

Forutsetninger vedrørende dekningsberegninger for mobilkommunikasjon

Nkom styringsdokument for beregnet mobildekning og
høyhastighet mobilnett i Norge

Versjon nr. 2.0
1. august 2024

Sammendrag

Nasjonal kommunikasjonsmyndighet (Nkom) etterstreber å gi aktørene i den norske ekombransjen størst mulig forutsigbarhet og dokumenterte forutsetninger knyttet til oppfølging av mobildekning og dekningskrav.

Dette dokumentet har til hensikt å fremlegge de forutsetningene som legges til grunn av Nkom for dekningsberegninger av mobilkommunikasjon i Norge. Dokumentet presenterer og begrunner Nkoms valg av parameter og terskel for beregning av mobildekning. Videre presenteres hvilke forutsetninger og forenklinger brukes ved vurdering av høyhastighet mobilnettet.

Nkom beregner dekning på et overordnet nivå. Nkoms beregninger har derfor en del forenklinger til sammenligning med detaljert radioplanlegging som gjøres hos mobiloperatørene. Nkom er klar over at visse forenklinger kan resultere i store avvik mellom det som er beregnet av Nkom og rapportert av mobiloperatører. Resultater kan derfor kun brukes til å få et overordnet bilde på utvikling og endringer i mobildekningen over tid. Forutsetningene omfatter kun gjeldende frekvensbruk i Norge.

Dekningsberegningene benyttes blant annet til å sannsynliggjøre at dekningsforpliktelser er oppfylt, og som underlag til ulike rapporter som blant annet til statsbudsjett og Bredbåndsrapporten og for rapportering til øvrige myndigheter.

Samfunnets behov for kommunikasjon og mobilteknologi er under konstant endring. Forutsetningene som legges til grunn endrer seg hele tiden ettersom det stadig utvikles nye generasjoner med mobilteknologi og nye krav til dekning. Dette dokumentet er derfor gjenstand for revidering når nye forutsetninger legges til grunn relatert til bruk av ny mobilteknologi, ny frekvensbruk, eller når myndighetene fremmer nye føringer for utbygging av mobilnett og dernest krav til mobildekning i Norge.

Versjonshistorikk

Dato:	Versjons nr:	Merknad:	Tekniske merknader:
06.04.2021	0.95	Dokument til gjennomgang hos mobiloperatørene ICE, Telia & Telenor	
TBD.06.2021	1.0	Første versjon av dokument publisert på www.Nkom.no	- Omhandler dagens frekvensbruk, samt 5G NR for 3.6 GHz - 4G - LTE terskelnivå justert til ny verdi for 2021, fra opprinnelig nivå satt i 2016. - 5G - NR første terskelnivå for 3.6 GHz er fastsatt for 2021.
01.08.2024	2.0	Lagt til et kapittel angående terskel for tilgang til mobildata Slettet kapittel gjeldende UMTS, siden system er avviket	

Innholdsfortegnelse

1	Forutsetninger vedrørende dekningsberegninger for mobilkommunikasjon	6
1.1	Oppfølging av mobildekning i Norge.....	6
1.2	Samarbeidsavtale om harmoniserte dekningskart for mobile tjenester	6
1.3	Terskelnivå for mottak	7
2	Nkoms beregningsparametere for mobildekning	7
2.1	Terrengmodell og befolkningsdetaljer.....	7
2.2	Terrenginformasjon	8
2.3	Propagasjonsmodell.....	8
2.4	Diffraksjonsmodell	9
2.5	Fading Margin og standardavvik (sikkerhetsmargin).....	10
3	Mottakerfølsomhet.....	11
3.1	2G - GSM	11
3.2	4G - LTE	12
3.3	5G - NR	14
3.4	Kroppstap.....	16
3.5	Håndsettvariasjon	17
4	Terskelnivåer satt av Nkom for grunnleggende mobildekning.....	17
5	Tilgang til mobildata med nedstrøms hastigheter på 30 Mbit/s eller 100 Mbit/s	18
5.1	Shannon formel.....	19
5.2	Modulasjon	21
5.3	Støymargin i QAM modulasjon	23
5.4	Carrier aggregation (bæreraggregering).....	26
5.5	Datahastighet.....	26
5.6	Valg av utgangsverdier for terskler for høyhastighet mobilnett	29
6	Terskler for høyhastighet mobilnett satt av Nkom	31
6.1	Utrekning og begrunnelse av terskler for høyhastighet mobilnett	31
6.2	Tabell med terskler for høyhastighet mobilnett satt av Nkom.....	32
6.3	Konklusjon for høyhastighet mobilnett	32

Figurliste

Figur 1: Deygout 94 diffraksjonsmetode (bilde hentet fra ATDI)	9
Figur 2: Antall aktive resursblokker avhengig av størrelse på frekvensblokk	13
Figur 3: Grafisk fremstilling av Shannon formel	20
Figur 4: Grafisk fremstilling av S/N forhold og kanal kapasitet til ulike blokkstørrelse	20
Figur 5: Utvalgte konstellasjonsdiagrammer for QAM (kilde: gaussianwaves.com).....	22
Figur 6: Et eksempel på mottatt 16QAM signal ved høyt støynivå	22

Tabeller

Tabell 1: Kart- og befolkningsdetaljer	7
Tabell 2: Clutter parameter	8
Tabell 3: Cell probability v.s. fading margin (beregnet med ATDI ICS Telecom)	11
Tabell 4: Referansefølsomhet for GSM MS.....	11
Tabell 5: Referansefølsomhet QPSK $P_{REFSENS}$ for utvalgte frekvensbånd.....	12
Tabell 6: Transmission bandwidth configuration N_{RB} in E-UTRA channel bandwidths.....	13
Tabell 7: Håndsettfølsomhet for ulike LTE bånd og blokkstørrelse	13
Tabell 8: Frekvensbåndene relevant for 5G NR	14
Tabell 9: Referanse følsomhet QPSK $REFSENS$ i dBm for 2 antenneporter	14
Tabell 10: Korrigeringsfaktor for 4 antenneporter, $\Delta R_{IB,4R}$	15
Tabell 11: Maksimal antall av ressursblokker N_{RB}	15
Tabell 12: RSRP for forskjellige båndbredde, antall Rx antenner og aktuelle frekvensbånd	16
Tabell 13: Håndsettelytelse fra Aalborg Universitetet	16
Tabell 14: Terskelverdier satt av Nkom	18
Tabell 15: Kanalkapasitet i Mbps.....	19
Tabell 16: Et minimum S/N forhold i dB i relevante blokkstørrelser for en gitt kapasitet.....	21
Tabell 17: QAM typer brukt i 4G og 5G	21
Tabell 18: BER og linkkvalitet.....	23
Tabell 19: CQI mapping mot SNR (10% BLER)	25
Tabell 20: CQI mapping mot modulasjon (Rel. 12 og nyere)	25
Tabell 21: LTE nedlink hastigheter	27
Tabell 22: 5G NR (SCS 30 kHz) nedlink hastigheter	28
Tabell 23: Blokkstørrelser tildelt mobiloperatører.....	29
Tabell 24: CQI og S/N verdier valgt av Nkom	29
Tabell 25: Økning av DL støy ved økt cell load (Q_{DL})	30
Tabell 26: Terskel til forskjellige modulasjoner	31
Tabell 27: Nkoms terskel for høyhastighet mobilnett	32

1 Forutsetninger vedrørende dekningsberegninger for mobilkommunikasjon

Forutsetningene Nkom legger til grunn for dekningsberegninger bør være forståelige for ekombransjen, og være basert på anerkjente tekniske standarder, propagasjonsmodeller og metodikk.

Pålitelige innrapporterte stasjonsdata fra mobilnettene er vesentlig for å kunne beregne dekning som viser trender og utvikling over tid for mobilnettene i Norge.

I 2021 vil 5G teknologien stå for betydelig utbygging i mobilnettene, mens 4G fortsatt vil være grunnstammen i det norske bredbåndsnettet i årene fremover. Det er viktig for norske myndigheter at det eksisterer noen målbare parametere for de investeringene som gjøres i den norske ekomsektoren. Oppfølging omkring mobildekning for 4G og 5G er av interesse for mange samfunnsaktører og norske forbrukere. Nkom ønsker med dette dokumentet å informere om hvordan vi gjennomfører dekningsberegninger for mobilkommunikasjon.

1.1 Oppfølging av mobildekning i Norge

Tilbyderne med eget mobilnett rapportere stasjonsdata for etablert senderpunkter, som er i kommersiell drift, kvartalsvis til Nkom. De innrapporterte opplysningene benytter Nkom i sitt tilsynsarbeid, blant annet i målekampanjer og for beregning av dekning, samt for oppfølging av dekningskrav satt i frekvenstillatelser.

Dekningsberegningene Nkom gjennomfører er med å danne grunnlaget for videre utbygging av mobildekning i Norge. Beregnet og målt dekning blir sammenlignet og resultatet blir brukt av Nkom og andre statlige aktører til oppfølging og tilrettelegging for utvikling av mobilnettene i Norge.

1.2 Samarbeidsavtale om harmoniserte dekningskart for mobile tjenester

Nkom er opptatt av at kundene får best mulig informasjon angående dekning, og at dekningen kan sammenlignes på tvers av mobiloperatører. Derfor er det viktig med klare definisjoner angående mobildekning, som videre kan benyttes av mobiloperatører for å publisere dekningskart på sine nettstedet.

For å imøtekomme denne problemstillingen tok Nkom initiativ til, og inngikk en samarbeidsavtale (fra 2016) med alle mobiltilbyderne med eget mobilnett i Norge. Avtalen angir felles retningslinjer for publisering av dekningskart. I henhold til avtalen skal dekningskartene, og annen informasjon om dekning, være utformet slik at brukerne får en god forståelse av tjenestene som tilbys for mobildekning, og dermed et bedre sammenligningsgrunnlag av dekning mellom ulike mobiloperatører. Fremstillingen av disse dekningskartene skal gjøres med de samme forutsetningene med hensyn på dekningsterskel og tilsvarende grafisk fremstilling. Det er viktig å tilstrebe at den beregnede dekningen som blir presentert på kart, i størst mulig grad representerer den faktiske dekningen.

1.3 Terskelnivå for mottak

Smarttelefonen er under utvikling på lik linje med alle andre endringer som skjer i mobilnettene. Antennedesign, frekvensbruk, båndbredde for mottak/sending, og følsomhet i radiomottakeren er under konstant utvikling.

Nkom har erfart at innenfor levetiden til en generasjon av mobilteknologi, kan det oppstå behov for å justere terskelnivå for tilkobling til nettet. Dette vil trolig også gjelde for neste generasjoner mobilteknologi som 5G og 6G.

2 Nkoms beregningsparametere for mobildekning

I dette kapittelet forklarer Nkom sine beregningsparametere for mobildekning. Parameterne er gjenstand for endring når nye føringer settes, som for eksempel når ny teknologi etableres i nettene. Viktige momenter for beregningsresultatet er innrapporterte stasjonsdata, digital terrengmodell, propagasjonsmodell og diffraksjonsmodell.

2.1 Terrengmodell og befolkningsdetaljer

Nkom benytter opplysninger om digital terrengmodell, opplysninger om plassering av befolkning og fritidsboliger fra norske offentlige tjenesteleverandører. Terrengmodellen er hentet fra GeoNorge (Kartverket) og opplysninger om befolkning og fritidsboliger er hentet fra Statistisk sentralbyrå (SSB).

Nkom bruker terrengmodell med en kartoppløsning på 100 x 100 meter, som gir en god tilnærming av den nasjonale dekningen. En bedre kartoppløsning vil øke beregningstiden og vil i liten grad bidra til forbedring av beregningsresultater på nasjonalt nivå, ettersom Nkom ikke gjennomfører detaljert planlegging.

Tabellen nedenfor presenterer grunnleggende data for kart brukt i beregninger

Digital terreng modell (DTM)	100 x 100 meter rutenett
Areal brukt for beregninger	Areal avgrenset av grunnlinjen ¹ og fastlandsgrensene mot naboland
Befolkningsgrunnlag	Antall personer per adressepunkt
Fritidsboliger	Fritidsbygninger etter bygningspunkt

Tabell 1: Kart- og befolkningsdetaljer

¹ Norges grunnlinje omfatter rette linjestykker trukket opp mellom grunnlinjepunkter (kystens ytterpunkter) og er definert i forskrift om [grunnlinjene](#) for sjøterritoriet rundt Fastlands-Norge. Norges areal er ut til grunnlinjen er omtrent 413 000 km², til sammenligning er Norges fastlandsareal på om lag 323 000 km².

2.2 Terrenginformasjon

Terrenginformasjon (clutter) er viktig for beregningsresultatet. Denne informasjonen innhenter Nkom fra en offentlig tilgjengelig tjeneste som heter CORINE Land Cover (CLC),². Hindringer er gruppert i syv klasser og parametere for hinder som Nkom benytter i sine beregninger er vist i tabellen nedenfor³.

Kode	Navn/type	Høyde [m]	Tilleggs dempning [dB/km]	Diffraksjonsfaktor	Refleksjonsfaktor
0	Åpnet landskap (Open)	0	0	1	0,25
1	Lett bebygd strøk (Village)	6	0	1	0,3
2	Forstad (Suburban)	10	0	1	0,3
3	Tettbebygd strøk (Urban)	15	0	1	0,3
4	Storby (Dense urban)	20	0	1	0,3
5	Skog (Forest)	12	0	1	0,11
6	Vann (Hydro)	0	0	1	0,02

Tabell 2: Clutter parameter

2.3 Propagasjonsmodell

Propagasjonsmodell fremstiller dempning mellom sender og mottaker ved hjelp av matematiske formler. Det er mange ulike propagasjonsmodeller for beregning av dempning. Hvilke som er best egnet er avhengig av kommunikasjonssystem og brukt frekvensområde.

Propagasjonsmodell under 3 GHz

For beregning av dempning av radiosignaler i mobile systemer er Hata – COST 231⁴ mye brukt. Hata-COST 231 modellen er en empirisk propagasjonsmodell som utvider den kjente Okumura-Hata modellen som er utviklet for urbane-områder til også å gjelde suburban. Modellen kan brukes i frekvensområdet fra 150 MHz til 2000 MHz. Nkom benytter denne modellen hovedsakelig for beregning av dekning i frekvensbåndene 450 MHz til 1800 MHz. Den gir gode estimater for dekning i tettbebygde strøk (urban og suburban), og for å estimere dekningsområder i griseblandte strøk. Modellen er god for å beregne dekningen til 2G, 3G og 4G.

Rekkevidden av radiosignaler i 2100 MHz- og 2600 MHz-båndet er begrenset i forhold til for eksempel 800 MHz-båndet, derfor vil avvik mellom beregninger med Hata - Cost 231-modellen og målinger i liten grad påvirke den samlede dekningen for nasjonale dekningsberegninger. Nkom gjennomfører foreløpig ikke detaljerte dekningsberegninger i tettbebygde strøk (suburban, urban eller dense urban) ettersom slike områder har dekning fra mange overlappende basestasjoner og en detaljert beregning i disse områdene ikke vil bidra til endring av generell dekningsprosent på overordnet nivå. I tillegg er 2100

² <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>

³ Dagens oppsett av clutter parameter gjenspeiler korrelasjon mellom beregnet og målt verdi på en tilstrekkelig bra måte, men det utelukkes ikke at fremtidige justeringer på høyde og dempning i de ulike clutter kategorier kan forekomme.

⁴ [The European Cooperation in Science and Technology \(COST\)](#)

MHz- og 2600 MHz-båndet ofte benyttet som et kapasitetsbånd, dvs. at dekningen fra 2600 MHz-båndet overlapper med dekning fra andre (lavere) frekvensbånd. En eventuell endring av modellen for disse båndene vil derfor ikke ha noen stor betydning.

Propagasjonsmodell over 3 GHz

Bruk av 3600 MHz-båndet er nytt for 5G NR, og foreløpig er dette båndet planlagt for 5G utover eksisterende frekvensbånd som operatørene allerede benytter i dag.

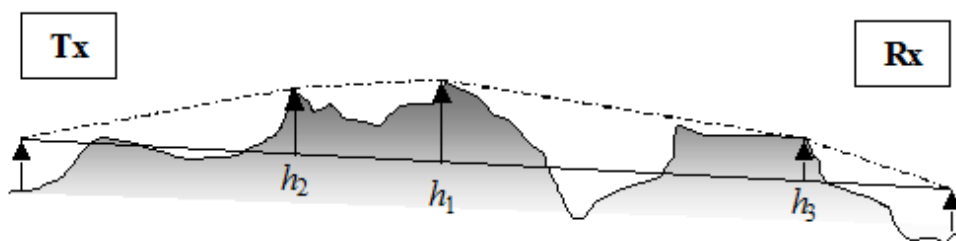
Nkom vil benytte en generisk propagasjonsmodell for dette båndet i tråd med forutsetninger som er lagt til grunn for å bruke denne modellen, samt diskusjon med Nkoms leverandør av programvare for beregning av dekning. Per i dag har Nkom ikke erfaring med målinger i dette båndet. Høyere frekvens vil også begrense dekningsområdet fra sendere i 3600 MHz-båndet ytterligere til sammenligning med dagens frekvensbånd.

Den generiske propagasjonsmodellen ITU-R P.341⁵ er en deterministisk modell, basert på frittromsdempning. Modellen egner seg for frekvenser fra 30 MHz til 350 GHz, men er mindre tilpasset til bruk i urbane strøk. Siden Nkom gjennomfører nasjonale dekningsberegninger med kartoppløsning på 100 x 100 meter anser vi denne modellen for å være hensiktsmessig til det formålet.

2.4 Diffraksjonsmodell

Diffraksjon er et fenomen som inntreffer når bølger treffer en hindring eller passerer en åpning. Takket være diffraksjonen, kan mottakeren oppleve dekning bak et hinder ute å måtte ha visuell kontakt med senderen. Diffraksjons-fenomenet benyttes derfor ved beregning av radiosignaler hvor det ikke er fri sikt ("non line of sight") mellom sender og mottaker. Det er mange matematiske modeller som kan beregne en mulig dekning bak hindret.

Basert på terrenget lager diffraksjonsmodellen kunstige hinder mellom sender og mottaker og justerer dermed mottatt signal fra senderen. Prinsippet for hvordan modellen lager kunstige hinder er vist på bilde nedenfor.



Figur 1: Deygout 94 diffraksjonsmetode (bilde hentet fra ATDI)

⁵ [ITU-R P.341](#)

De fleste diffraksjonsmodeller har en begrensning på antall hinder mellom sender og mottaker fra én til tre. Deygout 94 modellen har ingen begrensninger på hvor mange hindringer kan lages mellom sender og mottaker og antas derfor å ha minst avvik mellom teoretiske beregning og fysiske måling. Nkom anser denne diffraksjonsmodellen som mest presis, særlig i kupert terrenget der mottaker ikke er i siktlinje (NLOS⁶) til basestasjon.

Modellen som Nkom har valgt til sine dekningsberegninger er Deygout 94.

2.5 Fading Margin og standardavvik (sikkerhetsmargin)

Mellom en sender og en mottaker utsettes radiobølger for ulike fenomener som demping, forstyrrelser, hinder, refleksjoner osv. Som resultat av dette mottar mottaker en sum av signaler. Disse mottas samtidig, men i forskjellige faser som bidrar til å forsterke eller dempe det endelige nyttesignalet. Dette resulterer i at nyttesignalet, som er sum av samtidig mottatt elementer varierer i styrke. I praksis betyr dette at hvis du er i beregnet dekningsområde, så kan du miste dekning grunnet disse variasjonene. For å kompensere for variasjoner i signalstyrke, som er særlig viktig i ytterkanten (randsonen) av dekningsområdet ("cell edge"), benyttes en fading margin. Fading margin ("long term fading") tar hensyn til variasjoner av nyttesignalet på "cell edge"⁷.

Til beregning av fading margin benyttes statistiske funksjoner som beskriver sannsynlighet av mottatt signal med en forventet verdi og standardavviket fra denne verdien. Standardavviket forteller hvor mange prosent av elementene i en statistisk prøve sendt fra sender som havner innenfor en bestemt toleranse av forventet verdi i mottaker. Et større standardavvik betyr at det er flere elementer som er "godkjent" som forventet verdi. Standardavviket vil være avhengig av terrengvariasjoner. For et mer kupert terreng øker standardavviket. Et standardavvik på 8 dB er et godt kompromiss for norsk topografi⁸. Tabellen nedenfor viser sammenheng mellom fading margin i desibel (dB) og sannsynligheten for dekning på "cell edge".

Det er verdt å nevne at tabellen kun viser sannsynligheten på utkanten av dekningsområdet. Den samme marginen, som gir for eksempel 60 % sannsynlighet for dekning på ytterkanten, gir større sannsynlighet i dekningsområdet.

⁶ NLOS - Non Line of Sight

⁷ William C. Jakes, Editor. Microwave Mobile Communications. New York: John Wiley & Sons Inc. 1994

⁸ William C.Y. Lee "Mobile Cellular Telecommunications Systems" – McGraw-Hill 1989

Cell probability (%)	Fading margin (dB)				
	Std. dev. 3 dB	Std. dev. 6 dB	Std. dev. 8 dB	Std. dev. 9 dB	Std. dev. 10 dB
50	0	0	0	0	0
55	0,4	0,8	1	1,1	1,3
60	0,8	1,5	2	2,3	2,5
65	1,2	2,3	3,1	3,5	3,9
70	1,6	3,1	4,2	4,7	5,2
75	2	4	5,4	6,1	6,7
80	2,5	5	6,7	7,6	8,4
85	3,1	6,2	8,3	9,3	10,4
90	3,8	7,7	10,3	11,5	12,8
95	4,9	9,9	13,2	14,8	16,4

Tabell 3: Cell probability v.s. fading margin (beregnet med ATDI ICS Telecom)

Avhengig av hvor stor sannsynlighet for dekning en ønsker å oppnå på grensen av dekningsområdet brukes ulike marginer. Nkom har valgt å bruke fading margin på 6 dB som gir over 75 % sannsynligheten for dekning på "cell edge".

3 Mottakerfølsomhet

Mottakerfølsomheten definerer et minimum nivå for mottatt effekt for å kunne koble seg på mobilnettet. Mottakerfølsomheten er avhengig av blant annet system, frekvensbånd og kanabåndbredde. Mottakerfølsomheten er definert i tekniske spesifikasjoner fra ETSI (European Telecommunications Standards Institute) og 3GPP (3rd Generation Partnership Project).

3.1 2G - GSM

De tekniske parameterne for GSM er beskrevet i den tekniske spesifikasjonen ETSI TS 145 005⁹.

GSM 900	for GSM 900 small MS	-102 dBm
	for other GSM 900 MS	-104 dBm
DCS 1800	for DCS 1800 class 1 or class 2 MS	-100 / -102 dBm
	for DCS 1800 class 3 MS	-102 dBm

Tabell 4: Referansefølsomhet for GSM MS

Nkom beregner dekning ut fra en følsomhet på GSM mobiltelefonen tilsvarende -104 dBm. I dag er GSM 1800 system ikke lengre i bruk i Norge. Ved dekningsvurdering er parametere fra en standard mottaker i 900 MHz-båndet benyttet som en referansemottaker.

⁹ ETSI TS 145 005 V14.4.0 (2018-04) Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); GSM/EDGE Radio transmission and reception (3GPP TS 45.005 version 14.4.0 Release 14)

3.2 4G - LTE

De tekniske parameterne for LTE er beskrevet i den tekniske spesifikasjonen ETSI TS 136 101¹⁰.

Et uttrekk fra de relevante frekvensbånd og følsomhet (QPSK P_{REFSENS}) for mobilterminaler er vist i tabellen nedenfor.

Bånd	Kanalbredde						Dupleks Modus
	1.4 MHz (dBm)	3 MHz (dBm)	5 MHz (dBm)	10 MHz (dBm)	15 MHz (dBm)	20 MHz (dBm)	
450	-99.0	-95.7	-93.5				FDD
700		-100.2	-98.5	-95.5	-93.7	-91	FDD
800			-97	-94	-91.2	-90	FDD
900	-102.2	-99.2	-97	-94			FDD
1800	-101.7	-98.7	-97	-94	-92.2	-91	FDD
2100			-100	-97	-95.2	-94	FDD

Tabell 5: Referansefølsomhet QPSK P_{REFSENS} for utvalgte frekvensbånd

Mobilterminalen rapporterer informasjon om mottatt effekt fra referansesignalet (RSRP¹¹) til basestasjon. Rapporten er basert på referanse elementer. ETSI definerer følsomheten QPSK P_{REFSENS} som et samlet signal mottatt av mobiltelefonen i en bestemt frekvensblokk (RSSI¹²). RSSI er et samlet signal som inneholder et nyttesignal samt interferens og støy. Ut fra RSSI regnes RSRP etter følgende matematisk formel:

$$\text{RSSI} = \text{wideband power} = \text{serving cell power} + \text{interference power} + \text{noise}$$

I et interferens- og støyfritt miljø vil RSSI tilsvare "serving cell power", dvs. rapportert effekt beror kun på antallet resursblokker som basestasjon sender til mottakeren og referansefølsomheten tilsvarer antallet resursblokker som er sendt til mottakeren i en bestemt kanalbredde. Derfor kan man benytte følgende likning:

$$\text{RSSI} = N_{\text{RB}}$$

Hvor N_{RB} er antall resursblokker (RB¹³) i en LTE-frekvensblokk. En resursblokk inneholder 12 stykk 15 kHz underbølger (OFDM modulasjon), som inneholder referanseelementer. Effekt målt i samtlige referanseelementer rapporterer mobilen som RSRP. Derfor

$$\text{RSSI} = N_{\text{RB}} * 12 * \text{RSRP}$$

Fra denne ligningen utledes RSRP¹⁴ omregnet til dBm:

¹⁰ ETSI TS 136 101 V16.7.0_2020-12 for LTE Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 16.7.0 Release 16)

¹¹ RSRP – Reference Signal Received Power (It is the power of the Reference Signals spread over the full bandwidth)

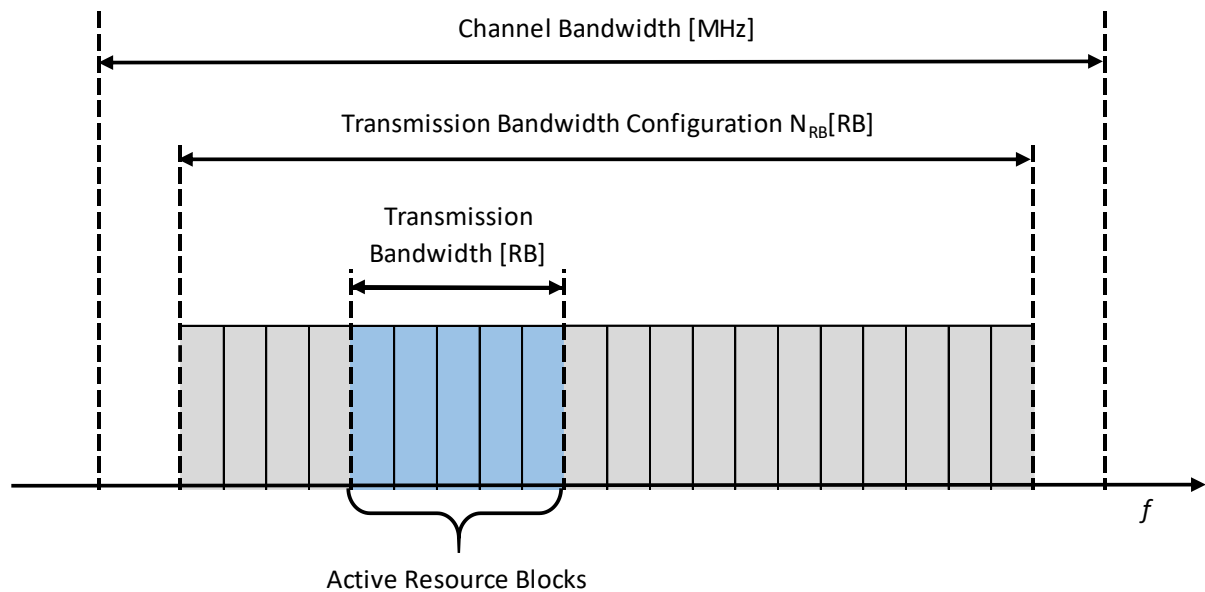
¹² RSSI – Received Signal Strength Indicator (the average total received power observed only in OFDM symbols containing reference symbols for antenna port 0 in the measurement bandwidth over N resource blocks)

¹³ RB – Resource Block (the minimum unit of allocation in LTE, 180 kHz wide, contains 12 elements of 15 kHz subcarriers)

¹⁴ ETSI TS 136 211 v13.0.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 13.0.0 Release 13)

$$RSRP \text{ (dBm)} = RSSI \text{ (dBm)} - 10 \cdot \log(12 \cdot N_{RB})$$

Antall aktive ressursblokker for en bestemt tjeneste er avhengig av tildelt blokkstørrelse med tilsvarende kanalkonfigurasjon og aktuell brukt båndbredde. Dette er vist på figur nedenfor.



Figur 2: Antall aktive resursblokker avhengig av størrelse på frekvensblokk

Detaljert tillatt konfigurasjon av en LTE blokk med tilsvarende antall av ressursblokker er presentert i tabellen nedenfor.

Channel bandwidth BW_{Channel} [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
Transmission bandwidth configuration N_{RB}	6	15	25	50	75	100

Tabell 6: Transmission bandwidth configuration N_{RB} in E-UTRA channel bandwidths

En sammenstilling av håndsettfølsomheten for ulike frekvensbånd og blokkstørrelser brukt i LTE er vist i tabellen nedenfor.

Bånd	1,4 MHz (dBm)	3 MHz (dBm)	5 MHz (dBm)	10 MHz (dBm)	15 MHz (dBm)	20 MHz (dBm)
450	-118	-118	-118			
700		-123	-123	-123	-123	-122
800			-122	-122	-121	-121
900	-121	-122	-122	-122		
1800	-120	-121	-122	-122	-122	-122
2100			-125	-125	-125	-125

Tabell 7: Håndsettfølsomhet for ulike LTE bånd og blokkstørrelse

Det mest brukte konfigurasjon i dekningsbåndene til LTE, dvs. i 800 MHz- og 900 MHz-båndet er 5 MHz- eller 10 MHz-blokk. Dette resulterer i en følsomhet for mobiltelefonen på tilnærmet -122 dBm (RSRP), som et utgangspunkt i Nkoms vurdering av LTE dekning.

Bruk av 700 MHz-båndet er i oppstartsfasen for LTE og vil bli brukt som dekningsbåndet både for LTE og 5G NR. Følsomheten på håndsettet i 700 MHz-båndet tilsvarer følsomheten på 5G NR i dette båndet og derfor vil LTE dekningen for 700 MHz baseres på en følsomhet lik -123 dBm.

3.3 5G - NR

De tekniske parameterne for mottak av 5G, som er aktuell på nåværende tidspunkt, er beskrevet i den tekniske spesifikasjonen ETSI TS 38.101-1¹⁵. Et uttrekk fra de relevante frekvensbånd for 5G NR og følsomhet (REFSENS) for mobilterminaler i tilsvarende bånd er vist i tabellene nedenfor.

NR operating band	Uplink (UL) operating band BS receive / UE transmit $F_{UL_low} - F_{UL_high}$	Downlink (DL) operating band BS transmit / UE receive $F_{DL_low} - F_{DL_high}$	Duplex Mode
n28	703 MHz – 748 MHz	758 MHz – 803 MHz	FDD
n3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
n78	3300 MHz – 3800 MHz	3300 MHz – 3800 MHz	TDD

Tabell 8: Frekvensbåndene relevant for 5G NR

Ifølge planlagt tildeling i 3.6 GHz båndet, vil operatører følge underbølgeavstand (SCS¹⁶) på 30 kHz.

Tabellen nedenfor viser følsomheten REFSENS i dBm avhengig av brukt båndbredde og SCS

Bånd / SCS / Kanalbredde														
Bånd	SCS kHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	25 MHz	30 MHz	40 MHz	50 MHz	60 MHz	70 MHz	80 MHz	90 MHz	100 MHz
n28	15	-98.5	-95.5	-93.5	-90.8		-78.5							
	30		-95.6	-93.6	-91.0		-78.6							
	60													
n3	15	-97.0	-93.8	-92.0	-90.8	-89.7	-88.9	-82.3						
	30		-94.1	-92.1	-91.0	-89.8	-89.0	-82.4						
	60		-94.5	-92.4	-91.2	-90.0	-89.1	-82.6						
n78	15		-95.8	-94.0	-92.7	-91.7	-90.9	-89.6	-88.6					
	30		-96.1	-94.1	-92.9	-91.8	-91	-89.7	-88.7	-87.9	-87.2	-86.6	-86.1	-85.6
	60		-96.5	-94.4	-93.1	-92	-91.1	-89.9	-88.8	-88.0	-87.3	-86.7	-86.2	-85.7

Tabell 9: Referanse følsomhet QPSK REFSENS i dBm for 2 antenneporter

¹⁵ ETSI TS 138 101-1 V16.6.0 (2021-01) - 5G NR User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone (3GPP TS 38.101-1 version 16.6.0 Release 16)

¹⁶ SCS – Subcarrier Spacing

Det er et krav i ETSI standarden om å benytte mottakere med 4 antenner, unntatt mottakere montert i bil som kan benytte 2 mottakerantenner. Derfor må verdier fra tabellen korrigeres med en faktor $\Delta R_{IB,4R}$ (dB)¹⁷ som fremgår av følgende tabell. Korrigeringen gjelder også for FWA¹⁸ bruk

Bånd	$\Delta R_{IB,4R}$ (dB)
n28 (700 MHz)	-2.7 ¹
n3 (1800 MHz)	-2.7
n78 (3600 MHz)	-2.2
NOTE 1: 4 Rx operation is targeted for FWA form factor	

Tabell 10: Korrigeringsfaktor for 4 antenneporter, $\Delta R_{IB,4R}$

For 5G NR benyttes tilsvarende regnestykke for utregning av RSRP som i LTE, ettersom begge systemer benytter tilsvarende prinsippet for modulasjon (OFDM) og gruppering i ressursblokker. Likevel er det i 5G NR betydelig flere mulige konfigurasjoner av antall ressursblokker N_{RB} til disposisjon, ettersom operatører kan benytte større sammenhengende frekvensblokker og forskjellige underbølgeavstand. Alle mulige kombinasjoner er vist i tabellen nedenfor

N_{RB}													
SCS (kHz)	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	25 MHz	30 MHz	40 MHz	50 MHz	60 MHz	70 MHz	80 MHz	90 MHz	100 MHz
15	25	52	79	106	133	160	216	270	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
30	11	24	38	51	65	78	106	133	162	189	217	245	273
60	N/A	11	18	24	31	38	51	65	79	93	107	121	135

Tabell 11: Maksimal antall av ressursblokker N_{RB}

Ved bruk av samme ligningen som for LTE, og korleksjon for følsomheten ved mottak med 4 antenner, kan følsomheten for terminaler for 5G regnes ut. Resultater er vist i tabellen nedenfor.

$$RSRP \text{ (dBm)} = RSSI \text{ (dBm)} - 10 \cdot \log(12 \cdot N_{RB})$$

Antall Rx antenner	Bånd	Båndbredde [MHz]												
		5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
SCS 15 kHz														
2 Rx	700	-123	-124	-123	-122		-111							
2 Rx	1800	-122	-122	-122	-122	-122	-122	-116						
2 Rx	3600		-124	-124	-124	-124	-124	-124	-124					
SCS 30 kHz														
2 Rx	700		-120	-120	-119		-108							
2 Rx	1800		-119	-119	-119	-119	-119	-113						

¹⁷ Delta Receive In band, 4 Receivers

¹⁸ FWA – Fixed Wireless Access

2 Rx	3600		-121	-121	-121	-121	-121	-121	-121	-121	-121	-121	-121	-121
SCS 15 kHz														
4 Rx	700	-126	-126	-126	-125		-114							
4 Rx	1800	-125	-125	-125	-125	-124	-124	-119						
4 Rx	3600		-127	-127	-126	-126	-126	-126	-126					
SCS 30 kHz														
4 Rx	700		-123	-123	-122		-111							
4 Rx	1800		-121	-121	-122	-121	-121	-116						
4 Rx	3600		-123	-123	-123	-123	-123	-123	-123	-123	-123	-123	-123	-123

Tabell 12: RSRP for forskjellige båndbredde, antall Rx antenner og aktuelle frekvensbånd

-123 dBm er utgangspunktet for utregning av dekningserskel for 5G NR, med utgangspunkt i 4 mottakerantenner og SCS på 30 kHz i 3600 MHz båndet.

3.4 Kroppstap

Kroppstap (Body loss) er en viktig faktor i vurderingen av deknningen. Hvordan mottakeren holdes under samtale eller datamottak har en stor påvirkning på opplevd dekningsgrad.

Fra 2016 og frem til utgangen av 2020 benyttet Nkom en verdi på 2 dB ved vurdering av dekning i de offentlige mobilnettene.

En undersøkelse gjennomført av Aalborg Universitet i 2018¹⁹ viser at det er stor forskjell på kroppstap avhengig av hvordan håndsettet holdes og på hvilken side av hode håndsettet holdes. Resultatet er gjengitt i tabellen nedenfor.

Mobil / LTE 800 MHz	Håndholdt TIS ²⁰ -verdi	TIS-verdi i fritt rom	Kroppstap
Samsung Galaxy S9+	-93,3 dBm	-94,8 dBm	1,5 dB
Apple Iphone XS Max	-88,2 dBm	-93,5 dBm	5,3 dB
Forskjell på håndsett med beste ytelse	-93,3 dBm	-95,6 dBm	2,3 dB
Forskjell på håndsett med verste ytelse	-88,2 dBm	-92,9 dBm	4,7 dB
Variasjon	5,1 dB	2,7 dB	

Tabell 13: Håndsettytelse fra Aalborg Universitetet

Ut fra undersøkelsen fremgår det at kroppstap også er avhengig av håndsettmodellen. Dette skyldes ulik plassering av antenner i mobiltelefonene, avhengig av produsenten av håndsettmodellen. Også material på dekslet av håndsettmodellen spiller en stor rolle. For å imøtekomme spredningene blant kroppstap på forskjellige mobiltelefoner anser Nkom det som hensiktsmessig å justere faktoren for kroppstap for generell bruk av smarttelefoner i Norge. Nkom vil benytte 5 dB kroppstap for 4G og 5G dekningsberegninger til kommersiell bruk i mobilnettene.

¹⁹ Aalborg University - Mobile Phone Antenna Performance 2018

²⁰ TIS –Total Isotropic Receiver Sensitivity

Det er besluttet at et nytt nødnett skal realiseres i de kommersielle mobilnettene. Dette medfører at det kan være hensiktsmessig å sette en faktor for kroppstap som vil gjelde spesifikt for beregning av dekning for nødnettet. DSB benytter i dag en faktor på 8 dB og begrunner dette med brukernes bekledning og arbeidsforhold. Nkom tar hensyn til DSBs begrunnelse for å benytte en faktor på 8 dB for kroppsdeмпing, og vil også benytte en faktor på 8 dB for beregning av dekning for nødnettet.

3.5 Håndsettvariasjon

I forbindelse med vurdering av kroppstap, ble det nevnt at det forekommer stor variasjon i følsomheten av håndsettmodeller, avhengig av plassering av antenner i mottakeren, material på dekslet og brukte elektronikk-komponenter.

For å kompensere for variasjon av håndsettene benytter Nkom en håndsettvariasjonsfaktor i sin vurdering av dekning.

Dersom vi sammenligner med tilsvarende rapport fra undersøkelsen som Aalborg universitetet gjennomførte i 2016²¹ ser vi at følsomheten til håndsettene er forbedret. Dette skyldes blant annet at noen modeller er ute av markedet og er erstattet av nye med forbedret elektronikk og antenner. Ut ifra Aalborg studiet ser vi at noen håndsett har betydelig dårligere følsomhet. Dette er håndsett som er svært populære på det norske mobilmarkedet. Nkom benytter derfor en håndsettvariasjonsfaktor på 5 dB, som er i tråd med undersøkelsen som er gjort i Danmark.

4 Terskelnivåer satt av Nkom for grunnleggende mobildekning

Nkom er opptatt av at arealdekning i størst mulig grad bør beregnes slik at resultatet reflekterer opplevd dekning for brukerne, og at tallene er sammenlignbare med dekningsberegninger for andre nett. Målsetningen for myndighetene i Norge er å sikre dekning der hvor folk bor og ferdes, og særlig i gråstrøket. Derfor anser Nkom det som nødvendig å justere sikkerhetsmarginen for dekningsberegninger som i utgangspunktet er basert på følsomheten til mottakeren.

Når Nkom skal gjennomføre dekningsberegninger fremover vil vi ta hensyn til følgende sikkerhetsmarginer:

1. Sikkerhetsmarginen (fading margin)

Frem til utgangen av 2020 benyttet Nkom en fading margin på 5 dB som tilsvarte en sannsynlighet for å kunne gjennomføre en samtale på "cell edge" tilsvarende ca. 75%. Nkom har bestemt å endre fra 5 dB til 6 dB, som vil sikre 76 % sannsynlighet av opplevd dekning i utkanten av dekningsområdet. Endringer er i tråd med planer for innføring av nødnettet i kommersielle nett og oppfølging av krav satt av DSB for sikkerhetsmargin.

²¹ Aalborg University - Mobile Phone Antenna Performance 2016

2. Kroppstap

Kroppstap økes fra 2 dB til 5 dB for kommersiell bruk av nettene. For beregning av dekning for nødnettet benyttes en faktor på 8 dB.

3. Håndsettvariasjon

Håndsettvariasjonen settes til 5 dB, som gir en god representasjon av håndsettvariasjonen brukt i det norske markedet.

Alle relevante parameter relatert til dekningsterskel som Nkom benytter i sine dekningsberegninger er vist i tabellen nedenfor.

	GSM	4G/LTE₂₀₁₆ (RSRP)	4G/LTE₂₀₂₁ (RSRP)	5G NR₂₀₂₁ (RSRP)	4G/LTE_{nødnett} (RSRP)	5G NR_{nødnett} (RSRP)
Håndsettfølsomhet (dBm)	-104	-122	-122	-123	-122	-123
Sikkerhetsmargin (fading margin) (dB)	5	5	6	6	6	6
Kroppstap (dB)	2	2	5	5	8	8
Håndsettvariasjon (dB)	5	5	5	5	5	5
Dekningsterskel (dBm)	-92	-110	-106	-107	-103	-104

Tabell 14: Terskelverdier satt av Nkom

Nkom vil fokusere på beregning av dekning for 4G og 5G NR, da det er disse teknologiene som vil styre utviklingen i mobilnettene i Norge i nær fremtid. Nkom finner derfor ikke behov for å justere terskel for GSM.

GSM system endrer seg ikke vesentlig og operatører har oppfylt sine dekningskrav for lenge siden og derfor har Nkom valgt å ikke endre på kroppstap og sikkerhetsmargin for GSM.

Det som er verdt å nevne er at dekningsterskel, som omtales her i rapporten gjelder utendørsbruk av mottakeren. Det er ikke mulig å sette en konstant tilleggsfaktor som vil sikre en margin for innendørsdekning. En slik faktor er avhengig av bygningskonstruksjon, typer av vegg, antall, størrelse og typer av vinduer (typer av vindusglass) og flere andre. Typisk kan denne faktoren variere fra 10 dB til 20 dB eller mer, spesielt når bygning er laget av armert betong med vinduer som isolerer termisk og beskytter mot stråling fra solen. Derfor beregner Nkom kun utendørsdekning for å ha et overordnet bilde av situasjonen og rapportere denne til andre myndighetene.

5 Tilgang til mobildata med nedstrøms hastigheter på 30 Mbit/s eller 100 Mbit/s

Dekningsterskel presisert i kapittel 4 begge for 4G og 5G er ment som grunnlag for tilgang til disse systemer og ikke setter noe krav på nedstrøms hastighet. Basisdekning utgjør randsonen for dekning og er basert på en signalstyrke på -106 dBm for 4G og på -107 dBm for 5G for samtlige frekvensbåndene brukt til 4G og 5G. For å beregne dekning for høyhastighetsnett må terskel økes. I

høyhastighets nett varierer terskel avhengig av størrelse av frekvensblokk som er til disponering av mobiloperatører. Nedstrøms hastighet er sterk relatert til valgt modulasjonstype, som er videre relatert til forhold mellom signal og støy pluss interferens (SINR). Jo bedre SINR desto mer avansert modulasjon kan brukes og med data sendes. Nedstrøms hastighet beror også på størrelsen av frekvensblokk som er brukt for kommunikasjon med mobilen.

Nkom antar at operatørens nett er optimalisert og interferens ligger på et konstant og lavt nivå. Derfor kan endring av modulasjon og dermed hastigheten relateres til S/N forhold.

5.1 Shannon formel

Et grunnleggende forhold mellom overføringshastighet, båndbredde og signal-til-støy-forhold for en datakanal beskrives av Shannon formel.

$$C = B * \log_2(1 + S/N)$$

Hvor:

C – overføringshastighet i Mbit/s

B – brukt båndbredde i MHz

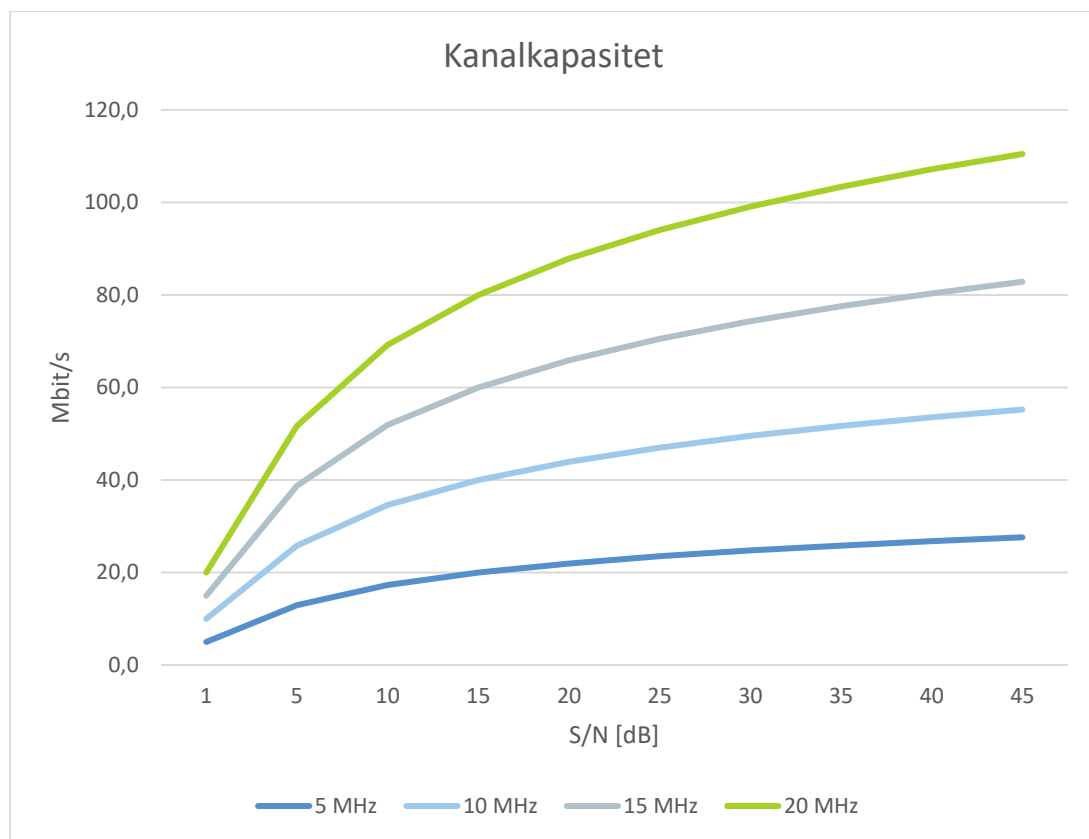
S/N – signal-støy forhold i dB

Shannon formel viser kapasitet, dvs. maksimal feil-fri data hastighet støttet av en overføringskanal.

Dette er definert i et ideelt miljø, altså uten støy. Med hjelp av denne formel kan man regne ut hvordan S/N påvirker hastigheten for en bestemt båndbredde.

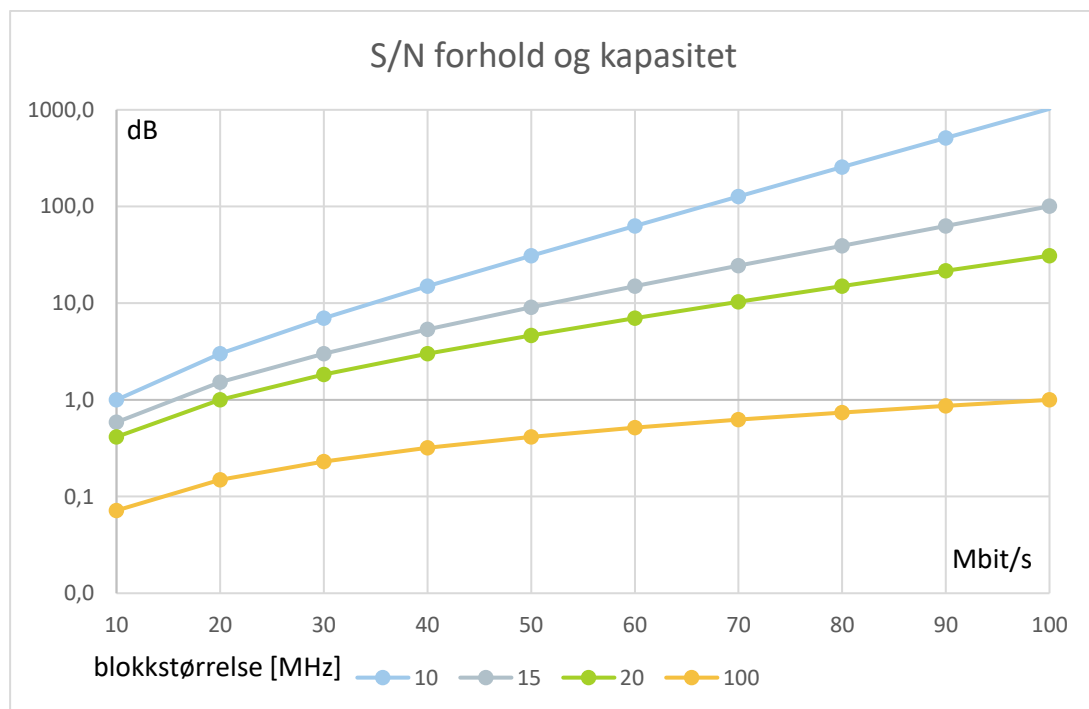
S/N [dB]	Båndbredde [MHz]				
	5	10	15	20	100
1	5,0	10,0	15,0	20,0	100,0
5	12,9	25,8	38,8	51,7	258,5
10	17,3	34,6	51,9	69,2	345,9
15	20,0	40,0	60,0	80,0	400,0
20	22,0	43,9	65,9	87,8	439,2
25	23,5	47,0	70,5	94,0	470,0
30	24,8	49,5	74,3	99,1	495,4
35	25,8	51,7	77,5	103,4	517,0
40	26,8	53,6	80,4	107,2	535,8
45	27,6	55,2	82,9	110,5	552,4

Tabell 15: Kanalkapasitet i Mbps



Figur 3: Grafisk fremstilling av Shannon formel

Ved å konvertere Shannon formel kan man beregne en minimal S/N forhold for å nå ønsket teoretisk kapasitet.



Figur 4: Grafisk fremstilling av S/N forhold og kanal kapasitet til ulike blokkstørrelse

Tabellen og figurer viser S/N-forhold og minimal kanalbredde som trengs for å få en teoretisk kapasitet på 30 Mbps eller 100 Mbps per bruker. Shannon formel setter grensen på hvor mye data kan sendes gjennom en kommunikasjonskanal. Ved hjelp av ulike tekniske verktøy prøver telekommunikasjonssystemer å nå denne grensen.

De relevante S/N forhold i dB for ulike frekvensblokkstørrelse viser tabell nedenfor.

Mbit/s	blokkstørrelse [MHz]				
	5	10	15	20	100
10	3,0	1,0	0,6	0,4	0,1
20	15,0	3,0	1,5	1,0	0,1
30	63,0	7,0	3,0	1,8	0,2
100	1048575,0	1023,0	100,6	31,0	1,0

Tabell 16: Et minimum S/N forhold i dB i relevante blokkstørrelser for en gitt kapasitet

Tabellen viser at for høyhastighet nett trengs en båndbredde på minimum på 10 MHz, derfor bruk av ressurser i 450 MHz båndet dedikert hovedsakelig til bruk i faste eller nomadiske installasjoner er ikke relevant i høyhastighet mobilnett.

I praksis oversendes data i miljøet der forekommer støy og andre fenomener som for eksempel, refleksjoner, speiling av signal, demping osv. For å forsikre en feilfri overføring av data brukes ulike modulasjon samt koding.

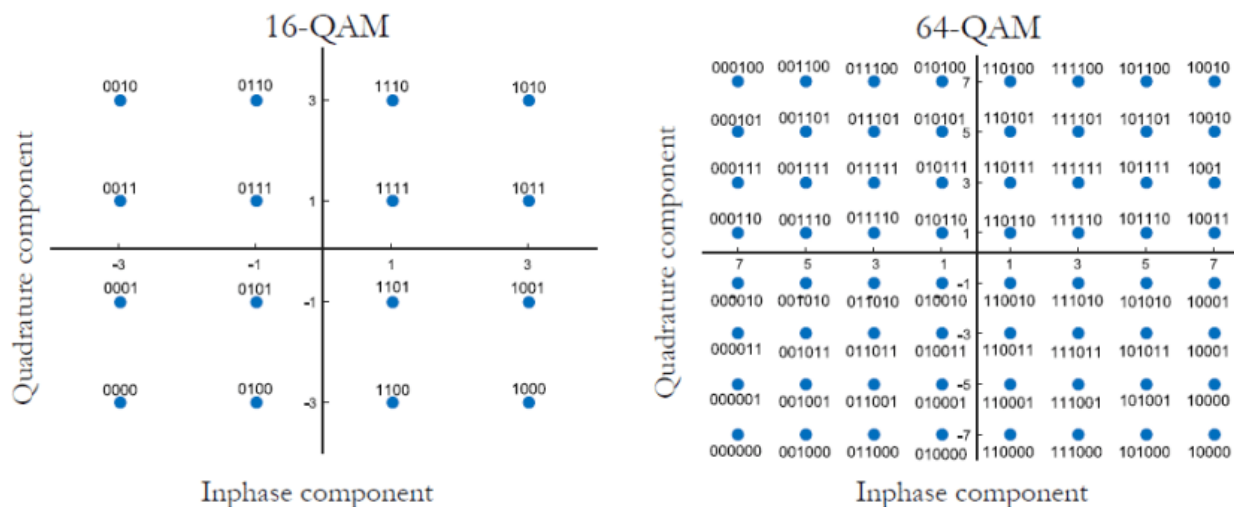
5.2 Modulasjon

Brukt modulasjon har en stor betydelse på overføringshastigheten. Med hjelp av mer komplisert modulasjon kan mer informasjon sendes over samme tid. Det er følgende modulasjonstyper som er tillatt for 4G og 5G system: QPSK (eller 4QAM), 16QAM, 64QAM 256QAM. Høyere modulasjonsgrad skal brukes når frekvenser i FR2-båndet skal tas i bruk. Avhengig av brukt modulasjon varierer antall av bits som overføres. En sammenstilling vises i tabellen nedenfor.

Modulasjonstype	Antall av symboler	Antall bits per symbol
QPSK	4	2
16QAM	16	4
64QAM	64	6
256QAM	256	8

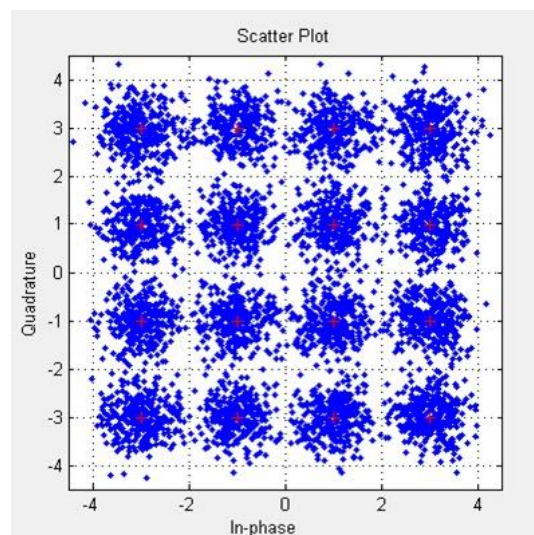
Tabell 17: QAM typer brukt i 4G og 5G

En detaljert beskrivelse av konstellasjonsdiagrammer for QAM finnes i ETSI TS 136 211²². Figur nedenfor viser konstellasjonsdiagrammer for utvalgte QAM-modulasjon



Figur 5: Utvalgte konstellasjonsdiagrammer for QAM (kilde: gaussianwaves.com)

Hver QAM diagram har faste posisjon av elementer sendt med bestemt amplitude og fase (I – in fase og Q – skiftet i 90° i fase) for hvert datasymbol. Ved høyt støynivå økes området med feil mottatt signal og dermed klarer ikke mottaker å lese korrekt posisjonen av mottatt signalet i bestemt konstellasjonen. Dermed må informasjon sendes med hjelp av lavere modulasjonsgrad. Eksempel nedenfor viser støy i 16QAM som kan føre til endring av modulasjonsskjemaet til QPSK (4QAM).



Figur 6: Et eksempel på mottatt 16QAM signal ved høyt støynivå

I 4G og 5G systemer endres QAM modulasjon dynamisk avhengig av støynivå for å gi raskest mulig dataoverføring til mobil. Finns det en god støymargin, kan høyere modulasjonsgrad brukes og dermed

—

²² ETSI TS 136 211 V15.2.0 (2018-10) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 15.2.0 Release 15)

raskere dataoverføring. Hvis avstand mellom basestasjon og mobil økes, økes sannsynlighet for feil i overført data. Derfor må basestasjonen enten øke på sendereffekt, eller redusere QAM modulasjon for å sikre en feilfri dataoverføring. Det finns en balanse mellom datahastighet, QAM modulasjonsgrad, utstrålt effekt og akseptabelt antall av feil i transmisjonen. I tillegg til dette, ved dårlig kvalitet av forbindelse, må basestasjonen introdusere ytterligere feilkorreksjonsalgoritme (FEC²³ – forward error correction) for å holde feil i transmisjon på et akseptabelt nivå. Dette reduserer ytterligere hastighet av brukbar data.

5.3 Støymargin i QAM modulasjon

Ettersom modulasjonsgrad øker, øker også antall punkter på QAM konstellasjonsdiagrammet og reduserer avstand mellom punktene og dermed reduseres feilmargin. For å bruke høyordens QAM-formater, må lenken ha en meget god E_b/N_0 ²⁴ ellers vil det oppstå datafeil. Når E_b/N_0 forringes, må ellers effektnivået økes, eller QAM-grad reduseres hvis bitfeilraten skal bevares.

For bredbånd systemer defineres SNR (Signal To Noise Ratio), som er tett knyttet til E_b/N_0 :

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10}(E_b/N_0) + 10 \log_{10}(f_b/B)$$

hvor f_b er netto bitrate og B er kanalbredde.

Bit Error Rate (BER) er antallet akseptable feil system er forberedt å tåle. Typisk ligger BER verdi mellom 10^{-3} og 10^{-6} . En lav SNR vil resultere i en økt BER og et sterkt signal gir mindre sjanse for feil. Årsaken til at feilen øker med SNR er støy. Jo nærmere støygulvet for båndet desto mer ustabile og uforutsigbare blir resultat.

Decimal	Exponential	Link quality
0.1	10^{-1}	Bad
0.01	10^{-2}	Not bad
0.001	10^{-3}	OK
0.0001	10^{-4}	Good
0.00001	10^{-5}	Very good
0.000001	10^{-6}	Excellent

Tabell 18: BER og linkkvalitet

Høyere modulasjonsgrad tilbyr mer data hastighet og bedre spektrumutnyttelse. Dette tilbys på bekostning av robusthet til forstyrrelser og interferens. Derfor moderne kommunikasjonssystemer endrer dynamisk modulasjonstyper for å gi mest mulig utnyttelse av sendt data, med minst mulig feil. Forbindelse mellom basestasjonen og mobilenheten er kontinuerlig målt under data overføring og rapportert til basestasjonen, som avhengig av innrapportert kvalitet av mottatt data (CQI – Channel Quality Indicator) endrer modulasjonstype.

²³ FEC – Forward Error Correction - er en prosess der sendes en redundant informasjon sammen med kodete dataene fra sender. Med dette kan mottakeren oppdage feil på enkeltbitnivå og korrigere dem (korrigerbare feil) uten å måtte få dataene overført på nytt.

²⁴ E_b/N_0 – energy per bit to noise power spectral density ratio – normalisert SNR, også kalles SNR per bit

Rapportert CQI er tett knyttet til støynivå. Tolkning av støynivå til CQI samt MCS²⁵ varierer og er avhengig utstyrsprodusent. Hver utstyrsprodusent har implementert sin egen CQI/SNR tabell direkte i produsert utstyr. Tabellen er ikke publisert offentlig ettersom denne parameter har en stor markedsverdi. Basert på CQI rapportert av mobilen til basestasjon, velger basestasjon en hensiktsmessig MCS. Måte på hvordan mobilen tolker SNR til CQI resulterer i data prestasjonen fra basestasjonen og dermed brukeropplevelsen.

Det finns veldig få informasjon om hvordan SNR overføres til CQI, derfor må Nkom på et overordnet nivå vurdere hvordan justere dekningsterskel for å få informasjon om mulig datahastighet.

En av de få tilnærminger tilgjengelig i litteratur, som et resultat av simuleringen vises i tabellen nedenfor²⁶. Det er følgende transmisjonsmoduser, definert i TS 36.213 som ble valgt til simuleringen:

- Transmission Mode 1 – single antenna port
- Transmission Mode 2 – Transmit Diversity
- Transmission Mode 3 – SU-MIMO Spatial Multiplexing Open-Loop

For Nkom er det Tx Mode 3 (2x2), som er av interesse for 4G og Tx Mode 3 (4x2) for 5G.

²⁵ MCS – Modulation and Coding Scheme

²⁶ Mohammad T. Kawser, Nafiz Imtiaz Bin Hamid, Md. Nayeemul Hasan, M. Shah Alam, and M. Musfiqur Rahman "Downlink SNR to CQI Mapping for Different Multiple Antenna Techniques in LTE" - *International Journal of Information and Electronics Engineering*, Vol. 2, No. 5, September 2012

CQI	SNR				
	Tx Mode = TM 1, Tx Antenna = 1, Rx Antenna = 1, Max retransmission HARQ = 0	Tx Mode = TM 1, Tx Antenna = 1, Rx Antenna = 1, Max retransmission HARQ = 3	Tx Mode = TM 2, Tx Antenna = 2, Rx Antenna = 2	Tx Mode = TM 3, Tx Antenna = 2, Rx Antenna = 2	Tx Mode = TM 3, Tx Antenna = 4, Rx Antenna = 2
	1	1.95	2.00	-7.00	-3.10
	2	4.00	4.05	-5.00	-1.15
	3	6.00	5.10	-3.15	1.50
	4	8.00	8.00	-1.00	4.00
	5	10.00	10.00	1.00	6.00
	6	11.95	11.80	3.00	8.90
	7	14.05	13.90	5.00	12.70
	8	16.00	16.10	6.90	14.90
	9	17.90	17.45	8.90	17.50
	10	19.90	19.50	10.85	20.50
	11	21.50	21.50	12.60	22.45
	12	23.45	23.10	14.35	23.20
	13	25.00	24.90	16.15	24.90
	14	27.30	27.00	18.15	27.00
	15	29.00	29.10	20.00	29.10

Tabell 19: CQI mapping mot SNR (10% BLER)

CQI verdier tolkes videre til modulasjon. En ETSI-standard 36.213²⁷ definerer tolkning mellom CQI og brukt modulasjon i 4G og 5G.

CQI index	modulation	Target code rate x 1024	Spectral efficiency bit/Hz
0	out of range		
1	QPSK	78	0,1523
2	QPSK	193	0,3770
3	QPSK	449	0,8770
4	16QAM	378	1,4766
5	16QAM	490	1,9141
6	16QAM	616	2,4063
7	64QAM	466	2,7305
8	64QAM	567	3,3223
9	64QAM	666	3,9023
10	64QAM	772	4,5234
11	64QAM	873	5,1152
12	256QAM	711	5,5547
13	256QAM	797	6,2266
14	256QAM	885	6,9141
15	256QAM	948	7,4063

Tabell 20: CQI mapping mot modulasjon (Rel. 12 og nyere)

²⁷ ETSI TS 136 213 V16.2.0 (2020-09) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (3GPP TS 36.213 version 16.2.0 Release 16) - tabell 7.2.3-2

Oppsummert – Mengde av data som kan sendes i områder med mobildekning beror på kvaliteten av forbindelsen mellom basestasjonen og mobilen. Jo bedre rapporterer mobilen kvalitet (S/N forholdet) av forbindelsen, desto mer data kan sendes.

5.4 Carrier aggregation (bæreraggregering)

Carrier aggregation (CA) er en teknikk som legger sammen flere frekvensblokker i det samme eller ulike frekvensbånd for å sende data til en bestemt bruker. Det er LTE-A (LTE-Advanced, eller "LTE+") som introduserer dette i LTE teknologien. CA er en velkjent teknologi som har sine røtter i 3G, da var en maksimal tilgjengelig blokkstørrelse avgrenset til 5 MHz. Får å tilby større båndbredde for dataoverføring måtte mobiloperatører bruke samtidig (aggregere) flere 3G frekvensblokker (HSPA+). I LTE er maksimal tilgjengelig blokkstørrelse avgrenset til 20 MHz. Når LTE blitt oppgradert til LTE+ var carrier aggregation det viktigste forbedring som åpnet vei til Gigabit-LTE. Blokkstørrelsen i 5G NR begrenset til 100 MHz og CA støtter FR1- (under 7GHz) og FR2-frekvensbånd (over 24 GHz). Mulige kombinasjoner av CA er beskrevet i 3GPP TS 36.101 standarden og antall mulige kombinasjon øker kontinuerlig. Også stadig flere nyere mobil modeller støtter mer CA kombinasjoner.

Det mest populære kombinasjoner av CA blant av norske mobiloperatører for tiden er kombinasjon mellom 800 MHz og frekvenser i 1800 MHz- eller 2600 MHz-båndet.

Nkom kan ikke informasjon om i hvilken grad og hvor brukes det ulike CA kombinasjoner, derfor i sin vurdering om nedstrøms hastighet ser bort fra denne teknologien.

5.5 Datahastighet

Som nevnt tidligere beror datahastighet (throughput) på størrelsen av tilgjengelig frekvensblokk og brukt modulasjon. Bruttohastigheten i bit/s beregnes med hjelp av følgende formel:

$$\text{Throughput} = N_{rb} * \# \text{subcarriers} * \# \text{symbols_per_sec} * \# \text{bit_per_symbol} * \text{Code_rate} * \text{MIMO}$$

Hvor:

N_{rb}	antall ressursblokker i frekvensblokk
#subcarriers	12 subcarriers per resource block for begge 4G og 5G
#symbols_per_sec	14 OFDM symbols per sekund (7 OFDM symbols sendt per TS=0,5 ms)
#bit_per_symbol	avhengig av brukt modulasjon
Code_rate	et forhold mellom størrelsen på transport blokk og det totale antallet fysiske biter per subframe som er tilgjengelig for overføring av den transportblokken
MIMO	antall ulike data strømmer mellom senderen og mottakeren

Code rate beror på S/N forhold og BER. Ved dårlig S/N forhold og stor BER verdien må basestasjon benytte stor del av sendt data til feilkorreksjonsalgoritme som reduserer betydelig mengde av brukbar data. En veiledning hvordan kan code rate estimeres finnes i 3GPP standarden TS36.213 (§7.1.7).

Alt som er sendt utover nyttig informasjon kalles overhead. Overhead tar ca. 25% av sendt informasjon. Derfor en nyttig throughput, altså den hastigheten som kunden opplever ligger på ca.

75% av brutto throughput. En oversikt over maksimal og nyttig throughput per lag, uten MIMO, per teknologi viser tabeller nedenfor.

LTE DL						
Channel bandwidth BW _{Channel} [MHz]	1,4	3	5	10	15	20
Transmission bandwidth configuration N _{RB}	6	15	25	50	75	100
Number of subcarriers DL	73	181	301	601	901	1201
Number of LTE symbols per 1 ms (7 symbols per TS = 0,5 ms)	1022	2534	4214	8414	12614	16814
Maksimal throughput brutto per layer [bit/s]						
QPSK (2 bit)	2 044	5 068	8 428	16 828	25 228	33 628
16 QAM (4 bit)	4 088	10 136	16 856	33 656	50 456	67 256
64 QAM (6 bit)	6 132	15 204	25 284	50 484	75 684	100 884
256 QAM (8 bit)	8 176	20 272	33 712	67 312	100 912	134 512
Avrundet netto throughput per layer [Mbps]						
QPSK (2 bit)	1,5	3,7	6,2	12,3	18,5	24,6
16 QAM (4 bit)	3,0	7,4	12,3	24,7	37,0	49,3
64 QAM (6 bit)	4,5	11,1	18,5	37,0	55,4	73,9
256 QAM (8 bit)	6,0	14,8	24,7	49,3	73,9	98,5
MIMO 2x2 [Mbps]						
QPSK (2 bit)	3,0	7,4	12,3	24,6	36,9	49,2
16 QAM (4 bit)	5,9	14,8	24,6	49,2	73,8	98,4
64 QAM (6 bit)	8,9	22,1	36,9	73,8	110,7	147,7
256 QAM (8 bit)	11,8	29,5	49,2	98,4	147,7	196,9

Tabell 21: LTE nedlink hastigheter

MIMO-teknologi (Multiple Input, Multiple Output) øker kapasiteten ved å bruke flere sendings- og mottaksantennener samt avanserte signalbehandlingsteknikk resulterer i samtidig overføring og mottak av flere datastrømmer, noe som ytterligere forbedrer gjennomstrømmingen.

For 4G brukes til vanlig 2x2 MIMO og for 5G – 4x4 MIMO teknologi.

Man må bli klar over at MIMO teknologi fungerer best på korte avstand fra basestasjoner. Dette betyr at for å få 30 Mbps til mobilen i griseendte strøk må den ha tilgang til minimum to 10 MHz-frekvensblokker med 16QAM modulasjon.

Høyere ordens modulasjoner (som 64QAM og 256QAM) gir høyere gjennomstrømming, men krever bedre signalforhold (høyere SNR - Signal-to-Noise Ratio). Lavere ordens modulasjoner (som QPSK og 16QAM) er mer robuste og kan opprettholde tilkobling og gjennomstrømming under dårligere signalforhold, men tilbyr lavere gjennomstrømming. Avhengig av S/N forhold bytter nettverk mellom

modulasjonsskjemaer for å opprettholde best mulig balanse mellom gjennomstrømming og tilkoblingsstabilitet. Det samme gjelder begge 4G og 5G nettet.

En derimot reduksjon av throughput angitt i tabellen kan forekomme ved større antall av brukere som er dekket av en dedikert cell og dermed stor etterspørsel for datatrafikk. Derfor er det veldig vanskelig å beregne en "garantert" nedlink hastighet i 4G eller 5G nettet.

5G NR (SCS 30 kHz)					
Channel bandwidth BW _{Channel} [MHz]	5	10	15	20	100
Transmission bandwidth configuration N _{RB}	11	24	38	51	273
Number of subcarriers DL	132	288	456	612	3276
Number of 5G symbols per 1 ms (14 symbols per TS = 0,5 ms)	3696	8064	12768	17136	91728
Maksimal throughput brutto per layer [bit/s]					
QPSK (2 bit)	7 392	16 128	25 536	34 272	183 456
16 QAM (4 bit)	14 784	32 256	51 072	68 544	366 912
64 QAM (6 bit)	22 176	48 384	76 608	102 816	550 368
256 QAM (8 bit)	29 568	64 512	102 144	137 088	733 824
Avrundet netto throughput per layer [Mbps]					
QPSK (2 bit)	5,4	11,8	18,7	25,1	134,4
16 QAM (4 bit)	10,8	23,6	37,4	50,2	268,7
64 QAM (6 bit)	16,2	35,4	56,1	75,3	403,1
256 QAM (8 bit)	21,7	47,3	74,8	100,4	537,5
MIMO 4x4 [Mbps]					
QPSK (2 bit)	21,7	47,3	74,8	100,4	537,5
16 QAM (4 bit)	43,3	94,5	149,6	200,8	1074,9
64 QAM (6 bit)	65,0	141,8	224,4	301,2	1612,4
256 QAM (8 bit)	86,6	189,0	299,3	401,6	2149,9

Tabell 22: 5G NR (SCS 30 kHz) nedlink hastigheter

5.6 Valg av utgangsverdier for terskler for høyhastighet mobilnett

Det er følgende frekvensblokk som er tilgjengelig per frekvensbånd (nedlink):

Frekvensbåndet	Blokkstørrelse ifølge tillatelse [MHz]	Blokkstørrelse brukt videre til vurdering av hastighet og terskel
450	5 ICE/Lyse	Ikke relevant ²⁸
700	10	10
800	10	10
900	15 (5 til ICE/Lyse)	10
1800	20 ICE/Lyse, 25 Telia, 30 Telenor	20
2100	20	20
2600 FDD	30 Telia, 40 Telenor	20
3600 TDD	180 Ice/Lyse, 120 Telenor, 100 Telia	100

Tabell 23: Blokkstørrelser tildelt mobiloperatører

I sin vurdering av terskel som er nødvendig for å oppnå med stor sannsynlighet tar Nkom som utgangspunkt en blokkstørrelse på 10 MHz, som et minimum for å få en nedstrøms hastighet på 30 Mbps.

Tabeller i § 5.5 viser at bruk av frekvensblokk som er mindre enn 10 MHz ikke gir tilstrekkelig hastighet alene, derfor ved vurdering av høyhastighetsnettet kan ses bort fra blokken i 450 MHz-båndet. Likevel i 450 MHz-båndet kan man oppnå gode 10-12 Mbps i gris grendte strøk.

Som nevnt i kap. 5.5, i grigrendte strøk må mobilen ha tilgang til 10 MHz frekvensblokk med 16QAM modulasjon (minimum to, hvis man ser bort fra 2x2 MIMO). Dette gjelder begge 4G og 5G nett.

Som utgangsverdi for beregning av minimum terskel for 30 og 100 Mbps har Nkom valgt CQI som ligger midt for hver modulasjon. Tabellen nedenfor viser oversikt over valgt CQI sammen med minimum S/N krav (10 % BLER) for hver teknologi (avrundet).

CQI index	S/N (4G) dB	S/N (5G) dB	modulasjon
2	-5	-2	QPSK (2 bit)
5	1	5	16QAM (4 bit)
9	9	16	64QAM (6 bit)
13	17	25	256QAM (8 bit)

Tabell 24: CQI og S/N verdier valgt av Nkom

Verdier av CQI og dermed S/N i tabellen viser hvor mye desibel må legges på toppen av støy. I tillegg til dette ved økt antall av brukere øker støynivå og bruk av data med antall av brukere per cell.

²⁸ 5 MHz blokk i 450 MHz-båndet kan brukes kun i dedikerte modemløsninger (bruk av kun denne blokken gir ikke mulighet for 30 Mbps) og derfor Nkom ser bort fra denne blokken i dette dokumentet

Brukere ved kort avstand til basestasjon kan fortsatt ha et godt S/N forhold, mens brukere ved utkanten av cell kan oppleve større endringer i S/N forhold og dermed lavere hastighet.

Ved å heve deknings terskel ytterligere oppnår man to resultater:

- Sikrer man tilgang til bedre modulasjon
- Gjør man mer sannsynlig at i praksis vil mobilen ha tilgang til flere frekvensbånd (selv om ytterligere frekvensbåndene har lavere modulasjonsgrad, leverer de data til mobilen).

Ved et økt antall av brukere øker støy for begge nedlink og opplink. Tilgjengelig faglitteratur²⁹ viser hvordan økes støy i cellen ved økt antall av brukere. Økt støy betyr at man må ytterligere kutte terskel for å få ønsket nedstrøms hastighet. Basert på tabellen nedenfor og forventet minimum RSRP på omtrent -90 dBm, samt cell load på 50 % får vi et tillegg på rundt 10 dB.

RSRP range [dBm]	SINR [dB]			
	$Q_{DL} = 5 \%$	$Q_{DL} = 10 \%$	$Q_{DL} = 20 \%$	$Q_{DL} = 50 \%$
[-130,-125)	-2.59505	-2.89747	-3.44561	-4.76733
[-125,-120)	1.167384	0.020646	-1.63513	-4.53769
[-120,-115)	6.067268	5.138658	3.724119	1.090231
[-115,-110)	10.52465	9.29315	7.550201	4.55794
[-110,-105)	14.44424	12.7537	10.59235	7.215437
[-105,-100)	17.57553	15.37665	12.83705	9.166675
[-100,-95)	18.15161	15.41714	12.55161	8.661447
[-95,-90)	20.47858	17.61515	14.68019	10.74663
[-90,-85)	20.48568	17.52136	14.53424	10.56881
[-85,-80)	21.68078	18.68957	15.68885	11.7152
[-80,-75)	23.69743	20.69673	17.69123	13.71472
[-75,-70)	24.55193	21.54533	18.53687	14.55858
[-70,-65)	24.55698	21.54785	18.53814	14.55909
[-65,-60)	26.01957	23.00978	19.99974	16.0205
[-60,-55)	28.23854	25.22851	22.21835	18.23903
[-55,-50)	34.25058	31.24063	28.2305	24.2512

Tabell 25: Økning av DL støy ved økt cell load (Q_{DL})

²⁹ Milutin S. Davidović, Sanja M. Bjeković and Igor A. Tomić, Ericsson d.o.o – "On the impact of network load on LTE network downlink performance"

6 Terskler for høyhastighet mobilnett satt av Nkom

6.1 Utrekning og begrunnelse av terskler for høyhastighet mobilnett

Nkoms dekningssterskel på -106 dBm for 4G og -107 dBm for 5G forutsetter en grunnleggende modulasjon QPSK. Fra tabell 24 fremgår at avstand mellom QPSK og 16QAM er på forholdsvis 6 dB for 4G og 7 dB for 5G.

Modulasjon	QPSK ³⁰		16QAM		64QAM	
System	4G	5G	4G	5G	4G	5G
Dekningsterskel	-106	-107	-106	-107	-106	-107
Avstand fra QPSK	n/a	n/a	6	7	14	18
MIMO forsterkning	n/a	n/a	0	0	-3	-6
Cell load 50 %	n/a	n/a	10	10	10	10
SUM (dBm)	-106	-107	-90	-90	-85	-85

Tabell 26: Terskel til forskjellige modulasjoner

Tildelt frekvensressurser kan deles i tre grupper:

- Frekvensene i 700 MHz-, 800 MHz- og 900 MHz-båndet ment som dekningsfrekvenser der dras ikke nytte av MIMO på grunn av en stor avstand mellom basestasjonen og utkanten av nyttig dekning. Det er stor sannsynlighet at dekningsområde er dekket samtidig av to frekvensbånd derfor en terskel som er tilstrekkelig nok for å få 16QAM modulasjon, bør også være tilstrekkelig for 30 Mbps i grisgrendte strøk (i utkanten av dekning). I disse tre frekvensbåndene alene er det ikke mulig for 100 Mbps pga. blokkstørrelse av 10 MHz.
- Frekvensene i 1800 MHz-, 2100 MHz- og 2600 MHz-båndet er kapasitetsbåndene, der kan også nyttes av MIMO og finns gode muligheter for begge 30 Mbps og 100 Mbps.
 - For 30 Mbps trengs en 10 MHz blokk med 16QAM modulasjon med 2x2 MIMO eller uten MIMO hvis det antas at kapasitetsbåndene fullstendig overlapper dekningsbåndene (som er det i de fleste tilfelle). Ved bruk av 20 MHz blokk 16QAM modulasjon garanterer 30 Mbps.
 - Ved bruk av 64QAM og MIMO kan fås rundt 100 Mbps. Her antas at kapasitetsbåndene fullstendig overlapper dekningsfrekvensene og kan kombineres med dem. Derfor en terskel for 64QAM med 2x2 MIMO for 10 MHz-blokk synes å være

³⁰ QPSK er en grunnleggende modulasjon derfor brukes ikke korreksjon. QPSK modulasjon garanterer ikke noe spesiell datahastighet (forventes mellom 6 og 10 Mbps for en blokk av 5-10 MHz)

riktig nok for 100 Mbps. Modulasjon 64QAM med 2x2 MIMO og 20 MHz blokk garanterer 100 Mbps.

- Frekvensbånd 3600 MHz er et høykapasitetsbånd, derfor forutsetter Nkom en mulig 100 Mbps nedstrøm der forekommer grunnleggende dekning i dette båndet.

6.2 Tabell med terskler for høyhastighet mobilnett satt av Nkom

Tabellen nedenfor viser de terskelverdier som er benyttet for å beregne tilgang til mobildata med nedstrøms hastigheter på 30 Mbit/s eller 100 Mbit/s.

Hastighet nedstrøms	Frekvensbånd (MHz)						
	700	800	900	1800	2100	2600	3600
30 Mbit/s	(-85)	(-85)	(-85)	(-100)	(-100)	(-100)	-107
	-90	-90	-90	-90	-90	-90	
100 Mbit/s	-	-	-	(-85)	(-85)	(-85)	(-104)
				-85	-85	-85	-107

Tabell 27: Nkoms terskel for høyhastighet mobilnett

[tallene i parentes ble angitt av Mats uten nærmere forklaring og er brukt hittil i Nkoms sin bredbåndsstatistikk og vil forsvinne etter godkjenning av oppdaterte terskel.]

6.3 Konklusjon for høyhastighet mobilnett

Det er veldig vanskelig å gi et definitivt svar hvor forekommer nedstrøms hastighet på 30 eller 100 Mbps basert kun på teoretiske beregning uten å kjenne konfigurasjon av hver basestasjon ved hver mobiloperatør. Hastigheten varierer kontinuerlig og er avhengig av lokal belastning, propagasjonsegenskaper m.m. Likevel mener Nkom at for å vurdere utvikling av høyhastighets mobilnett med de tersklene fra tabell 26 vil gi et godt tilnærming for videre analyser.

Ved basis tilgang til 4G nettet regner man med en data hastighet mellom 6 og 10 Mbps og dette forventes i utkanten av dekning med hjelp av lavest tilgjengelig modulasjon (QPSK) og frekvensblokk mellom 5 og 10 MHz. Selv om 5 MHz blokk i 450 MHz-båndet er ikke tatt til generell vurdering av hastigheten kan den, sammenlagt med andre tilgjengelig frekvensblokker, bidra i dedikerte modemløsninger til økt hastighet.