

Er trådløse byer basert på Wi-Fi en trussel for fastnett- og mobilleverandørene og i tilfelle hvilken innvirkning vil de ha?

Sverre Winsnes Rødland

Master i kommunikasjonsteknologi

Oppgaven levert: Juni 2007

Hovedveileder: Jan Arild Audestad, ITEM

Biveileder(e): Thomas Jelle, Trådløse Trondheim

Oppgavetekst

Det planlegges og bygges flere trådløse byer basert på Wi-Fi rundt i verden. Hvordan vil slike utbygginger påvirke inntektsstrømmene til fastnett- og mobilleverandørene? For å kunne vurdere innvirkningen må en ha gode modeller for å kunne predikere innendørsdekningen av slike nettverk.

Oppgaven omfatter målinger og innsamling av erfaringsdata fra Trådløse Trondheim med hensyn på dekning og benytte disse dataene til å etablere modeller for innendørsdekning. Deretter skal en vurdere hvilken forretningsmessig innvirkning trådløse bynett vil ha på inntektsstrømmene til fastnett- og mobilleverandørene.

Oppgaven gitt: 17. januar 2007
Hovedveileder: Jan Arild Audestad, ITEM

Sammendrag

Det planlegges og bygges flere trådløse byer basert på Wi-Fi rundt i verden. Trådløse Trondheim er et foregangsprosjekt for denne teknologien, og store deler av Trondheim sentrum er i dag tilrettelagt for trådløs nettverksaksess. Dekningsområdene er i første omgang planlagt og bygd ut for utendørs bruk, og kjennskapen til hvor godt radiosignalene også trenger inn i omkringliggende bygninger har til nå vært begrenset. Denne masteroppgaven retter derfor fokus mot innendørsdekning, hvor det forsøkes å kartlegge hvor stor andel av boligene i Trondheim sentrum som kan dra nytte av det trådløse bynettverket. På bakgrunn av resultatene, diskuteres det om trådløse byer kan være en trussel for fastnett- og mobilleverandørene, og i tilfelle hvilken innvirkning de vil ha.

Målingsarbeidet bestod av to deler. Del 1 innebar å velge 50 tilfeldige lokasjoner spredd utover hele dekningsområdet til Trådløse Trondheim. Del 2 tok for seg ett kvartal i Midtbyen, hvor det ble gjort 17 målinger tett inntil hverandre. På samtlige lokasjoner ble det målt signalstyrke, signal-til-støy forhold og båndbredde. Resultatene fra de tilfeldige målingene antas mest representative, siden utvalget av lokasjoner var størst i denne delen. Her ble det oppnådd en dekningsgrad på cirka 60 %. 40 % av lokasjonene hadde enten null dekning eller for flakkende signalforhold til å opprettholde en stabilt god tilkobling.

Alle målingene ble utført i et rom i første etasje, nært et vindu vendt mot dekningsområdene utendørs. Basert på dette og avhengig av bruksområde, kan resultatene sies å være både optimistiske og pessimistiske med tanke på Trådløse Trondheims dekningsgrad. For en typisk fast aksessform i private boliger, kan forholdene optimaliseres ved en slags hjemmenettkonfigurasjon. Dette innebærer oppsett av en intern antenne- og "gateway"-løsningen på et sted med god dekning, og opprettholde dekningsgraden i hele huset gjennom et lokalt nettverk. For nomadisk og mobil aksess innendørs, er en slik løsning lite hensiktsmessig. Resultatene fra målingsarbeidet antas derfor å være optimistiske, fordi man ved bevegelse rundt i boligen generelt vil oppleve dårligere signalforhold enn nær vinduet.

Til tross for at den økonomiske trusselen er størst ovenfor mobilleverandørene, tyder resultatene på at trådløse bynettverk kan ha størst forretningsmessig innvirkning på fastnettleverandørene. Så lenge tilfredsstillende dekning oppnås, kan Wi-Fi tilby samme funksjonalitet som tradisjonell fast aksess. I tillegg kan trådløse bynettverk supplere brukeren med muligheter for nomadisk aksess. I forhold til mobil aksess, anses både den overordnede dekningsgraden og talekvaliteten, fra tester gjort i Trådløse Trondheim, på at trådløse bynettverk ikke kan betraktes som et alternativ til dagens mobiltelefonisystemer. Å benytte Wi-Fi som en utvidelse av 3G, for å tilby høyere kapasitet for datatjenester, kan derimot være en god løsning.

Forord

Denne masteroppgaven ble skrevet vårsemesteret 2007 som avslutning på det femårige sivilingeniørstudiet i kommunikasjonsteknologi ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim. Arbeidet er utført på instituttet for telematikk og i samarbeid med prosjektgruppen Trådløse Trondheim.

Jeg vil rette en stor takk til veileder Thomas Jelle, for kyndig og inspirerende veiledning under hele arbeidet. Jeg vil også takke faglærer Jan A. Audestad, for gode innspill om hva jeg bør vektlegge i oppgaven.

Trondheim, 6. juni 2007

Sverre Winsnes Rødland

Innhold

Figurer	viii
Tabeller	x
Forkortelser	xi
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	1
1.3 Avgrensninger	2
1.4 Oppbygning	2
2 Bredbånd	3
2.1 Aksessmetoder	3
2.1.1 xDSL	3
2.1.2 Kabel-modem	4
2.1.3 Leide linjer	4
2.1.4 Radioaksess	4
2.1.5 Optisk fiber	6
2.2 Bredbåndstilstand	7
3 Telefoni	9
3.1 Mobiltelefoni	9
3.1.1 GSM	10
3.1.2 3G	11
3.2 IP-telefoni	11
4 Wi-Fi	13
4.1 OSI-modellen	14
4.2 IEEE 802.11	15
4.2.1 MAC-laget	17
4.2.2 Det fysiske laget	17
5 Trådløse Trondheim	19

5.1	Infrastruktur	20
5.2	Dekningsområder	21
5.3	Utstyr	21
5.4	Tjenester	21
6	Signalstyrke og støy	23
6.1	Signalstyrke	23
6.2	Signalkvalitet	24
6.3	Signal-til-støy forhold	24
6.4	Mottakerfølsomhet	25
7	Testplan	27
7.1	Del 1 - Tilfeldig utvalg av bygninger	27
7.2	Del 2 - Teppemåling i ett kvartal	29
7.3	Måleprosedyrer	29
7.3.1	Signalstyrke, SNR og teoretisk båndbredde	30
7.3.2	Reell båndbredde	31
7.4	Testkriterier	32
7.5	Tidsrom for målinger	34
7.6	Utstyr	35
8	Resultater	37
8.1	Del 1 - Tilfeldig utvalg av bygninger	38
8.1.1	Signalstyrke, SNR og teoretisk båndbredde	38
8.1.2	Reell båndbredde	42
8.2	Del 2 - Teppemåling i ett kvartal	44
8.2.1	Signalstyrke, SNR og teoretisk båndbredde	44
8.2.2	Reell båndbredde	49
8.3	Sammenligning	51
8.4	Støy	54
8.5	Taletrafikk	55
8.5.1	Minimumskrav for signalstyrke og SNR	55
8.5.2	Talekvalitet	57
8.6	Generelle erfaringer fra målingsarbeidet	59
9	Diskusjon og tolkning av resultater	61
9.1	Fast aksess	61
9.2	Nomadisk og mobil aksess	63
10	Innvirkning på fastnett- og mobilleverandørenes inntektsstrømmer	65
10.1	Kommunikasjon	65
10.1.1	Fastnett	66
10.1.2	Mobiltelefoni	66
10.1.3	Automatisk måleravlesning	67

<i>INNHold</i>	vii
10.2 Forretningsmessig trussel	68
10.3 Kostnader	72
11 Konklusjon og fremtidig arbeid	75
11.1 Konklusjon	75
11.2 Fremtidig arbeid	76
Bibliografi	77
A Posisjonsdata for målinger	81
B Elektroniske vedlegg	84

Figurer

2.1	Optimal kombinasjon av båndbredde, rekkevidde og antenestørrelse i forhold til frekvens [3]	5
2.2	Det elektromagnetiske spektrum [4]	5
2.3	Antall bredbåndsabonnement i Norge per 31/12 2001-2006	7
3.1	Antall abonnement og årlige vekstrater for fast- og mobiltelefoni [2] .	10
3.2	Karikatur av bredbåndstelefoner	12
4.1	Grunnleggende komponenter i WLAN	14
5.1	Infrastruktur for trådløst bynettverk [20]	20
6.1	Signal-til-støy nivå [14]	25
7.1	Utsnitt av kart med markerte lokasjoner for tilfeldige målinger	28
7.2	Utvalgt kvartal for teppemåling	29
7.3	Eksempler på døgnprofiler i telenettet (hverdag) [26]	34
8.1	Målingsdata for signalstyrke (50 tilfeldige lokasjoner)	38
8.2	Målingsdata for SNR (50 tilfeldige lokasjoner)	39
8.3	Målingsdata for signalstyrke og SNR (50 tilfeldige lokasjoner)	40
8.4	Gjennomsnittlig SNR og SNR- (50 tilfeldige lokasjoner)	41
8.5	Normalfordeling for SNR-verdier (50 tilfeldige lokasjoner)	42
8.6	Målingsdata for båndbredde, opplink (30 tilfeldige lokasjoner)	43
8.7	Målingsdata for båndbredde, nedlink (30 tilfeldige lokasjoner)	43
8.8	Målingsdata for signalstyrke (teppemåling, 17 lokasjoner)	45
8.9	Målingsdata for SNR (teppemåling, 17 lokasjoner)	46
8.10	Målingsdata for signalstyrke og SNR (teppemåling, 17 lokasjoner)	47
8.11	Gjennomsnittlig SNR og SNR- (teppemåling, 17 lokasjoner)	48
8.12	Normalfordeling for SNR-verdier (teppemåling, 17 lokasjoner)	49
8.13	Målingsdata for båndbredde, opplink (teppemåling, 9 lokasjoner)	50
8.14	Målingsdata for båndbredde, nedlink (teppemåling, 9 lokasjoner)	50
8.15	Sammenligning av signalstyrke	51
8.16	Sammenligning av SNR	52

8.17	Sammenligning av SNR-	52
8.18	Sammenligning av normalfordelinger for SNR-verdier	53
8.19	Normalfordelinger for støynivå	55
8.20	Målingsdata kategorisert etter minimumskrav for tale (50 tilfeldige lokasjoner)	56
8.21	Målingsdata kategorisert etter minimumskrav for tale (teppemåling, 17 lokasjoner)	56
8.22	Måling av MOS-estimat for VoIP-samtaler med bærbare PCer [28]	58
8.23	Måling av MOS-estimat for VoIP-samtaler med mobile terminaler [28]	58
9.1	Oppsett for internt, trådløst hjemmenett knyttet mot trådløst bynett [30]	62
10.1	Total omsetning i telesektoren i millioner norske kroner eksklusive merverdiavgift [2]	69
10.2	Redusert månedlig fortjeneste for fastnettleverandør ved tap av marked-sandeler til Trådløse Trondheim	72

Tabeller

4.1	OSI-modellen og IEEE 802.11	15
4.2	IEEE 802.11-standarder	16
7.1	Krav til testmiljø	30
7.2	Minimumskrav til signalstyrke og SNR for data og tale	32
7.3	Eksempel på resultat fra én måling av signalstyrke og SNR	33
8.1	Fordeling av SNR-verdier (50 tilfeldige lokasjoner)	41
8.2	Fordeling av SNR-verdier (teppemåling, 17 lokasjoner)	48
8.3	Fordeling for støynivå	54
8.4	MOS-skala for talekvalitet	57
10.1	Kalkulering av redusert fortjeneste for fastnettleverandør ved tap av kundemasse til Trådløse Trondheim	71
10.2	Investeringskostnader for Trådløse Trondheim i Midtbyen	73
A.1	Posisjonsdata for tilfeldige målinger	81
A.2	Posisjonsdata for teppemåling	83

Forkortelser

- SNR** “Signal to Noise Ratio”
- RSSI** “Received Signal Strength Indicator”
- PN** “Pseudo Noise”
- FHSS** “Frequency-Hopping Spread Spectrum”
- DSSS** “Direct-Sequence Spread Spectrum”
- OFDM** “Orthogonal Frequency-Division Multiplexing”
- IEEE** “Institute of Electrical and Electronics Engineers”
- WLAN** “Wireless Local Area Network”
- LAN** “Local Area Network”
- NTNU** Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
- NDT** “Network Diagnostic Tool”
- TCP** “Transmission Control Protocol”
- DSL** “Digital Subscriber Line”
- ADSL** “Asymmetric Digital Subscriber Line”
- FoU** Forsknings- og utviklingsarbeid
- PDA** “Personal Digital Assistant”
- OSI** “Open System Interconecion”
- ISO** “International Standards Organization”
- LLC** “Logical Link Control”
- MAC** “Medium Access Protocol”
- CSMA/CA** “Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance”
- ACK** “acknowledgement”
- P2P** “Peer-to-Peer”
- PSTN** “Public Switched Telephone Network”

ISDN “Integrated Services Digital Network”

TP “twisted pair”

FTTH “Fiber-to-the-Home”

GSM “Global System for Mobile Communications”

VPN “Virtual Private Network”

TDMA “Time Division Multiple Access”

FDD “Frequency Division Duplex”

GPRS “General Packet Radio Service”

EDGE “Enhanced Data Rates for Global Evolution”

3G “Third Generation”

ITU “International Telecommunication Union”

IMT “International Mobile Telecommunications”

3GPP “Third Generation Partnership Project”

3GPP2 “Third Generation Partnership Project 2”

UMTS “Universal Terrestrial Radio Access”

IP “Internet Protocol”

VoIP “Voice over Internet Protocol”

QoS “Quality of Service”

VoWLAN “Voice over Wireless Local Area Network”

SMS “Short Message Service”

MMS “Multimedia Messaging Service”

MOS “Mean Opinion Score”

ITU-T “International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector”

Kapittel 1

Innledning

1.1 Bakgrunn

Det planlegges og bygges flere trådløse byer basert på Wi-Fi rundt i verden. Trådløse Trondheim er i den sammenheng et foregangsprosjekt, og i skrivende stund, våren 2007, er store deler av Trondheim sentrum tilrettelagt for trådløs nettverksaksess. Dekningsområdene er planlagt og bygd ut for å tilby aksess for diverse trådløse terminaler utendørs. Hvor godt omkringliggende boliger kan dra nytte av dette bynettverket er derimot et forskningsområde hvor lite arbeid har blitt utført tidligere. Denne masteroppgaven retter derfor fokus mot innendørsdekning, og forsøker å formidle status for Trådløse Trondheims dekningsgrad og trådløse byers potensielle innvirkning på eksisterende fastnett- og mobilleverandører.

1.2 Problemstilling

Problemstillingen i oppgaven er i første omgang kartlegging av Trådløse Trondheims dekningsgrad innendørs. Dette innebærer et grundig målingsarbeid på et utvalg lokasjoner i Trondheim sentrum. Ved etablering av gode modeller, er formålet videre å avdekke hvor stor andel av boligene i området som opplever tilfredsstillende god nok innendørsdekning til å kunne dra nytte av Trådløse Trondheim.

Basert på resultatene, diskuteres det hvordan trådløse bynettverk kan påvirke inntektsstrømmene til fastnett- og mobilleverandørene. Fokus rettes primært mot fastnett-leverandørene, siden det er dette feltet som hovedsaklig underbygges av målingene. Det forsøkes ikke å belyse hvor godt Wi-Fi terminaler håndterer mobilitet. Likevel diskuteres det hvilken funksjonalitet Wi-Fi tilbyr brukerne, økonomiske aspekter og trusselen trådløse byer utgjør overfor dagens teleoperatører.

1.3 Avgrensninger

Samtlige målinger blir gjort innendørs i en typisk fastnettsituasjon. Her er det kartlegging av dekning som er hovedfokus for målingsarbeidet. Det blir ikke gjort noen forsøk for å indikere hvor godt mobilitetsaspekter håndteres.

Det gjøres ingen systematisering av målingene med hensyn på hvor godt signaler trenger gjennom ulike typer vegger, som for eksempel tre, mur og glass. Det forsøkes i stedet å tilstrebe en mer tilfeldig karakter for utvalget av lokasjoner. Dette antas å gi en vel så god representasjon av Trådløse Trondheims totale dekningsgrad.

Alle målingene gjøres med to bærbare datamaskiner. Det blir ikke testet hvor godt ulike antenner og trådløse nettverkskort mottar signaler.

Det gjøres ingen konkrete beregninger på inntekspotensialet til Trådløse Trondheim og andre trådløse byer. Det gjøres derimot beregninger på hvor mye en eksisterende fastnettleverandør kan få redusert sin fortjeneste ved tap av markedsandeler til trådløse bynettverk. På en indirekte måte, vil således også inntektsgrunnlaget belyses.

Diskusjonen rundt trådløse byers forretningsmessige potensiale er, hvor annet ikke er påpekt, rettet mot privatmarkedet. Selv om en stor andel av målingene gjøres i lokalene til såkalte offentlige virksomheter, omtales ikke bedriftsmarkedet ytterligere. Det antas derfor at disse lokasjonene er representative for totalbildet av Trådløse Trondheims dekningsgrad.

1.4 Oppbygning

Første del introduserer eksisterende systemer som trådløse bynettverk kan utøve en trussel ovenfor. Mer konkret vil det si at sentrale elementer innen bredbånds- og telefoniverdenen beskrives. Her inngår også tilstand og utbredelse for de ulike teknologiene.

Videre presenteres Wi-Fi begrepet og de essensielle prinsippene og teknologiene i et trådløst nettverk. Trådløse bynettverk forklares så med Trådløse Trondheim som eksempelnettverk.

Deretter beskrives de viktigste begrepene for å betegne signal- og støyforhold. Disse er sentrale for utarbeidelsen av testplanen, som presenteres i det etterfølgende kapitlet.

Så følger den viktigste delen, hvor resultatene fra målingsarbeidet presenteres og diskuteres inngående.

På bakgrunn av resultatene, diskuteres til slutt innvirkningen trådløse bynettverk kan ha for fastnett- og mobilleverandørenes inntektsstrømmer.

Kapittel 2

Bredbånd

For å vurdere om trådløse byer kan være en trussel for fastnettleverandørene, er det viktig å ha kjennskap til eksisterende teknologier for fast aksess. I dette kapitlet beskrives derfor ulike former for bredbånds aksessmetoder. Videre presenteres utbredelsen til de ulike aksessmetodene, samt en generell status for bredbåndstilstanden i Norge.

Betegnelsen bredbånd er ikke et spesifikt teknologisk konsept, men brukes i dagligtale og markedsføring for å referere til høyhastighets Internettaksess [1]. Mer konkret vil det si aksessmetoder som tilbyr høyere kapasitet en standard telefonitjenester.

2.1 Aksessmetoder

De mest brukte aksessmetodene for bredbånd i Norge er [2]:

- xDSL
- Kabel-modem
- Leide linjer
- Radioaksess
- Optisk fiber

Disse forklares nærmere i etterfølgende underseksjoner.

2.1.1 xDSL

xDSL er et samlebegrep for familien av “Digital Subscriber Line” (DSL) teknologier, som tilbyr digital dataoverføring over det lokale telefonnettet [1]. Den mest populære typen er “Asymmetric Digital Subscriber Line” (ADSL), som typisk tilbyr høyere

bitrater på nedlinken enn opplinken, derav begrepet asymmetrisk. DSL benytter “twisted pair” (TP)-kabler, tvinna par, som fysisk transmisjonsmedium. Et tvinna par består av to isolerte kobberkabler og kommer i flere varianter. Det vanligste bruksområdet er i telefonnettet. Med DSL har hver enkelt bruker en dedikert linje, fra nærmeste telefonsentral, med en gitt kapasitet. Dersom antall brukere øker, svekkes derfor ikke overføringskapasiteten på de eksisterende brukernes linjer. Kapasiteten inn og ut av sentralen vil derimot belastes mer, og kan således bli en flaskehals. Når det gjelder tilgjengelighet, har så og si alle boliger i dag tilkoblingsmuligheter til ordinære telefonlinjer. DSL-tjenester krever derimot at boligen befinner seg innenfor en viss radius til nærmeste telefonsentral. Ved økt avstand fra endestasjonen synker også tilbudt kapasitet betraktelig.

2.1.2 Kabel-modem

Kabel-modem vil si at man får tilgang til Internett via kabel-TV [1]. For aksess benyttes da en koaksialkabel, som består av en isolert kobberkjerne omsluttet av en beskyttet ytre leder. Den teoretiske kapasiteten til koaksialkabler er flere hundre ganger så stor som TP-kabler, men for et kabel-modem brukes store deler av denne kapasiteten til kabel-TV. Kapasiteten er i tillegg sterkt avhengig av antall brukere som er tilknyttet et kabelsegment. Kapasiteten til eksisterende brukere vil med andre ord reduseres når flere tegner abonnement. Problemet gjelder ikke for tv-sendingene, som kringkastes til samtlige kunder uavhengig av hvor mange som ser på. Løsningen for kabeloperatørene er å splitte overbelastede kabler, men dette er både tidkrevende og dyrt. Avstanden til nærmeste sentral anses derimot ikke som noe problem, så lenge man har tilkoblingsmulighet for kabel-TV.

2.1.3 Leide linjer

Leide linjer vil si at brukerne har en fast aksess gjennom egne leide linjer [2]. Tilbudet er kostbart og er primært rettet mot bedriftsmarkedet. Aksessformen blir ofte kalt overføringskapasitet og blir typisk brukt for dataoverføringer fra salgsteder med betalingsterminaler, eller for overføring av kringkastingssignaler. Leide linjer er i tillegg godt egnet for bedrifter som ønsker å sammenkoble geografisk adskilte lokaliseringer på samme lokalnettverk.

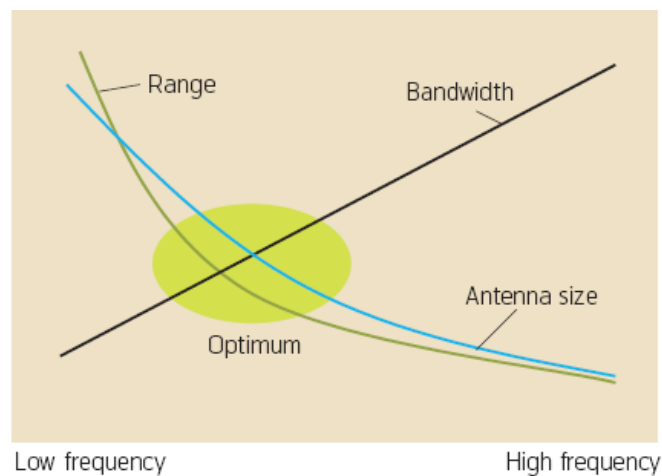
2.1.4 Radioaksess

Radioaksess benytter elektromagnetiske bølger som transmisjonsmedium [1]. Mer konkret vil det si at bølgenes amplitude, frekvens og fase moduleres for å overføre informasjon trådløst. For radiokommunikasjon, er det viktig å bemerke seg følgende fysiske egenskaper [3]:

KAPITTEL 2. BREDBÅND

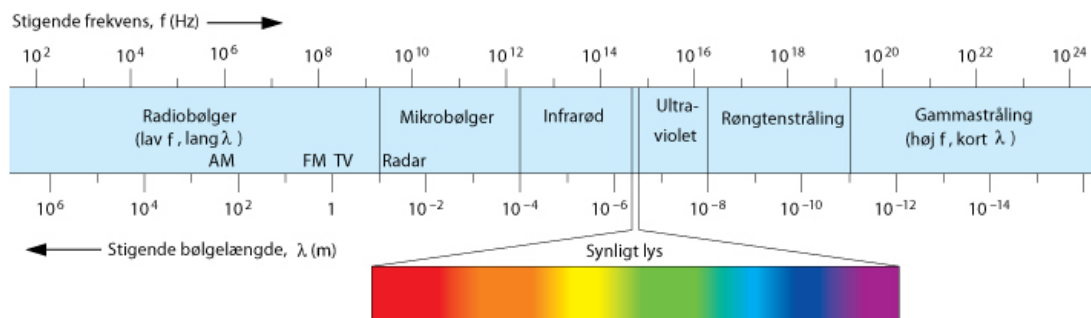
- Lav frekvens gir lenger rekkevidde enn høy frekvens.
- Høy frekvens tilbyr høyere båndbredde enn lav frekvens.
- Lav frekvens krever en fysisk større antenne enn høy frekvens.
- Lav frekvens har bedre penetreringsevne overfor fysiske hindringer, mens høy frekvens krever fri sikt i større grad.

Disse sammenligningene er kun gyldige når samme utstrålte effekt betraktes. Avhengig av bruksområde er det viktig å finne en optimal kombinasjon av de nevnte egenskapene. Dette er illustrert i figur 2.1.



Figur 2.1: Optimal kombinasjon av båndbredde, rekkevidde og antennessørrelse i forhold til frekvens [3]

Radiobølger befinner seg i nedre del, med lavest frekvens og lengst bølgelengde, av det elektromagnetiske spektrum. Dette er illustrert i figur 2.2.



Figur 2.2: Det elektromagnetiske spektrum [4]

Radiobølger har altså forholdsvis lang rekkevidde og god evne til å penetrere bygninger. Bølgene forplanter seg dessuten i alle retninger, slik at posisjonene til sender og mottaker ikke trenger å være finjustert i forhold til hverandre.

Det som tradisjonelt omtales som radiobølger, befinner seg i frekvensområdet opp i mot 1 GHz. Her inngår blant annet kringkasting av tv og radio, samt mobiltelefoni som GSM 900 MHz. Til tross for svært god rekkevidde, er båndbredden i dette spekteret begrenset i forhold til å tilby høy kapasitet for datakommunikasjon. For dette, må man bevege seg inn i spekteret for mikrobølger.

I denne oppgaven fokuseres det derfor på mikrobølger, i frekvensområdet fra 1 GHz til 10 GHz som omtales. Her finnes frekvensbånd som er regulert for ulisensiert bruk [3]. Lisensfrie frekvensbånd kan brukes av hvem som helst, og gjør dermed teknologien mer tilgjengelig. Ulempen er at faren for interferens og støy fra andre radiosendere i samme frekvensbånd øker. Aktuelle teknologier i dette frekvensområdet er eksempelvis GSM 1800/1900, 3G, Blåtann, Wi-Fi og WiMAX, samt potensielle støykilder som mikrobølgeovner og diverse trådløst utstyr.

Mikrobølger i frekvensområdet over 10 GHz er attraktivt for fremtidig trådløst bredbånd [3]. Grunnen til det er at området er relativt lite brukt og kan tilby høy båndbredde. Ulempen er sårbarheten overfor hindringer i signalveien, slik at tilnærmet fri sikt kreves mellom sender og mottaker. Dette gjør at frekvensområdet i dag er mest brukt til satellittsending, radiolinker og andre distribusjonssystemer hvor man kan justere sender og mottaker rettlinjet overfor hverandre.

2.1.5 Optisk fiber

Optisk fiber er mest vanlig i kjerne- og transportnett. Dersom man ønsker svært høy overføringskapasitet er det likevel mulig å benytte fiber i aksessnettet. Løsningen kalles “Fiber-to-the-Home” (FTTH) og er et kostbart alternativ [5]. Som betegnelsen tilsier, vil det altså si at man installerer optisk fiber direkte inn i hjemmet eller i lokalet for annen virksomhet.

Et optisk transmisjonssystem har tre grunnleggende komponenter [1]:

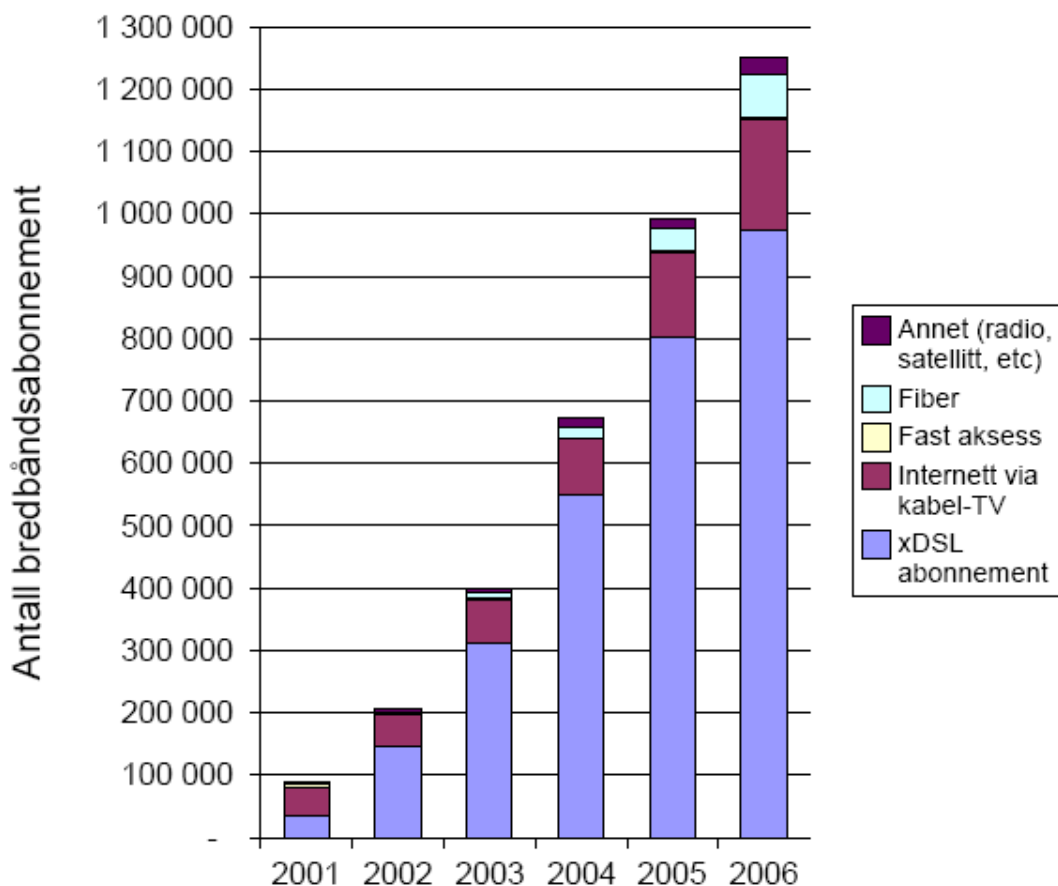
- **Lyskilde**
Genererer lyspulser hvor lys typisk betyr et 1'er bit og fravær av lys betyr 0'er bit.
- **Transmisjonsmedium**
En svært tynn fiber av glass som lyspulsene propagerer gjennom.
- **Detektor**
Detekterer lyspulsene på mottakersiden og genererer en elektrisk puls slik at signalene kan tolkes.

Til sammenligning med kobberkabler, kan optisk fiber tilby vesentlig høyere båndbredde [1]. I tillegg svekkes signalet i mye mindre grad, slik at det er mindre behov for å gjenvinne og forsterke signalet over store avstander. Eksempelvis er det på langdistanselinjer kun behov for en “repeater” hver 50. km med fiber, mens det for kobber trengs hver 5. km.

2.2 Bredbåndstilstand

I Norge er etterspørselen etter bredbåndstjenester i sterk vekst. Samtidig øker både antall operatører og befolkningsandelen som får tilgang til tjenestene. Det finnes ikke lenger norske kommuner uten bredbåndsdekning, og ved utgangen av 2006 var Norge på god vei mot å nå en dekningsgrad på hele 95 % av husstandene i landet [6]. Ved utgangen av 2006 var det totalt 1,12 millioner private bredbåndsabonnementer i Norge [2]. Antall husholdninger i landet var på samme tid 2,037 millioner [7], som tilsier at cirka 55 % av husstandene i Norge har bredbåndstilknytning. Ved utgangen av 2006 var det over 975.000 xDSL abonnementer totalt for både privat- og bedriftsmarkedet, som tilsvarer nesten 80 % av det totale antallet bredbåndsabonnementer i Norge [2].

Figur 2.3 viser fordelingen av de ulike typene bredbåndsabonnementer i Norge de siste seks årene [2]. Diagrammet er basert på tall fra både privatmarkedet og bedriftsmarkedet og viser den totale sammensetningen.



Figur 2.3: Antall bredbåndabonnementer i Norge per 31/12 2001-2006

Kapittel 3

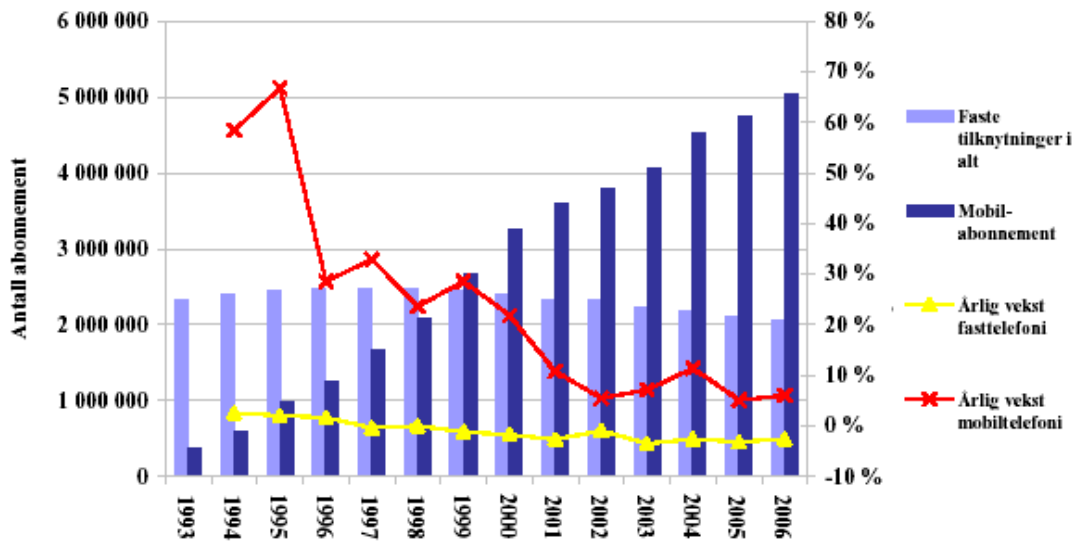
Telefoni

Dette kapitlet omtaler utviklingen innen telefoni og forklarer mobiltelefoni og IP-telefoni mer inngående. Kjennskap til dagens mobiltelefonisystemer er viktig for å vurdere i hvilken grad trådløse bynettverk kan påvirke innteksstrømmene til mobilleverandørene. IP-telefoni er således en potensiell erstatter, men er også aktuelt i en typisk fastnettsammenheng.

Tradisjonell fasttelefoni, “Public Switched Telephone Network” (PSTN)/“Integrated Services Digital Network” (ISDN), beskrives ikke nærmere i dette kapitlet. Begrepene PSTN og ISDN antas å være kjent for leseren.

3.1 Mobiltelefoni

Siden 1999 har det vært flere mobiltelefoniabonnement, inkludert kontantkort, enn antall fasttelefoniabonnement [2]. For fasttelefoni, har antall abonnenter faktisk avtatt siden 1996. Mobiltelefoni har derimot opplevd en sterk vekst den senere tid og antall mobilabonnement som på tradisjonell måte benyttes til tale, utgjør i dag mer enn befolkningstallet i Norge skulle tilsi, hele 104 prosent. Det er altså flere personer som har mer enn ett mobilabonnement og totalt sett mer enn fem millioner abonnement. Denne trenden illustreres i figur 3.1, som viser utviklingen for fasttelefoni og mobiltelefoni i Norge de siste årene i form av antall abonnement og årlig vekst.



Figur 3.1: Antall abonnement og årlige vekstrater for fast- og mobiltelefoni [2]

3.1.1 GSM

“Global System for Mobile Communications” (GSM) er verdens mest utbredte standard for mobiltelefoni [8]. Standarden baserer seg på digital, cellulær teknologi og tilbyr linjesvitsjet kommunikasjon for både tale og data [9]. GSM opererer i tre ulike frekvensbånd: 900 MHz, 1800 MHz og 1900 MHz. Hvert bånd er oppdelt i såkalte par, opp- og nedlink, av radiokanaler. Disse er av størrelsesorden 200 kHz for både opp- og nedlinken. En 200 kHz kanal er igjen oppdelt i 8 tidsluker som kan allokere for trafikk og kontrolldata. Et slikt system kalles “Time Division Multiple Access” (TDMA) med “Frequency Division Duplex” (FDD).

At GSM opererer på relativt lave frekvensbånd, gjør at rekkevidden og signalenes evne til å penetrere fysiske hindringer er forholdsvis god. De fleste kan for eksempel benytte mobiltelefonen uavbrutt når de beveger seg rundt i hjemmet sitt. Disse egenskapene setter samtidig en begrensning for båndbredden som kan tilbys av GSM-systemet, slik det er forklart og illustrert i underseksjon 2.1.4.

For å tilby høyere datarater, ble “General Packet Radio Service” (GPRS) introdusert for å samvirke med GSM over det samme luftgrensesnittet [9]. GPRS benytter pakkesvitsjing og kan tilby en teoretisk datarate på inntil 171 kbps. For ytterligere forbedring av dataratene, har også “Enhanced Data Rates for Global Evolution” (EDGE) blitt tatt i bruk. EDGE benytter det samme luftgrensesnittet, men ved hjelp av en mer effektiv moduleringsform, kan en teoretisk kapasitet på inntil 384 kbps tilbys. Likevel kvalifiserer ikke EDGE til kravene for et såkalt 3G-system, som omtales i underseksjon 3.1.2.

3.1.2 3G

Betegnelsen “Third Generation” (3G) er definert i “International Telecommunication Union” (ITU) spesifikasjonen “International Mobile Telecommunications” (IMT)-2000 [9]. Spesifikasjonen beskriver mobil radioaksess basert på cellulær mobiltelefoni som tillater høyhastighets dataoverføringer. 3G gir med dette rom for multimediamunikasjon i form av tale, data og videotelefoni. Dataratene avhenger av oppholdsted og bevegelse: 144 kbps i kjøretøy, 384 kbps for utendørs gangfart og 2 Mbps i ro innendørs.

Standardiseringsarbeidet med 3G ble etterhvert splittet i to hovedleire, “Third Generation Partnership Project” (3GPP) og “Third Generation Partnership Project 2” (3GPP2) [9]. 3GPP kan sies å være den europeiske leiren og har valgt “Universal Terrestrial Radio Access” (UMTS) som standard. 3GPP2 har størst oppslutning i Nord-Amerika, og fokuserer på CDMA2000 standarden. Til tross for en del forskjeller knyttet til teknologi og infrastruktur, er begge standardene designet for å kunne samvirke med hverandre. Dette innebærer blant annet at de stiller samme krav til totalt 5 MHz spektrum tilgjengelig som kommunikasjonsbærer. Begge standardene er dessuten designet til å kunne operere i ulike frekvensbånd, og kan i prinsippet operere i samme bånd dersom nødvendig spektrum er tilgjengelig.

3.2 IP-telefoni

“Internet Protocol” (IP)-telefoni eller “Voice over Internet Protocol” (VoIP) betegner kommunikasjon, i form av tale, over et pakkesvitsjet nettverk som benytter “Internet Protocol” (IP) [10]. IP-nettverket kan være en bedrifts eget “Local Area Network” (LAN), men for private brukere innebærer det typisk kommunikasjon over Internett. De fleste VoIP-nettverk er basert på en klient-tjener modell, hvor leverandøren tilbyr telefoni over brukerens bredbåndstilknytning. Dette kalles gjerne bredbåndstelefon. En alternativ modell er basert på “Peer-to-Peer” (P2P)-telefoni, hvor samtalen kan settes opp direkte mellom to brukere over Internett. Skype har blitt en populær applikasjon for nettopp dette.

Bredbåndstelefon er i sterk vekst [2]. Ved utgangen av 2006 hadde om lag en tredjedel av alle private bredbåndsabonnenter også skaffet seg abonnement på bredbåndstelefon. Samtidig har antall abonnenter av tradisjonell fasttelefon, PSTN/ISDN, gått ned den senere tid. Dette skyldes også økt bruk av mobiltelefoni.

Den elementære forskjellen på IP-telefoni og PSTN/ISDN er pakkesvitsjet kontra linjesvitsjet kommunikasjon [10]. I en utvidet forstand, skiller også VoIP seg fra tradisjonell telefoni ved at kommunikasjonen ikke er begrenset til tale. Simultan overføring av tale, video og data, såkalt multimedia, er mulig. Internett er i tillegg desentralisert, slik at funksjonalitet kan styres i endesystemene.

KAPITTEL 3. TELEFONI

Fordelen med IP-telefoni i forhold til PSTN/ISDN er for det første lavere kostnader som følge av konvergens av tale- og datanettverk [10]. Kostnader for hardware kan også reduseres ved at nytt utstyr kan integrere tale- og datakommunikasjon. Dette kan være forenkling for brukerne, men også upraktisk i en del sammenhenger hvor adskilt utstyr er å foretrekke. I tillegg er potensialet tilnærmet uendelig for avanserte telefonitjenester basert på multimedia kommunikasjon.

Det største problemet for IP-telefoni har vært å tilby stabil og tilstrekkelig god talekvalitet [10]. Sammenlignet med datatrafikk, stiller taletrafikk mye strengere krav til forsinkelse. Likevel konkurrerer som regel begge trafikkformene på lik linje om tilgjengelig kapasitet på det samme nettverket. De færreste VoIP-leverandører tilbyr såkalt "Quality of Service" (QoS)-funksjonalitet, hvor prioriteringsmekanismer for taletrafikk kan implementeres. Ved å overdimensjonere kapasiteten i nettet er talekvalitet i dag likevel såpass god at flere aktører lanserer bredbåndstelefoner som en kommersiell tjeneste. På grunn av redusert pris, godtar flere og flere brukere at kvaliteten er noe dårligere.

Det er flere alternativer når det gjelder VoIP-terminaler [10]. Tilsvarende Skype, kan man installere programvare på en PC eller "Personal Digital Assistant" (PDA) med intern eller ekstern kombinasjon av mikrofon og høyttaler. Moderne mobiltelefoner blir også i stadig større grad utstyrt med støtte for Wi-Fi, og fungerer på den måten som en hybrid terminal for både tale- og datakommunikasjon. For fast bredbåndstelefoner, er det mulig å benytte et adapter som gjør at brukeren kan beholde sin eksisterende huselefon. I tillegg finnes det her egne IP-telefoner, som gjerne støtter mer funksjonalitet.



Figur 3.2: Karikatur av bredbåndstelefoner

Kapittel 4

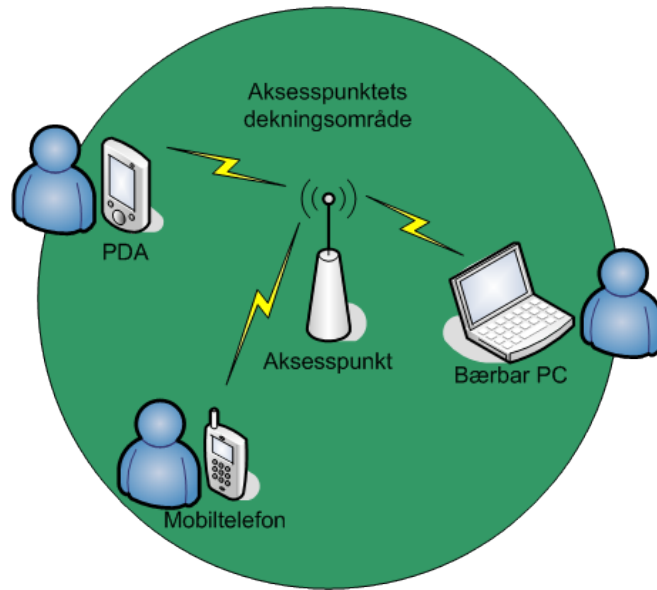
Wi-Fi

Trådløse Trondheim og andre trådløse bynettverk er basert på Wi-Fi som kommunikasjonsmedium. For å vurdere forretningspotensialet til Wi-Fi, forutsettes gode kunnskaper om den underliggende teknologien. Dette er temaet i dette kapitlet.

Betegnelsen Wi-Fi ble opprinnelige lisensiert av Wi-Fi Alliance og brukes for å beskrive teknologien i et “Wireless Local Area Network” (WLAN) basert på “Institute of Electrical and Electronics Engineers” (IEEE) 802.11 spesifikasjonen [11].

De grunnleggende komponentene i et trådløst lokalnettverk er illustrert i figur 4.1 og inkluderer [12]:

- **Trådløse terminaler**
Enheter for å kommunisere med over det trådløse mediet. Dette kan være en bærbar PC, en PDA, en moderne mobiltelefon eller annet utstyr som støtter Wi-Fi.
- **Aksesspunkt/basestasjoner**
Er ansvarlig for kommunikasjonen med de trådløse terminalene og fungerer vanligvis som et tilkoblingspunkt mot en kablet/trådfast forbindelse.
- **Trådløs link**
Fysisk kommunikasjonsmedium for overføring av data mellom de trådløse terminalene og aksesspunktet.



Figur 4.1: Grunnleggende komponenter i WLAN

I det etterfølgende presenteres IEEE 802.11 standarden mer inngående. For å sette denne teknologien inn i bredere sammenheng, introduseres først OSI-referansemodellen for nettverksarkitektur. Hensikten er først å fremst å vise innenfor hvilken del av en større nettverksmodell Wi-Fi befinner seg.

4.1 OSI-modellen

“Open System Interconneccion” (OSI)-modellen er en lagdelt referansemodell for nettverksarkitektur som tar for seg koblingen mellom såkalte åpne systemer, som vil si systemer som er åpne for kommunikasjon med andre systemer [1]. Modellen ble utformet av “International Standards Organization” (ISO) og kalles derfor ISO OSI-referansemodellen. For å forenkle skrivemåten, benytter jeg bare OSI-modellen i det etterfølgende. Lagene i OSI-modellen er illustrert i figur 4.1. De uthevede feltene viser samtidig hvor i modellen IEEE 802.11 spesifikasjonen befinner seg.

Lag 7 Applikasjonslaget	
Lag 6 Presentasjonslaget	
Lag 5 Sesjonslaget	
Lag 4 Transportlaget	
Lag 3 Nettverkslaget	
Lag 2 Datalinklaget	“Logical Link Control” (LLC)
	“Medium Access Protocol” (MAC)
Lag 1 Det fysiske laget	FHSS/DSSS/OFDM

Tabell 4.1: OSI-modellen og IEEE 802.11

4.2 IEEE 802.11

IEEE 802.11 er altså den virkelige spesifikasjonen på begrepet Wi-Fi. IEEE komitéens første standardisering av Wi-Fi fant sted i 1997 og fikk navnet 802.11 [1]. Standarden adresserte to grunnleggende nettverkstopologier [12]:

- **Infrastruktur nettverk**

All kommunikasjon går gjennom en basestasjon, kalt aksesspunkt i 802.11 terminologi. Man benytter altså faste tilkoblingspunkter og kommuniserer via disse.

- **Ad hoc nettverk**

Trådløse klienter kan kommunisere direkte med hverandre uten assistanse fra en basestasjon. Dette kalles gjerne P2P-modus.

Denne oppgaven tar for seg det første tilfellet, altså et trådløst nettverk med fast infrastruktur. Et trådløst bynettverk er altså en spesialisert utgave av et infrastruktur nettverk.

Den opprinnelige 802.11 standarden opererte på forholdsvis lave bitrater, 1 og 2 Mbps, i det lisensfrie 2,4 GHz frekvensbåndet [1]. 802.11 standarden spesifiserte tre transmisjonsteknikker i det fysiske laget: Infrarød, “Frequency-Hopping Spread Spectrum” (FHSS) og “Direct-Sequence Spread Spectrum” (DSSS) modulering. Infrarød har ingen reel utbredelse i WLAN [13]. De to andre metodene forklares nærmere i seksjon 4.2.2.

I 1999 kom to nye tilleggsstandarder, 802.11a og 802.11b, for å tilby høyere kapasitet [1]. 802.11a standarden opererer i 5 GHz frekvensbåndet og kan tilby bitrater

opp til 54 Mbps. Maksimal overføringskapasitet kan dog bare tilbys klienter som befinner seg nærme aksesspunktet. Ved økt avstand fra radiosenderen, svekkes nemlig signalstyrken, slik at også tilbudt båndbredde avtar. 5 GHz frekvensbåndet er i likhet med 2,4 GHz frekvensbåndet lisensfritt, men er mindre brukt, slik at faren for interferens og støy reduseres. 802.11a benytter "Orthogonal Frequency-Division Multiplexing" (OFDM) moduleringssteknikk, som forklares nærmere i seksjon 4.2.2.

802.11b standarden benytter samme frekvensbånd som den opprinnelige 802.11 standarden, men med økt kapasitet opp til 11 Mbps [1]. Moduleringssteknikken som benyttes er en forbedret utgave av DSSS. Selv om overføringskapasiteten til 802.11b er lavere enn 802.11a, er rekkevidden og penetreringsevnen bedre. Som vist i seksjon 2.1.4, er disse egenskapene generelt bedre ved lavere frekvenser. Trådløse nettverksenheter med 802.11b standarden implementert var de første til å bli kommersielt masseprodusert [14].

I 2001 kom IEEE 802.11g, som opererer i det samme 2,4 GHz frekvensbåndet som 802.11b [1]. Samtidig tilbyr standarden datarater på samme nivå som 802.11a, altså maksimalt 54 Mbps. Alt i alt tilbyr 802.11g standarden samtlige datarater til både 802.11a og 802.11b [15]. Moduleringssteknikken er en kombinasjon av OFDM og DSSS, som avhenger av overføringskapasiteten:

- **OFDM** - 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps
- **DSSS** - 1, 2, 5.5, 11 Mbps

Tabell 4.2 inneholder en oppsummerende oversikt over de omtalte IEEE 802.11-standardene. I tillegg er vanlige rekkevidder innendørs og utendørs inkludert [13]. Disse er kun tatt med som sammenligningsgrunnlag under like forhold, fordi rekkevidden er avhengig av type antenne, utstrålt effekt og fysiske hindringer i signalveien.

Standard (år)	Bitrate (Mbps)	Frekvensbånd (GHz)	Modulering	Innendørs rekkevidde	Utendørs rekkevidde
802.11 (1997)	1/2	2,4	FHSS/DSSS	~25 m	~75 m
802.11a (1999)	< 54	5	OFDM	~30 m	~100 m
802.11b (1999)	< 11	2,4	DSSS	~35 m	~110 m
802.11g (2001)	< 54	2,4	OFDM/DSSS	~35 m	~110 m

Tabell 4.2: IEEE 802.11-standarder

4.2.1 MAC-laget

MAC-laget definerer aksessmekanismen i IEEE 802.11 og benytter “Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance” (CSMA/CA) protokollen [1]. I korte trekk vil det si at avsenderen lytter på transmisjonsmediet for å detektere trafikk. Er kanalen ledig, kan sendingen starte etter en viss tid. Hvis ikke avventes sendingen. Etersom trådløse nettverk er sårbare med tanke på støy og eventuelle kollisjoner med andre sendere, kreves det at mottakeren sender en bekreftelse, “acknowledgement” (ACK)-pakke, om at meldingen ble mottatt. Dersom avsenderen av den opprinnelige meldingen av ulike grunner ikke mottar ACK-pakken, vil den forsøke å retransmittere meldingen.

4.2.2 Det fysiske laget

Det fysiske laget definerer moduleringsteknikker for å sende en MAC-ramme på radiolinken mellom sender og mottaker [1]. I IEEE 802.11 spesifikasjonen benyttes som tidligere nevnt tre hovedformer for modulering:

- **“Frequency-Hopping Spread Spectrum” (FHSS)**
FHSS deler hele frekvensområdet opp i 79 kanaler av 1 Mhz hver som det hoppes mellom i et bestemt mønster [1]. Varigheten er like lang på hver frekvens, og hoppsekvensen bestemmes av en pseudotilfeldig tallgenerator. Det er totalt 78 forskjellige hoppmønstre, som er beregnet ortogonalt, slik at ingen sekvenser lander på samme kanal samtidig [16]. I praksis gir optimal utnyttelse av frekvensområdet likevel bare rom for maksimalt 18 rivaliserende basestasjoner i samme område.
- **“Direct-Sequence Spread Spectrum” (DSSS)**
DSSS deler opp hele frekvensområdet i 14 kanaler [16]. Hver basestasjon bruker i praksis én frekvens. For å unngå interferens mellom nabokanaler, kan likvel bare tre forskjellige trådløse systemer operere i det samme frekvensområdet. Da benyttes tre ikke-overlappende kanaler som bærefrekvenser, mens de mellomliggende kanalene forblir ubrukte for å hindre interferens. Ved transmisjon kodes hvert databit med en sekvens av bit, som kun sender og mottaker kjenner til [1]. Alle andre vil oppleve datastrømmen som støy.
- **“Orthogonal Frequency-Division Multiplexing” (OFDM)**
OFDM deler frekvensområdet i 52 delkanaler, hvor 48 benyttes til data og de resterende 4 brukes til synkronisering [1]. Teknikken tillater dataoverføring på flere delkanaler i parallell, som igjen multiplekseres på såkalte reelle kanaler. Totalt antall reelle kanaler avhenger av antall delkanaler som blir tildelt brukerne. For å unngå interferens, anbefales kun tre ikke-overlappende reelle kanaler i 2,4 GHz frekvensbåndet, som benyttes av 802.11g standarden [17]. For 802.11a spesifikasjonen, vil antall kanaler generelt være større, avhengig av hvor mye av 5 GHz frekvensbåndet som er tilgjengelig i det enkelte land [13].

Kapittel 5

Trådløse Trondheim

Trådløse Trondheim er et foregangsprosjekt innen utviklingen av trådløse byer. Målingsarbeidet, som presenteres senere i oppgaven, er også utført i dette bynettverket. Det er derfor naturlig med en introduksjon til Trådløse Trondheim som prosjekt. I tillegg presenterer dette kapittelet sentrale elementer som infrastruktur, dekningsområder, utstyr og tjenesteplattform for dette bynettverket.

30. november 2005 inngikk Trondheim kommune, Sør-Trøndelag Fylkeskommune, Næringsforeningen i Trondheim og NTNU en avtale om å etablere et trådløst bredbåndsnett i Trondheim [18]. Arbeidet er organisert som et forsknings- og utviklingsprosjekt, i den hensikt å opparbeide god kompetanse og være med å drive utviklingen.

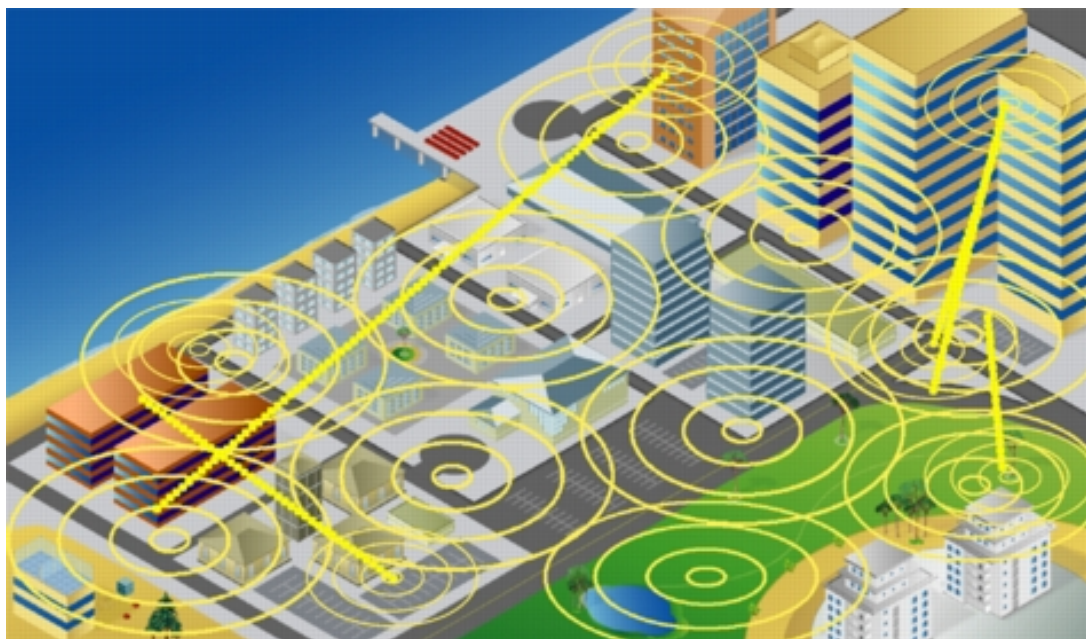
Målsetningen med Trådløse Trondheim var og er fortsatt [18]:

- Å skape et utviklingslaboratorium i verdensklasse for forskning og utvikling innen trådløse teknologier, produkter og tjenester.
- Bidra til et fremtidsrettet norsk næringsliv med spisskompetanse innen trådløse teknologier, produkter og tjenester.
- Gjøre Trondheim og NTNU mer attraktivt for studenter og teknologibasert næringsliv.

Målgruppen er i første omgang studenter og ansatte ved NTNU, ansatte i kommunen og fylkeskommunen, samt representanter fra Forsknings- og utviklingsarbeid (FoU)-miljøet [18]. Disse gruppene har i dag gratis tilgang til Trådløse Trondheim. Senere tenkes nettet å åpnes for kommersielle tjenestetilbydere og teleoperatører for videre salg av aksess og tjenester til privatpersoner.

5.1 Infrastruktur

Trådløse Trondheim er realisert med en såkalt to-nivå infrastruktur. Litt forenklet, vil det si at det benyttes en blanding av kablede og trådløse aksesspunkt [19]. Eksempel på en slik løsning er vist i figur 5.1. Det bør bemerkes at figuren ikke er en kopi av Trådløse Trondheim, men har som hensikt å illustrere hvordan trådløse bynettverk kan realiseres.



Figur 5.1: Infrastruktur for trådløst bynettverk [20]

Aksesspunktene dekningssoner er i figuren vist som gule rundstråler. Enkelte av dekningssonene er bundet sammen med en tykkere, gul, rett linje. Linja går typisk fra et aksesspunkt som er festet på en høy bygning til et lavereliggende aksesspunkt. Det førstnevnte aksesspunktet er da kablet, mens det andre er frittstående og trådløst. Brukerne kan uproblematisk koble seg til begge aksesspunktene, men all kommunikasjon til det trådløse aksesspunktet må gå via det kablede aksesspunktet for å nå brukere i andre deler av nettet eller for å koble seg til Internett. Et slikt oppsett karakteriseres som en to-nivå infrastruktur. Det trenger ikke nødvendigvis være høydeforskjell på de to aksesspunktene, men dette er en vanlig konfigurasjon som også gjør det mulig for det høyereliggende, kablede aksesspunktet å nå flere, lavereliggende, trådløse aksesspunkt.

I Trådløse Trondheim er cirka 40 % av aksesspunktene kablede [19]. Disse har direkte tilkobling til det såkalte matenettet, som i hovedsak består av optisk fiber. De resterende 60 % er da frittstående, trådløse aksesspunkt, som altså er koblet til matenettet med en radiolink.

For trådløs aksess benyttes Wi-Fi, både IEEE 802.11a, 802.11b og 802.11g [19]. Sett fra brukeren, benyttes 802.11b og 802.11g overalt, mens 802.11a kun benyttes i folkerike områder hvor det kreves høy kapasitet. I et slikt område vil samtlige omkringliggende aksesspunkt være kablet. Trondheim Torg er et eksempel på et sted hvor dette er tilfelle. I to-nivå strukturen benyttes 802.11b og 802.11g på radiolinken mot brukernes terminaler, mens 802.11a benyttes på radiolinken mellom aksesspunktene på hvert nivå. 802.11a opererer som kjent på en annen frekvens enn 802.11b og 802.11g. Dette er således en god løsning for å unngå interferens.

5.2 Dekningsområder

På lang sikt har prosjektgruppen for Trådløse Trondheim som målsetning å dekke hele Trondheim med trådløst bredbånd [18]. På nåværende tidspunkt har hovedsaklig store deler av Midtbyen, samt deler av Solsiden, Bakklandet og områder nær NTNU og Studentersamfundet dekning. Utbyggingsområdet er begrenset til utendørsarealer og såkalte “offentlige” innendørsarealer uten adgangsbegrensning (kaféer, kjøpesentre, osv.). Trådløse Trondheim er altså ikke designet og nettverksplanlagt for å tilby innendørsdekning for privatpersoner. Siden signalene kan trenge inn i omkringliggende boliger, retter denne masteroppgaven likevel fokus mot innendørsdekningen i Trondheim sentrum.

5.3 Utstyr

Trådløse Trondheim benytter Cisco Aironet 1010 og 1030 aksesspunkter, som styres av Cisco 4404 WLAN kontrollere. I tillegg benyttes Location Appliance for å lagre og presentere lokasjonsinfo og Cisco Wireless Control System (WCS) for å overvåke nettet.

5.4 Tjenester

To sentrale fokusområder for Trådløse Trondheims tjenesteplattform er nomadisk og mobil kommunikasjon. Det vil si at brukerne kan aksessere nettet fra flere lokasjoner (nomadisk) og i bevegelse på tvers av lokasjonene (mobil) [18]. I tillegg til Internettaksess, kan da også tjenester for mobilitet, posisjonering og sikkerhet tilbys brukerne av nettet.

Kapittel 6

Signalstyrke og støy

I dette kapitlet beskrives essensielle begreper for å betegne signal- og støyforhold. Disse er det viktig å ha kjennskap til for å utarbeide en god testplan, for å innhente nyttige verdier i målingsarbeidet og for å tolke resultatene på en hensiktsmessig måte.

6.1 Signalstyrke

I IEEE 802.11 sammenheng benyttes fire ulike mål på signalstyrke [21]:

- mW (milliwatt)
- dBm (desibel-milliwatt)
- “Received Signal Strength Indicator” (RSSI)
- Prosentvis mål

Watt er standard SI-enhet for effekt og betegner energimengde per sekund. Et trådløst aksesspunkt opererer typisk med en utstrålt effekt på mellom 1 og 100 mW, mens en trådløs klient har en effekt på mellom 1 og 30 mW. Signalet rundstråles i utgangspunktet sirkulært ut i fra kilden, men man kan også benytte sektorantenner for å konsentrere energien i en bestemt retning [22]. Signalstyrken avtar ikke lineært med avstanden, men reduseres proporsjonalt med kvadratet av avstanden fra antenna [23]. Dette er gjengitt i ligning 6.1.

$$W = 1/r^2 \tag{6.1}$$

Med andre ord, når avstanden fra kilden doubles, avtar effekten med en fjerdedel. Effekten følger altså en logaritmisk funksjon, som fort får veldig lav verdi. Det er derfor upraktisk å representere verdiene med en lineær skala som watt, med tanke på at trådløse enheter kan motta signaler ned mot en effekt på 10^{-7} til 10^{-9} mW.

Desibelskalaen er derimot et logaritmisk mål på signalets effekt [21]. Når signalstyrken avtar logaritmisk, avtar dermed dBm verdien lineært. Konverteringen fra mW til dBm foregår ved å ta 10-logaritmen og multiplisere med 10, som vist i ligning 6.2:

$$100mW = 10 \times \log_{10} 100dBm = 20dBm \quad (6.2)$$

RSSI er definert i IEEE 802.11 standarden [24]. RSSI har en numerisk heltallsverdi mellom 0 og 255 som indikerer mottatt signalstyrke. En absolutt “mapping” mellom RSSI verdi og signalstyrke er derimot ikke spesifisert, og verdien er kun ment som et relativt mål som leverandører kan definere til internt bruk. Maksimal RSSI verdi settes typisk lavere enn 255 og varierer fra leverandør til leverandør. Dette gjør at en direkte sammenligning av RSSI verdier fra forskjellige leverandørers utstyr vil kunne gi feilaktige resultater.

For å kunne sammenligne RSSI verdier på tvers av ulike leverandører kan prosentvise mål benyttes [21]. Dette krever dog en konsekvent omgjøring, hvor RSSI verdien divideres med maksimal RSSI verdi og multipliseres med 100.

6.2 Signalkvalitet

Signalkvalitet er et vanlig begrep innen trådløs kommunikasjon, men brukes ofte ukorrekt [21]. IEEE 802.11 definerer signalkvalitet som “Pseudo Noise” (PN) korrelasjonsstyrke [24]. Signalkvalitet er altså et mål på hvor godt den korrekte informasjonsstrømmen kan gjenvinnes fra den mottatte strømmen. Med andre ord sier signalkvaliteten hvor mye signalet forringes mellom et aksesspunkt og en klient. Definisjonen gjelder kun DSSS (direct-sequence spread spectrum) modulasjon, fordi det bare er denne modulasjonsformen som benytter PN kode. Definisjonen er derfor i utgangspunktet ikke gyldig for FHSS og OFDM.

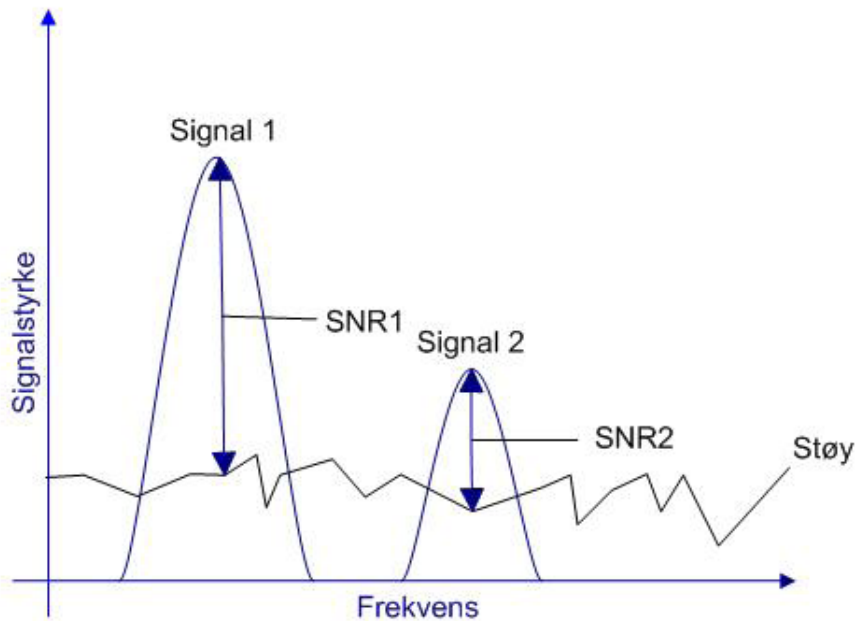
Det er vanlig å sette likhetstegn mellom signalkvalitet og signal-til-støy forhold. Dette er ikke korrekt og forskjellen klargjøres i seksjon 6.3.

6.3 Signal-til-støy forhold

Generelt, refererer signal-til-støy forholdet, eller “Signal to Noise Ratio” (SNR), til det relative forholdet mellom et innkommende signal og en eller annen form for bakgrunnsstøy [21]. I WLAN sammenheng benyttes derimot begrepet litt inkonsekvent om to vidt forskjellige ting. For det første brukes det om forholdet mellom mottatt signalstyrke og utstyrets interne støy generert av termisk effekt i mottakerens elektroniske kretser. For det andre benyttes betegnelsen om forholdet mellom signalstyrken og interfererende energi fra omgivelsene. I tillegg er det viktig å merke seg at hva som rapporteres som støy av det trådløse nettverkskortet er avhengig av hva produsenten

definerer som støy. I det etterfølgende antas derfor at støy tilsvarer alle former for bakgrunnsstøy som rapporteres fra utstyret benyttet i målingene.

Dersom signalstyrke og støy representeres med samme logaritmisk enhet, slik som dBm, vil SNR tilsvare differansen mellom signal- og støynivået. Dette er illustrert i figur 6.1.



Figur 6.1: Signal-til-støy nivå [14]

6.4 Mottakerfølsomhet

Mottakerfølsomhet er et minstekrav til det mottatte signalets effekt for å kunne tolke informasjonsstrømmen pålitelig [21]. Det bestemmer en nedre grense til signalstyrke når termisk støy er tatt med i beregningene. Interferens fra omgivelsene er derimot ikke tatt høyde for. Ved økte datarater, minker mottakerfølsomheten. Eksempelvis, kan mottakerfølsomheten til et 802.11b nettverkskort være -91 dBm for å motta en datastrøm på 2 Mbps pålitelig, mens følsomheten er -85 dBm ved 11 Mbps datarate.

Kapittel 7

Testplan

Dette kapitlet presenterer testplanen som ble utarbeidet i forkant av målingsarbeidet. Her inngår en overordnet beskrivelse av testingen, måleprosedyrer, testkriterier, valgt tidsrom for målingene og en spesifisering av utstyret som ble benyttet.

Overordnet mål for testingen er å få en indikasjon på hvor stor andel av Trondheim sentrums boliger som gjennom Trådløse Trondheim har tilfredsstillende god innendørsdekning. Dette innebærer testing av signalstyrke, signal-til-støy forhold og båndbredde. Dekningen er i høy grad avhengig av både avstanden mellom aksesspunktet og den trådløse enheten, samt ulike hinder i signalets vei mellom disse. Dette stiller krav til konsekvente og grundige målinger. For å få flere innfallsvinkler og et bredere grunnlag for å tolke dekningsgraden, er testplanen oppdelt i to deler, med respektive karakteristikker og mål for testingen. Del 1 tar for seg et tilfeldig utvalg av lokasjoner i Trondheim sentrum, mens del 2 er en såkalt teppemåling innenfor ett kvartal i Midtbyen.

7.1 Del 1 - Tilfeldig utvalg av bygninger

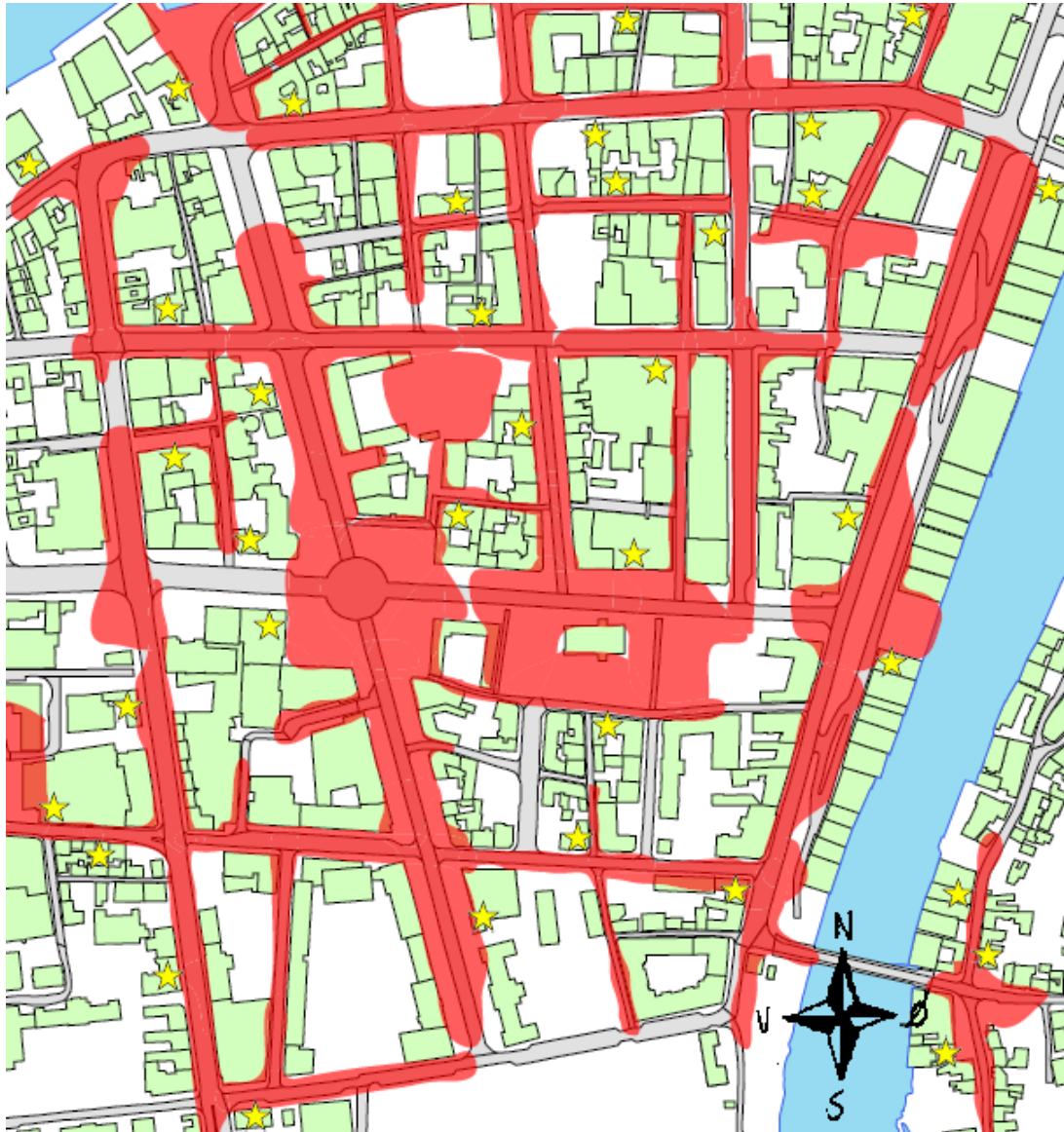
Del 1 innebærer testing av innendørsdekningen i et tilnærmet tilfeldig utvalg av boliger i Trondheim sentrum. For å kunne generalisere og konkludere ut i fra resultatene, kreves et stort antall målinger. Dette er derfor både den viktigste og mest omfattende delen av testingen.

Testingen er tilfeldig i den sammenheng at boliger velges tilfeldig innenfor dekningsområdet til Trådløse Trondheim, uavhengig av avstanden til nærmeste basestasjon. Likevel forsøkes det å spre målingene utover hele dekningsområdet, for å gi en best mulig representasjon av hele bynettverket. Hensikten er å formidle et totalbilde av gjeldende status for Trådløse Trondheims innendørsdekning.

Det gjøres målinger i totalt 50 boliger i Trondheim. Lokasjonene velges tilfeldig ved å markere vilkårlige punkter på et kart i forkant, og forsøke å utføre testingen nærmest

KAPITTEL 7. TESTPLAN

mulig hvert enkelte punkt. Et utsnitt av kartet, hvor de tilfeldig utvalgte lokasjonene er markert, er vist i figur 7.1. I tillegg inneholder appendix A en tekstlig beskrivelse av hvert enkelt målepunkt med tilhørende adresse.



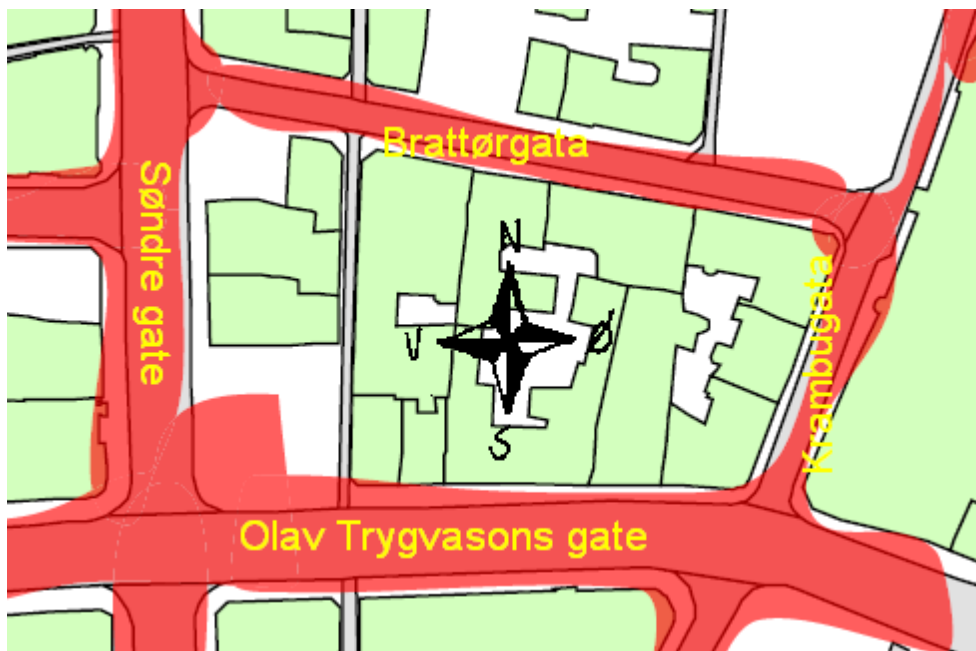
Figur 7.1: Utsnitt av kart med markerte lokasjoner for tilfeldige målinger

Stjernene på kartet viser de tilfeldig utvalgte lokasjonene, mens de røde områdene representerer dekningsområdene. Av figuren fremgår det at samtlige bygninger befinner seg inntil dekningsområdene som er kartlagt og planlagt utendørs.

7.2 Del 2 - Teppemåling i ett kvartal

I del 2 gjøres det målinger på et stor antall lokasjoner innenfor ett kvartal i Trondheim sentrum. Resultatene sammenlignes med resultatene fra de tilfeldige målingene for å underbygge eller indikere eventuelle avvik når det gjelder kvartalets dekningsgrad i forhold til resten av Trondheim sentrum.

Utvalgt kvartal for teppemålingen er vist i figur 7.2. I tillegg inneholder appendix A en tekstlig beskrivelse av hvert enkelt målepunkt med tilhørende adresse.



Figur 7.2: Utvalgt kvartal for teppemåling

For å presisere begrepet kvartal i denne sammenheng, er det altså alle bygninger som direkte omslutter den innerste “kjernen” i figuren. Eksempelvis er det kun bygninger langs nordsida av Olav Trygvasons gate som inngår, mens sørsida er utelatt. Avhengig av størrelsen på de ulike bygningene i kvartalet, kan det gjøres fra én til flere målinger i hvert bygg. Så sant det er mulig, forsøkes det likevel å utføre målinger i flest mulig av bygningene. Utover dette benyttes samme måleprosedyrer som i del 1. Disse beskrives nærmere i seksjon 7.3.

7.3 Måleprosedyrer

Generelt består målingsarbeidet i å oppsøke en på forhånd utvalgt lokasjon og benytte medbragt bærbar datamaskin til å hente ut verdier for signalstyrke, SNR og

båndbredde. For å sørge for konsekvente målinger som kan etterprøves av senere forskningsarbeid, samt ivareta mest mulig like forhold for testmiljøet, er det viktig å stille visse krav til lokasjonen i form av godt dokumenterte måleprosedyrer. Disse er gjengitt i tabell 7.1:

Testmiljø	Krav
Lokasjon	Innendørs
Beliggenhet	Vendt mot utendørs dekningsområde
Etasje	Første
Rom	Vindu mot utendørs dekningsområde
Plassering av bærbar PC	2-3 meter fra vinduskarm 1-2 meter fra gulvnivå
Egen posisjonering	Mellom vindu og PC

Tabell 7.1: Krav til testmiljø

7.3.1 Signalstyrke, SNR og teoretisk båndbredde

Et enkelt shell-script er implementert for å utføre målingene. Det benytter innebygde funksjoner i Unix til å hente ut verdier for signalstyrke og støy, som rapporteres fra det trådløse nettverkskortet. Disse verdiene brukes deretter til å kalkulere signal-til-støyforholdet, SNR. Til slutt sammenlignes signalstyrke og SNR med tilhørende teoretiske båndbredde, som vist under testkriteriene i seksjon 7.4.

Signalstyrke og støy måles i dBm, altså logaritmisk enhet for effekt. SNR måles i dB. Båndbredde måles i bit per sekund, bps. Følgende beskrivelse av parameterne signal- og støynivå er hentet fra "Linux man page":

Signal level

Received signal strength (RSSI - how strong the received signal is). May be arbitrary units or dBm, iwconfig uses driver meta information to interpret the raw value given by /proc/net/wireless and display the proper unit or maximum value (using 8 bit arithmetic). In Ad-Hoc mode, this may be undefined and you should use iwspy.

Noise level

Background noise level (when no packet is transmitted). Similar comments as for Signal level.

KAPITTEL 7. TESTPLAN

Shell-scriptet er gjengitt under:

```
#!/bin/sh

if [ $1 ]
then
  OUTSIGNAL="$1SIGNAL"
  OUTNOISE="$1NOISE"
  OUTSNR="$1SNR"
  i=1
  echo "Processing\c"
  while [ $i -le 20 ]
  do
    SIGNAL=$(iwconfig eth1 | grep 'Signal level' | \
sed 's/.*[:=]\([0-9]*\).*[:=]\(-*[0-9]*\).*[:=]\(-*[0-9]*\).*\2/ ')

    NOISE=$(iwconfig eth1 | grep 'Noise level' | \
sed 's/.*[:=]\([0-9]*\).*[:=]\(-*[0-9]*\).*[:=]\(-*[0-9]*\).*\3/ ')

    SNR=`expr $SIGNAL - $NOISE`

    echo $SIGNAL >> $OUTSIGNAL
    echo $NOISE >> $OUTNOISE
    echo $SNR >> $OUTSNR

    echo ".\c"
    sleep 3s
    i=`expr $i + 1`
  done
  echo "\nCompleted!"
else
  echo "ERROR: _output_file_not_entered"
  exit 1
fi
```

Totalt 20 ganger og med 3 sekunders intervaller hentes verdier for signalstyrke og støy. Deretter kalkuleres SNR og samtlige verdier skrives til separate filer, basert på filnavnet som angis på kommandolinjen ved kjøring av scriptet. Å utføre 20 delmålinger på hver lokasjon, sørger her for en viss feiltoleranse. I tillegg vil observasjonene da gjennomføres over et tidsrom på 1 minutt, for å ta høyde for eventuelle variasjoner i dekningsgraden.

7.3.2 Reell båndbredde

På hver lokasjon med dekning kjøres det i tillegg en test på overføringskapasiteten i form av bitrater. For dette benyttes en Web100 “Network Diagnostic Tool” (NDT)-server, som er utviklet på NTNU [25]. NDT kjører to tester på maksimal overføringsrate på en “Transmission Control Protocol” (TCP)-forbindelse mellom NDT-serveren og den bærbare datamaskinen. Data “streames” da fra PCen og til serveren i 10 sekunder, før tilsvarende gjøres like lenge i motsatt retning. Totalt gjøres det tre slike målinger, og de gjennomsnittlige verdiene for bitratene til opp- og nedlinken kalkuleres og sammenlignes med teoretisk kapasitet.

For å koble seg til NDT-serveren på NTNU fra Trådløse Trondheim, må man med dagens nettverkskonfigurasjon benytte en “Virtual Private Network” (VPN)-

konsentrator. Dette gjør at man i realiteten måler båndbredden for den tregeste linken i VPN-tunnelen, i stedet for å kun se på den trådløse linken mellom den bærbare PCen og aksesspunktet. Dette kan gi misvisende resultater og bør tas med i betraktningen ved tolkningen av resultatene.

7.4 Testkriterier

Signalstyrke og signal-til-støy forholdet evalueres i henhold til anbefalinger fra Cisco [22]. Disse er angitt i tabell 7.2 og bestemmer minimumskrav til signalstyrke og SNR for å kunne tilby ulik grad av teoretisk båndbredde.

Teoretisk bitrate (Mbps)	Data		Tale	
	Minimum signalstyrke (dBm)	Minimum SNR (dB)	Minimum signalstyrke (dBm)	Minimum SNR (dB)
54	-71	25	-	-
36	-73	18	-	-
24	-77	12	-	-
12 / 11	-82	10	-67	25
6 / 5,5	-89	8	-74	23
2	-91	6	-76	21
1	-94	4	-79	19

Tabell 7.2: Minimumskrav til signalstyrke og SNR for data og tale

Tabellen gjengir ulike minimumskrav avhengig av om trafikken er typisk datakommunikasjon eller tale. Kravene er strengere for tale, fordi tale er mer følsom for forsinkelser enn data [22]. Likevel, vil fokus hovedsaklig rettes mot data, siden det først og fremst er innendørsdekning og konkurransen ovenfor fastnettleverandørene som betraktes. Det vil likevel gjøres enkelte sammenligninger opp i mot minimumskravene for tale. I begge tilfeller vil resultatene fra målingene kategoriseres i henhold til de ulike nivåene som er presentert i tabellen.

Ved målingen av signalstyrke og SNR gjøres som nevnt 20 målinger på hver lokasjon. Resultatet fra én lokasjon kan da for eksempel se ut som i tabell 7.3:

Signalstyrke (dBm)	SNR (dB)
-65	23
-66	22
-66	22
-67	21
-67	21
-68	20
-69	19
-69	19
-70	18
-70	18
-71	17
-71	18
-72	17
-74	14
0	0
-60	28
-62	26
-62	26
-64	24
-66	22

Tabell 7.3: Eksempel på resultat fra én måling av signalstyrke og SNR

Følgende regler benyttes så for å bestemme representative verdier på lokasjonen:

- Generelt kalkuleres gjennomsnittlig verdi.
- For både signalstyrke og SNR betyr verdien 0 at det ikke er dekning i det hele tatt. Dette kan virke misvisende hvis man betrakter måleenheten for signalstyrke.
- Dersom flere enn to verdier er 0, settes også gjennomsnittlig verdi lik 0. Her antas signalene å være for svake eller flakkende til at lokasjonen kan sies å ha dekning.
- Dersom én eller to verdier er 0, sees disse bort i fra for å ivareta en viss feiltoleranse. Dette kan skyldes ustabile signalforhold, men også feil med utstyret som benyttes. Gjennomsnittet regnes så ut basert på de resterende verdiene.
- Gjennomsnittlig verdi for hver lokasjon kategoriseres i henhold til minimumskravene som er presentert i tabell 7.2.
- Dersom gjennomsnittlig verdi er 0 eller dårligere enn laveste minimumskrav, inngår lokasjonen i en egen kategori med null dekning.

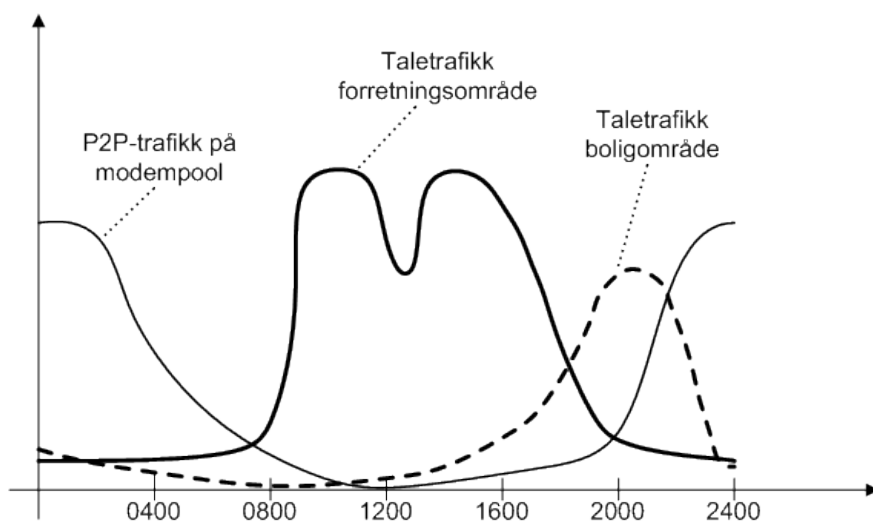
Måling av reell båndbredde gjøres kun på lokasjoner som karakteriseres å ha dekning. Som tidligere nevnt, gjøres det da tre målinger og gjennomsnittlig bitrate kalkuleres så for både opp- og nedlinken.

Valget om å akseptere maksimalt to 0-verdier for å anta dekning, ble delvis bestemt underveis i målingsarbeidet. En viss feiltoleranse var spesifisert på forhånd, men det konkrete kravet ble basert på erfaringer underveis. Begrunnelsen var at flere enn to 0'ere resulterte i at det ikke lot seg gjøre å opprettholde en kontinuerlig forbindelse. Forsøk på å koble seg til NTNUs VPN-konsentrator ble eksempelvis brutt regelmessig. To eller færre 0'ere kunne derimot oppstå uten at det var merkbart for tilkoblingen.

7.5 Tidsrom for målinger

For å sørge for konsekvente målinger og kunne generalisere resultatene best mulig, er det hensiktsmessig å utføre samtlige målinger innenfor samme tidsrom på dagen. For WLAN er det spesielt viktig å ta hensyn til når aktiviteten på andre trådløse nettverk, typisk hjemmenettverk, er størst. Disse vil kunne ha interfererende effekt overfor hverandre, som fører til at signalkvaliteten svekkes.

I denne sammenheng, er begrepet travel time relevant. Travel time er definert som den timen på dagen som i det lange løp har høyest trafikk [26]. Travel time vil avhenge av sted og type trafikk fokus rettes mot. Et typisk trafikkbilde er vist i figur 7.3, som illustrerer hvordan forskjellig type trafikk varierer i løpet av en hverdag:



Figur 7.3: Eksempler på døgnprofiler i telenettet (hverdag) [26]

Det er viktig å påpeke at denne figuren kun er ment som et eksempel på hvordan

enkelte typer trafikk varierer i løpet av dagen. Det er altså ikke en nøyaktig representasjon av det totale trafikkbildet i telenettet.

Med utgangspunkt i døgnprofilen over, samt egne antagelser når det gjelder WLAN-trafikk, har jeg valgt å gjøre samtlige målinger mandag til torsdag i tidsrommet 1700-2100. Det er hovedsaklig to grunner til det. For det første, er det flest mennesker som er hjemme i boligene sine i dette tidsrommet, slik at det blir enklere å komme inn til folk for å gjøre målingene. For det andre, er også aktiviteten på interne trådløse hjemmenettverk høyest på ettermiddagen, etter at folk flest har kommet hjem fra skole eller arbeid.

7.6 Utstyr

Av praktiske årsaker utføres testingen på to forskjellige bærbare PCer, men hvor hver PC kun benyttes til én type målinger for å ivareta konsekvente måleprosedyrer.

Samtlige målinger av signalstyrke, støy og SNR, utføres med en Dell Latitude C640. Nettverkskortet er av type Intel PRO/Wireless 2915ABG. Operativsystemet er Ubuntu 6.10, som er et åpen kildekode operativsystem med Linux kjerne.

Alle målinger av båndbredde opp i mot NDT-serveren på NTNU, utføres med en Dell Latitude D420. Nettverkskortet er av type Intel PRO/Wireless 3945ABG. Operativsystemet er Microsoft Windows XP.

Utstyret er Wi-Fi sertifisert. Det vil si at det er testet og godkjent av Wi-Fi Alliance for å tilfredsstillende krav til samspillsevne med andre sertifiserte WLAN produkter basert på IEEE 802.11 spesifikasjonen [27].

Å benytte to forskjellige bærbare datamaskiner til ulike deler av testingen, kan gi inkonsekvente resultater og bør gjøres med forsiktighet. Selv om funksjoner tilsynelatende virker identiske, kan ulike produsenters utstyr benytte forskjellige metoder og verdier som grunnlag. I dette tilfellet, kan valget av to PCer forsvares med at de begge har samme produsent for både nettverkskortet og selve maskinen. Det viktigste argumentet er likevel at resultatene fra målingene på de to PCene ikke vil bli sammenlignet direkte.

Kapittel 8

Resultater

I dette kapitlet presenteres resultatene fra del 1 og 2 av målingsarbeidet først hver for seg. Det er da viktig å studere resultatene i forhold til testkriteriene som er satt opp i tabell 7.2. Det vil si at den samme oppdelingen av minimumskrav til signalstyrke og SNR, med korresponderende teoretiske bitrate, er benyttet for å tolke resultatene. Det er kategoriseringen for datatrafikk som er gjeldende for denne delen av analysen.

På lokasjoner med dekning, er det målt reell båndbredde opp mot NDT-serveren på NTNU. Disse resultatene bør ikke sammenlignes direkte med de teoretiske bitratene, da det er stor forskjell på teoretisk og reell båndbredde. I tillegg er antall delmålinger i det reelle tilfellet færre og usikkerheten rundt hvordan verktøyet gjennomfører målingene større. Derfor bør disse resultatene heller tolkes som et supplement til målingene av signalstyrke og SNR og ilegges mindre vekt når det trekkes konklusjoner om dekningsgraden til Trådløse Trondheim.

Etter at hver del av målingsarbeidet er presentert, sammenlignes utvalgte deler av resultatene for indikere eventuelle avvik og påpeke fremtredende likheter.

Videre presenteres fordelinger for det generelle støynivået som ble målt under arbeidet. Disse er tatt med for å indikere grunnlaget for beregningene av SNR. Det diskuteres ikke hvor gode verdiene er eller hvilke støykilder som har påvirket målingene.

Deretter blir taletrafikk behandlet. Her blir resultatene fra målingsarbeidet kategorisert i henhold til minimumskravene for signalstyrke og SNR som er gjeldende for taletrafikk. Disse er vist i tabell 7.2. I denne seksjonen inngår også enkelte resultater fra medstudent Petter Stray sine målinger av talekvalitet i Trådløse Trondheim [28]. Disse er tatt med for å underbygge argumentasjonen når trådløse bynettverks innvirkning på mobilleverandørene diskuteres i kapittel 10.

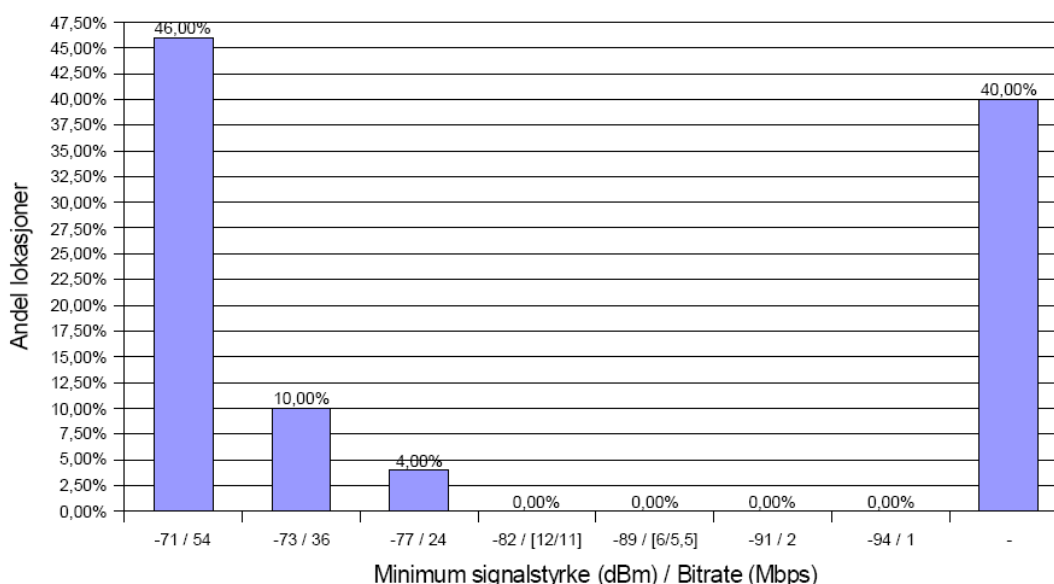
Til slutt inneholder kapitlet noen generelle erfaringer fra målingsarbeidet, som til en viss grad hadde innflytelse på utførelsen av arbeidet og som bør tas i betraktning når resultatene tolkes.

8.1 Del 1 - Tilfeldig utvalg av bygninger

Del 1 av målingsarbeidet bestod av å gjøre målinger i 50 tilnærmet tilfeldig valgte bygninger i Trondheim sentrum. Resultatene fra arbeidet presenteres i det etterfølgende.

8.1.1 Signalstyrke, SNR og teoretisk båndbredde

Figur 8.1 viser hvor stor andel av de totalt 50 lokasjonene som kan kategoriseres innenfor de ulike grensene for mottatt signalstyrke. Den teoretisk bitraten, som korresponderer med signalstyrken, er også oppgitt.



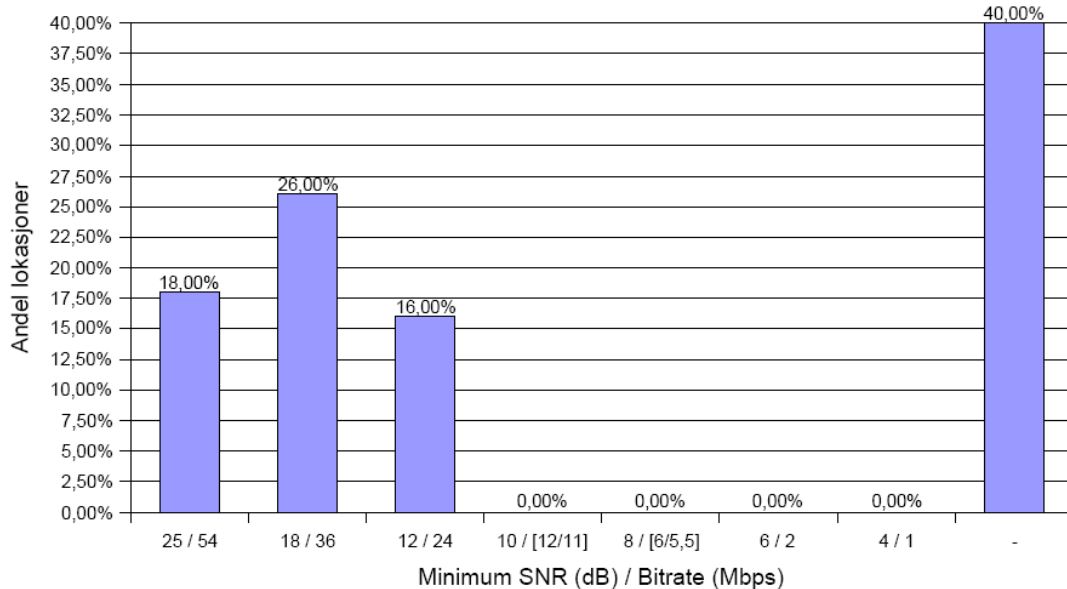
Figur 8.1: Målingsdata for signalstyrke (50 tilfeldige lokasjoner)

Figuren indikerer to markante ytterpunkter. Hele 46 % av lokasjonene oppfyller minimumskravet til signalstyrke hvor en teoretisk bitrate på 54 Mbps kan tilbys. Samtidig befinner hele 40 % seg i kategorien uten dekning. De sistnevnte bestod ikke nødvendigvis av lokasjoner hvor signalstyrken var null i hele måleperioden, men var såpass flakkende i verdi at de ble funnet uegnet for datatrafikk.

De resterende lokasjonene kan sies å ha en forholdsvis god signalstyrke, med tilbudt teoretisk bitrate på henholdsvis 36 og 24 Mbps. Alt i alt viser resultatene en slags “enten eller” situasjon, hvor det er enten tilstrekkelig god dekning eller ikke dekning i det hele tatt. Lokasjoner med dekning er i flertall, selv om andelen uten dekning er forholdsvis høy.

KAPITTEL 8. RESULTATER

Figur 8.2 presenterer andelen lokasjoner som tilfredsstillende de respektive minimumskrav til signal-til-støy forholdet, SNR. Igjen er korresponderende bitrater oppgitt.

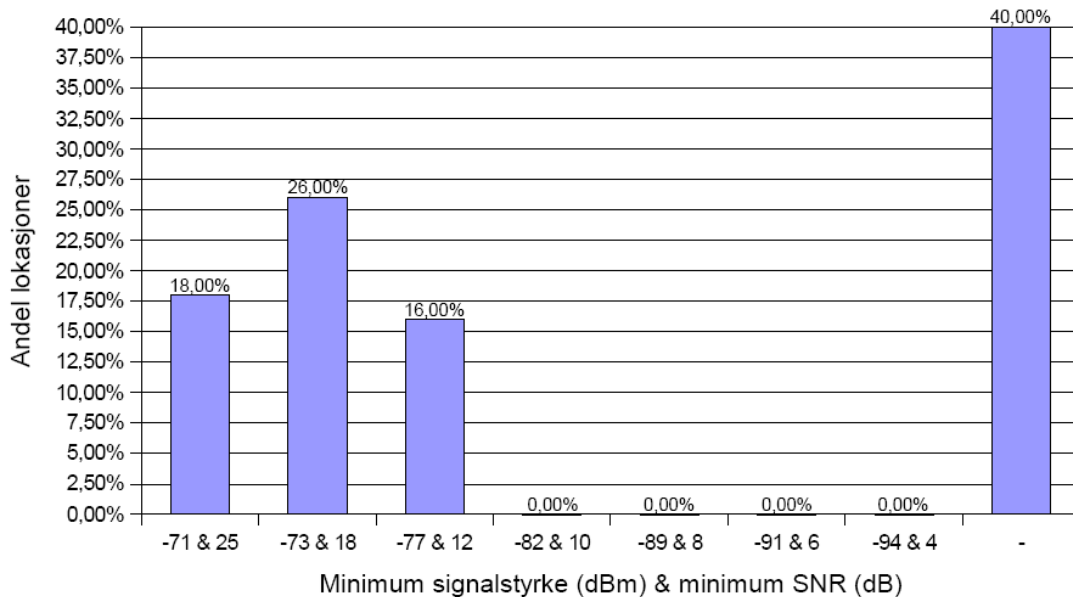


Figur 8.2: Målingsdata for SNR (50 tilfeldige lokasjoner)

Også i dette diagrammet kan man observere et tydelig skille mellom tilfredsstillende SNR og områder uten dekning. Andelen uten dekning er naturlig nok identisk med foregående diagram, da SNR kalkuleres på bakgrunn av signalstyrke og støy. For den tilfredsstillende andelen kan man dog se en mer jevn fordeling, hvor teoretiske bitrater på henholdsvis 54, 36 og 24 Mbps kan tilbys. I forhold til det forrige diagrammet, er andelen på 54 Mbps redusert betraktelig, mens de to andre kategoriene har tilsvarende økte andeler.

Slik testkriteriene er satt opp i tabell 7.2, korresponderer de teoretiske bitratene til et minimumskrav for både signalstyrke og signal-til-støy forhold. Det mest representative målet for dekningsgraden er derfor tilfellet hvor begge disse kravene er oppfylt innenfor hver kategori. Hver lokasjon er med andre ord kategorisert i henhold til minimumskrav for både signalstyrke og SNR, hvor den strengeste skranken er gjeldende. Andelsfordelingen for denne kombinasjonen er gjengitt i figur 8.3. De teoretiske bitratene er utelatt fra diagrammet, men er tilsvarende de to foregående diagrammene.

KAPITTEL 8. RESULTATER

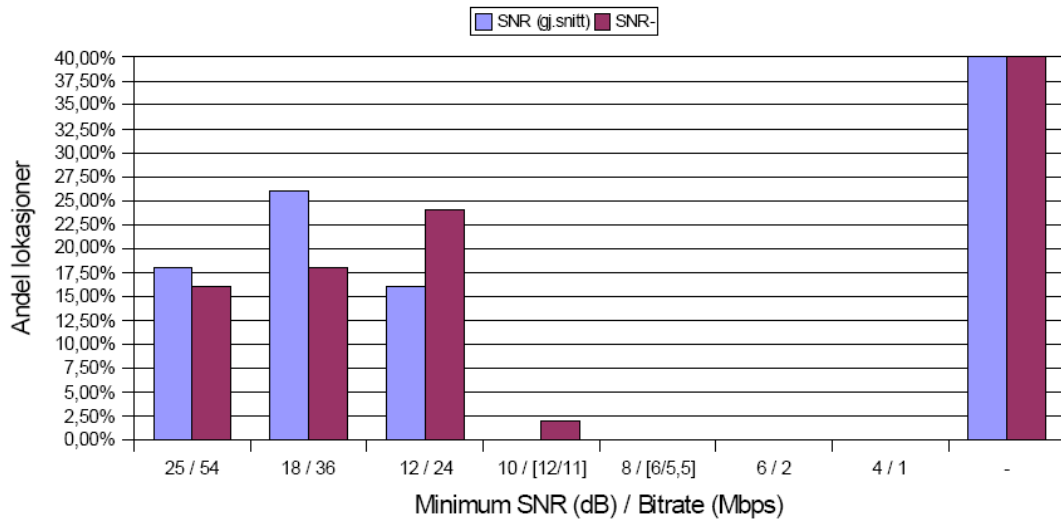


Figur 8.3: Målingsdata for signalstyrke og SNR (50 tilfeldige lokasjoner)

Dersom man sammenligner dette diagrammet med det forrige, som kun tar høyde for signal-til-støy forholdet, ser man at de er helt identiske. Fordelingen av antall lokasjoner på hvert nivå er altså likt. Dette betyr at de gjeldende testkriteriene har strengere minimumskrav til SNR enn signalstyrke, i forhold til hvilken teoretisk båndbredde som kan tilbys. Dette resultatet er ikke spesielt overraskende. En opplagt forklaring har sammenheng med andre, “konkurrerende” trådløse nettverk som opererer i nærheten av de ulike målepunktene. Disse vil påvirke støynivået, men ikke mottatt signalstyrke fra Trådløse Trondheim. Med andre ord vil flere faktorer ha innflytelse på SNR i forhold til signalstyrke, og flere begrensninger gir typisk en strengere skranke.

Siden signal-til-støy forholdet viste seg å stille de strengeste kravene til teoretisk båndbredde, er det hensiktsmessig å kikke nærmere på verdiene som ligger bak de presenterte diagrammene. Disse er som kjent basert på de gjennomsnittlige verdiene fra hver lokasjon. Et annet interessant mål er SNR-, som defineres som den laveste SNR-verdien som ble målt på hver lokasjon i den gitte måleperioden. Figur 8.4 viser hvor stor andel av lokasjonene som oppfylte de ulike minimumskravene til SNR når SNR- ble lagt til grunn. Gjennomsnittlig SNR er også inkludert i figuren for å gjøre sammenligningen enklere.

KAPITTEL 8. RESULTATER



Figur 8.4: Gjennomsnittlig SNR og SNR- (50 tilfeldige lokasjoner)

Diagrammet indikerer naturlig nok at en mindre andel av lokasjonene tilfredsstillende strengeste kravene til SNR dersom SNR- legges til grunn i stedet for den gjennomsnittlige verdien fra målingene. Med andre ord, fremgår det en forskyvning mot lavere bitrater når SNR- betraktes.

Et annet interessant mål er å se nærmere på variasjonene i SNR-verdi blant de individuelle målingene som ligger til grunn for de beregnede gjennomsnittene. For dette benyttes følgende fremgangsmåte:

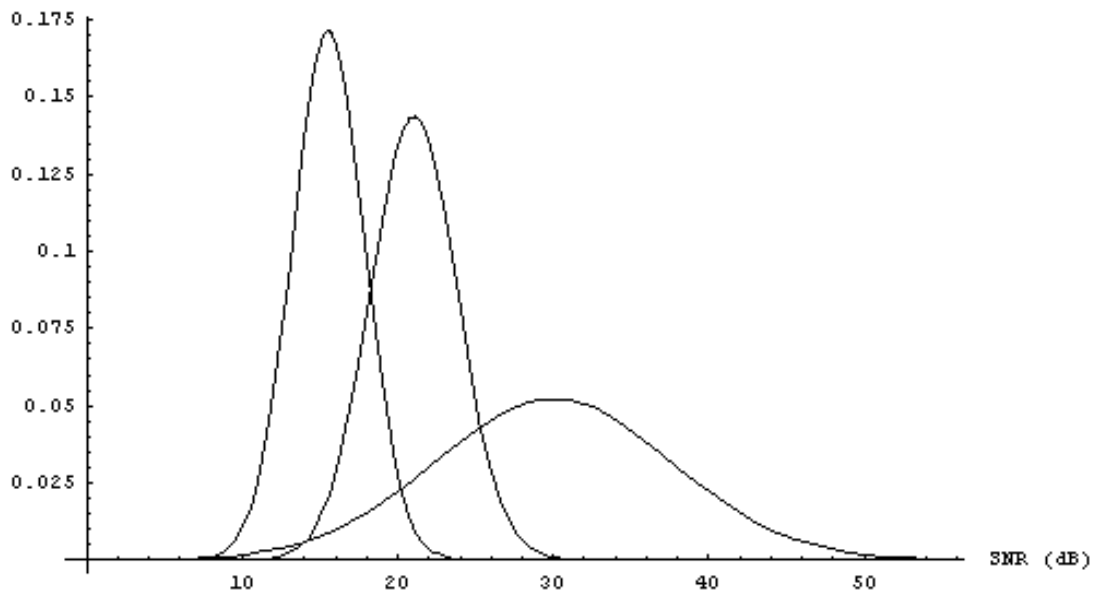
- Lokasjonene kategoriseres etter minimumskrav for gjennomsnittlig SNR.
- Samtlige delmålinger som da inngår i samme kategori, legges til grunn for å beregne gjennomsnitt, standardavvik og varians for kategoriens overordnede SNR-verdi.
- Beregningene gjøres kun for de kategoriene som en andel av lokasjonene er assosiert med.

De respektive verdiene for gjennomsnitt, standardavvik og varians følger i tabell 8.1:

Minimum SNR (dB) / Bitrate (Mbps)	25 / 54	18 / 36	12 / 24
Gjennomsnitt	30,03	21,03	15,55
Standardavvik	7,67	2,78	2,33
Varians	58,83	7,71	5,42

Tabell 8.1: Fordeling av SNR-verdier (50 tilfeldige lokasjoner)

For å tydeliggjøre SNR-verdiens variasjon, er en normalfordeling for hver kategori presentert i figur 8.5. Her er gjennomsnitt og varians fra tabell 8.1 satt lik henholdsvis forventningsverdi og varians for normalfordelingen.



Figur 8.5: Normalfordeling for SNR-verdier (50 tilfeldige lokasjoner)

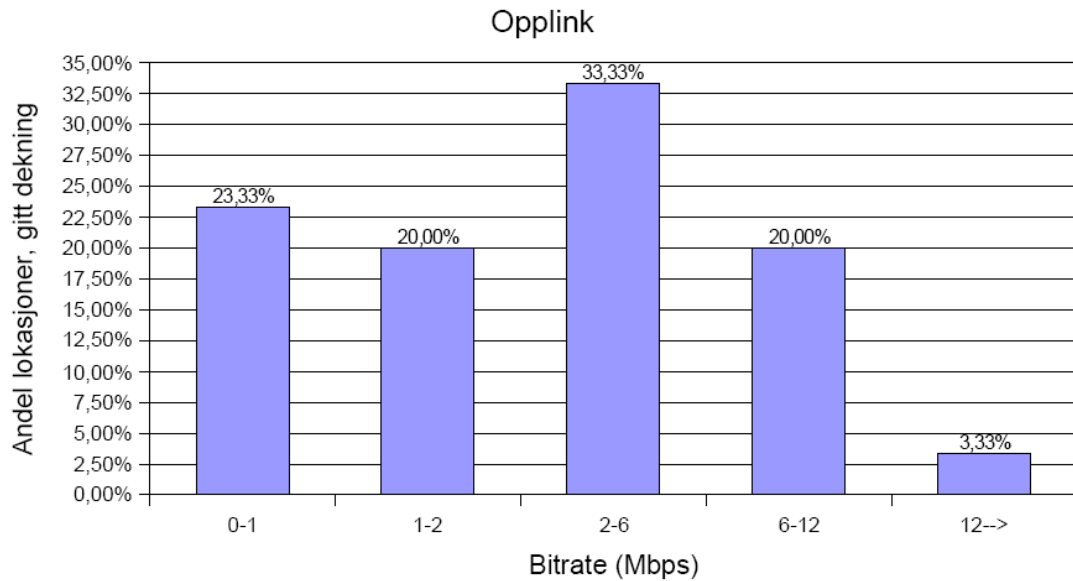
Av figuren går det fram at variasjonen avtar når minimumskravet til SNR reduseres. Dette skyldes trolig at også intervallet for kategorien skrumper inn ved lavere verdier. Variasjonen er uten tvil størst i kategorien hvor minimumskravet til SNR er 25 dB. En opplagt grunn til dette er at kategorien ikke har noen øvre skranke for tillatte verdier. Den gjennomsnittlige verdien er også mer enn 5 dB fra minimumskravet, som indikerer en relativt stor andel med svært gode signal-til-støy forhold.

8.1.2 Reell båndbredde

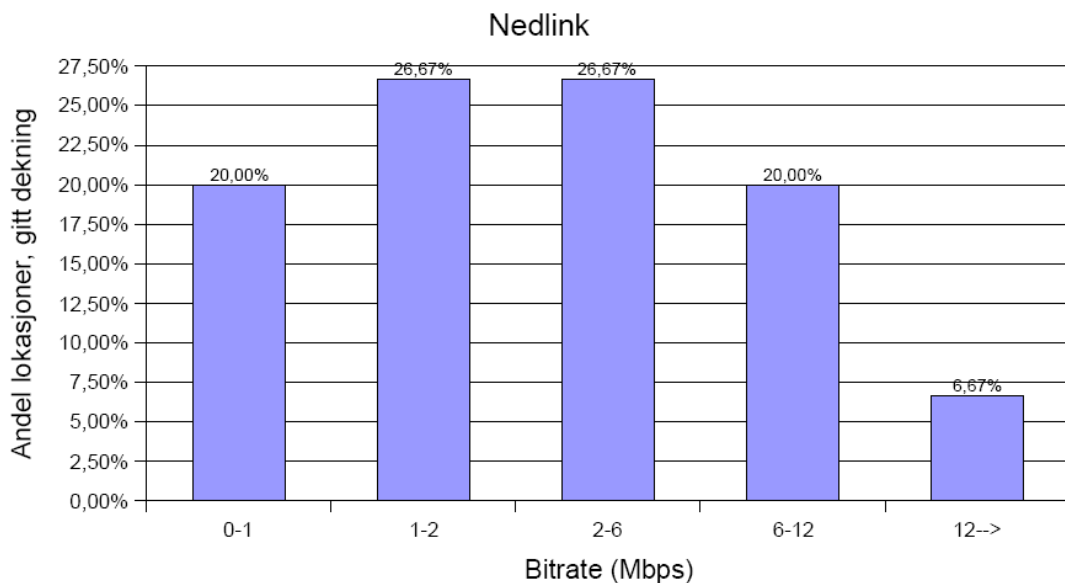
Målingene av reell båndbredde er som nevnt bare gjort på lokasjoner hvor det ble kartlagt dekning fra målingene av signalstyrke og SNR. Det er derfor viktig å bemerke seg at 40 % av de totalt 50 lokasjonene hadde for dårlig dekning til å utføre disse målingene og inngår altså ikke i de etterfølgende resultatene. Likevel gir resultatene en god pekepinn på hvor høy båndbredde som kan forventes i områder med dekning. For å gjøre sammenligningen med de teoretiske bitratene enklere, har jeg valgt å benytte tilnærmet like nivåer for båndbredde, men hvor disse har kontinuerlige intervaller. I tillegg er de høyeste bitratene utelatt, da de ikke er oppnåelige i en reell sammenheng.

Figur 8.6 og 8.7 viser hvordan resultatene fra de reelle målingene på henholdsvis opp- og nedlinken fordelte seg.

KAPITTEL 8. RESULTATER



Figur 8.6: Målingsdata for båndbredde, opplink (30 tilfeldige lokasjoner)



Figur 8.7: Målingsdata for båndbredde, nedlink (30 tilfeldige lokasjoner)

Fra diagrammene går det tydelig frem at bitratene for både opp- og nedlinken er vesentlig lavere enn i det teoretiske tilfellet. Det kan være flere grunner til dette. Generelt vil den reelle bitraten maksimalt være cirka halvparten av den teoretiske, avhengig av hvilket protokollnivå målingen utføres på [3]. Dette skyldes blant annet protokoll “overhead” og feilkorrigeringssteknikker, som er spesielt viktig for kommunikasjon over et trådløst medium.

En annen årsak til misforholdet mellom teoretisk og reell bitrate kan være at det kreves en VPN-tunnel til NTNU sitt nettverk for å koble seg opp mot NDT-serveren fra Trådløse Trondheim. Man måler derfor båndbredden på den tregeste linken i hele tunnelen i motsetning til å kun se på den trådløse linken. Dette har visst seg å kunne gi en reduksjon i båndbredden, som i større grad avhenger av annen trafikk i VPN-konsentratoren.

Når det gjelder forholdet mellom opp- og nedlinken, er det relativt små forskjeller å spore. Andelen på det høyeste intervallet er vel og merke dobbelt så høy for nedlinken som for opplinken. Dette skyldes likevel bare et marginalt avvik på én lokasjon. På denne lokasjonen er dessuten verdiene på opplinken tett oppunder det øverste intervallet. Alt i alt kan det fra disse resultatene ikke observeres noen målbar forskjell på båndbredden for opp- og nedlinken.

8.2 Del 2 - Teppemåling i ett kvartal

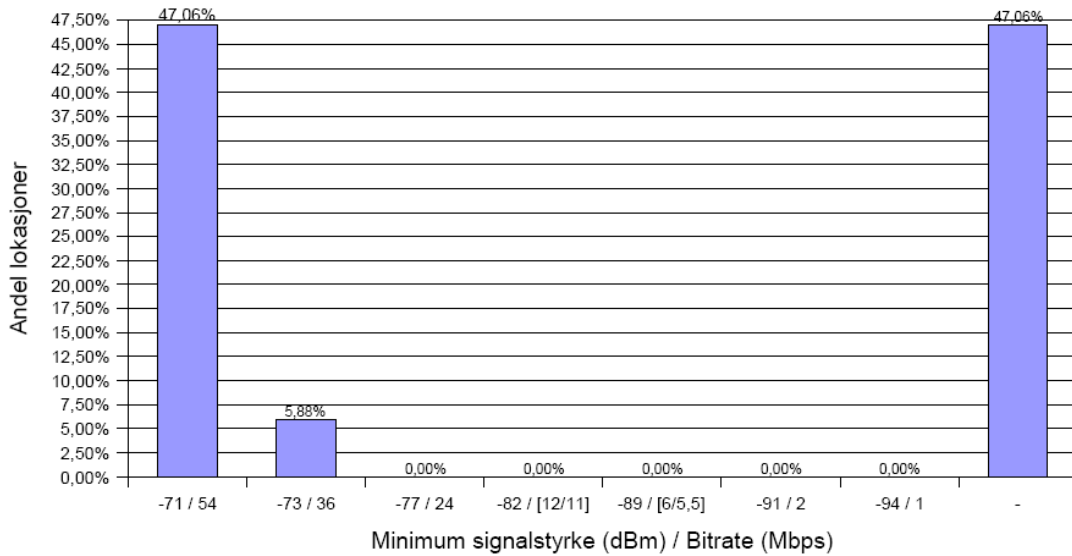
Del 2 av målingsarbeidet bestod av å gjøre flest mulig målinger i ett kvartal. Prosessen fikk tilnavnet teppemåling og resultatene presenteres i det etterfølgende. Totalt ble det gjort 17 målinger i 14 ulike lokaler. 3 lokaler ble ansett å være så store og dominerende i kvartalet at det ble gjort 2 målinger i hver av disse.

Et viktig moment å bemerke seg er at det statistisk grunnlaget er vesentlig mindre for del 2 av målingsarbeidet enn for del 1, med henholdsvis 17 og 50 lokasjoner. Hver enkelt måling i del 2 vil derfor påvirke fordelingen av observasjoner i høyere grad. Unormale resultater blir således mer fremtredende og ikke kamuffert av et bredere utvalg. Slik målingsarbeidet er realisert, bør resultatene fra teppemålingen derfor studeres for å underbygge resultatene fra de tilfeldige målingene i del 1.

8.2.1 Signalstyrke, SNR og teoretisk båndbredde

Som i del 1, presenteres først hvor stor andel av lokasjonene som tilfredsstilte de ulike kravene til mottatt signalstyrke, med korresponderende bitrate. Av de totalt 17 lokasjonene, ble den prosentvise fordelingen som vist i figur 8.8:

KAPITTEL 8. RESULTATER

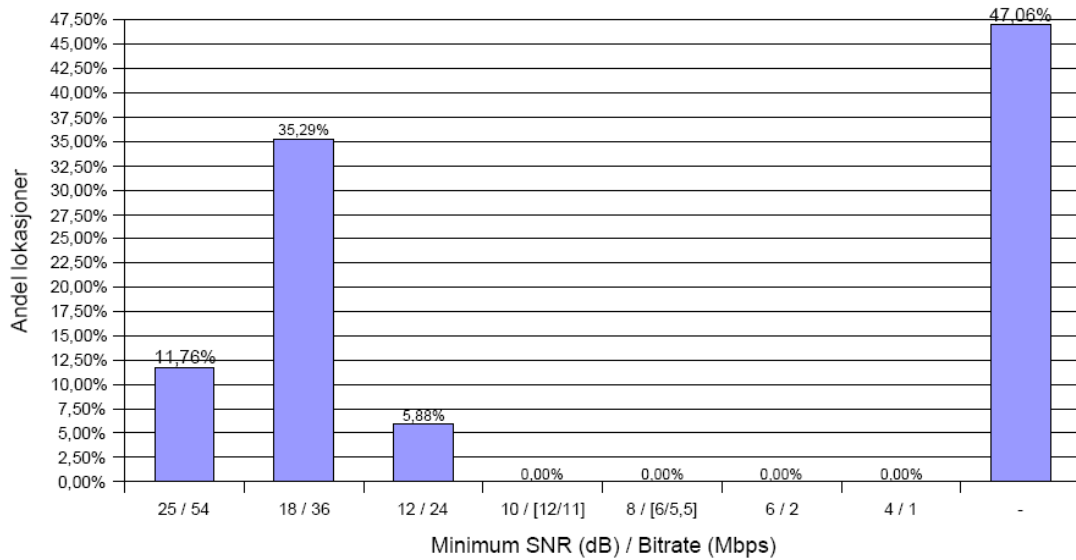


Figur 8.8: Målingsdata for signalstyrke (teppemåling, 17 lokasjoner)

Figuren indikerer to markante ytterpunkter. Andelen uten dekning er faktisk identisk med andelen som tilfredsstill det strengeste kravet til signalstyrke. Hver av disse utgjør hele 47,06 % av lokasjonene, og bekrefter således forholdene i del 1 med en såkalt “enten eller” situasjon. De resterende 5,88 % kan sies å ha forholdsvis god signalstyrke, hvor en teoretisk bitrate på 36 Mbps kan tilbys.

Figur 8.9 tar for seg det samme scenariet, men hvor andelen lokasjoner som tilfredsstill de ulike minimumskravene til signal-til-støy forholdet betraktes. Korresponderende bitrater er også oppgitt.

KAPITTEL 8. RESULTATER

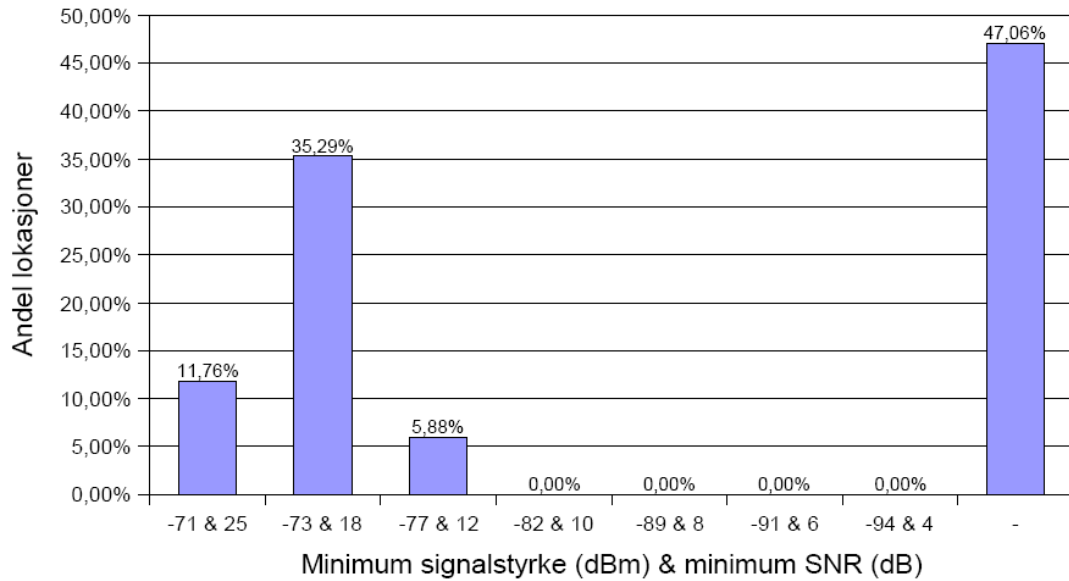


Figur 8.9: Målingsdata for SNR (teppemåling, 17 lokasjoner)

Igjen bekreftes den såkalte “enten eller” situasjonen, men hvor andelen lokasjoner med dekning fordeler seg over de tre høyeste nivåene. I forhold til foregående diagram, ser man også at den prosentvise andelen på hvert nivå forskyves mot lavere bitrater når SNR, kontra signalstyrke, betraktes.

For å utdype forholdet mellom signalstyrke, signal-til-støy forhold og teoretisk båndbredde, må man se nærmere på situasjonen hvor minimumskravet til både signalstyrke og SNR er gjeldende. Den strengeste skranken vil da avgjøre hvor høy teoretisk bitrate som kan tilbys. Figur 8.10 viser hvordan andelen lokasjoner i hver kategori da fordelte seg. De teoretiske bitratene er utelatt fra diagrammet, men er tilsvarende de to foregående diagrammene.

KAPITTEL 8. RESULTATER

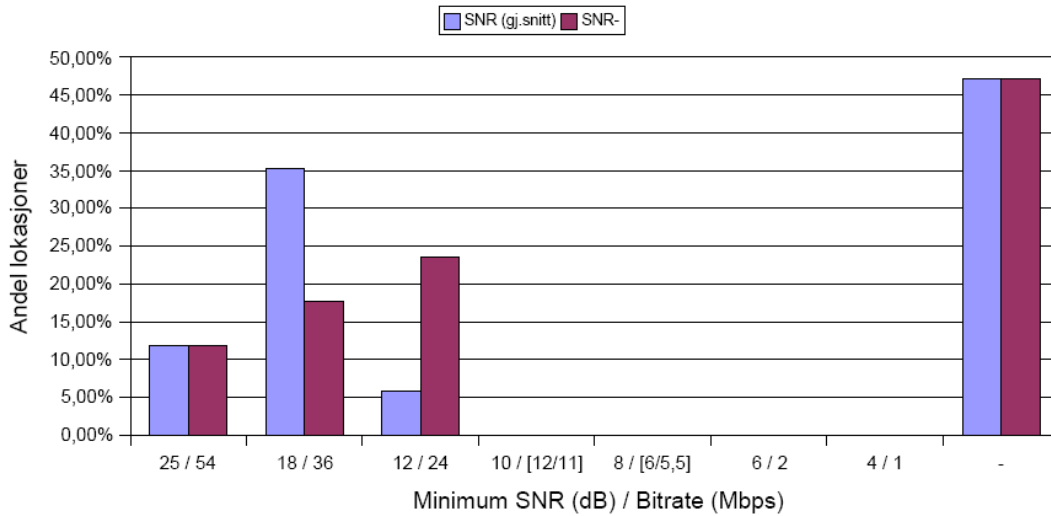


Figur 8.10: Målingsdata for signalstyrke og SNR (teppemåling, 17 lokasjoner)

Som i del 1 ser man at dette diagrammet er identisk med det foregående, hvor kun minimumkravet til SNR betraktes. Dette betyr at det stilles strengere krav til SNR enn signalstyrke i forhold til hvor høy båndbredde som kan tilbys. Årsaken til dette er allerede diskutert i underseksjon 8.1.1 og forklares ikke nærmere her.

Også for teppemålingen viste det seg altså at signal-til-støy forholdet stilte de strengeste kravene til båndbredde. Det er derfor hensiktsmessig å se nærmere SNR-, som altså representerer den lavest målte SNR-verdien per lokasjon. Andelen lokasjoner i hver kategori når SNR- ble lagt til grunn er vist i figur 8.11. Gjennomsnittlig SNR og signalstyrke er også inkludert for å gjøre sammenligningen enklere.

KAPITTEL 8. RESULTATER



Figur 8.11: Gjennomsnittlig SNR og SNR- (teppemåling, 17 lokasjoner)

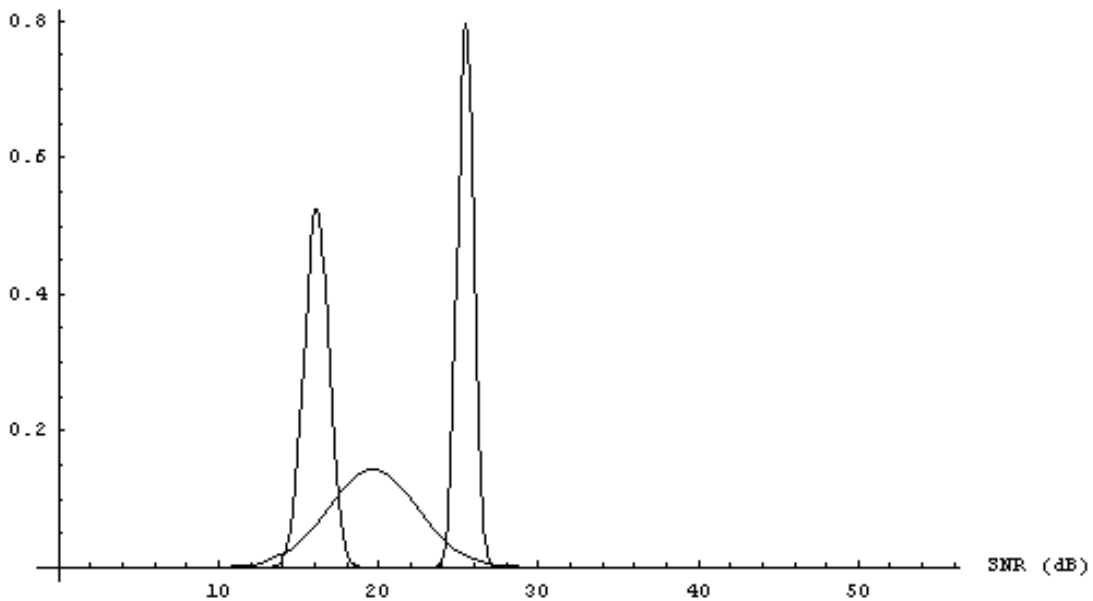
I diagrammet ser man at det strengeste minimumskravet er tilfredsstilt av like stor andel lokasjoner for både gjennomsnittlig SNR og SNR-. På neste nivå oppfyller derimot bare halvparten av lokasjonene som tilfredsstiller gjennomsnittlig SNR også kravene for SNR-. Dette kan tyde på at SNR-verdiene varierer mer når signalforholdene generelt forverres.

For å se nærmere på disse variasjonene er det beregnet overordnet gjennomsnitt, standardavvik og varians for de ulike kategoriens SNR-verdi. Fremgangsmåten for å kalkulere disse verdiene tilsvare metoden som ble beskrevet i underseksjon 8.1.1 og forklares ikke nærmere her. Verdiene er presentert i tabell 8.2.

Minimum SNR (dB) / Bitrate (Mbps)	25 / 54	18 / 36	12 / 24
Gjennomsnitt	25,45	19,63	16,11
Standardavvik	0,50	2,79	0,76
Varians	0,25	7,80	0,58

Tabell 8.2: Fordeling av SNR-verdier (teppemåling, 17 lokasjoner)

Videre er en normalfordeling benyttet for å fremstille SNR-verdiens variasjon grafisk. Gjennomsnittet og varians fra tabell 8.2 settes da lik henholdsvis forventningsverdi og varians for normalfordelingen. Kurvene er vist i figur 8.12.



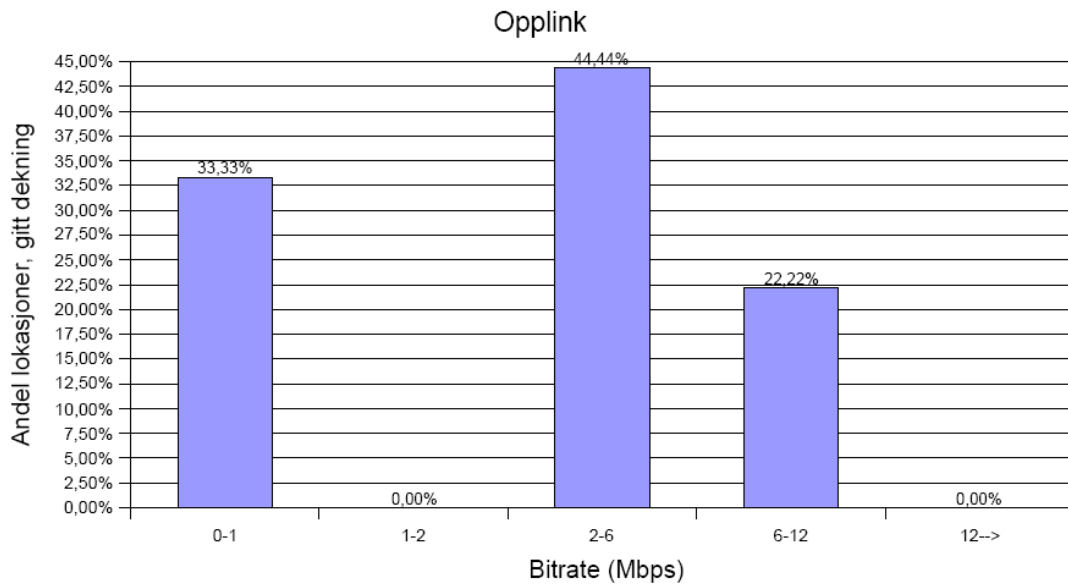
Figur 8.12: Normalfordeling for SNR-verdier (teppemåling, 17 lokasjoner)

Kurvene bærer preg av at relativt få lokasjoner kategoriseres innenfor de ulike nivåene. Dette er spesielt fremtredende for de to ytterkantene i figuren, som har svært smale sannsynlighetsfordelinger med lite varians. Det midterste intervallet, hvor den største andelen av lokasjonene hører hjemme, har derimot en glattere kurve med mer variasjon blant delmålingene.

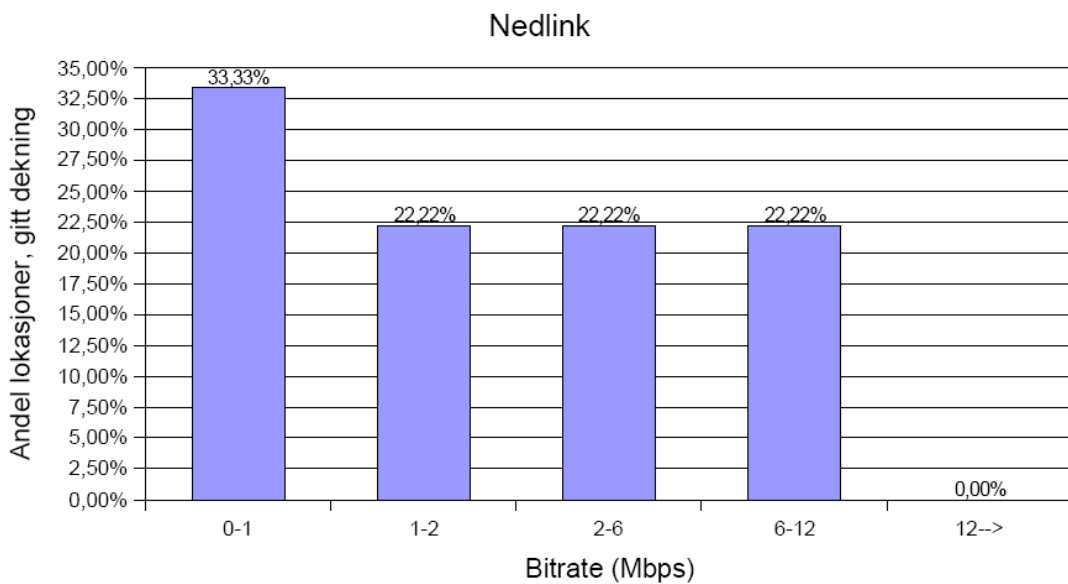
8.2.2 Reell båndbredde

For de snaue 53 % av lokasjonene hvor det ble kartlagt dekning, ble den reelle båndbredden testet opp i mot NDT-serveren på NTNU. Drøye 47 % av lokasjonene hadde altså null dekning eller for ustabile forhold til at det var mulig å koble seg til VPN-konsentratoren og utføre målingen. Figur 8.13 og 8.14 viser hvordan resultatene fra de reelle målingene på henholdsvis opp- og nedlinken fordelte seg.

KAPITTEL 8. RESULTATER



Figur 8.13: Målingsdata for båndbredde, opplink (teppemåling, 9 lokasjoner)



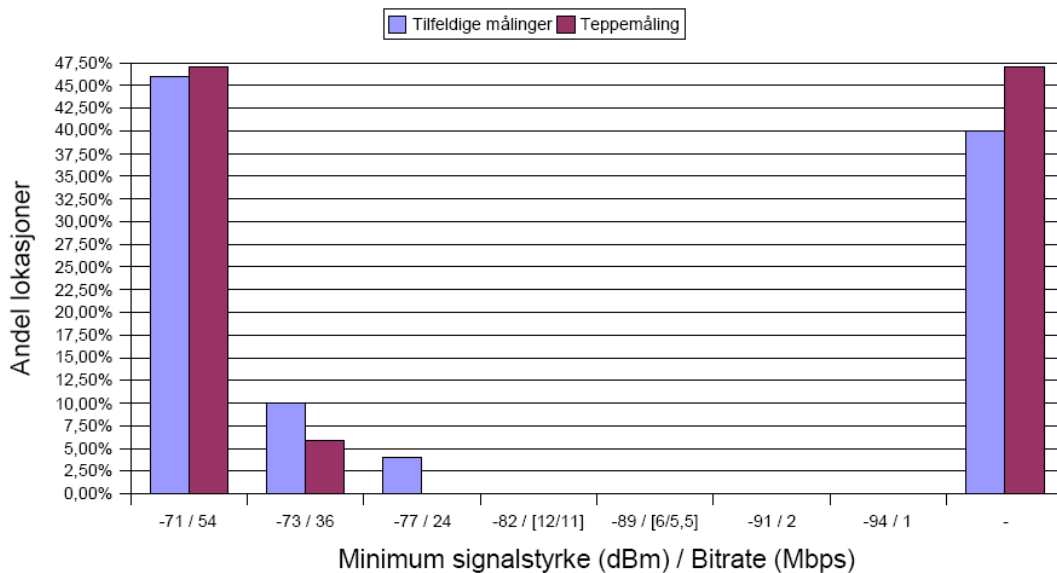
Figur 8.14: Målingsdata for båndbredde, nedlink (teppemåling, 9 lokasjoner)

Resultatene fra teppemålingen bekrefter at den reelle båndbredden kan forventes å være betydelig lavere enn den teoretiske båndbredden. Grunner til dette er allerede diskutert i underseksjon 8.1.2. I likhet med del 1, er også fordelingen av reell båndbredde for opp- og nedlinken tilnærmet identiske. Fra diagrammene er eneste forskjell å spore at andelen som inngår i intervallet 1-2 Mbps for nedlinken er forskjøvet opp til neste intervall på opplinken. Ser man nærmere på verdiene som

ligger bak resultatene, skyldes dette relativt små variasjoner grunnet noe ustabile målinger. Det kan derfor ikke trekkes noen konklusjoner om målbare forskjeller i båndbredde for opp- og nedlinken.

8.3 Sammenligning

I det etterfølgende sammenlignes utvalgte deler av de allerede presenterte resultatene fra del 1 og 2 av målingsarbeidet. Det er da viktig å ha i bakhodet at det statistiske grunnlaget for del 1 er betydelig større enn for del 2, og bør således ilegges størst vekt. Først sammenlignes den andelen lokasjoner som tilfredsstilte de ulike minimumskravene til signalstyrke. Dette er vist i figur 8.15.

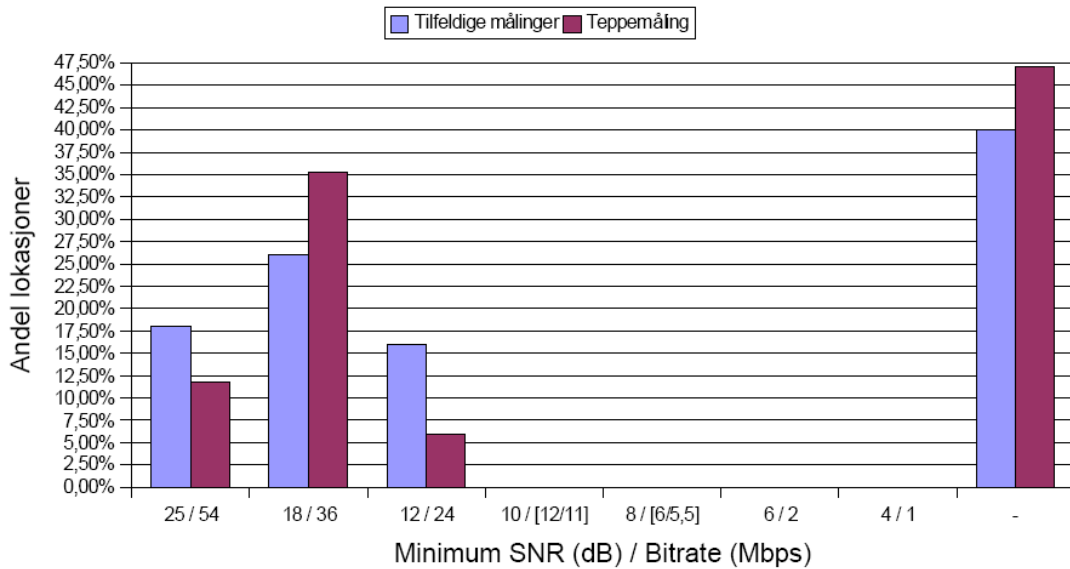


Figur 8.15: Sammenligning av signalstyrke

Selv om teppemålingen resulterte i en litt større andel uten dekning enn de tilfeldige målingene, er det ingen signifikante forskjeller å spore. Begge målingene påviser den allerede omtalte “enten eller” situasjonen, hvor det enten er god signalstyrke eller for ustabil eller svakt til at det kan sies å være dekning i det hele tatt.

Tilsvarende sammenligning er gjort i figur 8.16, men hvor minimumskravet til signal-til-støy forholdet betraktes.

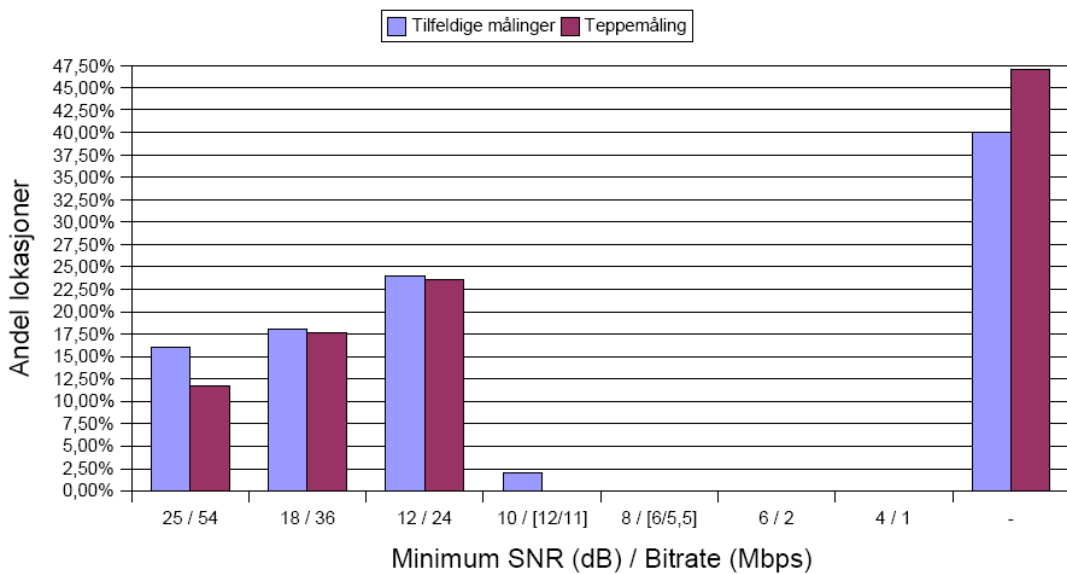
KAPITTEL 8. RESULTATER



Figur 8.16: Sammenligning av SNR

Også her er forskjellene mellom resultatene fra teppemålingen og de tilfeldige målingene for små til at det kan påvises noe fremtredende forskjeller. Tvert i mot, underbygger teppemålingen resultatene fra de tilfeldige målingene og bekrefter den omtalte “enten eller” situasjonen.

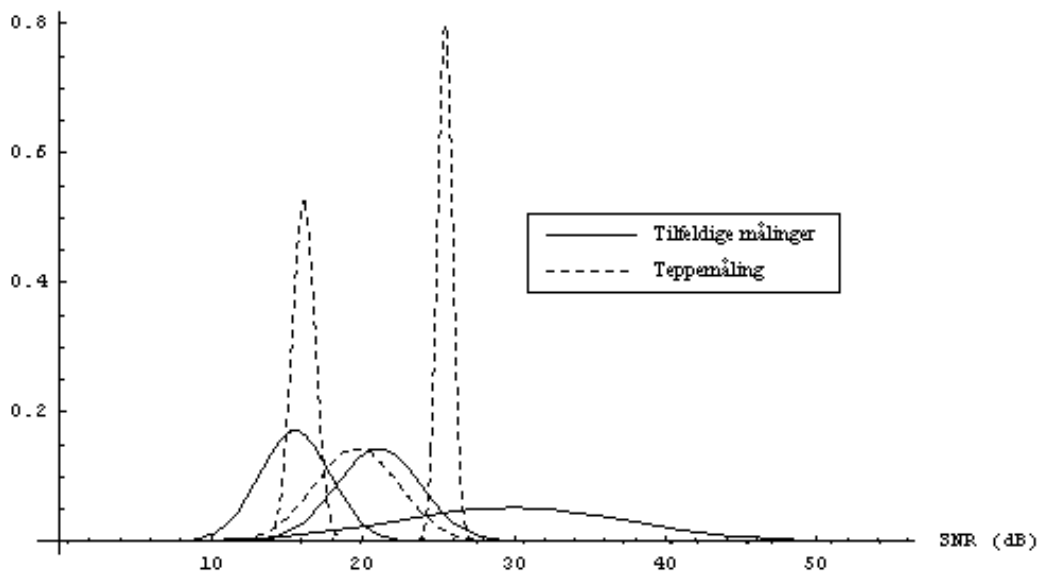
Videre er også SNR- betraktet. Andelen lokasjoner som da tilfredsstilte de ulike minimumskravene til SNR er sammenlignet i figur 8.17.



Figur 8.17: Sammenligning av SNR-

Teppemålingen og de tilfeldige målingene kan også her sies å ha gitt svært like resultater. Man kan dog se at de tilfeldige målingene er representert på et lavere nivå enn teppemålingen. Andelen er svært liten og det er faktisk bare én lokasjon som hadde så lav SNR-verdi. Forskjellen skyldes nok derfor bare at det ble gjort flere målinger i del 1, slik at sannsynligheten for variasjoner også økte.

For å se nærmere på disse variasjonene, er de normalfordelte kurvene for SNR-verdiene plottet i figur 8.18. Kurvene er allerede presentert hver for seg, men med ulike verdier på y-aksen. X-aksene var derimot identiske. Det etterfølgende diagrammet egner seg uansett best for å sammenligne variasjonene.



Figur 8.18: Sammenligning av normalfordelinger for SNR-verdier

Generelt viser kurvene at de tilfeldige målingene har mer variasjon i SNR-verdiene enn teppemålingen. Som allerede antydnet, er en viktig årsak til det at det totale antall målinger er nesten tre ganger så stort for de tilfeldige målingene i forhold til teppemålingen. Den interne variansen på én lokasjon har nemlig ofte vist seg å være liten. Forskjellen i varians er størst for kategorien med strengest minimumskrav til gjennomsnittlig SNR. Grunnen til dette er at samtlige, av et fåtall, delmålinger i denne kategorien var svært stabile for teppemålingen. De korresponderende lokasjonene for de tilfeldige målingene har tilsvarende stabilitet hver for seg. Siden det ikke er noen øvre beskrankning i denne kategorien, skaper likevel noen lokasjoner, med svært gode signal-til-støy forhold, en overordnet variasjon blant delmålingene. Dette har også ført til at gjennomsnittet på dette nivået er betydelig høyere for de tilfeldige målingene enn for teppemålingen.

8.4 Støy

I denne seksjonen sees det nærmere på støynivået som ble kartlagt under målingsarbeidet. Dette er vesentlig for utregningen av SNR, som altså i logaritmisk målestokk er differansen mellom signalstyrke og støy. Følgende tilnærming benyttes for å beregne fordelingen for det generelle støynivået:

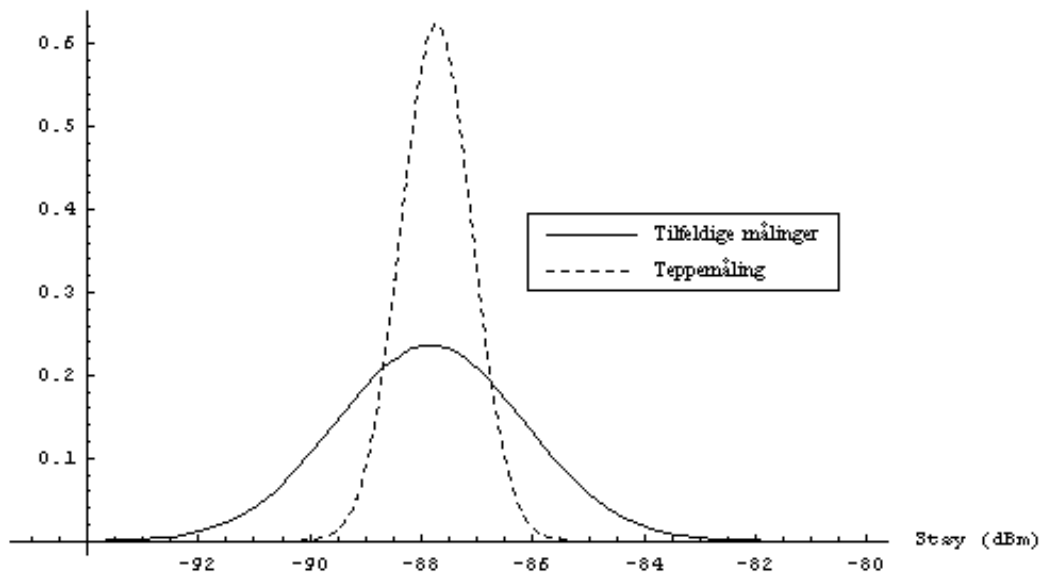
- Samtlige delmålinger på hver lokasjon med signalstyrke forskjellig fra 0, har også støynivå forskjellig fra 0.
- Hver enkelt delmåling av støy som ikke er 0, legges til grunn for å beregne gjennomsnitt, standardavvik og varians, uavhengig av om lokasjonen oppfyller krav for dekning eller ikke.

Tabell 8.3 presenterer fordelingen av støynivået for både de tilfeldige utvalgte lokasjonene og teppemålingen.

	Tilfeldige målinger	Teppemåling
Gjennomsnitt (dBm)	-87,84	-87,73
Standardavvik	1,69	0,64
Varians	2,86	0,41

Tabell 8.3: Fordeling for støynivå

Videre er normalfordelinger benyttet for å illustrere fordelingen tydeligere. Gjennomsnitt og varians fra tabell 8.3 er da satt lik henholdsvis forventningsverdi og varians for normalfordelingen. Kurvene er gjengitt i figur 8.19.



Figur 8.19: Normalfordelinger for støynivå

Generelt kan man si at det er svært lite variasjon i støynivået. Det er litt høyere varians blant de tilfeldige målingene, men dette skyldes hovedsaklig svært lave støyverdier på én lokasjon. Utover dette, kan støynivået med stor sannsynlighet forventes å ligge nær den gjennomsnittlige verdien. Verdiene er dog basert på utstyret og programvaren som er benyttet i målingsarbeidet.

8.5 Taletrafikk

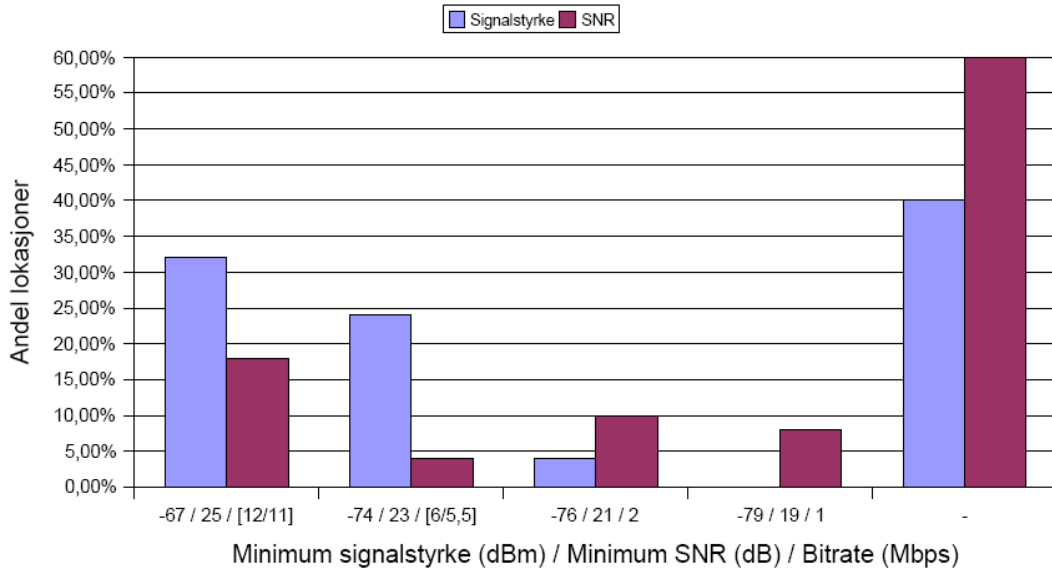
Resultatene fra målingsarbeidet har til nå blitt kategorisert i forhold til minimumskrav for signalstyrke og SNR som er gyldige for datatrafikk. Taletrafikk er mer følsom for forsinkelser og forstyrrelser i nettet og stiller derfor strengere krav for å oppnå samme kvalitet. I denne seksjonen betraktes andelen lokasjoner som tilfredsstilte de ulike kategoriene når krav for taletrafikk ble lagt til grunn. Dette gjøres for både de tilfeldige målingene og teppemålingen. I tillegg presenteres resultater fra målinger av talekvalitet i Trådløse Trondheim.

8.5.1 Minimumskrav for signalstyrke og SNR

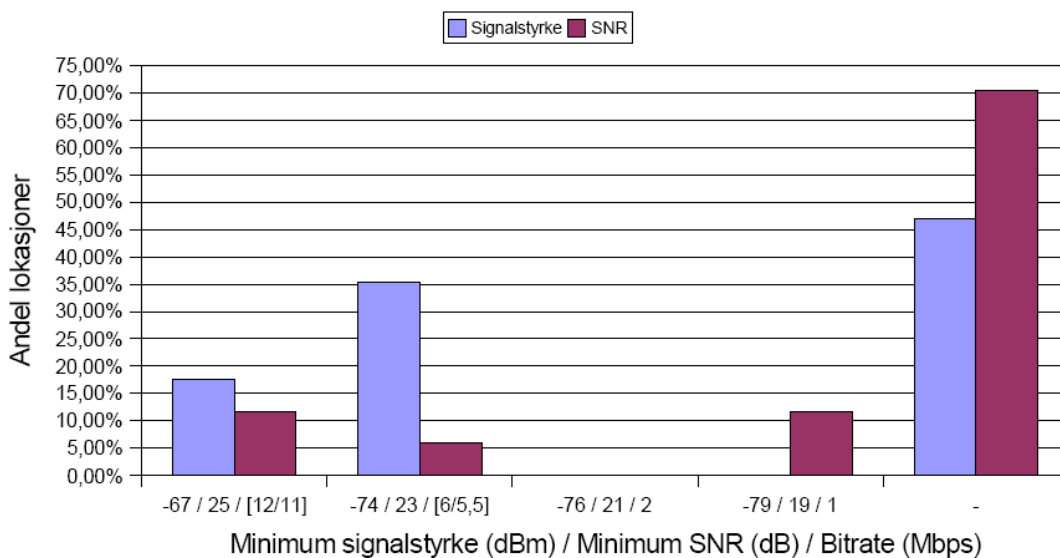
Når taletrafikk kontra datatrafikk betraktes, endres også minimumskravene til signalstyrke og SNR for å tilby ulik grad av teoretisk båndbredde. Dette fremgår av tabell

KAPITTEL 8. RESULTATER

7.2. Figur 8.20 og 8.21 viser fordelingen av lokasjoner i hver kategori for resultatene av henholdsvis del 1 og del 2 av målingsarbeidet.



Figur 8.20: Målingsdata kategorisert etter minimumskrav for tale (50 tilfeldige lokasjoner)



Figur 8.21: Målingsdata kategorisert etter minimumskrav for tale (teppemåling, 17 lokasjoner)

I diagrammene er det viktig å legge merke til at de teoretisk bitratene starter på lavere

nivå enn tilsvarende diagrammer for datatrafikk. Det oppstår altså en forskyvning mot lavere bitrater allerede i utgangspunktet. Dette er ikke nødvendigvis et problem, ettersom ren tale stiller lavere krav til båndbredde enn for eksempelvis video og store dataoverføringer [1]. Utvides tale til videokonferanser eller annen multimedia kommunikasjon, blir kapasiteten derimot en kritisk faktor.

Videre ser man at SNR igjen stiller strengere krav enn signalstyrke i forhold til hvor høy båndbredde som kan tilbys. Dette er spesielt synlig i kategorien med null dekning, hvor andelen basert på SNR er vesentlig høyere enn for signalstyrke. Dette skyldes at flere lokasjoner ikke tilfredsstillende laveste minimumskrav til SNR, selv om signalstyrken tilsynelatende er tilstrekkelig god. Tidligere diagrammer har også vist at signalforholdene på disse lokasjonene er gode nok for datatrafikk. Å betegne kategorien som lokasjoner uten dekning, er således noe misvisende, selv om signalforholdene ikke antas gode nok for tale.

8.5.2 Talekvalitet

Medstudent Petter Stray har testet talekvaliteten for bærbar PCer og håndholdte mobile terminaler i Trådløse Trondheim [28]. Testingen som presenteres her, er utført på Trondheim Torg, som per i dag er Trådløse Trondheims beste dekningsområde, med 54 Mbps teoretisk båndbredde. Testingen har gått ut på å etablere toveis VoIP-samtaler med henholdsvis bærbar PCer og mobile terminaler, og estimere “Mean Opinion Score” (MOS)-verdier hvert tredje sekund. MOS representerer en gjennomsnittlig verdi for subjektive tester av talekvaliteten, og benytter rangeringen angitt i tabell 8.4 [29].

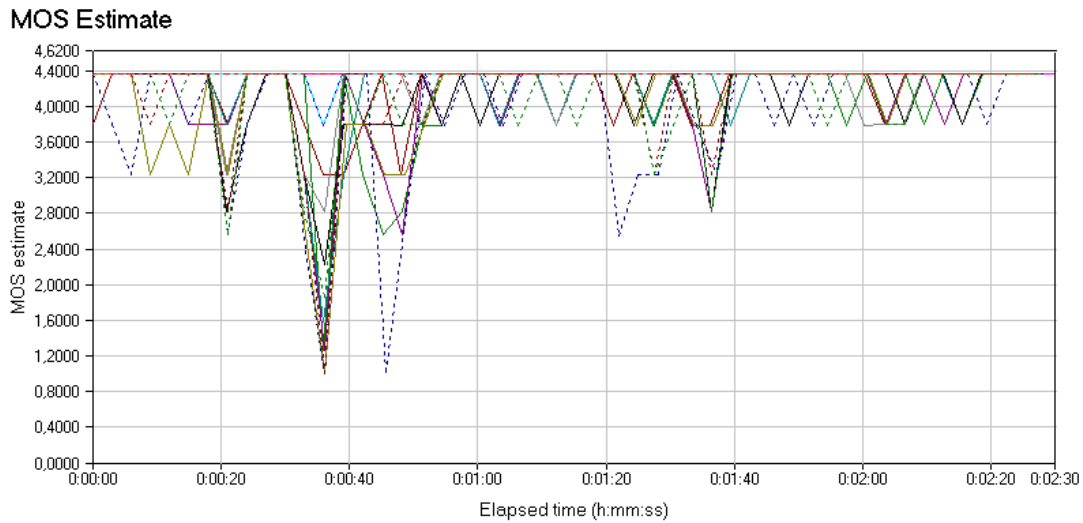
Karakter	Beskrivelse
5	Svært god
4	God
3	Middels
2	Dårlig
1	Svært dårlig

Tabell 8.4: MOS-skala for talekvalitet

Både de bærbar PCene og de mobile terminalene benytter G.711 talekodek. Denne kodeken er standardisert av “International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector” (ITU-T) og er i dag den meste utbredte kodeken i PSTN/ISDN [29].

Figur 8.22 viser resultatene fra en måleperiode på to og et halvt minutt hvor samtlige terminaler var bærbar PCer.

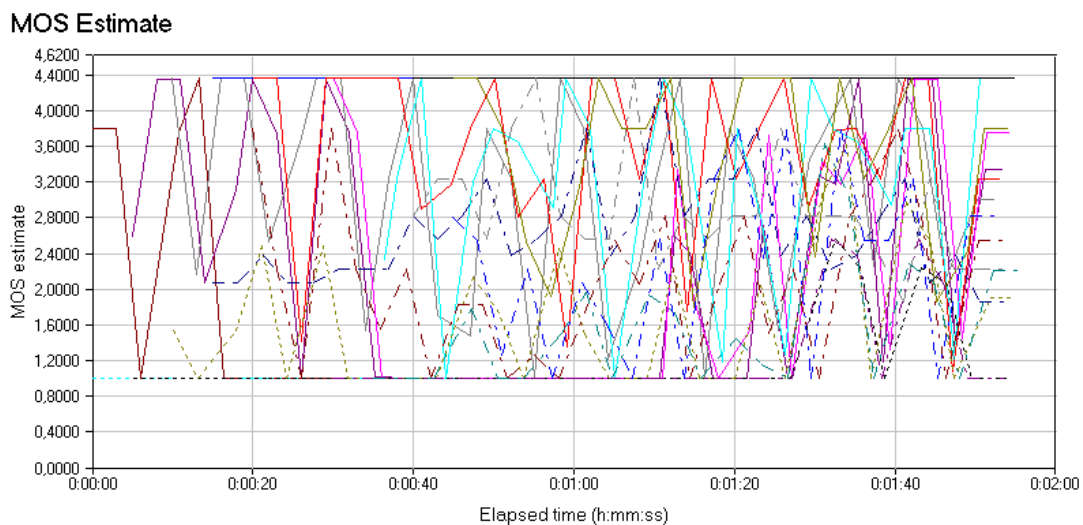
KAPITTEL 8. RESULTATER



Figur 8.22: Måling av MOS-estimat for VoIP-samtaler med bærbare PCer [28]

Selv om det er litt vanskelig å skille de ulike fargene og strekene fra hverandre, er det totalt 20 forskjellige kombinasjoner i figuren. Hver utgjør én talestrøm, slik at det er 10 samtaler til sammen. Det viktigste er likevel å studere hvor gode MOS-estimat som ble oppnådd. Disse viste seg å være relativt bra i dette tilfellet, hvor terminalene var bærbare PCer. Majoriteten av estimatene befinner seg fra middels og bedre talekvalitet. Man ser likevel enkelte utslag av lave estimater. De største avvikene hadde dog sammenheng med selve implementasjonen av målingene.

Figur 8.23 viser resultatene fra en måleperiode på to minutter med mobile terminaler.



Figur 8.23: Måling av MOS-estimat for VoIP-samtaler med mobile terminaler [28]

Denne figuren representerer også MOS-estimat for 10 toveis samtaler. Én foregår med bærbar PC, mens de resterende er satt opp med håndholdte mobile terminaler. De eneste talestrømmene som opplever stabil talekvalitet er de hvor bærbar PC ble benyttet. De mobile terminaler har derimot en voldsom variasjon i MOS-verdier, som i tillegg stort sett gjenspeiler en dårlig talekvalitet. Med andre ord indikerer testresultatene at talekvaliteten fra de mobile terminalene er vesentlig dårligere enn for de bærbare PCene og rett og slett for dårlig til at en normal samtale kan gjennomføres.

8.6 Generelle erfaringer fra målingsarbeidet

Å gjøre et relativt omfattende målingsarbeid medfører ofte overraskelser og situasjoner man ikke har tatt høyde for i testspesifikasjonen. Denne seksjonen beskriver erfaringer som ble gjort underveis i arbeidet, og som kan ha påvirket resultatene i ulik grad.

De tilfeldige utvalgte lokasjonene ble markert i forkant av målingene, men måtte ofte flyttes til nærliggende lokasjoner for å realiseres. Grunnen til dette var først og fremst at boligen eller lokalet skulle oppfylle de på forhånd oppførte kravene til testmiljøet, som spesifisert i tabell 7.1. Et typisk problem var at bygningen ikke oppfylte kravet om å ha et rom i første etasje med vindu vendt mot dekningsområdet utenfor. I tillegg kunne bygningen være stengt, fraflyttet eller av andre årsaker uegnet for å utføre måling i.

For både de tilfeldige målingene og teppemålingen viste det seg at flesteparten av lokasjonene var valgt i såkalte “offentlige” lokaler, som for eksempel caféer, restauranter, butikker og kiosker. Dette er naturlig ettersom det trådløse dekningsområdet er bygd ut i de mest sentrale delene av Trondheim, med mye offentlig virksomhet. Dette påvirket likevel utførelsen av målingene og trolig også resultatene til en viss grad. Følgende betraktninger er gjort rundt dette:

- Tidsrommet for målingene måtte tilpasses lokalets åpningstider i tillegg til testspesifikasjonens krav til tidsrom. De fleste målingene måtte derfor gjøres i første del av tidsrommet, som resulterte i at relativt få målinger kunne utføres per gang det ble gjort målinger.
- Sammenlignet med privatboliger, har butikker typisk større glassvinduer, for å tiltrekke seg kunder. Signalene trenger lettere gjennom glass enn for eksempel betong- og trevegger. Med et fåtall observasjoner i privatboliger, gir resultatene derfor uttrykk for en bedre dekningsgrad enn hva som ville vært tilfellet dersom samtlige lokasjoner var privatboliger.

Et annet moment som oppstod, var spørsmålet om hva som skal kategoriseres som første etasje i en bygning. Man har tilfeller med såkalte høye første etasjer, med god klaring til bakkenivå, og tilfeller med lave første etasjer, som delvis befinner seg under bakken. Det første tilfellet er å betrakte som relativt uproblematisk, og har trolig

KAPITTEL 8. RESULTATER

liten innvirkning på resultatene av målingene. Disse målingene ble derfor utført med standard prosedyrer. I tilfeller med lav første etasje, er det lite gunstig, med tanke på signalstyrken, å gjøre målingene langt under bakkenivå. I situasjoner hvor deler av rommet befant seg under bakkenivå, ble det derfor forsøkt å gjøre målingene i en “høy” avdeling av rommet, nær bakkenivå. Det skal dog påpekes at slike tilfeller oppstod svært sjeldent, og ble forsøkt unngått hvis det var gode alternative bygninger i nærheten.

Kapittel 9

Diskusjon og tolkning av resultater

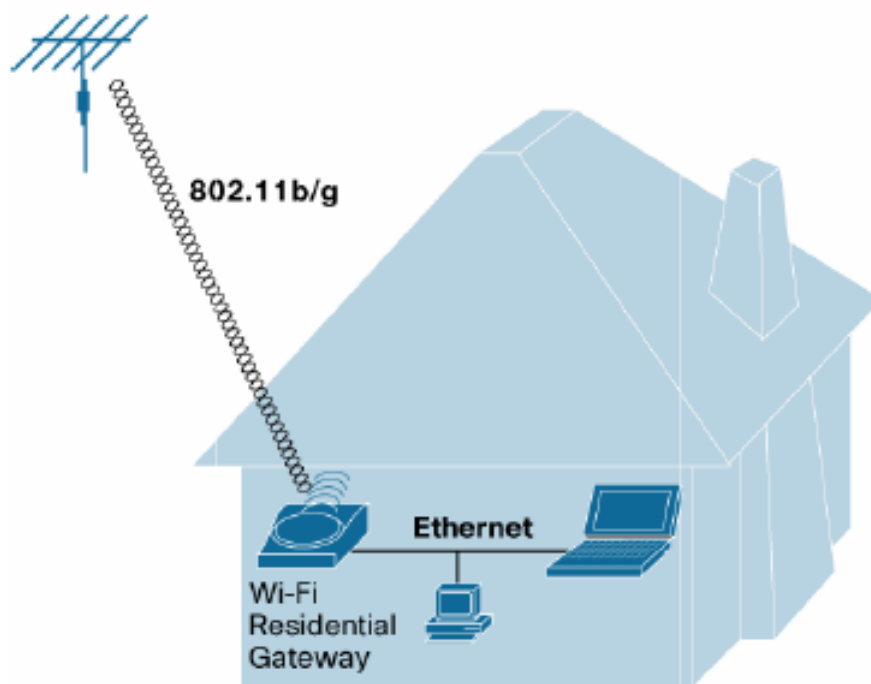
Tar man utgangspunkt i resultatene fra de tilfeldige målingene og supplerer med erfaringene fra teppemålingen, kan Trådløse Trondheim per i dag sies å ha en dekningsgrad innendørs på om lag 60 % for datatrafikk. Denne andelen er dog basert på måleprosedyrene og testkriteriene som ble benyttet for å fremstille resultatene. I tillegg vil de potensielle kundenes bruksmønster være en viktig faktor. Det sistnevnte står sentralt for diskusjonen i dette kapitlet, og er avgjørende for å indikere om resultatene gir et optimistisk, pessimistisk eller nøytralt bilde av dekningsgraden.

For videre diskusjon har jeg valgt å gjøre følgende oppdeling i forhold til brukernes aksessform:

- **Fast aksess**
Brukerne antas å være tilnærmet stasjonære i bruksmønsteret. Det viktigste er å optimalisere dekningsgraden i boligen.
- **Nomadisk og mobil aksess**
Brukerne ønsker å aksessere nettet fra flere lokasjoner (nomadisk) eller i bevegelse mellom lokasjonene (mobil). Flere og gjerne kontinuerlige dekningsområder er derfor ønskelig.

9.1 Fast aksess

Resultatene fra målingene kan sies å gi et optimistisk bilde av Trådløse Trondheims dekningsgrad innendørs fordi samtlige målinger er gjort nært et vindu vendt ut mot dekningssonene utendørs. Dette er ikke nødvendigvis en riktig konklusjon hvis man ønsker å optimalisere dekningsgraden internt i boligen. Ved å plassere en “gateway” i den delen av boligen som oppnår best dekning, kan man internt opprettholde den samme dekningsgraden i hele huset gjennom et lokalt Ethernet eller Wi-Fi [30]. Et slikt oppsett er illustrert i figur 9.1:



Figur 9.1: Oppsett for internt, trådløst hjemmenett knyttet mot trådløst bynett [30]

Ved å installere en slik løsning kan man altså løse problemet med varierende dekningsgrad internt i huset. Tvert i mot, kan man optimalisere dekningsgraden ved å plassere “gatewayen” på den beste lokasjonen i boligen. I tillegg har en slik “gateway” gjerne en bedre radioantenne enn en bærbar datamaskin, slik at mottatt signalkvalitet fra det trådløse bynettverket forbedres ytterligere. Dersom Internett-forbindelse til resten av huset distribueres internt med Wi-Fi, kan dette foregå på en annen frekvens, og således forringes ikke signalkvaliteten på grunn av interferens.

For ytterligere optimalisering av signalforholdene, kan man plassere en antenne på taket eller ytterveggen av boligen. Kabler kan så strekkes inn i boligen hvor en tilsvarende “gateway” kan distribuere Internett-forbindelsen gjennom et lokalt Ethernet eller Wi-Fi. På denne måten vil signalene unngå svekking som følge av propagasjon gjennom husveggen.

For bruksmønster hvor fast aksess i boligen er det viktigste, gir resultatene fra målingsarbeidet altså et heller pessimistisk bilde av Trådløse Trondheims dekningsgrad. Som beskrevet over, krever forbedrede signalforhold vel og merke oppsett av interne hjemmenettverk. Dekningsgraden kan likevel antas å overstige 60 % hvis slike konfigurasjoner tas i bruk.

9.2 Nomadisk og mobil aksess

Å optimalisere signalforholdene i egen bolig er ikke like aktuelt for nomadiske og mobile brukere. For nomadiske brukere, vil egen bolig være én av flere lokasjoner hvor det ønskes god dekning, mens mobile brukere trenger kontinuerlig dekning i områder de beveger seg innenfor. I begge tilfeller er det irrasjonelt og lite hensiktsmessig å installere egne antenner for å forbedre signalforholdene. En nomadisk bruker som er hjemme, vil i beste fall forsøke å finne den delen av boligen som oppnår best dekning direkte fra bynettverket. Dette kan fungere greit for brukere med bærbare datamaskiner eller håndholdte enheter, men for mange vil nok løsningen synes upraktisk og lite fleksibel.

I forhold til nomadisk aksess anses derfor resultatene fra målingsarbeidet å være optimistiske. At samtlige målinger er gjort nært et vindu vendt mot dekningssonene utendørs, er i teorien såpass optimalt at de færreste vil finne egnede posisjoner i boligen hvor dekningen er bedre. At de nomadiske brukerne i tillegg ønsker gode forhold på flere lokasjoner, gjør ikke situasjonen enklere.

For en mobil bruker anses resultatene å være enda mer optimistiske. Det er da viktig å påpeke at det er innendørsdekning som diskuteres. Selv om de fleste brukere har begrenset bevegelsesmønster innendørs, vil bevegeligheten generelt bety at brukeren forflytter seg til posisjoner med dårligere dekning enn det som er tilfellet nær vinduet.

Kapittel 10

Innvirkning på fastnett- og mobilleverandørenes inntektsstrømmer

I dette kapitlet diskuteres det hvilken innvirkning Trådløse Trondheim og andre trådløse bynettverk kan ha for fastnett- og mobilleverandørenes inntektsstrømmer. Det forsøkes ikke å spå penetrasjonshastigheten til Wi-Fi eller i hvilken grad slike nettverk vil overta markedsandeler fra eksisterende teleoperatører. Hensikten er å diskutere hvilken kommunikasjon Wi-Fi tilbyr brukerne og vurdere i hvilken grad denne kan erstatte tjenester som fastnett- og mobilleverandører tilbyr. Videre betraktes den forretningsmessige trusselen. For å eksemplifisere dette, er det estimert hvor mye en eksisterende fastnettleverandørs fortjeneste kan reduseres ved tap av markedsandeler til Trådløse Trondheim. Resultatene fra målingsarbeidet ligger da til grunn for beregningene. I tillegg er et kostnadsestimat for utbygging av Wi-Fi i Midtbyen inkludert.

10.1 Kommunikasjon

Fra et teknologisk perspektiv, skiller Wi-Fi seg fra dagens former for fastnett- og mobilaksess. Et sentralt spørsmål er da hvorvidt dette setter noen begrensning for funksjonaliteten som kan tilbys. I denne seksjonen sees det derfor nærmere på hvilken kommunikasjon Wi-Fi tilbyr brukeren og i hvilken grad denne kan erstatte dagens aksessformer. Det er da naturlig å dele opp i typisk fastnettkommunikasjon og typisk mobilkommunikasjon.

Som eksempel på en kommunikasjonsform som kommer for fullt, og hvor Wi-Fi er svært godt egnet, presenteres til slutt i seksjonen en løsning for automatisk måleravlesning av elektrisitetsforbruk.

10.1.1 Fastnett

Med fastnettkommunikasjon menes alle former for kommunikasjon hvor brukerne er tilknyttet Internett ved en trådfast bredbåndforbindelse. Eksempler på dette er ordinær Internett-“surfing”, epost, bredbåndstelefonti og diverse multimediatjenester.

En viktig egenskap ved IEEE 802.11 standarden er at den for lagene over datalinklaget er kompatibel med Ethernet, IEEE 802.3 [1]. OSI-referansemodellen er presentert i seksjon 4.1 og forklares ikke nærmere her. Ethernet er i dag den mest dominerende teknologien for kablede lokalnettverk, såkalte LAN. Med kompatibilitet, menes at 802.3 og 802.11 benytter samme LLC-lag, IEEE 802.2, som utgjør øvre del av datalinklaget. De har derfor identiske grensesnitt mot nettverkslaget. Dette betyr eksempelvis at det er likegyldig om en IP-pakke sendes over et LAN eller et WLAN.

Egenskapen over betyr indirekte at samme type kommunikasjon kan tilbys ved trådløs aksess som for en fast forbindelse, så lenge tilstrekkelig båndbredde og krav til QoS oppfylles. Dette stiller igjen krav til gode signal- og støyforhold. I tillegg er samtidig tale- og datatrafikk, samt antall brukere tilkoblet samme aksesspunkt, kritiske faktorer [31]. Dette utdypes nærmere i neste underseksjon 10.1.2.

10.1.2 Mobiltelefoni

Både bærbare PCer og moderne mobiltelefoner har i dag støtte for Wi-Fi, hvor VoIP-funksjonalitet kan tilbys. Dette kalles gjerne “Voice over Wireless Local Area Network” (VoWLAN). VoWLAN kan ikke betraktes som et alternativ til mobiltelefonisystemer som GSM og 3G [10]. Det kan derimot fungere som en utvidelse av 3G, for å tilby høyere kapasitet for datatjenester [31]. Innenfor WLAN dekningsområdene kan da høyere datarater oppnås, mens terminalene må tune seg inn på GSM/3G i områder utenfor WLAN dekning. Det er nettopp økte datarater som favoriserer en hybrid 3G/WLAN løsning ovenfor ordinær 3G. I tillegg til rene datatjenester, kan dette benyttes til å supplere en samtale med avansert multimediamkommunikasjon.

De vanligste bruksområdene innen mobiltelefoni er per i dag tale, “Short Message Service” (SMS) og “Multimedia Messaging Service” (MMS) [2]. Det er derfor interessant å se nærmere på hvordan disse eller tilsvarende tjenester kan realiseres i et Wi-Fi nettverk. Funksjonaliteten til SMS og MMS antas kjent for leseren og forklares ikke nærmere her.

Tale er den sentrale kommunikasjonsformen, hvor også utfordringene er størst. Resultatene fra målingsarbeidet har vist at dekningsgraden til Trådløse Trondheim er betydelig dårligere når taletrafikk kontra datatrafikk betraktes. Tale og annen sanntidskommunikasjon er nemlig svært sårbar for forsinkelser i nettet [31]. Dette gjør at et begrenset antall VoIP-forbindelser kan betjenes av samme aksesspunkt samtidig. Uten datatrafikk, støtter et 802.11b WLAN uten prioriteringsmekanismer kun 10 samtidige samtaler. Cisco anbefaler derimot bare 7 terminaler tilknyttet

KAPITTEL 10. INNVIRKNING PÅ FASTNETT- OG MOBILLEVERANDØRENES INNTEKTSSTRØMMER

samme aksesspunkt for å ivareta bedre talekvalitet [22]. 802.11a kan maksimalt støtte fem ganger så mange brukere som 802.11b, men med dårligere rekkevidde [31]. Kapasiteten til 802.11g er lavere enn 802.11a, på grunn av samvirke med 802.11b. Rekkevidden er derimot tilsvarende 802.11b, siden samme frekvensbånd benyttes. Ved samtidig datatrafikk reduseres antall VoIP-forbindelser ytterligere. For 802.11b halveres antall samtaler hvis 2 Mbps datatrafikk sendes til aksesspunktet. Ved 4 Mbps datatrafikk blir overbelastningen så stor at ingen samtaler kan betjenes. I tillegg er det viktig å bemerke seg at signal- og støyforholdene, samt avstanden fra aksesspunktet, er avgjørende for hvor høy båndbredde som kan tilbys i utgangspunktet.

Utstyret som benyttes har også vist seg å være en begrensende faktor for talekvaliteten [31]. Påliteligheten til bærbare PCer har foreløpig ikke nådd samme nivå som for en telefon, og kan synes upraktisk og stor til å benytte som mobil. PDAer og andre håndholdte mobile terminaler er mer praktiske, men har vist seg å ha problemer med ytelsen. Disse problemene ble bekreftet av målingene av talekvalitet i Trådløse Trondheim, som ble presentert i underseksjon 8.5.2. På et område med god dekning, oppnådde bærbare PCer i disse testene relativt stabil og god talekvalitet, mens de mobile terminalene oppnådde svært ustabil og generelt dårlig talekvalitet.

For å erstatte eller supplere funksjonalitet som SMS, finnes allerede direktemeldingstjenester, som for eksempel Microsoft MSN [10]. Disse benyttes ofte i kombinasjon med VoIP og har gjerne funksjonalitet for å se om andre brukere er tilkoblet eller ikke. Grunnen til det er at direktemeldinger tidligere bare kunne sendes til tilkoblede brukere. Dette er ikke tilfellet lenger, og direktemeldinger er derfor en fullgod erstatning for SMS, så lenge personen man ønsker å nå benytter det samme verktøyet. Tilsvarende funksjonalitet kan erstatte MMS, ved å utvide meldingsinnholdet til å omfatte multimedia informasjon.

10.1.3 Automatisk måleravlesning

Automatisk avlesning av strømforbruk i private hjem er en kommunikasjonsform som kommer for fullt og hvor det forretningsmessige potensialet er stort. Til dette er Wi-Fi og en trådløs infrastruktur godt egnet som kommunikasjonsmedium mellom den enkelte bolig og energiselskapet [20].

En slik løsning krever en kommunikasjonsterminal som er ansvarlig for avlesning av energiforbruket [32]. Denne kan være integrert i selve strømmåleren eller montert ved siden av med en direkte kobling til måleren. Videre må kommunikasjonsterminalen ha en forbindelse til nettselskapet sentralsystem. Til dette kan altså trådløse bynettverk være godt egnet, men dette stiller krav til at det er dekning i boligen. På bakgrunn av resultatene fra målingsarbeidet, anses derfor en slags hjemmenettløsning, som er illustrert og forklart i seksjon 9.1, hensiktsmessig. Det er lite sannsynlig at strømmåleren er plassert et sted med direkte dekning fra bynettverket. Kommunikasjonsterminalen kan heller kobles på et internt Ethernet, eventuelt lokalt Wi-Fi, hvor en "gateway" med god dekning fra bynettverket ivaretar forbindelsen mot energiselskapets sentral.

KAPITTEL 10. INNVIRKNING PÅ FASTNETT- OG MOBILLEVERANDØRENE INNTEKTSSTRØMMER

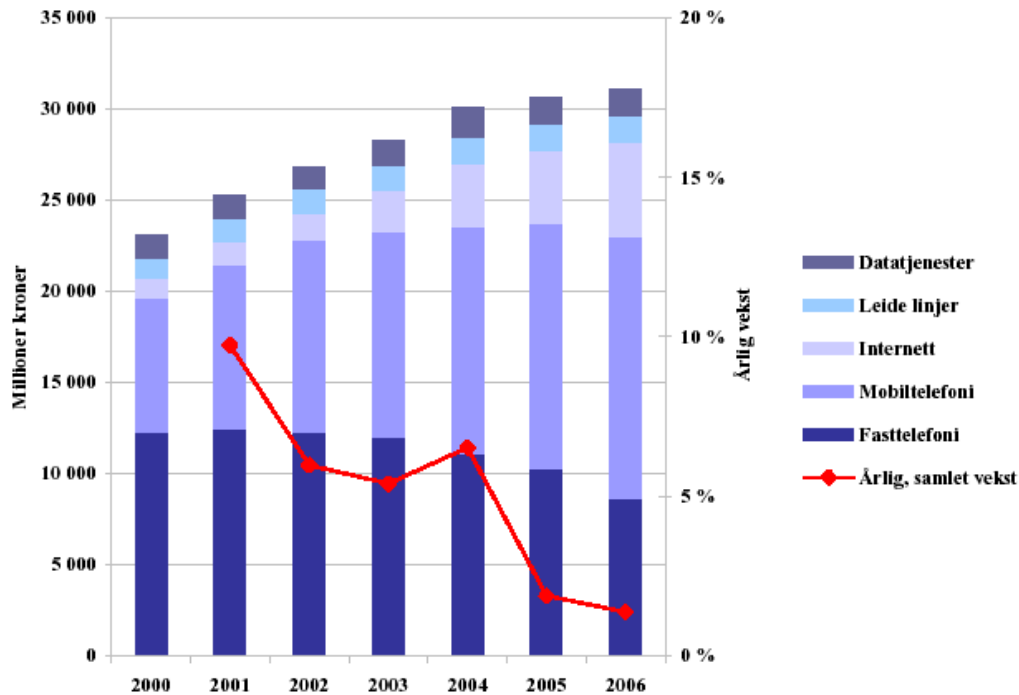
Det er mange fordeler med automatisk måleravlesning i forhold tradisjonell manuell avlesning [20] [32]:

- Man oppnår tids- og kostnadsbesparelser for både sluttkunden og energiselskapet. Kunden slipper å lese av strømmåleren og energi-selskapet kan bruke mindre ressurser på innsamlingen av avleste målerdata.
- Presise avlesninger vil i større grad gi korrekte faktura. På grunn av prisendringer i en måleperiode, må kundens forbruk i dag estimeres av nettselskapet. Med et system for automatisk måleravlesning, kan derimot nøyaktige verdier hentes ut hver gang prisen endres.
- En bedre oversikt over strømforbruket til både sluttkunden og totalt sett for energiselskapet kan gi opphav til en tettere dialog mellom partene. Energiselskapet kan eksempelvis tilby lavere strømpriser på tider av døgnet med lite påtrykk.
- Med en god trådløs infrastruktur kan teknikere og servicepersonell fra energiselskapet medbringe mobile terminaler med Wi-Fi på oppdrag hos kundene. De kan så koble seg til selskapets nettverk gjennom en VPN-forbindelse, og aksessere nyttige ressurser eller rapportere direkte til sentralen.

10.2 Forretningsmessig trussel

Før man vurderer den forretningsmessige trusselen Trådløse Trondheim og andre trådløse bynettverk kan utøve ovenfor eksisterende fastnett- og mobilleverandører, er det interessant å se nærmere på den totale omsetningen av basistjenester for telesektoren i Norge. Dette er vist i figur 10.1.

KAPITTEL 10. INNVIRKNING PÅ FASTNETT- OG MOBILLEVERANDØRENES INNTEKTSSTRØMMER



Figur 10.1: Total omsetning i telesektoren i millioner norske kroner eksklusive merverdiavgift [2]

Diagrammet viser at omsetningen i dag er størst for mobiltelefoni, etterfulgt av fasttelefoni, som stadig taper andeler. Deretter følger Internett, som betegner bredbåndsløse leverandørene. Det er en tydelig trend at fasttelefoni taper kunder og markedsandeler til mobiltelefoni og bredbåndstelefoner.

Trådløse byer er en trussel for både fastnett- og mobilleverandørene. Rent økonomisk er trusselen størst ovenfor mobilleverandørene fordi:

- Takseringen for fastnett er stort sett basert på en fast abonnementsavgift. Konkurransen fra Wi-Fi vil derfor i verste fall bety at abonnementsdelen faller bort.
- Takseringen på mobilnett er som regel basert på tellerskritt pluss en eventuell fast månedsavgift. I dag er derfor mobilnett hovedinntektskilden til teleoperatørene.

Bortfall av tellerskrittinntekter er trolig den største trusselen ovenfor mobilleverandørene. Skype og andre VoIP-applikasjoner opererer i dag uten tellerskritt og er således gratis å bruke hvis man ser bort i fra kostnadene for Internett-aksess. Dette gjelder kun hvis anropet går til en annen Skype-applikasjon. For å nå kunder med fast- eller mobiltelefon, påløper en ekstra kostnad.

KAPITTEL 10. INNVIRKNING PÅ FASTNETT- OG MOBILLEVERANDØRENE INNTEKTSSTRØMMER

VoWLAN anses ikke å kunne erstatte mobiltelefoni fullt ut. Dette skyldes både den overordnede dekningsgraden og talekvaliteten som per i dag er oppnådd med håndholdte mobile terminaler. Det er også vanskelig å spå hvordan en hybrid 3G/WLAN løsning vil utarte seg forretningsmessig.

Ovenfor fastnettleverandørene betraktes Wi-Fi derimot som en fullverdig erstatte, og konkurransen blir således mer direkte. For å gjøre konkrete beregninger på innvirkningen Trådløse Trondheim og andre bynettverk kan ha for fastnettleverandørers inntektsstrømmer, har jeg tatt utgangspunkt i følgende scenario:

- Potensiell kundemasse er antall husstander i Midtbyen som per i dag har bredbåndstilknytning.
- Resultatet fra de tilfeldige målingene bestemmer Trådløse Trondheims dekningsgrad.
- Andelen husstander med dekning som ønsker å gå over til Trådløse Trondheim er en variabel parameter som avgjør den estimerte kundemassen.
- Det tas utgangspunkt i en fastnettleverandørs (NextGenTel) inntekter per abonnent og bruttomargin, som er forholdet mellom brutto fortjeneste og omsetningen for abonnementsinntektene. På bakgrunn av disse verdiene og estimert kundemasse for Trådløse Trondheim, gjøres det beregninger på redusert fortjeneste for fastnettleverandøren.

Tabell 10.1 viser hvordan beregningene er gjort. Her antas at halvparten, av de som har mulighet til å gå over til Trådløse Trondheim, gjør det. Det bør også presiseres at antall boliger i Midtbyen kun inkluderer private hjem, og ekskluderer altså butikker, caféer og andre “offentlige” bygninger. Sån sett er antall privatboliger relativt sett lavt i forhold til størrelsen på dekningsområdene i Midtbyen. Inkluderes også “offentlige” bygg, vil den forretningsmessige trusselen med andre ord være større, men dette diskuteres ikke videre her. I tillegg kan det tenkes at boliger som ikke har bredbånd i dag, vil ønske å benytte Trådløse Trondheim, dersom de oppnår god dekning i hjemmet sitt. Dette forholdet er heller ikke behandlet ytterligere.

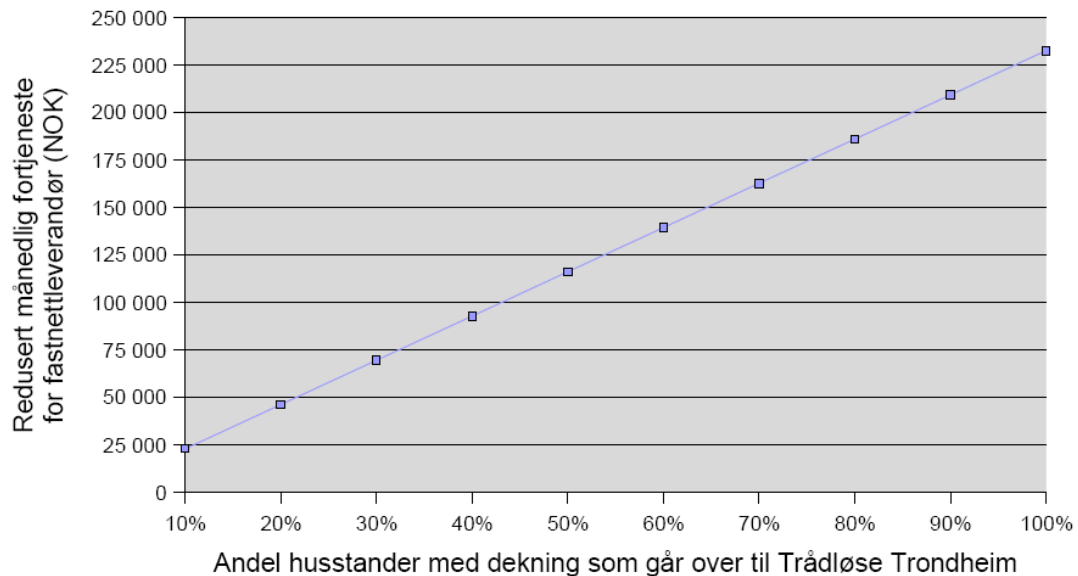
KAPITTEL 10. INNVIRKNING PÅ FASTNETT- OG MOBILLEVERANDØRENS INNTEKTSSTRØMMER

Antall boliger i Midtbyen [33]	3 713	
Andel husstander med bredbåndstilknytning [2]	55	%
Potensiell kundemasse	2 042	
Trådløse Trondheims dekningsgrad	60	%
Andel husstander som ønsker å gå over til Trådløse Trondheim	50	%
Estimert kundemasse	613	
Gjennomsnittlig totalinntekt per abonnent per måned [34]	390	kr
Redusert månedlig omsetning pga tap av kundemasse	238 932	kr
Bruttomargin (Brutto fortjeneste/Omsetning) [34]	48,7	%
Redusert månedlig fortjeneste pga tap av kundemasse	116 360	kr
Redusert årlig fortjeneste pga tap av kundemasse	1 396 316	kr

Tabell 10.1: Kalkulering av redusert fortjeneste for fastnettleverandør ved tap av kundemasse til Trådløse Trondheim

Med de gitte forutsetningene indikerer beregningene over en redusert årlig fortjeneste på nærmere 1,4 millioner norske kroner. Beløpet er i stor grad avhengig av andelen husstander som ønsker å gå over til Trådløse Trondheim, og kan betraktes som en funksjon av kundemassen. Dette er illustrert i figur 10.2, som viser potensiell, månedlig reduksjon i fortjeneste for en fastnettleverandør med hensyn på hvor mange kunder som ønsker å bytte til Trådløse Trondheim. Kundemassen er da oppgitt i en prosentvis andel av de husstander som har god nok dekning og som allerede har bredbånd installert.

KAPITTEL 10. INNVIRKNING PÅ FASTNETT- OG MOBILLEVERANDØRENS INNTEKTSSTRØMMER



Figur 10.2: Redusert månedlig fortjeneste for fastnettleverandør ved tap av markedsandeler til Trådløse Trondheim

Figuren viser en lineær sammenheng mellom andelen husstander som går over til Trådløse Trondheim og fastnettleverandørens reduserte fortjeneste. Forutsatt at Trådløse Trondheim kan tilby aksess til 60 % av husstandene i Midtbyen, vil dette maksimalt føre til en redusert fortjeneste for fastnettleverandøren på 232 720 kroner i måneden. Dette svarer til nærmere 2,8 millioner kroner i året.

10.3 Kostnader

Ved vurderingen av trusselen Trådløse Trondheim og andre trådløse bynettverk kan utøve, er det viktig å ta hensyn til investeringskostnadene som tilfaller både utbygger og potensielle, fremtidige brukere av nettet. For utbyggeren har jeg tatt utgangspunkt i Trådløse Trondheims kostnadsestimater for utbygging av dekningsområdene i Midtbyen [18]. Denne avgrensningen synes mest hensiktsmessig for å kunne sammenligne med beregningene i seksjon 10.2. I begge tilfeller er det kun Midtbyen som betraktes.

Ved tolkningen av kostnadsestimatet er det viktig å ha i bakhodet at motivasjonen for å bygge trådløse byer i dag ikke er å utvikle kommersiell virksomhet, som skal kunne konkurrere med eksisterende fastnett- og mobilleverandører [19]. Trådløse Trondheim er eksempelvis organisert som et forsknings- og utviklingsprosjekt, hvor det fokuseres på å tilby nye tjenester basert på nomadisk og mobil kommunikasjon.

Det gjøres følgende antagelser for beregningene av utbyggingskostnader i Midtbyen [18]:

KAPITTEL 10. INNVIRKNING PÅ FASTNETT- OG MOBILLEVERANDØRENES INNTEKTSSTRØMMER

- Området skal ha 100 % opplevd utendørsdekning.
- Alle aksesspunkter skal støtte 802.11a, 802.11b og 802.11g.
- De folkerike områdene skal ha 54 Mbps teoretisk kapasitet.
- Resten av utbyggingsområdet skal ha 11-54 Mbps teoretisk kapasitet.
- Hvert aksesspunkt har da en 50 meters strålingsradius.

Strålingsradiusen er her basert på aksesspunkt som rundstråler. Trådløse Trondheim har i stedet valgt å benytte sektorantener, for å konsentrere signalenergien i bestemte retninger. Avhengig av byens topologi, vil dette påvirke hvor mange aksesspunkt som kreves for å bygge ut det samme arealet med trådløsdekning.

Videre er det kun investeringskostnadene som betraktes. Her inngår utstyr, programvare, installasjon og konsulentbidrag for planlegging av topologi og frekvensbruk [18]. Kostnader for intern planlegging og prosjektledelse er ikke tatt med i beregningen. Drifts- og avskrivningskostnader inngår heller ikke i estimatet. Investeringskostnadene er da kalkulert som vist i tabell 10.2.

Radius per aksesspunkt	0,050	km
Areal per aksesspunkt ($\pi \times r^2$)	0,008	km
Areal med trådløsdekning	1,41	km ²
Antall aksesspunkt	179	
<hr/>		
Pris per aksesspunkt	12 000	kr
Installasjonskostnader per aksesspunkt	3 000	kr
Etablering av matenett, radio/xDSL per aksesspunkt	7 500	kr
Kostnader per aksesspunkt	22 500	kr
Totale kostnader for etablering av aksesspunkt	4 027 500	kr
<hr/>		
Administrasjonssystem	500 000	kr
Nettverksutstyr	250 000	kr
Planleggingskostnader	200 000	kr
Totale investeringskostnader	4 977 500	kr

Tabell 10.2: Investeringskostnader for Trådløse Trondheim i Midtbyen

Fra beregningene ser man at cirka 5 millioner kroner må påregnes i rene investeringskostnader for å bygge et trådløst bynettverk av Midtbyens størrelse. Uten å spekulere for mye i det forretningsmessige potensialet, kan man på bakgrunn av beregningene gjort i seksjon 10.2 antyde at en langsiktig inntjeningsfase kreves.

For den enkelte bruker vil investeringskostnadene være avhengig av både bruksmønstret og hvor gode signalforhold det er i boligen. Dette er diskutert i kapittel 9, og er avgjørende for om brukeren trenger å installere en egen antenne- og "gateway"-løsning for å oppnå tilfredsstillende god dekning. Dersom en slik løsning kreves,

KAPITTEL 10. INNVIRKNING PÅ FASTNETT- OG MOBILLEVERANDØRENE INNTEKTSSTRØMMER

må prisen for utstyret være konkurransedyktig med dagens fastnettinstallasjoner. Er løsningen overflødig, kan derimot installasjonskostnadene for brukerne elimineres helt, og således gi trådløse bynettverk et konkurransefortrinn.

Kapittel 11

Konklusjon og fremtidig arbeid

I dette kapitlet gjøres det konkluderende betraktninger på hvorvidt trådløse byer basert på Wi-Fi er en trussel for fastnett- og mobilleverandørene, og i tilfelle hvilken innvirkning de vil ha. Som grunnlag, oppsummeres også resultatene fra kartleggingen av Trådløse Trondheims dekningsgrad innendørs.

Til slutt presenteres forslag til fremtidig arbeid, som det vil være interessant å se nærmere på for å underbygge resultatene og for å tillegne seg mer kunnskap om trådløse bynettverk.

11.1 Konklusjon

Trådløse Trondheim er i dag nettverksplanlagt for å tilby Wi-Fi utendørsdekning i Midtbyen og enkelte andre sentrale områder. Kjennskap til hvor godt omkringliggende boliger kan dra nytte av dette bynettverket har vært begrenset. Fokus for målingsarbeidet har derfor vært å kartlegge dekningsgraden innendørs for bygninger i Trondheim sentrum.

De mest representative målingene gikk ut på å velge 50 tilfeldige lokasjoner og måle verdier for signalstyrke, signal-til-støy forhold og båndbredde. Basert på resultatene, kan Trådløse Trondheim per i dag sies å ha en dekningsgrad på cirka 60 %. Dette gjelder for datatrafikk, som står mest sentralt for diskusjonen i oppgaven. Resultatene for taletrafikk er generelt dårligere, som skyldes at sanntidsdata stiller strengere krav til forsinkelser i nettet.

Hovedinntektskilden til teleoperatørene er i dag mobilnett. Dette skyldes at takseringen er basert på både fast abonnementsavgift og tellerskritt for bruken. Til sammenligning opererer fastnettleverandørene kun med abonnementsavgift for bredbåndstilknytninger. Til tross for at den økonomiske trusselen er størst ovenfor mobilleverandørene, tyder resultatene på at trådløse bynettverk kan utøve størst konkurranse ovenfor fastnettleverandørene. Så lenge tilfredsstillende dekning oppnås,

kan Wi-Fi tilby samme funksjonalitet som tradisjonell fast aksess. I tillegg kan trådløse bynettverk supplere brukeren med muligheter for nomadisk aksess. For mobil aksess, tyder både dekningsgraden og målinger av talekvalitet for mobile terminaler på at Wi-Fi ikke kan betraktes som noe reelt alternativ til dagens mobiltelefonisystemer. Det kan derimot fungere som en utvidelse av 3G for å tilby høyere kapasitet for datatjenester.

11.2 Fremtidig arbeid

Trådløse bynettverk er en såpass moderne teknologi at forsknings- og utviklingspotensialet er tilnærmet ubegrenset. Med fremtidig arbeid fokuseres det derfor her på forskning som kan ha direkte nytteverdi for sammenligning og underbygging av resultatene fra målingsarbeidet.

Samtlige målinger er konsekvent gjort med det samme utstyret. Det foregår en kontinuerlig utvikling på utstysfronten. Det kunne derfor vært interessant å se nærmere på hvor godt ulike produsenters utstyr og ulike typer terminaler sender og mottar radiosignaler.

Videre vil en mer konkret analyse av kvaliteten på både data- og taletrafikk være hensiktsmessig for et utvalg av lokasjoner. Her bør det fokuseres på den generelle brukeropplevelsen, som en utvidelse av tolkningen av signalforhold og båndbredde.

Signalenes evne til å penetrere ulike typer vegger, for eksempel glass, tre og mur, er også et interessant forskningsområde. Dette kan være nyttig for nettverksplanleggere i områder hvor én eller flere veggtyper er spesielt utbredt.

Bibliografi

- [1] Tanenbaum, Andrew S.: *Computer Networks*. Prentice Hall PTR, 4. utgave, 2003.
- [2] *Post og teletilsynet: *Det norske ekomarkedet 2006*, 2006.
<http://www.npt.no>.
- [3] Lehne, Per H.: *A Brief Overview of Radio Technologies*. I *Teletronikk 3/4.06*. Telenor R&I, 2006.
- [4] *EMU, Danmarks undervisningsportal: *Strålingen fra Universet*.
http://www.emu.dk/gsk/fag/fys/ckf/fase2/2uine/universet_og_jordens_udvikling/straalingen_fra_universet/index.html.
- [5] R. Koch, G. Yanovsky: *Evolution and Convergence in Telecommunications*. The abdu salam international centre for theoretical physics, 2. utgave, 2002.
- [6] *Teleplan: *Bredbånd - dekning og tilknytning*, 2005.
- [7] Statistisk sentralbyrå: *Befolkningsstatistikk 2006*, 2006.
<http://www.ssb.no>.
- [8] Wikipedia the free encyclopedia: *Global System for Mobile Communications*.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Gsm>.
- [9] C. Smith, D. Collins: *3G Wireless Networks*. McGraw-Hill, 2002.
- [10] Trond Ulseth, Finn Stafsnes: *Real-time communication on IP networks*. I *Teletronikk 1.06*. Telenor R&I, 2006.
- [11] Wikipedia the free encyclopedia: *Wi-Fi*.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>.
- [12] *Tzannes, Peter: *Characterising Wireless LAN Transmission Characteristics*. Masteroppgave, The University of New South Wales, 2005.
- [13] Wikipedia the free encyclopedia: *802.11*.
<http://en.wikipedia.org/wiki/802.11>.
- [14] Vedvik, Rune: *Evaluerings- og testkriterier for trådløse datanettverk*. Masteroppgave, NTNU, 2006.

BIBLIOGRAFI

- [15] *Cisco systems: *Capacity, Coverage and Deployment Considerations for IEEE 802.11g*. teknisk rapport, Cisco Systems Inc., 2005. White Paper.
- [16] *Leira, Jardar: *Trondløst - Frekvensbruken i Trondheim*.
<http://forskningsnett.uninett.no/tradlos/trondlost/frekvens.html>.
- [17] *Cisco systems: *Channel Deployment Issues for 2.4 GHz 802.11 WLANs*. teknisk rapport, Cisco Systems Inc., 2004.
- [18] *Jelle, Thomas: *Trådløse Trondheim*. teknisk rapport, NTNU, 2006.
- [19] Samtale med Thomas Jelle, daglig leder i Trådløse Trondheim, 2007.
- [20] *Cisco systems: *Cisco Outdoor Wireless Network Serves Up Automatic Meter Reading*. teknisk rapport, Cisco Systems Inc., 2006.
- [21] *Bardwell, Joshua: *You Believe You Understand What You Think I Said... - The Truth About 802.11 Signal And Noise Metrics*. teknisk rapport, Connect802 Corporation, 2004.
- [22] *Cisco systems: *Site Survey Guide for Deploying Cisco 7920 IP Phones*. teknisk rapport, Cisco Systems Inc., 2005.
- [23] Audestad, Jan A.: *Kompendium TTM4105 - Access and Transport Networks*. Tapir akademisk forlag, 2005.
- [24] *IEEE, 802.11: *Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. teknisk rapport, ANSI/IEEE, 1999.
- [25] *ITEM, NTNU: *Web100 based Network Diagnostic Tool (NDT)*.
<http://web100.item.ntnu.no:7123/>.
- [26] Peder J. Emstad, Poul E. Heegaard, Bjarne E. Helvik: *Kompendium TTM4110 - Pålitelighet og ytelse med simulering*. Tapir akademisk forlag, 2004.
- [27] *Wi-Fi alliance: *Enabling the Future of Wi-Fi Public Access*. teknisk rapport, Wi-Fi Alliance, 2004.
- [28] Stray, Petter: *Field test of mobile terminals in wireless cities*. Masteroppgave, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, 2007.
- [29] Trond Ulseth, Paal E. Engelstad: *VoIP speech quality - Better than PSTN? I Telektronikk 1.06*. Telenor R&I, 2006.
- [30] *Cisco systems: *Cisco Outdoor Wireless Mesh Enables Alternative Broadband Access*. teknisk rapport, Cisco Systems Inc., 2006.
- [31] Trond Ulseth, Paal E. Engelstad: *Voice over WLAN (VoWLAN) - A wireless voice alternative? I Telektronikk 1.06*. Telenor R&I, 2006.

BIBLIOGRAFI

- [32] Cinclus, Telenor: *Cinclus Technology*.
<http://www.telenorcinclus.com/>.
- [33] Kvaal, Ole Erling. Informasjon fra Trondheim kommune, 2007.
- [34] *NextGenTel: *Rapport 1. kvartal 2006*, 2006.
http://www.nextgentel.no/ressurser/rapporter/Q12006_report.pdf.

Referanser merket med * er vedlagt elektronisk.

BIBLIOGRAFI

Tillegg A

Posisjonsdata for målinger

Tabell A.1: Posisjonsdata for tilfeldige målinger

Testnr	Adresse	Beskrivelse
1	Beddingen 14	Elvehavna Fysioterapi & Helse (inngangsparti)
2	Fjordgata 1	Tre '45 Musikk AS
3	Fjordgata 22	Trondheim Varmesenter Kjell Hofstad AS
4	Fjordgata 9 B	Carstens Design AS
5	Fjordgata 23	Enten Eller Frisør
6	Fjordgata 68	Klinikk Stokkan
7	Fjordgata 82	Agaton Sax
8	Olav Trygvasons gate 42	Nor-Contact Sport AS
9	Prinsens gate 44	Kultursenteres ISAK (Coffee Annan, mot syd)
10	Olav Trygvasons gate 40	Midtbyen kiosk og Spill
11	Carl Johans gate 5	To rom og kjøkken
12	Olav Trygvasons gate 5	Café Roman
13	Krambugata 12/14	Krambua (mot nord)
14	Kjøpmannsgata 73	Radison SAS Royal Garden Hotel (mot nord)
15	Kjøpmannsgata 65	SATS Trondheim
16	Olav Trygvasons gate 5	Olav's Pub og spiseri
17	Thomas Angells gate 12	Graffi Grill & Bar
18	Thomas Angells gate 20	Wheat Trondhjem
19	Dronningens gate 40	Pizza MIR Kebab
20	Munkegata 46	7-Eleven
21	Dronningens gate 18	Bristol Conditor AS
22	Dronningens gate 5	Hjørnet Bar & Brasseri
23	Søndre gate 14	Mix Scene 1
24	Nordre gate 21	Dolly Dimple's Trondheim sentrum
25	Olav Trygvasons gate 23	1001 Natt Metin AS
26	Kongens gate 8	Mercursenteret (Mester Grønn, mot syd)

TILLEGG A. POSISJONSDATA FOR MÅLINGER

Testnr	Adresse	Beskrivelse
27	Nordre gate 8	Erichsen Konditori AS
28	Sommerveita 3	Sport 1 Torvet AS
29	Prinsens gate 39	Trondhjem Mikrobryggeri AS
30	Munkegata 26	Brukbar
31	Hans Hagerups gate 6	Privat bolig
32	Kalvskinngata 2	Kong Carl Johan Arbeiderstiftelse
33	Prinsens gate 18/20	Trøndelag Teater (mot syd)
34	Prinsens gate 22 B	Salem Menighet Normisjon Trondheim
35	Erling Skakkes gate 39	Persilleriet
36	Kongens gate 9	McDonald's Familierestaurant
37	Vår Frue gate 4	Zia Teresa Trattoria Pizzeria
38	Erling Skakkes gate 2 B	Privat bolig
39	Kjøpmannsgata 10	Ute.no
40	Peter Egges plass 1	Trondheim Folkebibliotek
41	Kjøpmannsgata 54	Peppes Pizza
42	Nedre Bakklandet 3	Dromedar Kaffebar AS
43	Munkegata 3	Møllers Gullsmedforretning AS
44	Prinsens gate 8 A	Viking Kiosk
45	Prinsens gate 2 B	Trondheim Kino AS
46	Bispegata 9 A	Ni Muser AS
47	Nedre Bakklandet 6	Kaktus Kaffebar og Restaurant
48	Elgeseter gate 1	Studentersamfundet i Trondheim (Edgar, mot syd)
49	Øvre Bakklandet 64	CCC Frisør DA
50	Elgeseter gate 2	7-Eleven Kingosgt ANS

TILLEGG A. POSISJONSDATA FOR MÅLINGER

Tabell A.2: Posisjonsdata for teppemåling

Testnr	Adresse	Beskrivelse
1	Olav Trygvasons gate 8	Løiten Lys
2	Olav Trygvasons gate 6	Wistex
3	Olav Trygvasons gate 2 B	Åhléns (mot syd)
4	Krambugata 12/14	Krambua (mot øst)
5	Krambugata 12/14	Krambua (mot nord)
6	Brattørgata 3 A	ViDa
7	Brattørgata 5	Jadab Indian Restaurant AS
8	Brattørgata 3 B	Cafe 3B
9	Søndre gate 21	Gunnar Ree AS
10	Krambugata 14	DeCora
11	Olav Trygvasons gate 2 B	Åhléns (mot øst)
12	Søndre gate 23	Brandtzæg Optikk Synsam (mot nord)
13	Søndre gate 23	Brandtzæg Optikk Synsam (mot vest)
14	Brattørgata 1	Marit Zoo
15	Olav Trygvasons gate 6	Thorn
16	Søndre gate 25	Uno Danmark Oslo AS
17	Brattørgata 7	Cherox

Tillegg B

Elektroniske vedlegg

Følgende data er inkludert som elektroniske vedlegg:

- Kart over Trådløse Trondheim, hvor samtlige lokasjoner fra de tilfeldige målingene er markert.
- Målte verdier for signalstyrke, støy og signal-til-støy forhold fra hver enkelt lokasjon for både del 1 og del 2 av målingsarbeidet.