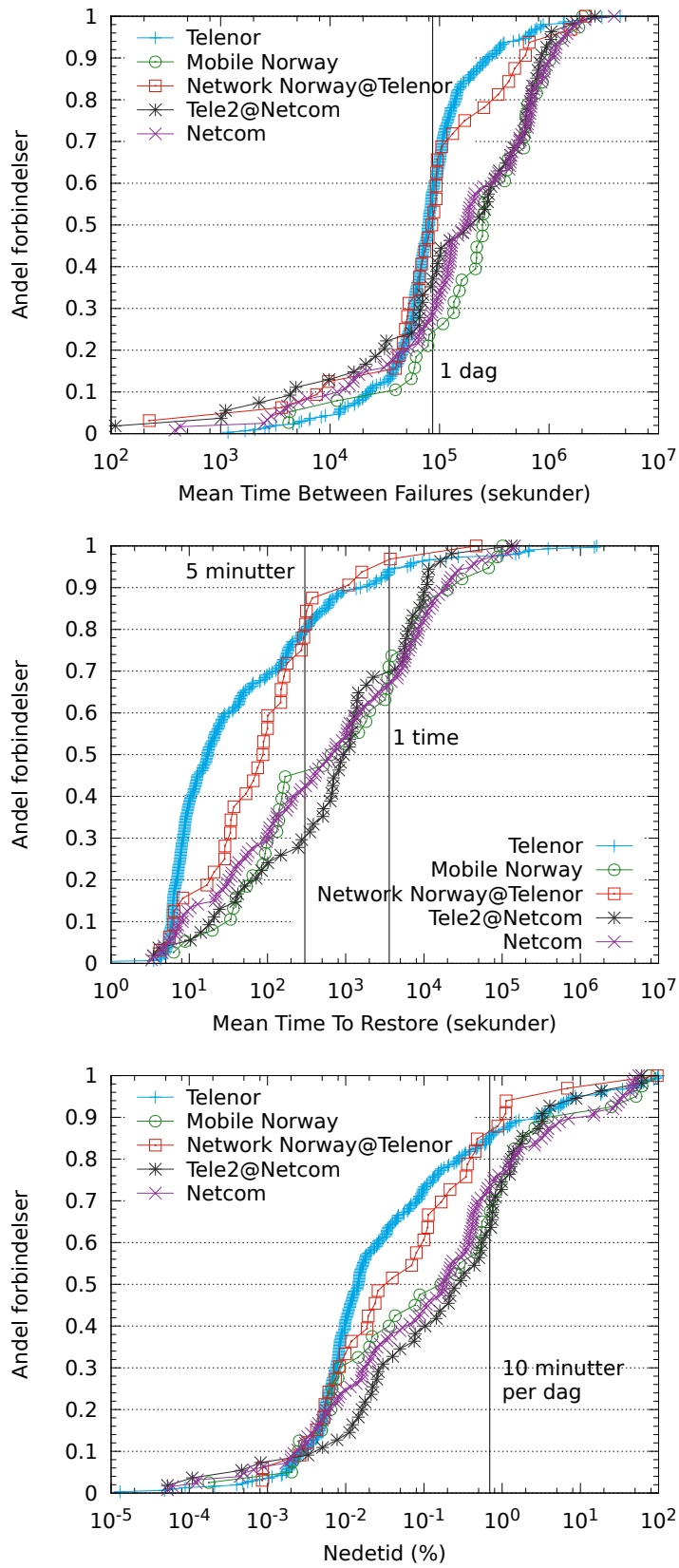
#### Hvordan lese grafene brukt i denne rapporten

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. Det vil derfor ofte være misvisende å kun fokusere på gjennomsnittet i tunghalede fordelinger.



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

## 4.1 Analyse av stabilitet i tilkoblingen

Figur 4.1 viser kumulative distribusjoner for MTBF, MTTR og nedetid for hver av de 5 logiske nettverkene. Først merker vi oss at det er klare forskjeller mellom nettverkene, og at de største forskjellene går mellom ulike RAN. Vi ser at kurvene til Telenor og Network Norway@Telenor er ganske like hverandre, og det samme er sant for Netcom og Tele2@Netcom. Dette viser at RAN er en dominerende faktor for stabiliteten til tilkoblingene.

**Forskjeller mellom nettverkene.** Det øverste plottet i figur 4.1 forteller oss at forbindelser i Telenor og Network Norway@Telenor feiler oftere enn i de andre nettverkene. Rundt halvparten av forbindelsene i Telenor og Network Norway@Telenor mister tilkoblingen minst en gang i døgnet i gjennomsnitt. For de andre nettverkene gjelder dette bare mellom hver fjerde (Mobile Norway) og hver tredje (Netcom og Tele2@Netcom) forbindelse. Feilene i Telenor og Network Norway@Telenor er imidlertid mye kortere enn i de andre nettverkene. Fra det midterste plottet i figur 4.1 kan vi lese at kun 19% og 20% av forbindelsene i henholdsvis Telenor og Network Norway@Telenor har en MTTR på mer enn 5 minutter. Dette tallet øker til 46% for Mobile Norway, 58% for Netcom og 68% for Tele2@Netcom.

**Analyse av forbindelsesbruddene.** Telenor og Network Norway@Telenor domineres av et stort antall korte brudd på tilkoblingene. Halvparten av bruddene i disse nettverkene varer kortere enn 15 sekunder (Telenor) og 75 sekunder (Network Norway@Telenor). Ved nærmere analyse ser vi at disse korte bruddene har sammenheng med RRC tilstandsmaskinen til forbindelsene. De oppstår som regel når forbindelsen ikke kan oppgraderes fra en delt kanal (CELL\_FACH) til en dedikert kanal (CELL\_DCH) som normalt. Dette fører igjen til at modemmet resetter forbindelsen, og det tar noen sekunder før en ny PDP kontekst etableres. Som vi skal se i kapittel 7, kan dette ha alvorlige konsekvenser for den opplevde robustheten til noen applikasjoner.

Netcom og Tele2@Netcom har en høyere andel av mer langvarige brudd i tilkoblingen. Vi har sett nærmere på 157 slike brudd i 27 ulike Tele2@Netcom forbindelser, som alle varte over 1 time. For alle disse forbindelsene har vi også Netcomforbindelser fra de samme målenodene. Rundt halvparten av bruddene påvirket også Netcomforbindelsen fra samme node (som ofte vil gå over samme RAN), mens Telenorforbindelsen ikke ble påvirket. Dette viser at slike langvarige brudd ikke skyldes forhold ved vår måleinfrastruktur, men heller stabiliteten i radioaksessen, dekningsforhold, eller samspillet mellom modem og nettverk.

**Nedetid.** Telenor og Network Norway@Telenor har midre total nedetid enn de andre nettene, som vist i det nederste plottet i figur 4.1. Andelen forbindelser som i gjennomsnitt er nede mer enn 10 minutter (0,7%) hver dag varierer fra 38% for Tele2@Netcom til 15% for Telenor. Mellom 4,2% (Network Norway) og 11,0% (Netcom) av alle feil varer mer enn 10 minutter, og disse feilene er ansvarlige for mellom 96,4% og 98,3% av den totale nedetiden.

---

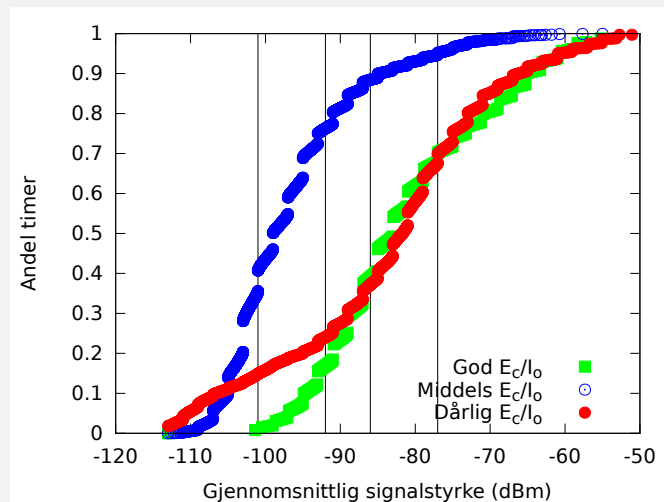
<sup>2</sup>Merk at en del forbindelser veksler mellom ulike RAN i løpet av måleperioden. Inndelingen i 5 logiske nettverk er derfor ikke helt nøyaktig.

## Signalstyrke og $E_c/I_o$

I denne rapporten sammenholder vi flere ganger parametere som nedetid og pakketap med signalkvalitet. Vi bruker to ulike mål på signalkvalitet, signalstyrke og  $E_c/I_o$ . Begge er viktige, og beskriver ulike aspekter av signalkvaliteten.

Signalstyrken måles som den totale energien som mottas i det aktuelle frekvensbåndet. Denne energien består av både signalet fra basestasjonen, bakgrunnsstøy og interferens fra andre sendere. Det er derfor mulig å ha høy signalstyrke men dårlig signalkvalitet på grunn av interferens. Signalstyrken er normalt grunnlaget for indikatoren vist som 1-5 bars på mobiltelefoner. Ulike utstysprodusenter har ulike måter å omsette signalstyrke (målt i dBm) til bars. Vi følger samme konvensjon som produsenten av modemene vi bruker (Huawei).

$E_c/I_o$  måler enkelt sagt forholdet mellom energien i signalet ( $E_c$ , energi per chip) og interferens ( $I_o$ ). Vi omtaler denne verdien noe forenklet som signal-til-støyforhold i teksten.  $E_c/I_o$  måles i den såkalte pilotkanalen i UMTS-nettverk. Når trafikken øker i en basestasjon, vil interferensen i pilotkanalen også øke, og vi får en lavere  $E_c/I_o$ . Det samme er tilfelle hvis et område betjenes av flere basestasjoner/sektorer i nærliggende frekvensbånd. Lav  $E_c/I_o$  kan derfor være et problem i områder med mye trafikk og høy tetthet av basestasjoner.



Denne figuren viser sammenhengen mellom signalstyrke og  $E_c/I_o$  i våre målinger. For hver time måler vi gjennomsnittlig signalstyrke og  $E_c/I_o$ .  $E_c/I_o$ -verdiene klassifiseres som god, middels eller dårlig som beskrevet i teksten under. Tilsvarende deles signalstyrkeverdiene inn i bars. Grenseverdiene mellom to ulike bar-verdier er vist som vertikale linjer i figuren (høyest signalstyrke til høyre i figuren). Figuren viser at høy signalstyrke og god  $E_c/I_o$  ikke alltid betyr det samme. I våre målinger ser vi at forbindelser med middels  $E_c/I_o$  normalt har lavere signalstyrke enn forbindelser med god eller dårlig  $E_c/I_o$ .

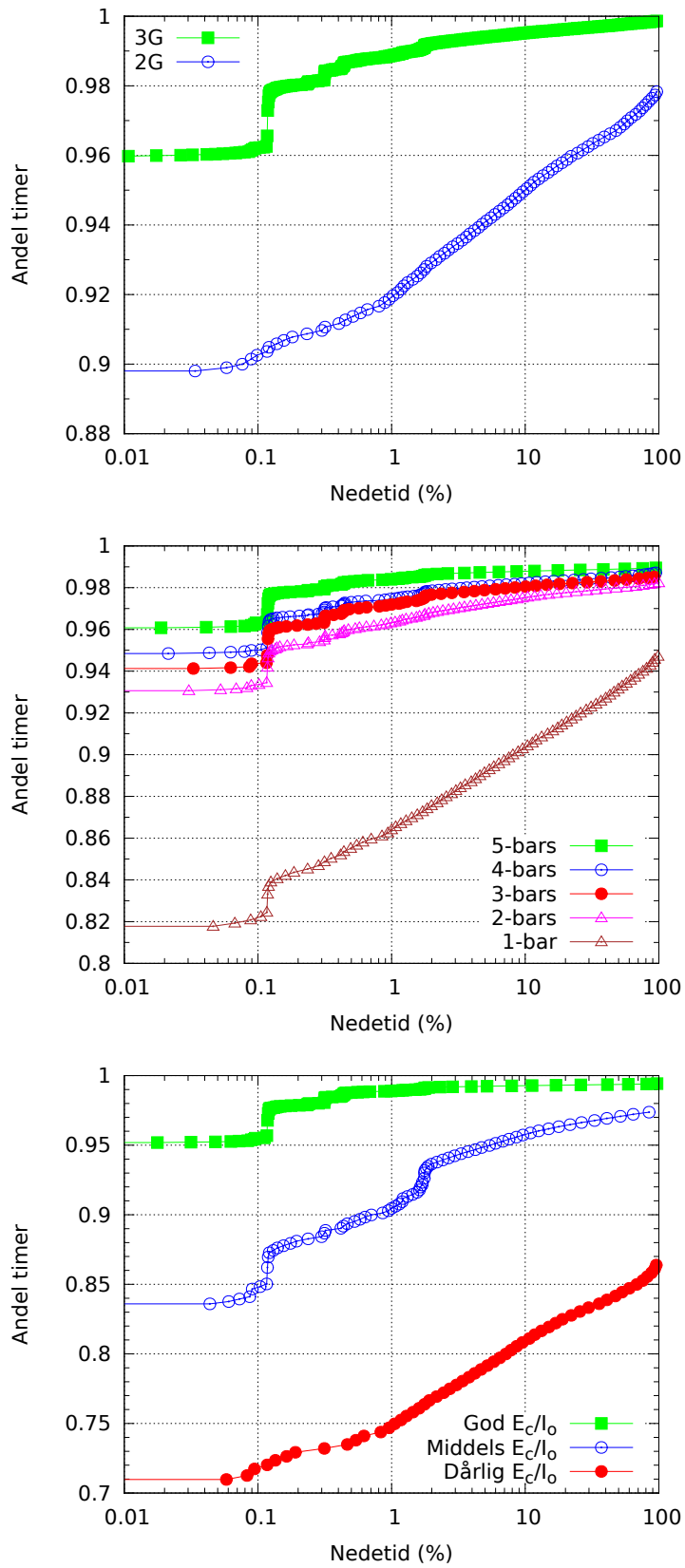
## 4.2 Forbindelsestype og signalforhold

I dette avsnittet ser vi på ulike forklaringsmodeller for nedetid. Vi ser på forskjeller mellom 2G og 3G forbindelser, og undersøker hvordan nedetid henger sammen med signalstyrke og signal-til-støyforhold. Alle operatørene ses på under ett i denne diskusjonen, men vi kommenterer der det er spesielle forskjeller. **Nedetid i 2G vs 3G.** For å se på forskjeller i nedetid mellom 2G og 3G, starter vi med å klassifisere hver forbindelse som enten 2G eller 3G. Vi gjør dette for hver time forbindelsen er aktiv. En forbindelse klassifiseres som 2G (3G) i en gitt time hvis den er i 2G-modus (3G-modus) minst 70% av timen. Øverste plot i figur 4.2 viser nedetid for de to kategoriene. Vi observerer at 3G-forbindelser har klart mindre nedetid enn 2G-forbindelser. Dette gjelder for alle operatører. 8% av 2G-timene har mer enn 1% nedetid, mens tilsvarende tall for 3G-timene er 1%. Knekkene i distribusjonen for 3G forbindelser rundt 0,12% (ca 5 sekunder nedetid i løpet av en time) skyldes forbindelser som mister forbindelsen en gang, og deretter lykkes i å gjenopprette den på første forsøk. Denne prosessen tar normalt ca 5 sekunder. En del forbindelser har timer der de verken kan klassifiseres som 2G eller 3G (disse timene er ikke vist i figuren). I disse periodene kan forbindelsene veksle mellom 2G og 3G, eller ha perioder der modemmet ikke rapporterer forbindelsestypen. Vi observerer generelt høyere nedetid i disse timene.

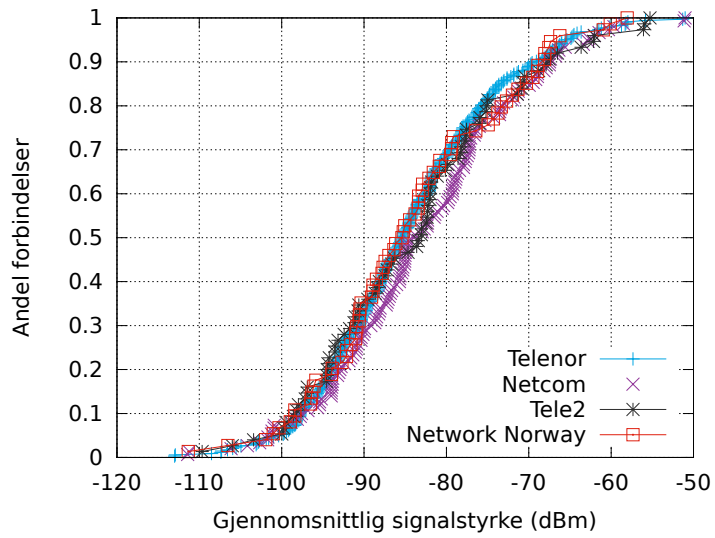
**Nedetid versus signalstyrke.** Midterste plot i figur 4.2 viser nedetid som en funksjon av signalstyrke. Vi har delt signalstyrken inn i 5 nivåer, som tilsvarer antall bars som vises på en mobiltelefon. For hver forbindelse beregner vi gjennomsnittlig signalstyrke og nedetid for hver time. Figuren viser at svakt signal (1 bar) har en klar innvirkning på nedetiden. 10% av timene med 1 bar har en nedetid på minst 10%. I 5% av timene med så svakt signal er forbindelsen nede hele timen. Dersom signalstyrken kommer over dette nivået, øker stabiliteten raskt. Vi ser vi liten forskjell i nedetid for 2-5 bars.

**Nedetid versus  $E_c/I_o$ .** Vel så viktig som signalstyrken er signal-til-støyforholdet til forbindelsen. Vi bruker her  $E_c/I_o$  som et mål på signal-til-støyforholdet, og beregner denne verdien for hver forbindelse og hver time.  $E_c/I_o$ -verdiene deles inn i tre kategorier: God (0 dB til -8 dB), middels (-8 dB til -15 dB) og dårlig (lavere enn -15 dB) [4]. Figuren viser en klar sammenheng mellom nedetid og  $E_c/I_o$ . Mindre enn 5% av timene med god  $E_c/I_o$  har nedetid i det hele tatt, mens over 13% av timene med dårlig  $E_c/I_o$  opplever 100% nedetid. Sammenhengen mellom nedetid og  $E_c/I_o$  er klar i alle operatører, men er sterkere hos Telenor og Network Norway enn hos Netcom og Tele2.

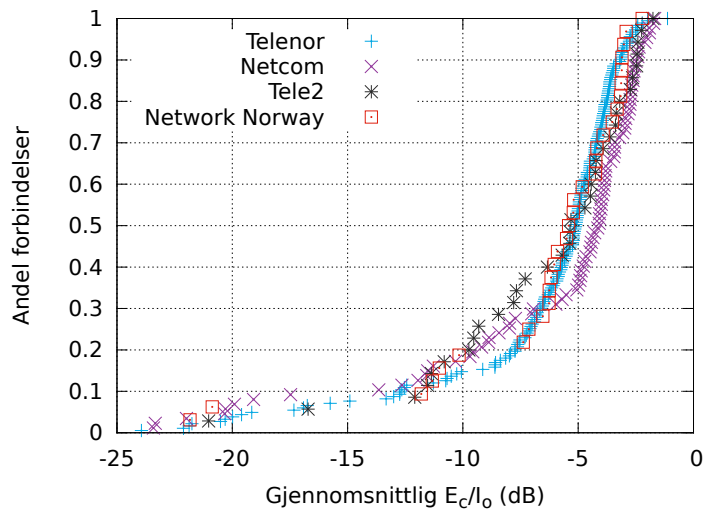
Diskusjonen over har vist at signalkvalitet er viktig for stabilitet i tilkoblingen. Vi finner imidlertid ingen systematiske forskjeller i signalkvalitet hos de ulike operatørene som kan forklare forskjellene i feilfrekvens og nedetid. Figur 4.3 og figur 4.4 viser henholdsvis gjennomsnittlig signalstyrke og  $E_c/I_o$  for hver forbindelse. Fordelingene er overraskende like for alle operatører.



Figur 4.2: Nedetid vs forbindelsestype (topp), signalstyrke (midt) og signal-til-støyforhold ( $E_c/I_o$ ) (bunn).



Figur 4.3: Gjennomsnittlig signalstyrke for forbindelser i hver operatør.



Figur 4.4: Gjennomsnittlig  $E_c/I_o$  for forbindelser i hver operatør.



## 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 tilboklet.

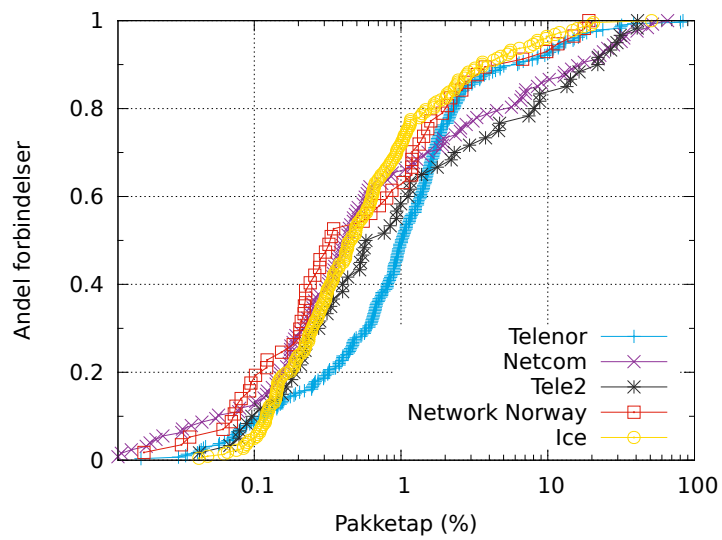
Måletrafikken vi baserer vår analyse på består av små (20 Byte) UDP-pakker som sendes til vår måleserver hvert sekund. Måleserveren sender den samme pakken tilbake umiddelbart. For hver pakke registrerer vi hvor lang tid det tok før svarpakken kom tilbake. Dersom ingen svarpakke kom i retur innen 60 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 8 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. Vår første observasjon er at pakketap er relativt beskjedent i det store flertallet av forbindelser. Over 50% av forbindelsene har mindre enn 1% pakketap for alle operatører. Det er likevel klare forskjeller mellom operatørene. Telenor har færre forbindelser med et svært lavt pakketap enn de andre operatørene. 75% av Telenors forbindelser har et pakketap over 0,5%, mens dette gjelder rundt 50% for de andre operatørene. Telenor har imidlertid også færre forbindelser med et høyt pakketap. Kun 10% av Telenors forbindelser har en tapsrate over 5%, mens dette gjelder 20% av Netcoms forbindelser og 23% av Tele2s forbindelser. Network Norway og Ice har alt i alt de laveste tapsratene.

Tabell 5.1 oppsummerer noen observasjoner om pakketapet i hver operatør. Vi ser at en del forbindelser med svært høyt pakketap trekker opp gjennomsnittet, som dermed ikke er representativt for en typisk forbindelse.

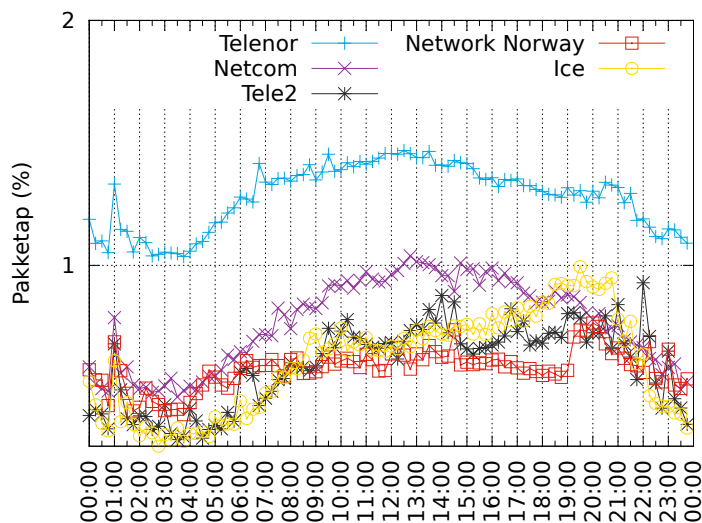
Figur 5.2 viser hvordan pakketap varierer gjennom døgnet for hver operatør. Merk at vi i denne figuren har fjernet tidsperioder for enkeltforbindelser som opplever 100% pakketap over lang tid, for å tydeliggjøre døgnvariasjonene. Figuren kan derfor ikke brukes direkte til å sammenligne pakketap mellom operatører



Figur 5.1: Pakketap

Operatør	10 percentil	Median	90 percentil	Gjennomsnitt
Telenor	0,12%	1,0%	6,2%	3,1%
Netcom	0,05%	0,41%	17,7%	5,0%
Tele2	0,10%	0,58%	21,9%	5,5%
Network Norway	0,07%	0,33%	4,0%	2,1%
Ice	0,12%	0,45%	3,6%	1,8%

Tabell 5.1: Pakketap



Figur 5.2: Døgnvariasjoner i pakketap

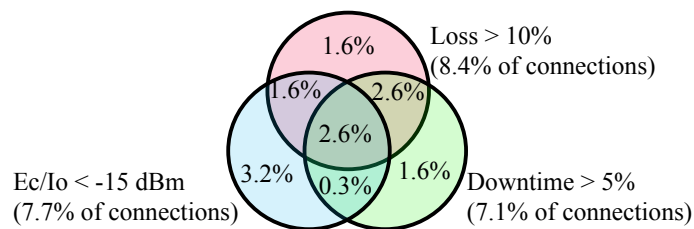
(dette vises i figur 5.1 og tabell 5.1). Pakketapet varierer i takt med trafikkmengden hos alle operatørene, og er for eksempel høyere på dagtid enn om natten. Ice har et annet trafikkmonster enn UMTS-operatørene, og har høyest pakketap etter arbeidstid. Figuren viser at Telenor har et høyere pakketap enn de andre operatørene gjennom hele døgnet i normal operasjon. Vi antar derfor at det høye pakketapet hos Telenor ikke skyldes høy last, men heller måten de har konfigurert sitt nett.

En del av forklaringen finnes i konfigurasjonen av RRC tilstandsmaskinen. Telenor er mer tilbakeholdne med å gi forbindelser en dedikert kanal (CELL\_DCH) enn de andre nettverkene, og Telenors forbindelser tilbringer dermed mer av sin tid i delt kanal (CELL\_FACH). I gjennomsnitt tilbringer våre Telenorforbindelser 66% av tiden i CELL\_FACH, mens tilsvarende for Netcom er 33%. Til forskjell fra de andre operatørene, har Telenor høyere pakketap i CELL\_FACH enn i i CELL\_DCH, noe som tyder på at denne kanalen ofte opererer nær sin kapasitetsgrense<sup>1</sup>. Forskjellene i RRC konfigurasjon forklarer likevel ikke fullt ut det høye pakketapet i Telenor. Dersom vi kun ser på pakketap når forbindelsene har en dedikert kanal (CELL\_DCH), ser vi fremdeles høyere pakketap hos Telenor.

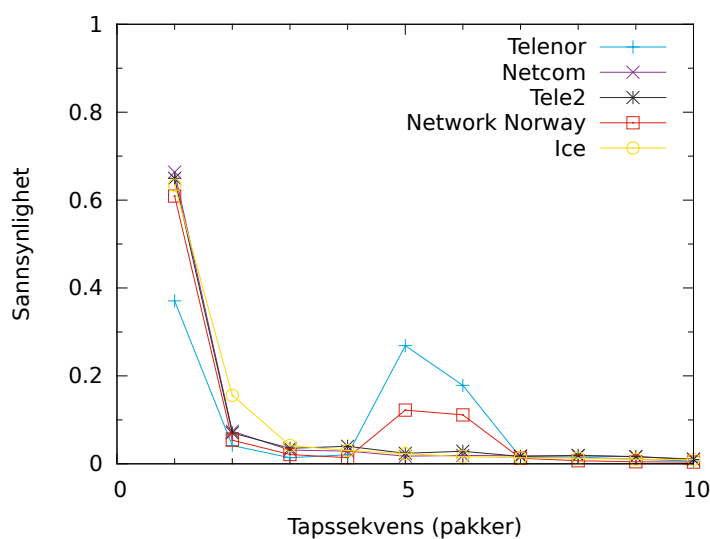
## 5.2 Pakketap, nedetid og signalforhold

Det er en klar sammenheng mellom pakketap, nedetid og signalforhold. Venn-diagrammet i figur 5.3 illustrerer denne sammenhengen. De tre sirklene representerer forbindelser med høyt pakketap (over 10%), mye nedetid (over 5%) og lav  $E_c/I_o$  (under -15 dBm). Tallene i figuren viser hvor stor andel av forbindel-

<sup>1</sup>Telenor har tidligere hatt store kapasitetsproblemer i FACH-kanalen i sitt nett, men en oppgradering sommeren 2012 reduserte dette problemet betraktelig.



Figur 5.3: Sammenheng mellom pakketap, signalforhold og nedetid.



Figur 5.4: Varighet av pakketap

sene som faller i en eller fler av disse kategoriene. Vi ser for eksempel at 81% av forbindelsene med høyt pakketap også opplever høy nedetid, lav  $E_C/I_o$ , eller begge. Vi finner ingen systematiske forskjeller mellom operatørene i sammenhengen mellom pakketap, nedetid og signalforhold.

### 5.3 Varighet av pakketap

Fra målingene kan vi trekke ut hvor mange pakker som tapes på rad. Vi kaller en sekvens av tapte pakker en tapssekvens. Siden vi sender en datapakke hvert sekund, vil antall pakker i en tapssekvens omtrent tilsvare antall sekunder forbindelsen er utilgjengelig for datatrafikk. Lengden på slike tapssekvenser er viktige for hvordan brukeropplevelsen påvirkes. Figur 5.4 viser distribusjonen av tapssekvenser hos de ulike operatørene. Ikke overraskende er den vanligste størrelsen på en tapssekvens 1. For tre av nettverkene består over 60% av tapssekvensene av en enkelt tapt pakke. For Telenor og Network Norway observerer vi

imidlertid også mange tapssekvenser av størrelse 5 eller 6. For Network Norways del finner vi slike tapssekvenser i forbindelser koblet til Telenors RAN.

Ved nærmere inspeksjon finner vi at disse tapssekvensene oppstår når forbindelsens RRC-tilstand nedgraderes fra CELL\_FACH til CELL\_PCH, hvor data-trafikk ikke kan sendes. RRC-tilstanden gjenopprettes i løpet av 5-6 sekunder, og trafikken kan fortsette som normalt. Vi kjenner ikke årsaken til disse hendelsene, men det er velkjent at nettverket i visse tilfeller kan trekke tilbake de tildelte radioressursene når det mangler ressurser til å sette opp nye samtaler.

## 6. Større hendelser

Måledata fra det samme eksperimentet 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.

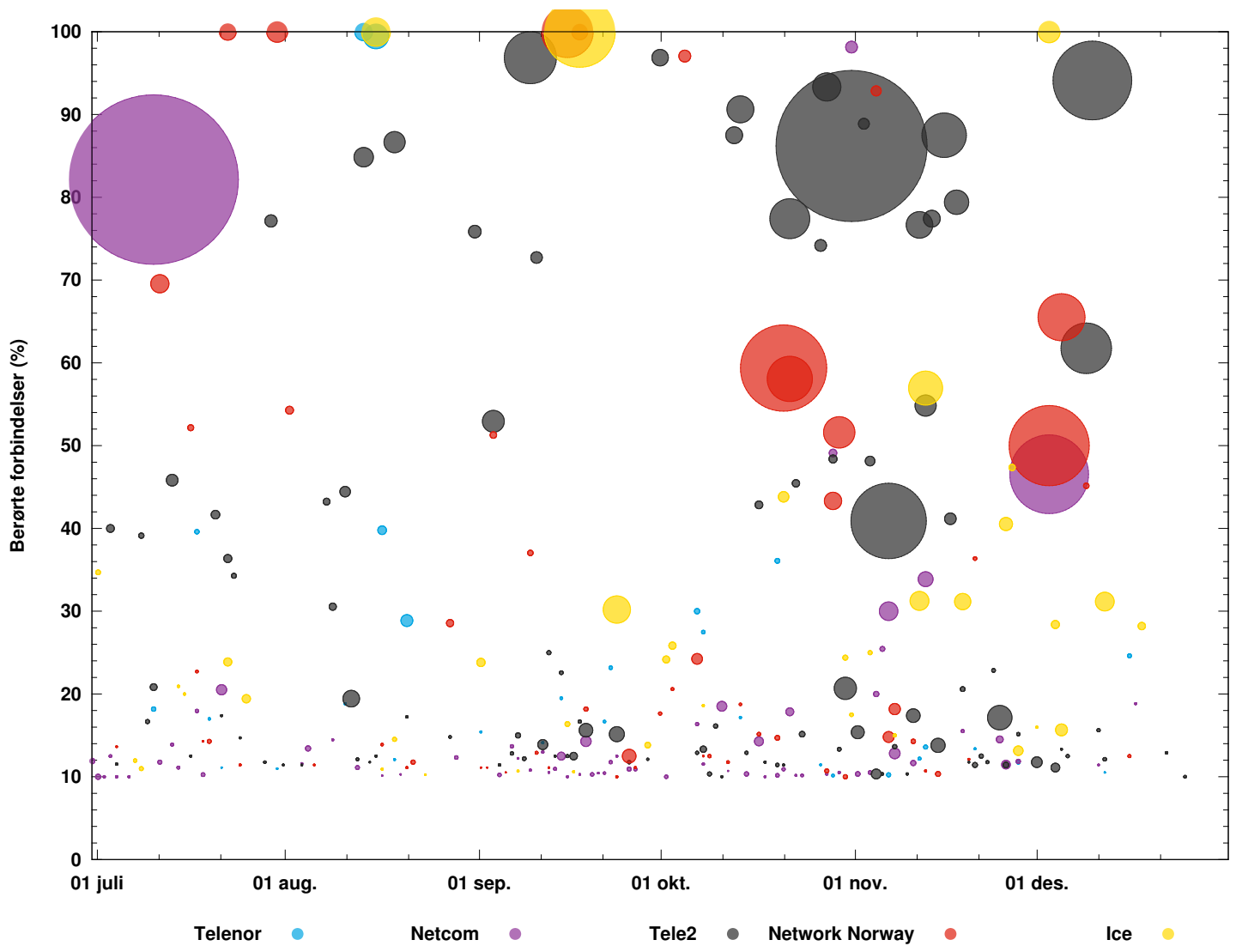
For å identifisere større hendelser deler vi våre måleserier inn i 5 minutters intervaller, og beregner pakketapet for hver forbindelse i hvert intervall. Vi definerer en større hendelse som ett eller flere intervaller der minst 10% av de målte forbindelsene til en operatør opplever minst 10% pakketap. 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 figuren<sup>1</sup>.

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.

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. I tabellen under gir vi en nærmere beskrivelse av noen av de største hendelsene vi har observert gjennom måleperioden. 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.

---

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



<p><b>Operatør:</b> Netcom</p> <p>Dato: 11.-12. juli</p> <p>Varighet: 16:40 - 09:55</p> <p>Berørte forbindelser: Alle. Noen forbindelser berørt kun få minutter, andre mister forbindelsen i opp til 17 timer.</p> <p>Pakketap: Varierende. 50 - 100%.</p> <p>Kommentar: Feilen berørte forbindelser fra hele landet, og var derfor trolig forårsaket av en sentral komponent i mobilnettet. En del forbindelser var raskt tilbake i normal operasjon, mens andre kom gradvis tilbake over en periode på 17 timer.</p>
<p><b>Operatør:</b> Tele2</p> <p>Dato: 10. september</p> <p>Varighet: 08:00 - 08:40 og 16:30 - 16:50</p> <p>Berørte forbindelser: Alle<sup>2</sup></p> <p>Pakketap: 20-50%</p> <p>Kommentar: Feilen berørte forbindelser fra hele landet, og var derfor trolig forårsaket av en sentral komponent i mobilnettet.</p>
<p><b>Operatør:</b> Ice</p> <p>Dato: 19. september</p> <p>Varighet: 00:05 - 02:20</p> <p>Berørte forbindelser: Alle, varierende varighet</p> <p>Pakketap: 100%</p> <p>Kommentar: Alle forbindelsene ble utilgjengelige kl 00:05. Noen kom opp etter kort tid, mens de fleste forble utilgjengelige i over 2 timer. Tidspunktet for hendelsen kan tyde på at dette utfallet var en konsekvens av en serviceoperasjon.</p>
<p><b>Operatør:</b> Network Norway</p> <p>Dato: 21.-22.. oktober</p> <p>Varighet: 21:15 - 08:35</p> <p>Berørte forbindelser: Alle forbindelser knyttet til Telenors RAN</p> <p>Pakketap: Rundt 50%</p> <p>Kommentar: Pakketapet var høyere på tidspunkt med mer trafikk i nettverket, noe som indikerer at kapasiteten mellom de to nettverkene var redusert. Network Norway har senere bekreftet at feilen skyldtes et problem hos Telenor som gjorde at all trafikk mellom de to nettverkene ble rutet gjennom en såkalt GPRS roaming exchange. Denne ruten brukes normalt bare til internasjonal gjesting, og var ikke dimensjonert for den fulle trafikkmengden fra nasjonale brukere.</p>



<p><b>Operatør:</b> <b>Tele2</b>  Dato: 1.-2. november  Varighet: 23:00 - 05:25  Berørte forbindelser: Alle forbindelser knyttet til Netcoms RAN  Pakketap: 100%  Kommentar: 41% av de berørte forbindelsene mistet sin PDP kontekst under feilen, mens de øvrige beholdt sin IP-adresse men kunne ikke sende eller motta data. Feilen berørte kun Tele2-forbindelser knyttet til Netcoms RAN, og Tele2 har i etterkant bekreftet at feilen skyldtes feil i en komponent i forbindelsen mellom disse to nettverkene.</p>
<p><b>Operatør:</b> <b>Ice</b>  Dato: 12. november  Varighet: 02:30 - 02:50 og 03:25 - 03:35  Berørte forbindelser: Alle forbindelser i Trondheimsområdet  Pakketap: 100%  Kommentar: Denne hendelsen er mindre enn de andre vi omtaler her, men spesiell fordi den er en av de få der vi ser et større utfall i et begrenset geografisk område. Tidspunktet for hendelsen kan tyde på at utfallet skyldes en serviceoperasjon hos Norkring, som leverer transmisjon til Ice sin basestasjon.</p>
<p><b>Operatør:</b> <b>Netcom</b>  Dato: 4. desember  Varighet: 00:15 - 04:30  Berørte forbindelser: 40%.  Pakketap: 100%  Kommentar: De berørte forbindelsene var spredt over hele landet, noe som tyder på en feil i en sentral komponent. Tidspunktet tyder på at feilen er knyttet til en serviceoperasjon.</p>
<p><b>Operatør:</b> <b>Tele2</b>  Dato: 10. desember  Varighet: 19:00 - 20:30  Berørte forbindelser: Alle  Pakketap: 100%  Kommentar: Alle forbindelsene var nede i 1,5 timer. Så godt som alle forbindelser kom tilbake samtidig.</p>

## 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. Vi ser 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

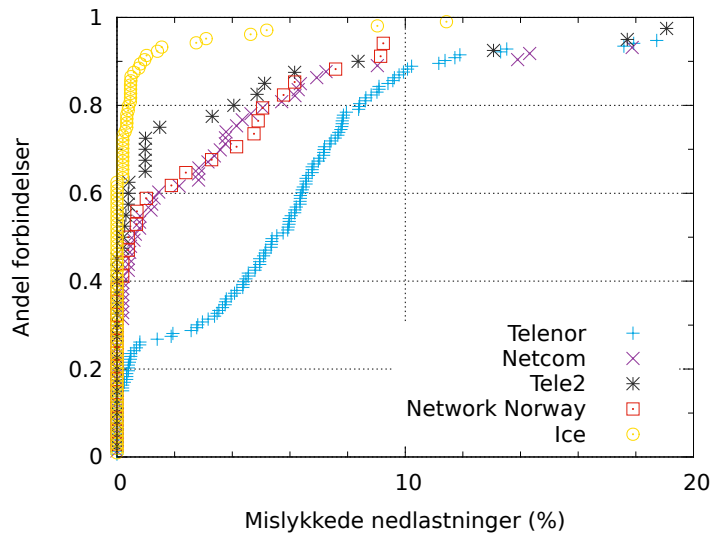
Vi rapporterer resultater fra en enkel test der vi bruker HTTP GET til å laste ned en fil på 1 MB. Denne testen gjentas hver time i tre uker over alle aktive forbindelser. Dette gir opp til 504 repetisjoner per forbindelse. For hver repetisjon noterer vi hvorvidt nedlastingen kunne fullføres, hvor lang 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.

**Feilrate for nedlastinger.** Figur 7.1 viser andelen mislykkede nedlastingsforsøk for hver forbindelse<sup>1</sup>. Vi observerer at Telenor har en vesentlig høyere feilrate enn de andre operatørene. 55% av Telenors forbindelser har en feilrate på over 5%, og 12% har en feilrate over 10%. I gjennomsnitt feiler 7,4% av alle nedlastingsforsøkene hos Telenor. I den andre enden av skalaen finner vi Ice, hvor kun 9% av forbindelsene har en feilrate over 1%. Disse trekker imidlertid gjennomsnittet opp, slik at 1,1% av nedlastingsforsøkene feiler når alle Ice-forbindelser ses under ett.

Feilkodene fra de mislykkede nedlastingsforsøkene, viser at den dominerende feilårsaken i alle operatører unntatt Telenor er at TCP-forbindelsen til serveren ikke kunne opprettes. Ved å sammenholde disse resultatene med pakketapsstatistikken fra kapittel 5, ser vi at disse feilene oppstår i forbindelser og perioder med høyt pakketap. Situasjonen for Telenors forbindelser er imidlertid annerledes. For disse avbrytes nedlastingen *etter* at forbindelsen er opprettet i 74% av feiltilfellene. Denne typen feil forklarer den observerte forskjellen i feilrate mellom Telenor og de andre operatørene. Nærmere inspeksjon viser at disse feilene oppstår når radiotilstanden til forbindelsen ikke kan oppgraderes

<sup>1</sup>Figuren leses som at "y forbindelser har en feilrate på mindre enn x%".



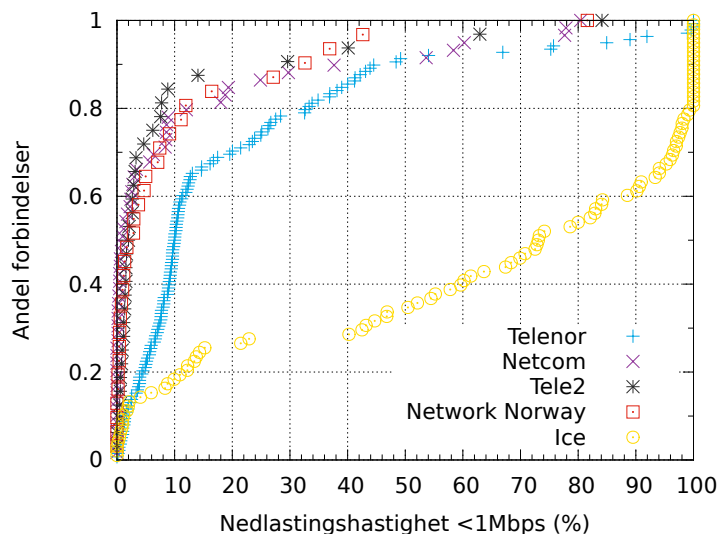
Figur 7.1: Mislykkede forsøk på nedlasting

fra CELL\_FACH til CELL\_DCH. Nedlastingen vil normalt utløse en slik oppgradering. Når dette ikke skjer som normalt, reagerer modemmet med å resette forbindelsen, og nedlastingen feiler. Vi ser klare døgnvariasjoner i forekomsten av denne typen feil; de forekommer hyppigere på tidspunkter med mer trafikk i nettverket. Dette gjør det naturlig å tro at de er relatert til kapasitetsbegrensninger i nettverket.

**Stabilitet i båndbredde.** Figur 7.2 viser andelen vellykkede nedlastinger som oppnådde en gjennomsnittlig båndbredde på minst 1 Mbps for hver forbindelse<sup>2</sup>. Kun 3G-forbindelser er inkludert i denne figuren, siden 2G-forbindelser aldri oppnår denne hastigheten.

Hos Netcom, Tele2 og Network Norway oppnår de fleste forbindelsene en stabil ytelse over den valgte grenseverdien. 50-55% av disse forbindelsene oppnår over 1 Mbps i minst 98% av forsøkene, og 77-85% av forbindelsene i 90% av forsøkene. Telenor oppnår sjeldnere denne båndbredden - kun 10% av forbindelsene oppnår 1 Mbps i 98% av forsøkene, og 50% i 90% av forsøkene. Vi tror denne forskjellen skyldes at Telenor har høyere tapsrate enn de andre operatørene (se kapittel 5), og at denne tapsraten i kombinasjon med TCPs metningskontroll gir en lavere effektiv båndbredde. Merk at Telenorabonnementene brukt i målingene har en innbakt begrensning i hastighet på 4 Mbps. Vi kjenner ikke detaljene i hvordan denne begrensningen er implementert, men finner ikke grunn til å tro at denne begrensningen er hovedårsaken til at vi sjeldnere oppnår en båndbredde på 1 Mbps. Ice oppnår gjennomgående lavere båndbredde enn UMTS-operatørene. 20% av Ice sine forbindelser oppnår aldri 1Mbps, og kun 19% oppnår denne båndbredden i minst 90% av forsøkene. Merk imidlertid at de fleste av modemene brukt i våre målinger kun støtter Rev A versjonen av

<sup>2</sup>Figuren leses som at "y% av forbindelsene oppnådde mindre enn 1Mbps i opptil x% av forsøkene".



Figur 7.2: Andel nedlastinger med lavere båndbredde enn 1 Mbps

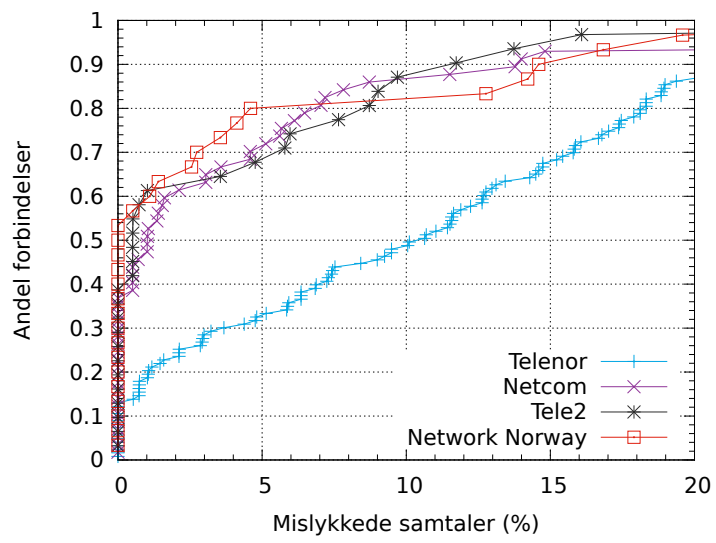
datastandarden som brukes i Ice sitt nett, og ikke den nyere Rev B. Det er derfor grunn til å tro at de reelle tallene for Ice ligger noe høyere enn vist i figur 7.2.

## 7.2 IP-telefoni

Applikasjoner som Skype og Viber bidrar til at IP-telefoni (VoIP) er i ferd med å bli en populær applikasjon i mobile bredbåndnett. For å evaluere mobilnettets 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 PBX<sup>3</sup> 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 en uke, noe som gir oss 168 samtaler per forbindelse. Igjen har tekniske utfordringer med modemmet gjort at Ice ikke er inkludert i dette eksperimentet.

For hver måling noterer vi hvorvidt samtalen kunne etableres og fullføres normalt. Figur 7.3 viser andelen samtaler som ikke kunne fullføres. Forbindelsene fra Telenor har en høyere andel mislykkede samtaler enn forbindelser fra de andre operatørene. 30% av Telenors forbindelser har en feilrate over 15%, sammenlignet med kun 4% av Tele2 sine forbindelser. Som for HTTP-målingen beskrevet over, ser vi forskjeller i typen feil mellom operatørene. 34% og 21% av feilene i henholdsvis Netcom og Tele2 skjer under etableringen av samtalen (SIP INVITE feiler). Tilsvarende tall for Telenor og Network Norway er 13% og 15%. De resterende feilene skjer ved at forbindelsen brytes underveis i samtalen. Vi tror den underliggende grunnen er den samme som for HTTP-målingen

<sup>3</sup><http://www.asterisk.org/>



Figur 7.3: Andel mislykkede VoIP-samtaler

beskrevet over.

## 8. Øket robusthet gjennom multihoming

Så langt i denne rapporten har vi fokusert på opplevd robusthet i hver operatør for seg selv. I dette kapitlet ser vi på avhengigheter mellom de ulike nettverkene. Ved å se på korrelasjoner i feilmønstre mellom operatører, kan vi også si noe om potensialet for øket robusthet gjennom å koble seg til flere operatører samtidig. Dersom forbindelser fra de ulike operatører feiler stort sett samtidig sett fra en målenode, vil det være lite å vinne på slik *multihoming*. Resultatene presentert i dette kapitlet viser imidlertid det motsatte: det er ofte stor grad av uavhengighet i feilmønstre. Dette betyr at det er et stort potensiale for øket robusthet gjennom å utnytte ressurser fra flere nett.

Vår diskusjon fokuserer på korrelasjon mellom operatørene innen tre viktige områder: signalforhold, nedetid og pakketap.

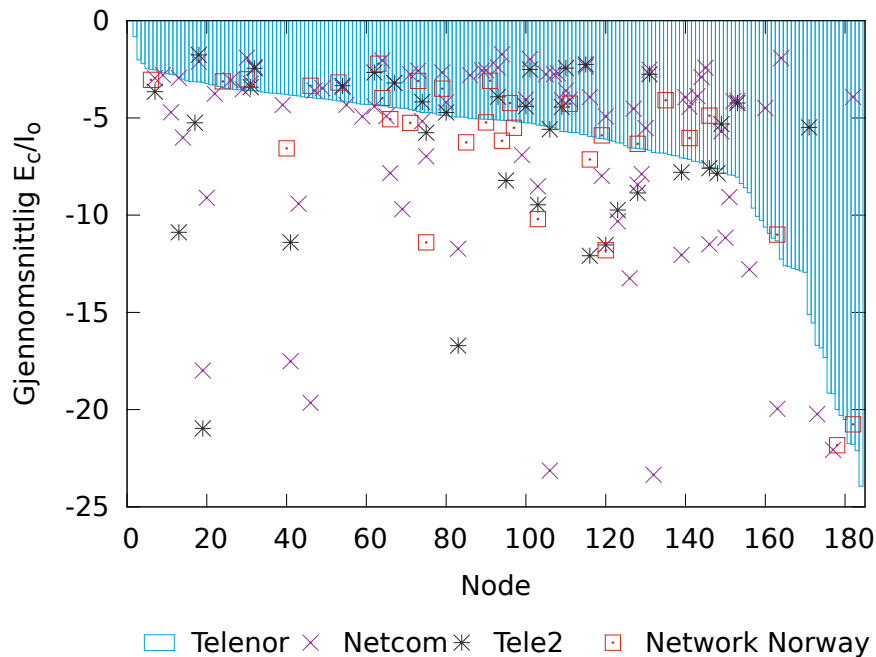
### 8.1 Korrelasjon i signalforhold

Vi ser først på hvor like eller ulike de ulike operatørene er med tanke på signal-kvalitet på en gitt lokasjon. Våre målenoder er distribuert over hele landet, men en hovedvekt på sentrumsnære lokasjoner i små og store tettsteder og byer. Vi mener at denne fordelingen gir et rimelig bilde av innendørsdekningen man kan forvente hos hver operatør, selv om resultatene kan være noe annerledes utenfor tettsteder. Som et mål på signalforholdene velger vi å fokusere på  $E_c/I_o$ , som er et mål for signal-til-støyforholdet i UMTS-nettverk. Siden vi kun har måledata fra UMTS-operatørene, begrenses vår diskusjon til disse.

Figur 8.1 viser gjennomsnittlig  $E_c/I_o$  for alle UMTS-forbindelser i vårt datasett. Verdiene er gjennomsnittsverdier for hele måleperioden (for de fleste forbindelsene varierer denne verdien lite). Målenodene er sortert etter  $E_c/I_o$ -verdien for Telenorforbindelsene, siden nesten alle målenodene har en slik forbindelse. Verdier for de andre operatørene er markert der de er tilgjengelige. Som diskutert i kapittel 4 sier vi at en forbindelse har gode signalforhold når de har en  $E_c/I_o$  over -8dBm, og dårlige signalforhold når  $E_c/I_o$  er lavere enn -15dBm.

Figuren viser at det er begrenset korrelasjon i dekning mellom operatørene. Sagt med andre ord: dersom for eksempel Telenor har dårlige signalforhold på en lokasjon, sier det lite om hva slags signalforhold Netcom har på den samme lokasjonen. I de fleste tilfeller vil det være slik at når en operatør har dårlige signalforhold, vil en annen operatør ha akseptable forhold. Vi observerer at Network Norway ofte har en  $E_c/I_o$  omtrent lik Telenor, og det samme gjelder Tele2 og Netcom. Dette er forventet, gitt den nasjonale gjestingen mellom disse operatørene.

For å kvantifisere observasjonene over, har vi beregnet Pearson korrelasjons-



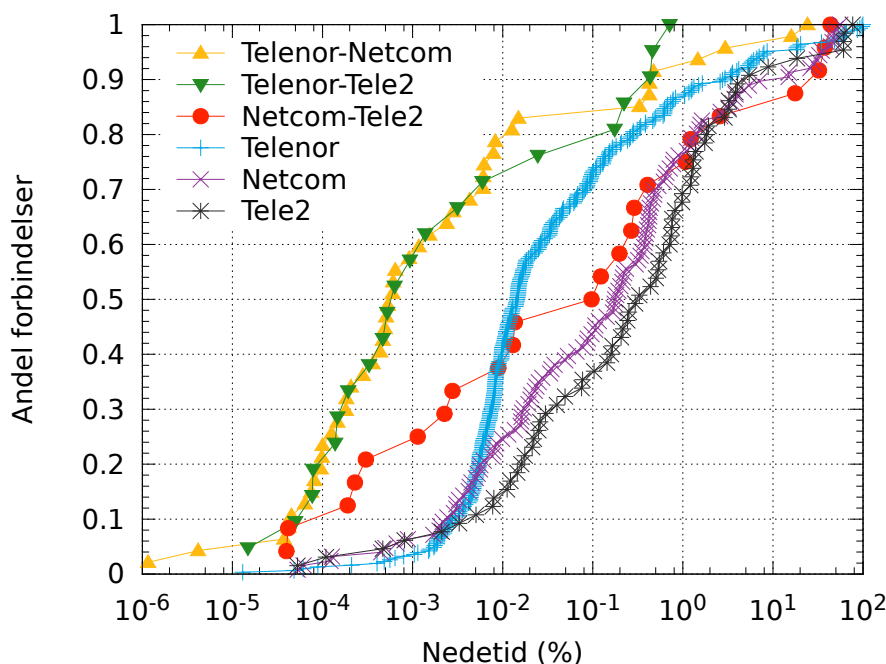
Figur 8.1: Korrelasjon i signalforhold

koeffisienten for hvert par av operatører. Dersom koeffisienten for et par av operatører er 0, er det ingen sammenheng mellom de målte verdiene. En koeffisient på 1 betyr at verdiene følger hverandre perfekt, mens en verdi på -1 betyr perfekt negativ korrelasjon. For operatørene som ikke deler RAN er korrelasjonskoeffisienten mellom -0,04 (Telenor/Tele2) og 0,32 (Telenor/Netcom), som betyr liten eller ingen korrelasjon. For operatørene som ofte deler RAN er korrelasjonen høyere; 0,62 for Netcom/Tele2 og 0,88 (Telenor/Network Norway). Disse observasjonene er positive i et robusthetsperspektiv, siden de indikerer at det er et betydelig potensiale for mer stabil signalkvalitet dersom man kan utnytte flere nett parallelt.

## 8.2 Korrelasjon i nedetid

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 8.2 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 ikke nok datapunkter til å inkludere de øvrige kombinasjonene av forbindelser.



Figur 8.2: Korrelasjon i nedetid

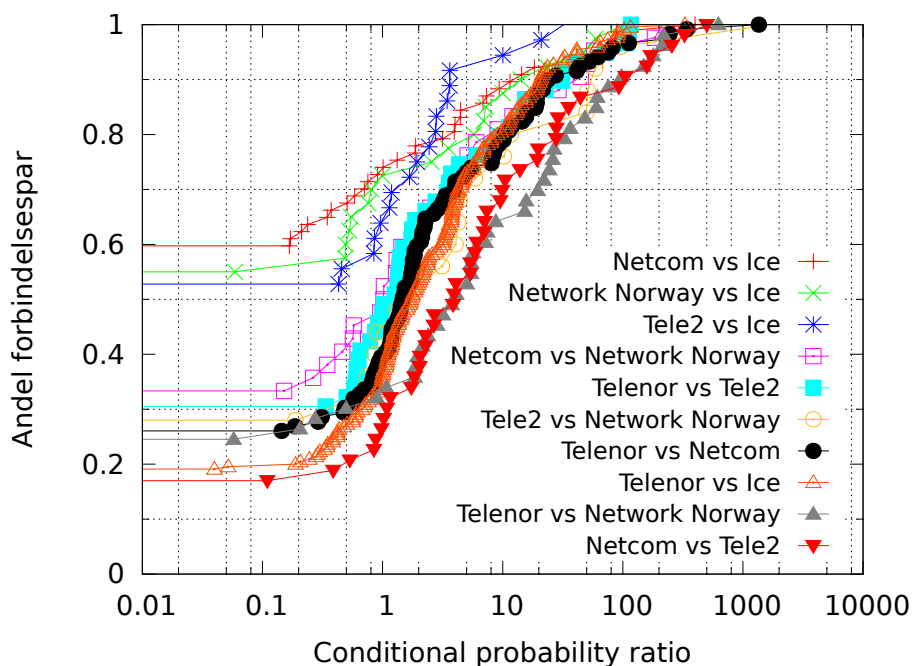
Figuren viser at nedetid kan reduseres betydelig ved å koble to forbindelser. Kombinasjonene Telenor/Netcom og Telenor/Tele2 kan potensielt gi five nines<sup>7</sup> (99,999%) oppetid fra nær 60% av målenodene. Svær få enkeltforbindelser (3% for Telenor, 6% for Netcom og Tele2) oppnår en slik oppetid alene. For de aller fleste målnoder reduseres nedetiden med over 90% ved å kombinere forbindelser fra Telenor/Netcom eller Telenor/Tele2. Dette viser det store potensialet for øket robusthet gjennom multihoming.

Kombinasjonen Netcom/Tele2 gir en begrenset gevinst i form av redusert nedetid, siden disse forbindelsene ofte deler RAN. 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 8.2. Som vi skal se i neste avsnitt viser Ice stor uavhengighet i pakketap.

### 8.3 Korrelasjon i pakketap

For å beregne korrelasjon i pakketap tar vi utgangspunkt i de samme 5-minutters intervallene beskrevet i kapittel 5. La  $P(A)$  betegne den (empiriske) sannsynligheten for at forbindelse  $A$  har mer enn 10% pakketap i et gitt 5-minutters intervall, og  $P(B)$  være det samme for en annen forbindelse  $B$  fra den samme målnoden. Fra målingene beregner vi også den betingede sannsynligheten  $P(A|B)$  for at  $B$  opplever over 10% pakketap gitt at  $A$  gjør det. Vi sammenligner den betingede sannsynligheten  $P(A|B)$  med den ubetingede sannsynligheten





Figur 8.3: Korrelasjon i pakketap

$P(A)$  ved å beregne sannsynlighetsforholdet  $R = P(A|B)/P(A)$ . Dette forholdet sier noe om hvor mye sannsynligheten for høyt pakketap i en forbindelse øker (eller minker) dersom vi vet at en annen forbindelse fra samme målnode opplever høyt pakketap. Dersom  $R$  er nær 1, er det liten sammenheng i pakketap mellom de to forbindelsene. Dersom  $R$  er høy, er avhengigheten høy. Merk at fra Bayes setning har vi at  $P(A|B)/P(A) = P(B|A)/P(B)$ , slik at avhengigheten er den samme begge veier.

Figur 8.3 viser  $R$  for alle par av forbindelser fra samme målnode, delt inn i operatørpar. Merk at i noen tilfeller er antallet intervaller der to forbindelser har høy pakketap samtidig svært lavt. Vi skal derfor være forsiktige med å trekke for sterke konklusjoner basert på denne figuren. En del observasjoner er likevel tydelige.

Forbindelser fra ulike operatører er ikke helt uavhengige. For mellom 30 og 60 % av forbindelsesparene blir sannsynligheten for høyt pakketap i forbindelse  $A$  mer enn doblet når forbindelse  $B$  opplever høyt pakketap. For mellom 5 og 30% av parene blir sannsynligheten minst tidoblet.

Det er imidlertid store forskjeller mellom operatørpar. Den sterkeste avhengigheten finner vi som forventet for Netcom/Tele2 og Telenor/Network Norway. Minst avhengighet finner vi mellom Ice og de andre operatørene. Dette er ikke overraskende, siden Ice opererer på helt andre frekvenser enn UMTS-operatørene, med en annen teknologi, og en annen kundeprofil (og dermed trafikkprofil).

## Bibliografi

- [1] Sårbarhetsanalyse av mobilnettene i norge. Technical Report 1, Post- og Teletilsynet, Januar 2012.
- [2] Marnix Dekker, Chistoffer Karsberg, and Matina Lakka. Annual incident reports 2012. Technical report, ENISA, August 2013.
- [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] H. Holma and A. Toskala. *WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE*. John Wiley & Sons Ltd., 4th edition, 2007.
- [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.





[www.simula.no](http://www.simula.no)