

FFI RAPPORT

BRUK AV SATELLITTKOMMUNIKASJON I FORSVARETS TAKTISKE KOMMUNIKASJONSNODE

ARNESON, Vegard

FFI/RAPPORT-2006/03215

**BRUK AV SATELLITTKOMMUNIKASJON I
FORSVARETS TAKTISKE
KOMMUNIKASJONSNODE**

ARNESON, Vegard

FFI/RAPPORT-2006/03215

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT
Norwegian Defence Research Establishment
Postboks 25, 2027 Kjeller, Norge

P O BOX 25
 NO-2027 KJELLER, NORWAY
REPORT DOCUMENTATION PAGE

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

1) PUBL/REPORT NUMBER FFI/RAPPORT-2006/03215	2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED	3) NUMBER OF PAGES 46
1a) PROJECT REFERENCE FFI II/869/913	2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE -	
4) TITLE BRUK AV SATELLITTKOMMUNIKASJON I FORSVARETS TAKTISKE KOMMUNIKASJONSNODE USE OF SATELLITE COMMUNICATIONS IN THE DEFENCE TACTICAL COMMUNICATIONS SYSTEM		
5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) ARNESON, Vegard		
6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)		
7) INDEXING TERMS IN ENGLISH: IN NORWEGIAN:		
a) <u>Satellite communications</u>	a) <u>Satellittkommunikasjon</u>	
b) <u>Link budget calculations</u>	b) <u>linkbudsjettberegninger</u>	
c) <u>Rain attenuation</u>	c) <u>Nedbørsdempning</u>	
d) <u>Transponder utilization</u>	d) <u>transponderutnyttelse</u>	
e) _____	e) _____	
THESAURUS REFERENCE:		
8) ABSTRACT This report deals with satellite communications for the Norwegian Defence Tactical Communications system. The system has been based on radio links but larger distances between the communications nodes require the use of satellite communications. The main focus is on link budget calculations to investigate the capacity different ground terminals can support. Four different climatic regions are used in the link calculations: dry inland at high and low altitudes, costal climate and tropical climate. The frequency bands considered are X-band at 8 GHz at uplink and 7 GHz at downlink, Ku-band (14/11 GHz), Ka-band (30/20 GHz) and EHF-band (44/20 GHz). The X-band seems to be the most advantageous due to the least influence of atmospheric- and rain attenuation. The increased attenuation can at some extent be compensated by increased antenna gain at increasing frequency but with reduced coverage area.		
9) DATE 2006-06-15	AUTHORIZED BY This page only Vidar S. Andersen	POSITION Director

ISBN 978-82-464-1050-0

UNCLASSIFIED

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

INNHOLD

	Side	
1	INNLEDNING	7
2	TEORI	7
2.1.1.2	Støytemperatur	8
2.1.2	Regndempning	9
2.2	Forutsetninger for linkbudsjettet	9
2.2.1	Satellitt	9
2.2.1.1	Effekt per bærebølge	9
2.2.1.2	Antennevinning	11
2.2.1.3	Støytemperatur	11
2.2.1.4	Output back off og interferens	11
2.2.2	Bakketerminaler	11
2.2.2.1	Støytemperatur	12
2.2.3	Klimatiske forhold	13
2.2.4	Transponderutnyttelse	13
3	LINKBUDSJETT	14
3.1	X-bånd	14
3.1.1	Fra jordstasjon til terminal med 0,4 m antenne	14
3.1.2	Fra terminal med 0,4 m antenne til jordstasjon	15
3.1.3	Kommunikasjon mellom to terminaler med 0,4 m antenne	16
3.1.4	Fra jordstasjon til terminal med 1 m antenne	16
3.1.5	Fra terminal med 1 m antenne til jordstasjon	17
3.1.6	Kommunikasjon mellom to terminaler med 1 m antenne	17
3.1.7	Fra jordstasjon til terminal med 2,4 m antenne	17
3.1.8	Fra terminal med 2,4 m antenne til jordstasjon	18
3.1.9	Kommunikasjon mellom to terminaler med 2,4 m antenne	18
3.1.10	Fra jordstasjon til terminal med 3,8 m antenne	18
3.1.11	Fra terminal med 3,8 m antenne til jordstasjon	19
3.1.12	Kommunikasjon mellom to terminaler med 3,8 m antenne	19
3.1.12.1	Oppsummering	19
3.2	Ku-bånd	20
3.2.1	Fra jordstasjon til terminal med 0,4 m antenne	20
3.2.2	Fra terminal med 0,4 m antenne til jordstasjon	20
3.2.3	Kommunikasjon mellom to terminaler med 0,4 m antenne	21
3.2.4	Fra jordstasjon til terminal med 1 m antenne	21
3.2.5	Fra terminal med 1 m antenne til jordstasjon	22
3.2.6	Kommunikasjon mellom to terminaler med 1 m antenne	22
3.2.7	Fra jordstasjon til terminal med 2,4 m antenne	23
3.2.8	Fra terminal med 2,4 m antenne til jordstasjon	23
3.2.9	Kommunikasjon mellom to terminaler med 2,4 m antenne	24
3.2.10	Fra jordstasjon til terminal med 3,8 m antenne	24
3.2.11	Fra terminal med 3,8 m antenne til jordstasjon	25
3.2.12	Kommunikasjon mellom to terminaler med 3,8 m antenne	25
3.2.12.2	Oppsummering	26

3.3	Ka-bånd	26
3.3.1	Fra jordstasjon til terminal med 0,4 m antenne	26
3.3.2	Fra terminal med 0,4 m antenne til jordstasjon	27
3.3.3	Kommunikasjon mellom to terminaler med 0,4 m antenne	27
3.3.4	Fra jordstasjon til terminal med 1 m antenne	27
3.3.5	Fra terminal med 1 m antenne til jordstasjon	28
3.3.6	Kommunikasjon mellom to terminaler med 1 m antenne	29
3.3.7	Fra jordstasjon til terminal med 2,4 m antenne	29
3.3.8	Fra terminal med 2,4 m antenne til jordstasjon	30
3.3.9	Kommunikasjon mellom to terminaler med 2,4 m antenne	30
3.3.10	Fra jordstasjon til terminal med 3,8 m antenne	31
3.3.11	Fra terminal med 3,8 m antenne til jordstasjon	31
3.3.12	Kommunikasjon mellom to terminaler med 3,8 m antenne	32
3.3.12.2	Oppsummering	32
3.4	EHF-bånd	32
3.4.1	Fra jordstasjon til terminal med 0,4 m antenne	33
3.4.2	Fra terminal med 0,4 m antenne til jordstasjon	33
3.4.3	Kommunikasjon mellom to terminaler med 0,4 m antenne	34
3.4.4	Fra jordstasjon til terminal med 1 m antenne	34
3.4.5	Fra terminal med 1 m antenne til jordstasjon	34
3.4.6	Kommunikasjon mellom to terminaler med 1 m antenne	35
3.4.7	Fra jordstasjon til terminal med 2,4 m antenne	35
3.4.8	Fra terminal med 2,4 m antenne til jordstasjon	36
3.4.9	Kommunikasjon mellom to terminaler med 2,4 m antenne	36
3.4.10	Fra jordstasjon til terminal med 3,8 m antenne	37
3.4.11	Fra terminal med 3,8 m antenne til jordstasjon	37
3.4.12	Kommunikasjon mellom to terminaler med 3,8 m antenne	38
3.4.12.2	Oppsummering	38
3.5	Optimalt frekvensbånd	39
4	DATA OG TALE OVER SATELLITT	39
4.1	Tjenestekvalitet (QoS)	39
5	KONKLUSJON	40
	APPENDIKS	41
A	KLIMATISKE FORHOLD I ATMOSFÆREN	41
A.1	Atmosfærisk dempning	41
A.2	Regndempning	42
A.3	Noen verdier for nedbørsdempning og atmosfærisk dempning	44
	Litteratur	46

BRUK AV SATELLITTKOMMUNIKASJON I FORSVARETS TAKTISKE KOMMUNIKASJONSNODE

1 INNLEDNING

Erfaringer fra operasjoner i utlandet har vist at dagens radiolinjebaserte TADKOM i mange tilfeller ikke er tilstrekkelig for å støtte operasjonen med kommunikasjon. Dette skyldes at operasjonsområdene er blitt mye større og at avstanden mellom avdelinger og enheter er for stor til at det er praktisk mulig å benytte radiolinje. I mange tilfeller vil man heller ikke kunne anta å ha kontroll over områdene mellom operasjonsområdene slik at bruk av dagens TADKOM-node vil kreve store ressurser i blant annet vakthold og sikring. På grunn av dette må det finnes løsninger som ikke er avhengig av infrastruktur mellom operasjonsområdene. I mange tilfeller vil den beste løsningen være satellittkommunikasjon. Denne rapporten omhandler hovedsakelig problemstillinger knyttet til kapasitetsberegninger for å vurdere hva som vil være gunstigste løsningen.

2 TEORI

I de tilfellene hvor TADKOM skal benyttes hvor topografi gjør det ugunstig med radiolinjer, vil satellittkommunikasjon være en attraktiv løsning. Hvilken satellittløsning som er aktuell vil være avhengig av hvilket system Forsvarets velger. Mange ønsker tilgang til militære SATKOM-systemer. Det mest aktuelle frekvensområdet da er 8 GHz på opplinken og 7 GHz på nedlinken. Dette kalles militær SHF (Super High Frequency) eller X-bånd. Et annet mindre vanlig militært frekvensbånd er på 40 GHz opplink og 20 GHz nedlink og kalles militær EHF (Extremely High Frequency). Fordelen med det siste er høyere tilgjengelig båndbredde og større antennevinning ved samme antennestørrelse men demping i atmosfæren vil være større sammenlignet med X-bånd. Spesielt i nedbør vil dette systemet være utsatt for høy signaldempning. En tommelfingerregel skal være at nedbørsdempning gjør seg gjeldende først over 10 GHz. Antennevinningen for en parabolantenne er gitt ved følgende uttrykk:

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (2-1)$$

hvor η er antenneeffektiviteten, D er antennediameteren og λ er bølgelengden. Samtidig er et vanlig uttrykk for 3 dB antennelebbredden θ_{3dB} gitt ved:

$$\theta_{3dB} = 70 \lambda / D \quad (2-2)$$

$$\frac{E_b}{N_0} = EIRP \cdot \frac{1}{L_0} \cdot \frac{G_r}{T} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{L_{atm}} \cdot \frac{1}{L_{pre}} \cdot \frac{1}{L} \quad (2-3)$$

hvor $\frac{E_b}{N_0}$ er signal-støyforholdet for digital kommunikasjon gitt ved energi per bit (E_b) over

støytetthet N_0 . EIRP er forkortelse for "Eqvivalent Isotropic Radiated Power" og er produktet av sendereffekt P_{Tr} og antennevinning G_{Tr} i senderantennen. L_0 er frittromstapet gitt ved

$$L_0 = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad (2-4)$$

hvor d er avstanden til satellitten. G_r er antennevinning i mottakerantennen, T er systemstøytemperaturen i mottakeren, k er Boltzmanns konstant lik $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K, R er dataraten, L_{atm} er tap som skyldes dempning pga atmosfæriske forhold, L_{pre} er dempning som skyldes nedbør og L representerer andre tap som for eksempel implementasjonstap og tap i mateledninger.

For en vanlig regenererende satellitt som er påvirket av intermodulasjonsprodukter Im , interferens I og som kun forsterker mottatt signal og retransmitterer på nedlinkfrekvensen vil totalt digitalt signal-støyforhold $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{tot}$ være gitt av:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{opp}} + \frac{1}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{ned}} + \frac{1}{\frac{E_b}{Im}} + \frac{1}{\frac{E_b}{I}}} \quad (2-5)$$

Uttrykket i likning (2-5) forteller at det bidraget med dårligst signal-støyforhold vil være mest avgjørende for det totale resultatet. For eksempel vil det i tilfeller hvor en liten terminal kommuniserer med en stor jordstasjon ene og alene være terminalens egenskaper som er avgjørende for linkbudsjettet når man ser bort fra bidrag av intermodulasjon og interferens.

2.1.1.2 Støytemperatur

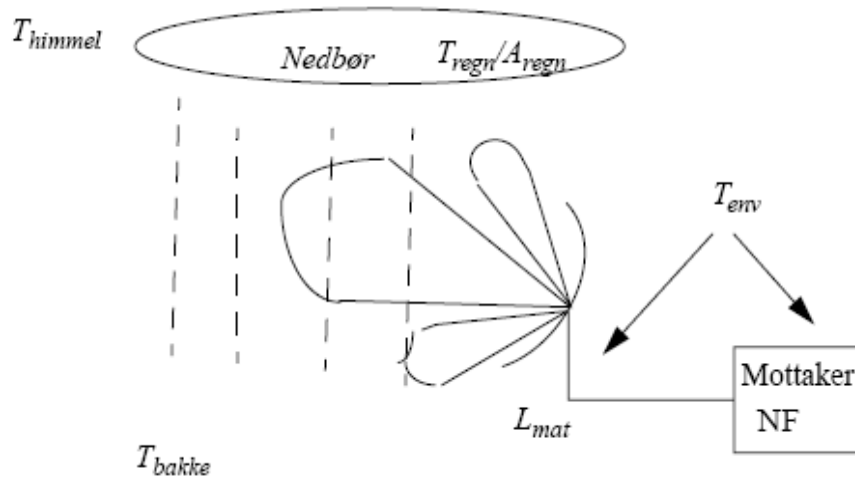
Antennens støytemperatur T_A er gitt av

$$T_A = \frac{T_{himmel}}{A_{regn}} + T_{regn} \left(1 - \frac{1}{A_{regn}}\right) + T_{bakke} \quad (2-6)$$

hvor $T_{himmel} = 20^0$ K, $T_{regn} = 270^0$ K og $T_{bakke} = 60^0$ K. Systemstøytemperaturen vil så være gitt av

$$T_S = \frac{T_A}{L_{mat}} + T_{mat} \left(1 - \frac{1}{L_{mat}}\right) + \left(10^{\frac{NF}{10}} - 1\right) T_{env} \quad (2-7)$$

hvor $L_{mat} = 1$ dB, T_{mat} og $T_{env} = 290^0$ K og $NF = 2$ dB.



Figur 2.1 Faktorer som bidrar til systemstøytemperaturen til en mottaker.

2.1.2 Regndempning

Regndempning oppstår fordi regndråpene fører til absorpsjon og avbøyning av radiobølgene. Hvor stor dempningen er, vil blant annet være avhengig av hvor langt signalet går gjennom nedbør, fordelingen på dråpeformen og regnintensiteten. ITU utgir rekommandasjon for hvordan nedbørsdempning beregnes. Metoden brukt her for å estimere gjennomsnittlig regndempningen for prosentvis tid gjennom et år er i henhold til siste ITU- rekommandasjon hentet fra (3) og gjengitt i appendiks A.2.

Man må ta hensyn til store variasjoner fra år til år dersom man skal sammenligne målinger med estimatene.

2.2 Forutsetninger for linkbudsjetten

Dette avsnittet tar for seg forutsetninger for linkbudsjettberegningene i kapittel 3.

2.2.1 Satellitt

Linkberegningene er gjort for satellitter i militært X-bånd med 8 GHz opplink frekvens og 7 GHz på nedlinken, Ku-bånd satellitt med 14 GHz på opplink og 11 GHz på nedlink, Ka-satellitt med 30 GHz på opplink og 20 GHz på nedlink og for militær EHF med 44 GHz på opplink og 20 GHz på nedlink.

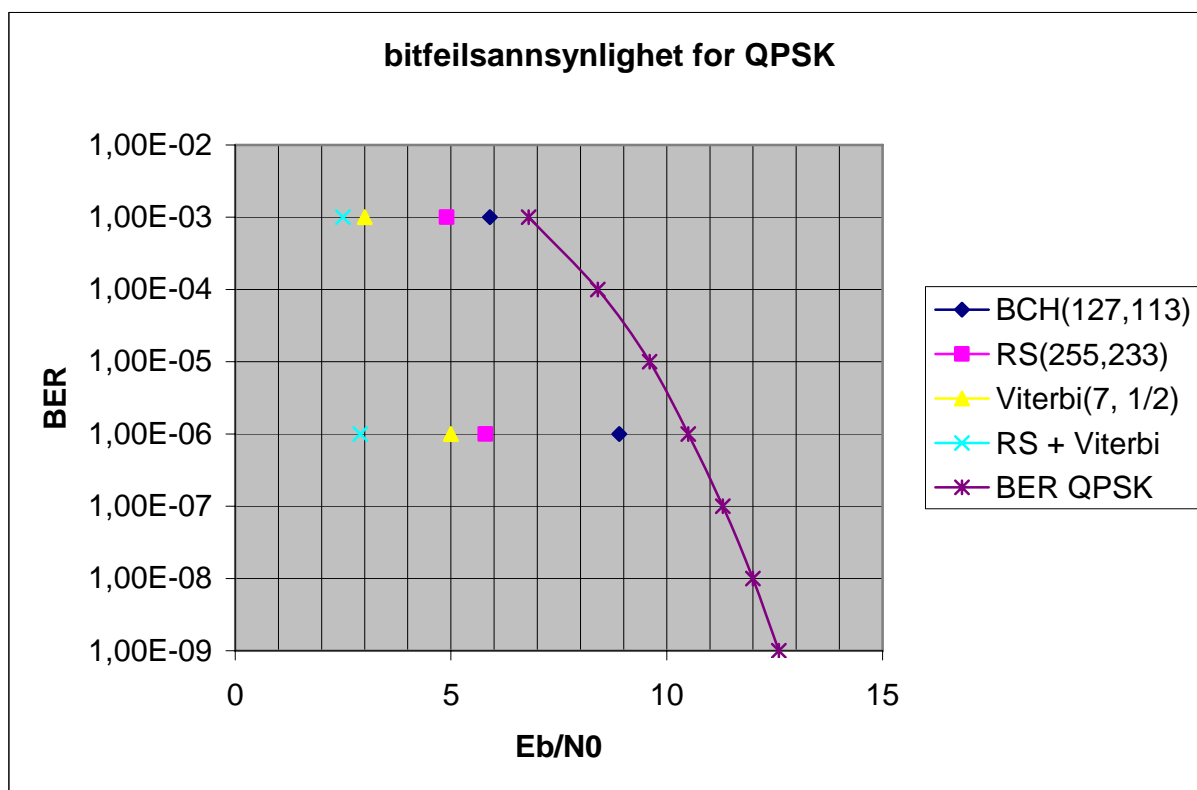
2.2.1.1 Effekt per bærebølge

I beregningene er effekten for hver bærebølge P_{CA} som går over satellitten gitt ved følgende uttrykk:

$$P_{CA} = \frac{P_{Tot} BW_{CH}}{BW} \quad (2-8)$$

hvor P_{Tot} er total effekt, BW_{CH} er båndbredden for hver kanal og BW er total båndbredde i transponderen. Det antas at BW er 72 MHz på alle satellittene og at P_{Tot} er 100W for hver transponder. Det antas QPSK modulasjon som teoretisk har 2 bit/s/Hz utnyttelse av kanalen. I praksis vil det være noe mindre på grunn av filtrering og her antas det 1,5 bit/s/Hz slik at for et signal på 1,5 Mbit/s så er BW_{CH} 1 MHz. I praksis vil man ofte filtrere noe smalere for å utnytte båndbredden i transponderen bedre. Dette kan gjøres fordi det er lite energi rundt nullpunktene i spekteret.

Forholdet mellom bitfeilsannsynligheten (BER) og E_b/N_0 er gitt i Figur 2.2 for ren QPSK og for noen vanlige feilrettende koder (FEC) (se (1) og (2) for detaljer). For eksempel viser figuren at man vil spare omtrent 5,5 dB ved å bruke en 1/2-rate foldingskode med Viterbi dekoding kontra et ukodet QPSK signal for en BER lik 10^{-6} . Da vil man benytte to bit transmisjonskapasitet for hvert informasjonsbit slik at i dette tilfellet vil båndbredeutnyttelsen være 0,75 informasjonsbit/s/Hz.



Figur 2.2 Bitfeilsannsynlighet som funksjon av E_b/N_0 for QPSK modulasjon og noen feilrettende koder.

For en transponder på 72 MHz vil man kunne overføre 108 Mbit/s uten koding og 54 Mbit/s med koding ut fra forutsetningene gitt over. Det maksimale antall kanaler en 72 MHz transponder kan overføre for forskjellige datarater med 1/2-rate foldingskode med Viterbi dekoding og QPSK modulasjon er gitt i Tabell 2.1.

Datarate	128 kbit/s	256 kbit/s	512 kbit/s	1 Mbit/s	2 Mbit/s	4 Mbit/s	8 Mbit/s
Maks ch	421	210	105	54	27	13	6

Tabell 2.1 Maksimalt antall kanaler i en 72 MHz transponder for forskjellige datarater med 1/2-rate foldingskode med Viterbi dekoding og QPSK modulasjon (0,75 bit/s/Hz).

2.2.1.2 Antennevinning

Ut fra likning (2-1) og (2-2) vil antennevinningen for en global dekkende antenne med 3dB lobebredde på $17,5^\circ$ være

$$G = \eta \left(\frac{\pi 70}{\theta_{3dB}} \right)^2 = 0,6 \left(\frac{\pi 70}{17,5} \right)^2 = 94,7 = 19,8dB \quad (2-9)$$

For en spot-beam på 3° vil antennevinningen være

$$G = \eta \left(\frac{\pi 70}{\theta_{3dB}} \right)^2 = 0,6 \left(\frac{\pi 70}{3} \right)^2 = 3224 = 35dB \quad (2-10)$$

Merk at satellittantennen er spesifisert ut fra dekningsområdet og at størrelsen derfor vil endres avhengig av frekvens. Av denne grunn vil ikke økning av frekvens gi en gevinst i linkbudsjettet fordi økt vinning i mottakerantennen (for samme diameter) vil oppheves av tilsvarende reduksjon i frittromstapet.

2.2.1.3 Støytemperatur

Satellittens støytemperatur er antatt å være (fra likning (2-7)):

$$T_{S,sat} = \frac{290}{10^{10}} + 290 \left(1 - \frac{1}{10^{10}} \right) + 290 = 580K \quad (2-11)$$

2.2.1.4 Output back off og interferens

Når flere bærebølger går over samme transponder samtidig, vil det oppstå intermodulasjonsprodukter på grunn av forsterkerens ulineære karakteristikk når den er nær metning. For å ta hensyn til dette vil en reduksjon i signalnivået (back off) være nødvendig. I beregningene her er det antatt reduksjon på utgangen (output back off - obo) på 2 dB.

Det antas interferens (C/I) på både opp- og nedlink lik 15 dB.

2.2.2 Bakketerminaler

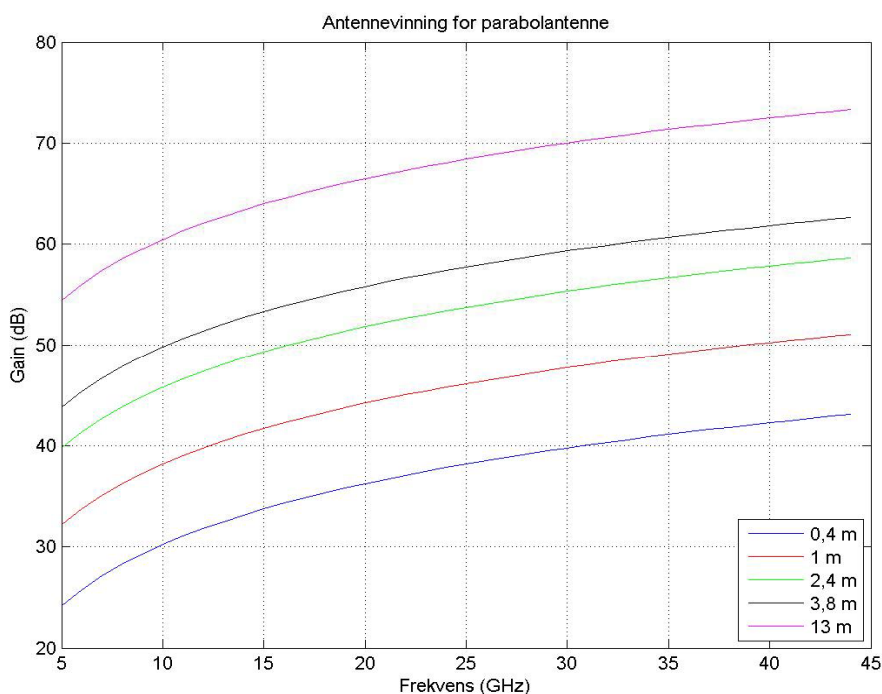
Det antas at jordstasjonene (ankerstasjoner) har antennediameter på 13 m og at utgangseffekten er 500 W. Tabell 2.2 viser noen verdier for C/N_0 og E_b/N_0 som funksjon av regndempning (gitt i prosent av tiden - se appendiks A.3) på opplinken som gir tilstrekkelig margin.

	X-bånd	Ku-bånd	Ka-bånd	EHF-bånd
Prosent av tiden	0,01 %	0,01 %	0,1 %	1 %
C/N_0 opplink	101,1 dBHz	95,5 dBHz	92,6 dBHz	97 dBHz
E_b/N_0 opplink	23,8 dB	18,1 dB	15,3 dB	19,7 dB

Tabell 2.2 Nødvendig utgangseffekt for jordstasjon for å fylle en hel transponder i global beam.

Full transponderutnyttelse for høyere prosentandeler i Ka og EHF vil betinge enorme utgangseffekter fordi dempingen vil bli så høy. Alternativet er å akseptere redusert kapasitet i disse periodene med høy nedbørsintensitet.

For små, deployerbare terminaler er antennediameteren 0,4 m, 1 m, 2,4 m og 3,8 m og utgangseffekten vil være henholdsvis 10 W, 20 W, 50 W og 100 W for de respektive antennediameterne. Vinningen er vist i Figur 2.3.



Figur 2.3 Antennevinningen for 0,4, 1, 2,4, 3,8 og 13 meter parabolantenne.

2.2.2.1 Støytemperatur

Ut fra likning (2-6) og (2-7) bestemmes bakketerminalens støytemperatur T_S :

$$T_S = \frac{\frac{20}{A_{regn}} + 275(1 - \frac{1}{A_{regn}}) + 60}{10^{\frac{1}{10}}} + 290(1 - \frac{1}{10^{\frac{1}{10}}}) + (10^{\frac{2}{10}} - 1)290 \quad (2-12)$$

Tabeller med dempingen for forskjellige prosentverdier av tiden for forskjellige steder er vist i appendiks A.3 når satellitten er på 10^0 øst.

Tabell 2.3 viser G_r/T fra likning (2-3) for terminalene for tilfellene uten regn og med regnintensitet tilsvarende 0,01 % av tiden i tropiske forhold. Differansen mellom radene vil gi økningen av antennevinningen $\Delta G_{a,b}$ mellom antenne med diameter D_a og diameter D_b som vil være uavhengig av frekvensen gitt av følgende likning:

$$\Delta G_{a,b} = 10 \log \eta \left(\frac{\pi D_a}{\lambda} \right)^2 - 10 \log \eta \left(\frac{\pi D_b}{\lambda} \right)^2 = 10 \log \left(\left(\frac{D_a}{D_b} \right)^2 \right) = \quad (2-13)$$

Støyfaktoren NF antas å være 2 dB i alle tilfellene. Verdiene i tabellen er basert på antennens støytemperatur gitt i likning (2-12). Dataratene vil variere mellom 128 kbit/s og 8 Mbit/s hvor 8 Mbit/s er det maksimale man ser for seg i Forsvarets Taktiske Kommunikasjonsnode. Det antas også et implementasjonstap på 2 dB.

Frekvensbånd	X-bånd		Ku-bånd		Ka- og EHFbånd	
	Uten regn	3,4 dB	Uten regn	11,5 dB	Uten regn	40,4 dB
$G/T_{0,4 m}$ (dBK ⁻¹)	2,5	1,1	6,4	4,2	11,6	9,3
$G/T_{1 m}$ (dBK ⁻¹)	10,4	9,0	14,3	12,2	19,5	17,3
$G/T_{2,4 m}$ (dBK ⁻¹)	18,0	16,6	21,9	19,8	27,1	24,9
$G/T_{3,8 m}$ (dBK ⁻¹)	22,0	20,6	25,9	23,8	31,1	28,8
$G/T_{13 m}$ (dBK ⁻¹)	32,7	31,3	36,6	34,5	41,8	39,5

Tabell 2.3 G/T for de forskjellige bakketerminalene.

2.2.3 Klimatiske forhold

Det er i linkberegningene antatt følgende klimasoner:

- Tørt innlandsklima
 - Lav høyde over havet (200m) med elevasjonsvinkel 20,8°.
 - Høyt over havet (1800m) med elevasjonsvinkel 16,6°.
- Kystklima med elevasjonsvinkel 21,2°.
- Tropisk klima med elevasjonsvinkel 78,7°.

Detaljer om nedbørsdempning og atmosfæredempning i disse sonene er gitt i appendiks A.3.

2.2.4 Transponderutnyttelse

Det er i diskusjonen tatt utgangspunkt i BER lik 10^{-6} . Det antas at man benytter 1/2-rate foldingskode med Viterbi dekoding fra Figur 2.2 slik at kravet til E_b/N_0 er 5 dB. Da vil man benytte to bit transmisjonskapasitet for hvert informasjonsbit slik at i dette tilfellet vil båndbreddeutnyttelsen være 0,75 informasjonsbit/s/Hz. Antall kanaler ch en effektbegrenset transponder kan støtte er gitt av følgende likning:

$$ch = \left[\frac{72 \text{ MHz}}{\frac{\frac{E_b(BER=10^{-6})}{N_0} - \frac{E_b(\text{beregnet})}{N_0}}{10}} \right] \quad (2-14)$$

Dermed vil verdien for E_b/N_0 for et gitt antall kanaler ch når transponderen er effektbegrenset være gitt av

$$\frac{E_b}{N_0}(\text{beregnet}) = \frac{E_b}{N_0}(BER = 10^{-6}) - 10 \cdot \log \frac{ch \cdot \text{Rate}}{72 \text{ MHz} \cdot 0,75} \quad (2-15)$$

Ligning (2-15) er beregnet i Tabell 2.4 og gir altså den minste verdien linkbudsjettberegningen fra likning (2-3) kan gi for at en 72 MHz transponder skal kunne støtte minst en kanal for forskjellige datarater.

Datarate	128 kbit/s	256 kbit/s	512 kbit/s	1 Mbit/s	2 Mbit/s	4 Mbit/s	8 Mbit/s
ch	1	1	1	1	1	1	1
E_b/N_0	-21,3 dB	-18,2 dB	-15,2 dB	-12,2 dB	-9,2 dB	-6,2 dB	-3,2 dB

Tabell 2.4 Grenseverdier for beregnet E_b/N_0 for at en 72 MHz transponder skal kunne støtte 1 kanal.

Maksimal kapasitet R_{max} i en effektbegrenset transponder vil være gitt av

$$R_{max} = R \cdot ch = \text{floor} \left(\frac{R \cdot 72 \text{ MHz}}{\frac{\frac{E_b(BER=10^{-6})}{N_0} - \frac{E_b(\text{beregnet})}{N_0}}{10}} \right) \quad (2-16)$$

$$\frac{\text{Rate} \cdot 10}{0,75 \text{ bit} / \text{s} / \text{Hz}}$$

3 LINKBUDSJETT

Dette kapittelet inneholder linkbudsjettberegninger for kommunikasjon mellom jordstasjon og de forskjellige terminalene og direkte mellom terminalene.

3.1 X-bånd

Dette avsnittet gir linkberegninger mellom de forskjellige terminalene når X-båndet benyttes med 8 GHz på opplink og 7 GHz på nedlink.

3.1.1 Fra jordstasjon til terminal med 0,4 m antenne

Resultatene i Tabell 3.1 viser at systemet er effektbegrenset. Det vil si at satellitten ikke har nok

effekt til å støtte en liten antenne og samtidig kunne ha full frekvensutnyttelse av transponderen. Det vil la seg gjøre å øke effekten per bærebølge (C/N_0) slik at E_b/N_0 blir tilstrekkelig men dette vil gå på bekostning av båndbreddeutnyttelsen i transponderen. For å nå E_b/N_0 lik 5 dB for BER lik 10^{-6} med 1/2-rate foldingskode med Viterbi dekodning vil båndbreddeutnyttelsen synke. Tabellen viser hvor stor transponderkapasitet som kan oppnås mot terminalen med 0,4 m antenne for forskjellige nedbørsintensiteter og forskjellige lokasjoner. Videre viser tabellen at det ikke er så stor variasjon i signalsvekkningen på grunn av nedbørsintensitet i X-bånd. Total kapasitet i transponderen varierer mellom 2,9 Mbit/s og 7,9 Mbit/s avhengig av lokasjon og krav til prosentvis dekning gjennom et år.

Klima	% uten forb.	C/N_{0opp} (dBHz)	C/N_{0ned} (dBHz)	C/N_{0Tot} (dBHz)	E_b/N_0 v/54 Mbit/s (dB)	Kapasitet (Mbit/s)
Lavt innland til lavt innland	1	102,7	75,6	73,5	-3,9	6,9
	0,1	102,3	75,3	73,2	-4,2	6,4
	0,01	101,1	74,2	72,1	-5,2	5,1
Lavt innland til kystklima	1	102,7	75,6	73,4	-3,9	6,9
	0,1	102,3	75	72,8	-4,5	6,0
	0,01	101,1	73,2	71,1	-6,2	4,0
Lavt innland til høyt innland	1	102,7	75,5	73,4	-4	6,8
	0,1	102,3	75,1	73	-4,4	6,2
	0,01	101,1	74,3	72,2	-5,1	5,2
Lavt innland til tropisk	1	102,7	76,2	74	-3,3	7,9
	0,1	102,3	74,4	72,3	-5	5,4
	0,01	101,1	71,8	69,7	-7,6	2,9

Tabell 3.1 Linkbudsjett fra 13m jordstasjon i global beam i lavlandet i innlandet til 0,4 m antenne i spot beam i X-bånd.

3.1.2 Fra terminal med 0,4 m antenne til jordstasjon

Tabell 3.2 viser tilfellet når en terminal med 0,4 meter antenne befinner seg i lavereliggende innlandsklima eller i tropisk klima og sender data til jordstasjonen. Beregningene viser at maksimal rate en terminal kan sende med er 512 kbit/s, da innenfor 99,9 % av tiden gjennom et år med 1/2-rate foldingskode med Viterbi dekodning. Videre vil man kunne støtte 256 kbit/s innenfor 99,99 % av tiden fra alle soner.

Klimasone	Rate (kbit/s)	% uten forb.	C/N_{0opp} (dBHz)	C/N_{0ned} (dBHz)	C/N_{0Tot} (dBHz)	E_b/N_0 (dB)

Lavt innland til lavt innland	512	0,1	65,3	71,1	62,8	5,7
	256	0,01	64,1	71	61,3	7,2
Tropisk til lavt innland	512	0,1	64,4	75,1	62	4,9
	256	0,01	61,4	71	59	4,9

Tabell 3.2 Linkbudsjett fra 0,4 m antenne i spot beam til 13m jordstasjon i global beam i X-bånd.

3.1.3 Kommunikasjon mellom to terminaler med 0,4 m antenne

Ved å studere verdiene for C/N_0 i Tabell 3.1 og Tabell 3.2 ser man at direkte kommunikasjon mellom to terminaler ikke kan støttes uten å bruke store ressurser i satellitten. I beste fall kan man oppnå 512 kbit/s når begge terminalene er i spot beam.

3.1.4 Fra jordstasjon til terminal med 1 m antenne

Tabell 3.3 viser at som forventet er utnyttelsen av transponderen økt fra tilfellet med 0,4 m antenne i forrige avsnitt. Den ligger nå på mellom 77,6 % (41,9 Mbit/s) og 32,2 % (17,4 Mbit/s) avhengig av lokasjon og nedbørsintensitet.

Klima	% uten forb.	C/N_{0opp} (dBHz)	C/N_{0ned} (dBHz)	C/N_{0Tot} (dBHz)	E_b/N_0 v/54 Mbit/s (dB)	Kapasitet (Mbit/s)
Lavt innland til lavt innland	1	102,7	83,6	80,7	3,4	37,3
	0,1	102,3	83,2	80,5	3,1	34,8
	0,01	101,1	82,2	79,5	2,2	28,3
Lavt innland til kystklima	1	102,7	83,5	80,7	3,4	37,3
	0,1	102,3	82,9	80,2	2,9	33,2
	0,01	101,1	81,1	78,6	1,3	23,0
Lavt innland til høyt innland	1	102,7	83,5	80,6	3,3	36,5
	0,1	102,3	83,1	80,3	3,0	34,0
	0,01	101,1	82,3	79,6	2,3	29
Lavt innland til tropisk	1	102,7	84,2	81,2	3,9	41,9
	0,1	102,3	82,4	79,7	2,4	29,6
	0,01	101,1	79,8	77,4	0,1	17,4

Tabell 3.3 Linkbudsjett fra jordstasjon med 13 m antenne i global beam og til terminal med 1 m antenne i spot beam i X-bånd.

3.1.5 Fra terminal med 1 m antenne til jordstasjon

Tabell 3.4 viser at det er mulig å sende data med en rate på mellom 4 og 2 Mbit/s fra en terminal med 1 m antenne innenfor 99,99 % av tiden i X-bånd fra alle soner.

Klimasone	Rate (Mbit/s)	% uten forb.	$C/N_{0\text{opp}}$ (dBHz)	$C/N_{0\text{ned}}$ (dBHz)	$C/N_{0\text{Tot}}$ (dBHz)	E_b/N_0 (dB)
Lavt innland til lavt innland	4	0,01	75,1	82,9	72,3	6,3
Kystklima til lavt innland	4	0,01	74,2	83	71,6	5,5
Høyt innland til lavt innland	4	0,01	75,2	83	72,4	6,4
Tropisk til lavt innland	2	0,01	72,4	80	69,6	6,6

Tabell 3.4 Linkbudsjett fra terminal med 1 m antenne i spot beam til jordstasjon med 13 m i global beam i X-bånd.

3.1.6 Kommunikasjon mellom to terminaler med 1 m antenne

Ved å studere verdiene for C/N_0 i Tabell 3.3 og Tabell 3.4 ser man at direkte kommunikasjon mellom to terminaler ikke kan støttes uten å bruke ekstra ressurser i satellitten. Beste tilfellet vil være 4 Mbit/s med begge terminalene i spot beam. Det vil være redusert transponderutnyttelse.

3.1.7 Fra jordstasjon til terminal med 2,4 m antenne

Resultatene i Tabell 3.5 viser at det nå med antennestørrelse på 2,4 m er nok antennevinning til at det er blitt 100 % transponderutnyttelse.

Klima	% uten forb.	$C/N_{0\text{opp}}$ (dBHz)	$C/N_{0\text{ned}}$ (dBHz)	$C/N_{0\text{Tot}}$ (dBHz)	E_b/N_0 v/54 Mbit/s (dB)	Kapasitet (Mbit/s)
Lavt innland til lavt innland	1	102,7	91,2	85,7	8,4	54
	0,1	102,3	90,8	85,5	8,2	54
	0,01	101,1	89,8	85	7,6	54
Lavt innland til kystklima	1	102,7	91,1	85,7	8,4	54
	0,1	102,3	90,5	85,4	8,1	54
	0,01	101,1	88,7	84,4	7,1	54
Lavt innland til høyt innland	1	102,7	91	85,6	8,3	54
	0,1	102,3	90,7	85,4	8,1	54

	0,01	101,1	89,9	85	7,7	54
Lavt innland til tropisk	1	102,7	91,8	86	8,7	54
	0,1	102,3	90	85,1	7,8	54
	0,01	101,1	87,4	83,5	6,2	54

Tabell 3.5 Linkbudsjett fra jordstasjon med 13 m antenne i global beam og til terminal med 2,4 m antenne i spot beam i X-bånd.

3.1.8 Fra terminal med 2,4 m antenne til jordstasjon

Tabell 3.6 viser at det er mulig å sende data med en rate på 32 Mbit/s fra en terminal med en 2,4 m antenne innenfor 99,99 % av tiden i X-bånd fra alle soner.

Klimasone	Rate (Mbit/s)	% uten forb.	C/N _{0opp} (dBHz)	C/N _{0ned} (dBHz)	C/N _{0Tot} (dBHz)	E _b /N ₀ (dB)
Lavt innland til lavt innland	32	0,01	86,6	92	82,4	7,3
Kystklima til lavt innland	32	0,01	85,8	92	81,8	6,8
Høyt innland til lavt innland	32	0,01	86,7	92	82,4	7,4
Tropisk til lavt innland	32	0,01	84	92	80,1	5,5

Tabell 3.6 Linkbudsjett fra terminal med 2,4 m antenne i spot beam til jordstasjon med 13 m i global beam i X-bånd.

3.1.9 Kommunikasjon mellom to terminaler med 2,4 m antenne

Beregningene som ligger til grunn for resultatene i Tabell 3.5 og Tabell 3.6 indikerer at det er støtte for 8 Mbit/s kanalkapasitet med god margin under alle forhold.

3.1.10 Fra jordstasjon til terminal med 3,8 m antenne

Tabell 3.7 viser at det er 100 % transponderutnyttelse i X-bånd når en stor jordstasjon sender data til en terminal med 3,8 m antenne.

Klima	% uten forb.	C/N _{0opp} (dBHz)	C/N _{0ned} (dBHz)	C/N _{0Tot} (dBHz)	E _b /N ₀ v/54 Mbit/s (dB)	Kapasitet (Mbit/s)
Lavt innland til lavt innland	1	102,7	95,2	87,1	9,8	54
	0,1	102,3	94,8	87	9,7	54

	0,01	101,1	93,8	86,6	9,3	54
Lavt innland til kystklima	1	102,7	95,1	87,1	9,7	54
	0,1	102,3	94,5	86,9	9,6	54
	0,01	101,1	92,7	86,3	8,9	54
Lavt innland til høyt innland	1	102,7	95,1	87,1	9,7	54
	0,1	102,3	94,6	86,9	9,6	54
	0,01	101,1	93,9	86,6	9,3	54
Lavt innland til tropisk	1	102,7	95,8	87,2	9,8	54
	0,1	102,3	94	86,7	9,4	54
	0,01	101,1	91,3	85,7	8,4	54

Tabell 3.7 Linkbudsjett fra jordstasjon med 13 m antenne i global beam og til terminal med 3,8 m antenne i spot beam i X-bånd.

3.1.11 Fra terminal med 3,8 m antenne til jordstasjon

Tabell 3.8 viser at det fra en terminal med en 3,8 m antenne er mulig å sende minimum 8 Mbit/s fra alle soner.

Klimasone	Rate (Mbit/s)	% uten forb.	C/N ₀ opp (dBHz)	C/N ₀ ned (dBHz)	C/N ₀ Tot (dBHz)	E _b /N ₀ (dB)
Lavt innland til lavt innland	8	0,01	93,7	86	82,2	13,1
Kystklima til lavt innland	8	0,01	92,8	86	82	13
Høyt innland til lavt innland	8	0,01	93,7	86	82,1	13,1
Tropisk til lavt innland	8	0,01	91	86	81,8	12,7

Tabell 3.8 Linkbudsjett fra terminal med 3,8 m antenne i spot beam til jordstasjon med 13 m i global beam i X-bånd.

3.1.12 Kommunikasjon mellom to terminaler med 3,8 m antenne

Beregningene som ligger til grunn for resultatene i Tabell 3.7 og Tabell 3.8 indikerer at det er støtte for 8 Mbit/s kanalkapasitet med god margin under alle forhold.

3.1.12.1 Oppsummering

Linkberegningen for X-båndet indikerer at kommunikasjonen vil være lite påvirket av

nedbørsdempning slik at det ikke er nødvendig med veldig stor margin utover klarvær for å opprettholde stabile forhold selv i de verste klimasonene.

Fra og med antennestørrelse på 2,4 meter vil man ha god utnyttelse av transponderen og samtidig kunne tilby 8 Mbit/s ved behov.

3.2 Ku-bånd

Dette avsnittet gir linkberegninger mellom de forskjellige terminalene når Ku-båndet benyttes med 14 GHz på opplink og 11 GHz på nedlink.

3.2.1 Fra jordstasjon til terminal med 0,4 m antenne

I Tabell 3.9 forsterkes effektbegrensningen fra X-bånd, spesielt når nedbørsintensiteten øker. Maksimal kapasitet er 6,2 Mbit/s innenfor 99 % av tiden. Spesielt i tropisk klima begynner signalevekkingen å gjøre seg gjeldende. I siste rad er det kun kapasitet til å overføre 382 kbit/s informasjon med forbindelse i 99,99 % av tiden.

Klima	% uten forb.	C/N ₀ opp (dBHz)	C/N ₀ ned (dBHz)	C/N ₀ Tot (dBHz)	E _b /N ₀ v/54 Mbit/s (dB)	Kapasitet (Mbit/s)
Lavt innland til lavt innland	1	101,6	75,1	73	-4,4	6,2
	0,1	100	73,6	71,5	-5,8	4,4
	0,01	95,5	70,1	68,1	-9,3	2,0
Lavt innland til kystklima	1	101,6	74,9	72,8	-4,5	6,0
	0,1	100	72,9	70,8	-6,5	3,8
	0,01	95,5	68,2	66,1	-11,2	1,2
Lavt innland til høyt innland	1	101,6	75	72,8	-4,5	6,0
	0,1	100	72,9	70,8	-6,5	3,8
	0,01	95,5	70,3	68,3	-9,1	2,1
Lavt innland til tropisk	1	101,6	75	72,9	-4,4	6,2
	0,1	100	69,4	67,3	-10	1,7
	0,01	95,5	62,9	60,8	-16,5	0,382

Tabell 3.9 Linkbudsjett fra jordstasjon i global beam til 0,4 m antenne i spot beam i Ku-bånd.

3.2.2 Fra terminal med 0,4 m antenne til jordstasjon

Tabell 3.10 viser tilfellet når den lille terminalen befinner seg i lavereliggende innlandsklima eller i tropisk klima og sender data til jordstasjonen. Terminalen kan støtte inntil 512 kbit/s innenfor 99 % av tiden gjennom et år i begge tilfellene og 256 kbit/s fra lavereliggende innlandsstrøk i 99,9 % av tiden. Stor dempning på grunn av regnintensiteten gjør at

kommunikasjon i 99,99 % av tiden med mer enn 128 kbit/s ikke er mulig.

Klimasone	Rate (kbit/s)	% uten forb.	C/N ₀ opp (dBHz)	C/N ₀ ned (dBHz)	C/N ₀ Tot (dBHz)	E _b /N ₀ (dB)
Lavt innland til lavt innland	512	1	64,6	74,9	62,2	5,1
	256	0,1	62,9	70,4	60,2	6,1
Tropisk til lavt innland	512	1	64,6	74,9	62,2	5,1

Tabell 3.10 Linkbudsjett fra 0,4 m antenne i spot beam til 13m jordstasjon i global beam i Ku-bånd.

3.2.3 Kommunikasjon mellom to terminaler med 0,4 m antenne

Verdiene for C/N₀ i Tabell 3.9 og Tabell 3.10 viser at direkte kommunikasjon mellom to terminaler med 0,4 m antenne ikke kan støttes uten å bruke store ressurser i satellitten. I henhold til Tabell 3.11 kan man i beste fall oppnå 256 kbit/s og få

$$\left[10^{\frac{\frac{C}{N_{0 \text{ ned, maks}}}}{10} - \frac{C}{N_{0 \text{ ned, 1ch}}}} \right] = \left[10^{\frac{75,1 \text{ dB} - 63,9}{10}} \right] = 13 \quad (3-1)$$

kanaler a 256 kbit/s når begge terminalene er i spot beam.

Klimasone	Rate	%	C/N ₀ opp	C/N ₀ ned	C/N ₀ Tot	E _b /N ₀
Lavt innland til lavt innland	256 kbit/s	1	64,6 dBHz	63,9 dBHz	59,2 dBHz	5,1 dB

Tabell 3.11 Linkbudsjett mellom to terminaler i Ku-bånd med 0,4 m antenne, begge i spot beam.

3.2.4 Fra jordstasjon til terminal med 1 m antenne

Tabell 3.12 viser at utnyttelsen av transponderen er mellom 63 % (34 Mbit/s) og 4,3 % (2,3 Mbit/s) avhengig av lokasjon og nedbørsintensitet som altså er en reduksjon i forhold til X-bånd.

Klima	% uten forb.	C/N ₀ opp (dBHz)	C/N ₀ ned (dBHz)	C/N ₀ Tot (dBHz)	E _b /N ₀ v/54 Mbit/s (dB)	Kapasitet (Mbit/s)
Lavt innland til lavt innland	1	101,6	83	80,3	3,0	34
	0,1	100	83,2	80,5	3,1	25,2
	0,01	95,5	82,2	79,5	2,2	28,3
	1	101,6	82,8	80,2	2,8	32,5
	0,1	100	80,8	78,3	1,0	21,4

	0,01	95,5	78,1	75,8	-1,6	11,8
Lavt innland til høyt innland	1	101,6	82,9	80,2	2,9	33,2
	0,1	100	80,9	78,4	1,0	21,4
	0,01	95,5	78,2	75,9	-1,4	12,3
Lavt innland til tropisk	1	101,6	83	80,2	2,9	33,2
	0,1	100	77,3	75,1	-2,2	10,2
	0,01	95,5	70,8	68,7	-8,6	2,3

Tabell 3.12 Linkbudsjett fra jordstasjon med 13 m antenne i global beam og til terminal med 1 m antenne i spot beam i Ku-bånd.

3.2.5 Fra terminal med 1 m antenne til jordstasjon

Tabell 3.13 viser en generell reduksjon i mulig overføringsrate sammenlignet med tilfellet ovenfor i X-bånd. Dette skyldes økt demping i nedbør og atmosfæren på grunn av høyere frekvens.

Klimasone	Rate (Mbit/s)	% uten forb.	C/N ₀ opp (dBHz)	C/N ₀ ned (dBHz)	C/N ₀ Tot (dBHz)	E _b /N ₀ (dB)
Lavt innland til lavt innland	1	0,01	69,4	72,8	65,7	5,7
	4	0,1	73,9	82,4	71,2	5,2
Kystklima til lavt innland	0,512	0,01	66,8	69,9	63,1	6,0
	2	0,1	73	79,4	70,1	7,0
Høyt innland til lavt innland	1	0,01	69,4	72,8	65,8	5,8
	2	0,1	72,9	79,4	70	7,0
Tropisk til lavt innland	64	0,01	57,4	60,9	53,8	5,7
	1	0,1	67,5	76,3	65	5,0

Tabell 3.13 Linkbudsjett fra terminal med 1 m antenne i spot beam til jordstasjon med 13 m i global beam i Ku-bånd.

3.2.6 Kommunikasjon mellom to terminaler med 1 m antenne

Verdiene for C/N₀ i Tabell 3.12 og Tabell 3.13 tilsier at direkte kommunikasjon mellom to terminaler ikke kan støttes uten å bruke ekstra ressurser i satellitten. I henhold til Tabell 3.14 kan man i beste fall oppnå 4 Mbit/s og få

$$\left[\frac{\frac{C}{N_{0, ned, maks}}}{\frac{C}{N_{0, ned, 1ch}}} \right] = \left[10^{\frac{83dB-77,8}{10}} \right] = 3 \quad (3-2)$$

kanaler a 256 kbit/s når begge terminalene er i spot beam.

Klimasone	Rate	%	C/N ₀ opp	C/N ₀ ned	C/N ₀ Tot	E _b /N ₀
Lavt innland til lavt innland	4 Mbit/s	1	75,5 dBHz	77,8 dBHz	71,4 dBHz	5,4 dB

Tabell 3.14 Linkbudsjett mellom to terminaler i Ku-bånd med 1 m antenne, begge i spot beam.

3.2.7 Fra jordstasjon til terminal med 2,4 m antenne

Tabell 3.15 viser at det vil være 100 % transponderutnyttelse i 99 % av tiden i Ku-bånd når antennestørrelsen er 2,4 m. Den økte nedbørsdempningen som skyldes økt frekvens vil medføre redusert transponderutnyttelse i den siste prosenten av tiden gjennom et år.

Klima	% uten forb.	C/N ₀ opp (dBHz)	C/N ₀ ned (dBHz)	C/N ₀ Tot (dBHz)	E _b /N ₀ v/54 Mbit/s (dB)	Kapasitet (Mbit/s)
Lavt innland til lavt innland	1	101,6	90,6	85,4	8,1	54
	0,1	100	89,2	84,6	7,3	54
	0,01	95,5	85,7	82,1	4,5	51,5
Lavt innland til kystklima	1	101,6	90,5	85,3	8	54
	0,1	100	88,4	84,2	6,8	54
	0,01	95,5	83,7	80,7	3,3	36,5
Lavt innland til høyt innland	1	101,6	90,5	85,4	8	54
	0,1	100	88,5	84,2	6,9	54
	0,01	95,5	85,9	82,2	4,9	52,7
Lavt innland til tropisk	1	101,6	90,6	85,4	8,1	54
	0,1	100	84,9	81,8	4,5	48,1
	0,01	95,5	78,4	76,1	-1,2	12,9

Tabell 3.15 Linkbudsjett fra jordstasjon med 13 m antenne i global beam og til terminal med 2,4 m antenne i spot beam i Ku-bånd.

3.2.8 Fra terminal med 2,4 m antenne til jordstasjon

Tabell 3.16 viser at det er mulig å sende data med en rate på minimum 8 Mbit/s fra en terminal med en 2,4 m antenne innenfor 99,99 % av tiden i Ku-bånd fra alle sonene bortsett fra tropiske områder på grunn av stor nedbørsdempning. Innenfor 99,9 % av tiden vil dette også være mulig fra tropiske soner.

Klimasone	Rate (Mbit/s)	% uten forb.	C/N ₀ opp (dBHz)	C/N ₀ ned (dBHz)	C/N ₀ Tot (dBHz)	E _b /N ₀ (dB)
Lavt innland til lavt innland	16	0,01	80,1	84,9	77,2	5,1

Kystklima til lavt innland	8	0,01	78,4	81,9	74,6	5,6
Høyt innland til lavt innland	16	0,01	81	84,9	77,2	5,1
Tropisk til lavt innland	1	0,01	69	72,9	65,5	5,5
	8	0,1	79,1	85,4	76	6,7

Tabell 3.16 Linkbudsjett fra terminal med 2,4 m antenne i spot beam til jordstasjon med 13 m i global beam i Ku-bånd.

3.2.9 Kommunikasjon mellom to terminaler med 2,4 m antenne

Tabell 3.15 og Tabell 3.16 indikerer at det skal være mulig med kommunikasjon med terminal med 2,4 m antenner i Ku-bånd med 8 Mbit/s i 99,99 % av tiden i alle sonene bortsett fra i tropisk. Der skal det gå innenfor 99,9 % av tiden. Mellom to slike terminaler vil ytelsen gå litt ned på grunn av at marginene i Tabell 3.15 og Tabell 3.16 er marginale. I henhold til Tabell 3.17 kan man oppnå 8 Mbit/s og få

$$\left[10^{\frac{\frac{C}{N_{0, ned, maks}} - \frac{C}{N_{0, ned, 1ch}}}{10}} \right] = \left[10^{\frac{85,7 \text{ dB} - 80,6}{10}} \right] = 3 \quad (3-3)$$

kanaler a 8 Mbit/s når begge terminalene er i spot beam.

Klimasone	Rate	%	C/N _{0opp}	C/N _{0ned}	C/N _{0Tot}	E _b /N ₀
Lavt innland til lavt innland	8 Mbit/s	0,01	81 dBHz	80,6 dBHz	75,6 dBHz	6,5 dB

Tabell 3.17 Linkbudsjett mellom to terminaler i Ku-bånd med 2,4 m antenne, begge i spot beam.

3.2.10 Fra jordstasjon til terminal med 3,8 m antenne

Tabell 3.18 viser at det er 100 % transponderutnyttelse i Ku-bånd når en stor jordstasjon sender data til en terminal med 3,8 m antenne bortsett fra i 0,01 % av tiden i tropiske soner hvor den er nesten halvert på grunn av nedbørsintensiteten.

Klima	% uten forb.	C/N _{0opp} (dBHz)	C/N _{0ned} (dBHz)	C/N _{0Tot} (dBHz)	E _b /N ₀ v/54 Mbit/s (dB)	Kapasitet (Mbit/s)
Lavt innland til lavt innland	1	101,6	94,6	86,9	9,6	54
	0,1	100	93,2	86,4	9	54
	0,01	95,5	89,7	84,5	7,2	54
	1	101,6	94,5	86,8	9,5	54
	0,1	100	92,4	86,1	8,8	54

	0,01	95,5	87,7	83,4	6,1	54
Lavt innland til høyt innland	1	101,6	94,5	86,9	9,5	54
	0,1	100	92,5	86,1	8,8	54
	0,01	95,5	89,9	84,6	7,3	54
Lavt innland til tropisk	1	101,6	94,6	86,8	9,6	54
	0,1	100	88,9	84,5	7,1	54
	0,01	95,5	82,4	79,6	2,3	29

Tabell 3.18 Linkbudsjett fra jordstasjon med 13 m antenne i global beam og til terminal med 3,8 m antenne i spot beam i Ku-bånd.

3.2.11 Fra terminal med 3,8 m antenne til jordstasjon

Tabell 3.19 viser at det fra en terminal med en 3,8 m antenne i Ku-bånd er mulig å sende minimum 8 Mbit/s fra alle soner bortsett fra tropisk sone hvor grensen er 4 Mbit/s.

Klimasone	Rate (Mbit/s)	% uten forb.	C/N ₀ opp (dBHz)	C/N ₀ ned (dBHz)	C/N ₀ Tot (dBHz)	E _b /N ₀ (dB)
Lavt innland til lavt innland	8	0,01	88	81,8	78,5	9,4
Kystklima til lavt innland	8	0,01	85,4	81,9	77,9	8,8
Høyt innland til lavt innland	8	0,01	88	81,8	78,5	9,4
Tropisk til lavt innland	4	0,01	76	78,8	72,1	6,1

Tabell 3.19 Linkbudsjett fra terminal med 3,8 m antenne i spot beam til jordstasjon med 13 m i global beam i Ku-bånd.

3.2.12 Kommunikasjon mellom to terminaler med 3,8 m antenne

Tabell 3.18 og Tabell 3.19 viser at det skal være mulig med kommunikasjon direkte mellom to terminaler med 3,8 m antenner i Ku-bånd med 8 Mbit/s i 99,99 % av tiden i alle sonene bortsett fra i tropisk hvor det vil være mulig med 4 Mbit/s. Mellom to slike terminaler vil ytelsen gå litt ned på grunn av at marginen på opplinken nå er blitt mindre. I henhold til Tabell 3.20 kan man oppnå 8 Mbit/s og få

$$\left[10^{\frac{\frac{C}{N_{0 \text{ ned, maks}}}}{10} - \frac{C}{N_{0 \text{ ned, 1ch}}}} \right] = \left[10^{\frac{89,7 \text{ dB} - 84,4}{10}} \right] = 3 \quad (3-4)$$

kanaler a 8 Mbit/s når begge terminalene er i spot beam.

Klimasone	Rate	%	C/N ₀ opp	C/N ₀ ned	C/N ₀ Tot	E _b /N ₀
Lavt innland til lavt innland	8 Mbit/s	0,01	88 dBHz	84,4 dBHz	80,1 dBHz	11,1 dB

Tabell 3.20 Linkbudsjett mellom to terminaler i Ku-bånd med 3,8 m antenne, begge i spot beam.

3.2.12.2 Oppsummering

Linkberegningen for Ku-båndet indikerer at kommunikasjonen vil være noe mer påvirket av nedbørsdempning enn for tilfellet med X-bånd slik at det i de fleste tilfeller ikke vil være nødvendig med veldig stor margin utover klarvær for å opprettholde stabile forhold bortsett fra i tropiske klimasoner.

Fra og med antennestørrelse på 2,4 meter vil man ha god utnyttelse av transponderen og samtidig kunne tilby 8 Mbit/s ved behov innenfor 99 % av tiden i alle sonene.

3.3 Ka-bånd

Dette avsnittet gir linkberegninger mellom de forskjellige terminalene når Ka-båndet benyttes med 30 GHz på opplink og 20 GHz på nedlink.

Dette avsnittet gir beregninger for Ka-båndet. Beregninger for nedbørsdempningen indikerer at denne vil ha betydelig innvirkning på linkkvaliteten ved nedbør. Spesielt tropiske strøk vil være utsatt. Også i kystklima vil det være så mye nedbør at dempingen til tider vil være problematisk.

3.3.1 Fra jordstasjon til terminal med 0,4 m antenne

Tabell 3.21 viser at det blir vanskelig å støtte kommunikasjon i dette frekvensbåndet mot så små terminaler når man krever kommunikasjon mer enn for 99 % av tiden. Problemet er spesielt stort i tropiske soner på grunn av regnintensitetens innvirkning på dempingen i dette frekvensområdet. Maksimal transponderkapasitet innenfor 99 % vil være 3,5 Mbit/s. Det gir en utnyttelse på 6,5 %.

Klima	% uten forb.	C/N ₀ opp (dBHz)	C/N ₀ ned (dBHz)	C/N ₀ Tot (dBHz)	E _b /N ₀ v/54 Mbit/s (dB)	Kapasitet (Mbit/s)
Lavt innland til lavt innland	1	99,3	72,6	70,5	-6,8	3,5
	0,1	92,6	68,3	66,3	-11,1	1,3
	0,01	77,0	59,3	57,2	-20,1	0,166
Lavt innland til kystklima	1	99,3	72,1	70,1	-7,3	3,1
	0,1	92,6	66,9	64,8	-12,5	0,096
	0,01	77,0	54,8	52,8	-24,6	0,059

Lavt innland til høyt innland	1	99,3	72,3	70,2	-7,1	3,3
	0,1	92,6	66	64	-13,3	0,80
	0,01	77,0	59,4	57,3	-20	0,17
Lavt innland til tropisk	1	99,3	70,2	68,2	-9,2	2,0
	0,1	92,6	52,2	50,2	-27,1	0,033
	0,01	77,0	33,4	31,4	-45,9	$438 \cdot 10^{-6}$

Tabell 3.21 Linkbudsjett mellom 13m jordstasjon i global beam og 0,4 m antenne i spot beam i Ka-bånd.

3.3.2 Fra terminal med 0,4 m antenne til jordstasjon

Tabell 3.22 viser tilfellet når en terminal med 0,4 meter antenne befinner seg i lavereliggende innlandsklima eller i tropisk klima og sender data til jordstasjonen i Ka-bånd. Beregningene viser at terminalen kan støtte en link på 256 Kbit/s innenfor 99 % av tiden fra lavereliggende innlandsklima og kun 64 kbit/s innenfor 99,9 %. For kystklima 128 kbit/s og for tropisk klima kan man oppnå 64 kbit/s innenfor 99 %.

Klimasone	Rate (kbit/s)	% uten forb.	C/N ₀ opp (dBHz)	C/N ₀ ned (dBHz)	C/N ₀ Tot (dBHz)	E _b /N ₀ (dB)
Lavt innland til lavt innland	256	1	62,3	69,4	59,5	5,4
	64	0,1	55,6	59,1	52	3,9
Kystklima til lavt innland	128	1	61,6	66,3	58,4	7,3
Tropisk til lavt innland	64	1	56,3	65,3	53,5	5,5

Tabell 3.22 Linkbudsjett fra 0,4 m antenne i spot beam til 13m jordstasjon i global beam i Ka-bånd.

3.3.3 Kommunikasjon mellom to terminaler med 0,4 m antenne

Når man tar i betraktning at den ”sterkeste” linken i Tabell 3.21 og Tabell 3.22 forsvinner, indikerer dette at det ikke vil være reell støtte for direkte kommunikasjon mellom to terminaler med 0,4 m antenner i Ka-bånd.

3.3.4 Fra jordstasjon til terminal med 1 m antenne

Tabell 3.23 viser at transponderutnyttelsen er begynner å bli veldig begrenset for nedbørsintensiteter som forekommer utover 99 % av gjennomsnittstiden gjennom et år. I dette frekvensbåndet oppleves store variasjoner i nedbørsdempningen på grunn av regnintensiteten.

Klima	% uten forb.	C/N _{0opp} (dBHz)	C/N _{0ned} (dBHz)	C/N _{0Tot} (dBHz)	E _b /N ₀ v/54 Mbit/s (dB)	Kapasitet (Mbit/s)
Lavt innland til lavt innland	1	99,3	80,5	78,1	0,7	20
	0,1	92,6	76,3	74	-3,3	7,9
	0,01	77,0	67,3	64,9	-12,5	0,960
Lavt innland til kystklima	1	99,3	80,1	77,7	0,4	18,7
	0,1	92,6	74,8	72,6	-4,7	5,7
	0,01	77,0	62,7	60,6	-16,8	0,356
Lavt innland til høyt innland	1	99,3	80,2	77,8	0,5	19,1
	0,1	92,6	74	71,8	-5,5	4,8
	0,01	77,0	67,3	64,9	-12,5	0,960
Lavt innland til tropisk	1	99,3	78,2	75,9	-1,4	12,3
	0,1	92,6	60,2	58,2	-19,2	0,205
	0,01	77,0	41,3	39,3	-38	0,003

Tabell 3.23 Linkbudsjett fra jordstasjon med 13 m antenne i global beam og til terminal med 1 m antenne i spot beam i Ka-bånd.

3.3.5 Fra terminal med 1 m antenne til jordstasjon

Tabell 3.24 viser at det maksimale man kan overføre fra en terminal med 1 m antenne i Ka-bånd er 2 Mbit/s innenfor 99 % av tiden bortsett fra tropiske forhold hvor grensen er 512 kbit/s.

Dersom man ønsker kommunikasjon innenfor 99,9 % av tiden blir maksimal datarate 512 kbit/s fra lavland innenlands og henholdsvis 256 og 128 kbit/s fra kystklima og høytliggende, tørt klima. Muligheten til forbindelse fra tropiske soner innenfor 99,9 % av tiden er svært begrenset. I noen tilfeller kan forbindelsen bli noe bedre dersom man øker ressursbruken i satellitten men det vil gå på bekostning av den totale kapasiteten.

Klimasone	Rate (Mbit/s)	% uten forb.	C/N _{0opp} (dBHz)	C/N _{0ned} (dBHz)	C/N _{0 Tot} (dBHz)	E _b /N ₀ (dB)
Lavt innland til lavt innland	2	1	73,3	78,3	70	7
	0,512	0,1	66,6	68,1	62,2	5,2
Kystklima til lavt innland	2	1	72,6	78,3	69,5	6,5
	0,256	0,1	64,2	65,1	59,6	5,5
Høyt innland til lavt innland	2	1	72,9	78,3	69,7	6,7
	0,128	0,1	62,6	62,1	57,3	6,2

Tropisk til lavt innland	0,512	1	67,3	72,4	64,1	7
--------------------------	-------	---	------	------	------	---

Tabell 3.24 Linkbudsjett fra terminal med 1 m antenne i spot beam til jordstasjon med 13 m i global beam i Ka-bånd.

3.3.6 Kommunikasjon mellom to terminaler med 1 m antenne

Verdiene for C/N_0 i Tabell 3.23 og Tabell 3.24 tilsier at direkte kommunikasjon mellom to terminaler ikke kan støttes uten å bruke ekstra ressurser i satellitten. I henhold til Tabell 3.14 kan man i beste fall oppnå 2 Mbit/s og få

$$\left[10^{\frac{\frac{C}{N_{0, ned, maks}}}{10} - \frac{\frac{C}{N_{0, ned, 1ch}}}{10}} \right] = \left[10^{\frac{80,5 dB - 75,2}{10}} \right] = 3 \quad (3-5)$$

kanaler a 2 Mbit/s når begge terminalene er i spot beam.

Klimasone	Rate	%	C/N_{0opp}	C/N_{0ned}	C/N_{0Tot}	E_b/N_0
Lavt innland til lavt innland	2 Mbit/s	1	73,3 dBHz	75,2 dBHz	69,1 dBHz	6,1 dB

Tabell 3.25 Linkbudsjett mellom to terminaler i ka-bånd med 1 m antenne, begge i spot beam.

3.3.7 Fra jordstasjon til terminal med 2,4 m antenne

Tabell 3.26 viser at det vil være 100 % transponderutnyttelse i 99 % av tiden i Ka-bånd når antennestørrelsen er 2,4 m. Den økte nedbørsdempningen som skyldes økt frekvens vil medføre redusert transponderutnyttelse i den siste prosenten av tiden gjennom et år og i de verste periodene vil forbindelsen i praksis forsvinne.

Klima	% uten forb.	C/N_{0opp} (dBHz)	C/N_{0ned} (dBHz)	C/N_{0Tot} (dBHz)	E_b/N_0 v/54 Mbit/s (dB)	Kapasitet (Mbit/s)
Lavt innland til lavt innland	1	99,3	88,1	84	6,6	54
	0,1	92,6	83,9	80,6	3,2	35,6
	0,01	77,0	74,9	70,7	-6,6	3,7
Lavt innland til kystklima	1	99,3	87,7	83,7	6,4	54
	0,1	92,6	82,4	79,5	2,1	27,6
	0,01	77,0	70,3	67,4	-9,9	1,7
Lavt innland til høyt innland	1	99,3	87,8	83,7	6,4	54
	0,1	92,6	81,6	78,8	1,4	23,5
	0,01	77,0	74,9	70,8	-6,6	3,7

Lavt innland til tropisk	1	99,3	85,8	82,4	5,1	54
	0,1	92,6	67,8	65,7	-11,6	1,1
	0,01	77,0	49	46,9	-30,4	0,016

Tabell 3.26 Linkbudsjett fra jordstasjon med 13 m antenne i global beam og til terminal med 2,4 m antenne i spot beam i Ka-bånd.

3.3.8 Fra terminal med 2,4 m antenne til jordstasjon

Tabell 3.27 viser at det er mulig å sende data med en rate på minimum 8 Mbit/s fra en terminal med en 2,4 m antenne innenfor 99 % av tiden i Ka-bånd fra alle sonene. Innenfor 99,9 % av tiden vil raten være begrenset til mellom 2 og 4 Mbit/s fra alle sonene unntatt fra tropisk sone hvor fremkommeligheten er begrenset. Innenfor 99,99 % av tiden er man avhengig av økt ressursbruk i satellitten eller lav regndempning på nedlinken for å få fram informasjon over 64 kbit/s.

Klimasone	Rate (Mbit/s)	% uten forb.	C/N ₀ opp (dBHz)	C/N ₀ ned (dBHz)	C/N ₀ Tot (dBHz)	E _b /N ₀ (dB)
Lavt innland til lavt innland	8	1	84,8	84,3	79	10
	4	0,1	78,1	77	72,4	6,4
	0,256	0,01	62,5	75,1	60,3	6,2
Kystklima til lavt innland	8	1	84,2	84,3	78,8	9,7
	4	0,1	75,8	77	71,3	5,3
	0,064	0,01	55,4	69,1	53,2	5,1
Høyt innland til lavt innland	8	1	84,5	84,3	78,9	9,8
	2	0,1	74,2	74	69	6,0
	0,256	0,01	62,6	79,4	60,5	6,4
Tropisk til lavt innland	8	1	78,9	84,3	75,5	6,5

Tabell 3.27 Linkbudsjett fra terminal med 2,4 m antenne i spot beam til jordstasjon med 13 m i global beam i Ka-bånd.

3.3.9 Kommunikasjon mellom to terminaler med 2,4 m antenne

Verdiene for C/N₀ i Tabell 3.26 og Tabell 3.27 tilsier at direkte kommunikasjon mellom to terminaler skal kunne støttes. I henhold til Tabell 3.28 kan man oppnå 8 Mbit/s innenfor 99 % av tiden og få

$$\left[10^{\frac{\frac{C}{N_{0\text{ ned, maks}}}}{10} - \frac{C}{N_{0\text{ ned, 1ch}}}} \right] = \left[10^{\frac{88,1\text{dB} - 79,8}{10}} \right] = 6 \quad (3-6)$$

kanaler a 8 Mbit/s når begge terminalene er i spot beam.

Klimasone	Rate	%	C/N ₀ opp	C/N ₀ ned	C/N ₀ Tot	E _b /N ₀
-----------	------	---	----------------------	----------------------	----------------------	--------------------------------

Lavt innland til lavt innland	8 Mbit/s	1	84,8 dBHz	79,8 dBHz	76,4 dBHz	7,3 dB
-------------------------------	----------	---	-----------	-----------	-----------	--------

Tabell 3.28 Linkbudsjett mellom to terminaler i Ka-bånd med 2,4 m antenne, begge i spot beam.

3.3.10 Fra jordstasjon til terminal med 3,8 m antenne

Tabell 3.29 viser at det er 100 % transponderutnyttelse i Ka-bånd når en stor jordstasjon sender data til en terminal med 3,8 m antenne mot de fleste stedene innefor 99,9 % av tiden. I de verste nedbørsperiodene blir dempingen så stor at kommunikasjonen blir svært begrenset.

Klima	% uten forb.	C/N ₀ opp (dBHz)	C/N ₀ ned (dBHz)	C/N ₀ Tot (dBHz)	E _b /N ₀ v/54 Mbit/s (dB)	Kapasitet (Mbit/s)
Lavt innland til lavt innland	1	99,3	92,1	85,9	8,6	54
	0,1	92,6	87,9	83,1	5,8	54
	0,01	77,0	78,9	72,7	-4,6	5,9
Lavt innland til kystklima	1	99,3	91,7	85,8	8,4	54
	0,1	92,6	86,4	82,3	5	54
	0,01	77,0	74,3	70,4	-6,9	3,4
Lavt innland til høyt innland	1	99,3	91,8	85,8	8,5	54
	0,1	92,6	85,6	81,7	4,4	47
	0,01	77,0	78,9	72,7	-4,6	5,9
Lavt innland til tropisk	1	99,3	89,8	84,9	7,5	54
	0,1	92,6	71,8	69,7	-7,6	2,9
	0,01	77,0	52,9	50,9	-26,4	0,039

Tabell 3.29 Linkbudsjett fra jordstasjon med 13 m antenne i global beam og til terminal med 3,8 m antenne i spot beam i Ka-bånd.

3.3.11 Fra terminal med 3,8 m antenne til jordstasjon

Tabell 3.30 viser at det er mulig å sende data med en rate på minimum 8 Mbit/s fra en terminal med en 3,8 m antenne innenfor 99,9 % av tiden i Ka-bånd fra alle sonene unntatt fra tropisk sone hvor fremkommeligheten er 8 Mbit/s men innenfor 99 % av tiden. Innenfor 99,99 % av tiden er man avhengig av økt ressursbruk i satellitten eller lav regndempning på nedlinken for å få fram informasjon mellom 1 Mbit/s og 256 kbit/s.

Klimasone	Rate (Mbit/s)	% uten forb.	C/N ₀ opp (dBHz)	C/N ₀ ned (dBHz)	C/N ₀ Tot (dBHz)	E _b /N ₀ (dB)
Lavt innland til lavt innland	8	0,1	85,1	80	76,6	7,6
	1	0,01	69,5	77	66,8	6,8
Kystklima til	8	0,1	82,8	80	75,9	6,9

lavt innland	0,256	0,01	62,4	71,1	59,8	5,8
Høyt innland til lavt innland	8	0,1	81,2	80	75,3	6,3
	1	0,01	69,6	77	66,8	6,8
Tropisk til lavt innland	8	1	85,9	84,3	79,4	10,4

Tabell 3.30 Linkbudsjett fra terminal med 3,8 m antenne i spot beam til jordstasjon med 13 m i global beam i Ka-bånd.

3.3.12 Kommunikasjon mellom to terminaler med 3,8 m antenne

Verdiene for C/N_0 i Tabell 3.29 og Tabell 3.30 tilsier at direkte kommunikasjon mellom to terminaler skal kunne støttes. I henhold til Tabell 3.31 kan man oppnå 8 Mbit/s innenfor 99 % av tiden og få

$$\left[10^{\frac{\frac{C}{N_{0\text{ ned,maks}}}}{10} - \frac{C}{N_{0\text{ ned,1ch}}}} \right] = \left[10^{\frac{92,1\text{dB} - 83,4}{10}} \right] = 7 \quad (3-7)$$

kanaler a 8 Mbit/s når begge terminalene er i spot beam. I dette tilfellet oppnår man altså full utnyttelse av transponderen.

Klimasone	Rate	%	$C/N_{0\text{ opp}}$	$C/N_{0\text{ ned}}$	$C/N_{0\text{ Tot}}$	E_b/N_0
Lavt innland til lavt innland	8 Mbit/s	1	91,2 dBHz	83,4 dBHz	80,1 dBHz	11 dB

Tabell 3.31 Linkbudsjett mellom to terminaler i Ka-bånd med 3,8 m antenne, begge i spot beam.

3.3.12.2 Oppsummering

Linkberegningen for Ka-båndet indikerer at kommunikasjonen vil være påvirket av nedbørsdempning slik at det vil være nødvendig med god margin utover klarvær for å opprettholde stabil kommunikasjon under vanskelige forhold.

Små antenner vil ikke være særlig gunstige fordi de vil kreve uforholdsmessig store ressurser i satellitten. Fra og med antennestørrelse på 2,4 meter vil man ha god utnyttelse av transponderen og samtidig kunne tilby 8 Mbit/s ved behov innenfor 99 % av tiden. Det vil være vanskelig i det hele tatt å opprettholde kommunikasjon i tropisk klima utover 99 % av tiden.

3.4 EHF-bånd

Dette avsnittet gir linkberegninger mellom de forskjellige terminalene når EHF-båndet benyttes med 44 GHz på opplink og 20 GHz på nedlink.

3.4.1 Fra jordstasjon til terminal med 0,4 m antenne

Tabell 3.32 viser at for forbindelsen fra jordstasjonen til terminalen vil resultatene bli omtrent som i Tabell 3.21 fordi eneste forskjell er opplinkfrekvensen på 44 GHz i stedet for 30 GHz. Signalevekkingen vil bli større men fremdeles vil nedlinken være så svak at den er styrende for totalresultatet som altså vil oppleves likt som for Ka-bånd.

Klima	% uten forb.	C/N _{0opp} (dBHz)	C/N _{0ned} (dBHz)	C/N _{0Tot} (dBHz)	E _b /N ₀ v/54 Mbit/s (dB)	Kapasitet (Mbit/s)
Lavt innland til lavt innland	1	97	72,6	70,5	-6,8	3,5
	0,1	85,6	68,3	66,2	-11,1	1,3
	0,01	60,8	59,3	55	-22,4	0,098
Lavt innland til kystklima	1	97	72,1	70,1	-7,3	3,1
	0,1	85,6	66,8	64,8	-12,5	0,96
	0,01	60,8	54,8	51,8	-25,5	0,048
Lavt innland til høyt innland	1	97	72,3	70,2	-7,1	3,3
	0,1	85,6	66	64	-13,4	0,78
	0,01	60,8	59,4	55	-22,3	0,10
Lavt innland til tropisk	1	97	70,2	68,2	-9,2	2,0
	0,1	85,6	52,2	50,2	-27,1	0,033
	0,01	60,8	33,4	31,4	-45,9	438·10 ⁻⁶

Tabell 3.32 Linkbudsjett mellom 13m jordstasjon i global beam og 0,4 m antenne i spot beam i EHF-bånd.

3.4.2 Fra terminal med 0,4 m antenne til jordstasjon

Resultater for motsatt vei er vist i Tabell 3.33. Den viser at det er mulig for en terminal å støtte alle mulighetene med 128 kbit/s innenfor 99 % av tiden unntatt fra tropisk klima. Her vil dempningen bli for stor og man må forbedre linkene med 7 dB fra 64 kbit/s for å oppnå E_b/N₀ lik 5 dB.

Klimasone	Rate (kbit/s)	% uten forb.	C/N _{0opp} (dBHz)	C/N _{0ned} (dBHz)	C/N _{0 Tot} (dBHz)	E _b /N ₀ (dB)
Lavt innland til lavt innland	128	1	60	66,3	57,0	6,0
Kystklima til lavt innland	128	1	59	66,3	56,3	5,2
Høyt innland til lavt innland	128	1	59,5	66,3	56,7	5,6
Tropisk til lavt innland	64	1	48,2	63,3	46,0	-2,0

Tabell 3.33 Linkbudsjett fra 0,4 m antenne i spot beam til 13m jordstasjon i global beam i EHF-bånd.

3.4.3 Kommunikasjon mellom to terminaler med 0,4 m antenne

Når man tar i betraktning at den ”sterkeste” linken i Tabell 3.32 og Tabell 3.33 forsvinner, indikerer dette at det ikke vil være reell støtte for direkte kommunikasjon mellom to terminaler med 0,4 m antenner i EHF-bånd.

3.4.4 Fra jordstasjon til terminal med 1 m antenne

Tabell 3.34 viser omtrent samme verdier som i Tabell 3.23 siden den begrensende nedlinken er på samme frekvens i de to tilfellene. Selv om dempningen på 44 GHz vil øke er EIRP fra jordstasjonen nok til at den ekstra dempningen ikke påvirker totalutnyttelsen nevneverdig. I noen tilfeller er resultatet dog noe dårligere her.

Klima	% uten forb.	C/N ₀ opp (dBHz)	C/N ₀ ned (dBHz)	C/N ₀ Tot (dBHz)	E _b /N ₀ v/54 Mbit/s (dB)	Kapasitet (Mbit/s)
Lavt innland til lavt innland	1	97	80,5	78,1	0,7	20
	0,1	85,6	76,3	74	-3,3	7,9
	0,01	60,8	67,3	57,9	-19,4	0,196
Lavt innland til kystklima	1	97	80,1	77,7	0,4	18,7
	0,1	85,6	74,8	72,6	-4,7	5,7
	0,01	60,8	62,7	56,6	-20,7	0,145
Lavt innland til høyt innland	1	97	80,2	77,8	0,5	19,1
	0,1	85,6	74	71,8	-5,5	4,8
	0,01	60,8	67,3	57,9	-19,4	0,196
Lavt innland til tropisk	1	97	78,2	75,9	-1,4	12,3
	0,1	85,6	60,2	58,2	-19,2	0,205
	0,01	60,8	41,3	39,3	-38	0,003

Tabell 3.34 Linkbudsjett fra jordstasjon med 13 m antenne i global beam og til terminal med 1 m antenne i spot beam i EHF-bånd.

3.4.5 Fra terminal med 1 m antenne til jordstasjon

Tabell 3.35 viser at det maksimale man kan overføre innenfor 99 % av tiden fra en terminal med 1 m antenne i EHF-bånd er 2 Mbit/s fra lavlandet, 1 Mbit/s fra kystklima og høytliggende områder og 128 kbit/s fra tropiske forhold. Dersom man ønsker kommunikasjon innenfor 99,9 % av tiden blir maksimal datarate 64 kbit/s fra lavlandet innenlands og henholdsvis 32 og 16 kbit/s fra kystklima og høytliggende, tørt klima. Muligheten til forbindelse fra tropiske soner innenfor 99,9 % av tiden er svært begrenset. I noen tilfeller kan forbindelsen bli noe bedre dersom man øker ressursbruken i satellitten men det vil gå på bekostning av den totale kapasiteten.

Klimasone	Rate (Mbit/s)	% uten forb.	C/N ₀ opp (dBHz)	C/N ₀ ned (dBHz)	C/N ₀ Tot (dBHz)	E _b /N ₀ (dB)
Lavt innland til lavt innland	2	1	70,9	78,3	68,1	5,1
	0,064	0,1	59,5	59,1	54,3	6,2
Kystklima til lavt innland	1	1	70	75,3	66,8	6,8
	0,032	0,1	56,2	56,1	51,1	6,1
Høyt innland til lavt innland	1	1	70,5	75,3	67,2	7,2
	0,016	0,1	52,3	53,1	47,6	5,6
Tropisk til lavt innland	0,128	1	59,1	66,3	56,4	5,3

Tabell 3.35 Linkbudsjett fra terminal med 1 m antenne i spot beam til jordstasjon med 13 m i global beam i EHF-bånd.

3.4.6 Kommunikasjon mellom to terminaler med 1 m antenne

Resultatene fra de to foregående tabellene indikerer at kommunikasjon med 2 Mbit/s er mulig mellom to terminaler i lavereliggende innlandsklima.

$$\left[10^{\frac{\frac{C}{N_{0 \text{ ned, maks}}}}{10} - \frac{C}{N_{0 \text{ ned, 1ch}}}} \right] = \left[10^{\frac{80,5 \text{ dB} - 78,2}{10}} \right] = 1 \quad (3-8)$$

kanal på 2 Mbit/s når begge terminalene er i spot beam.

Klimasone	Rate	%	C/N ₀ opp	C/N ₀ ned	C/N ₀ Tot	E _b /N ₀
Lavt innland til lavt innland	2 Mbit/s	1	70,9 dBHz	78,2 dBHz	68,1 dBHz	5,1 dB

Tabell 3.36 Linkbudsjett mellom to terminaler i EHF-bånd med 1 m antenne, begge i spot beam.

3.4.7 Fra jordstasjon til terminal med 2,4 m antenne

Tilsvarende som for Tabell 3.26 viser Tabell 3.37 at det vil være 100 % transponderutnyttelse i 99 % av tiden i EHF-bånd når antennestørrelsen er 2,4 m. Den økte nedbørsdempningen som skyldes økt frekvens vil medføre redusert transponderutnyttelse i den siste prosenten av tiden gjennom et år og i de verste periodene vil forbindelsen i praksis forsvinne.

Klima	% uten forb.	C/N ₀ opp (dBHz)	C/N ₀ ned (dBHz)	C/N ₀ Tot (dBHz)	E _b /N ₀ v/54 Mbit/s (dB)	Kapasitet (Mbit/s)
Lavt innland til lavt innland	1	97	88,1	83,8	6,5	54
	0,1	100,3	83,9	79,1	1,8	25,8
	0,01	60,7	74,9	58,6	-18,7	0,23
	1	97	87,7	83,6	6,2	54

kystklima	0,1	100,3	82,4	78,2	1	21,4
	0,01	60,7	70,3	58,3	-19	0,214
Lavt innland til høyt innland	1	97	87,8	83,6	6,3	54
	0,1	100,3	81,6	77,8	0,4	18,7
	0,01	60,7	74,9	58,6	-18,7	0,23
Lavt innland til tropisk	1	97	85,8	82,3	5,0	54
	0,1	100,3	67,8	65,7	-11,6	1,1
	0,01	60,7	49	46,7	-30,6	0,015

Tabell 3.37 Linkbudsjett fra jordstasjon med 13 m antenne i global beam og til terminal med 2,4 m antenne i spot beam i EHF-bånd.

3.4.8 Fra terminal med 2,4 m antenne til jordstasjon

Tabell 3.38 viser at det er mulig å sende data med en rate på 8 Mbit/s fra en terminal med en 2,4 m antenne innenfor 99 % av tiden i EHF-bånd fra alle sonene bortsett fra tropisk sone hvor raten er 2 Mbit/s. Innenfor 99,9 % av tiden vil raten være begrenset til mellom 2 Mbit/s og 256 kbit/s fra alle sonene unntatt fra tropisk sone hvor fremkommeligheten er begrenset. Innenfor 99,99 % av tiden er det begrensede muligheter til å overføre informasjon.

Klimasone	Rate (Mbit/s)	% uten forb.	C/N ₀ opp (dBHz)	C/N ₀ ned (dBHz)	C/N ₀ Tot (dBHz)	E _b /N ₀ (dB)
Lavt innland til lavt innland	8	1	82,5	92,6	79,5	10,5
	2	0,1	71,1	84	68,8	5,8
Kystklima til lavt innland	8	1	81,6	92,6	78,7	9,7
	1	0,1	67,7	81	65,5	5,5
Høyt innland til lavt innland	8	1	82	92,6	79,1	10,1
	0,256	0,1	63,8	75,1	61,5	7,4
Tropisk til lavt innland	2	1	70,7	88,3	68,6	5,6

Tabell 3.38 Linkbudsjett fra terminal med 2,4 m antenne i spot beam til jordstasjon med 13 m i global beam i EHF-bånd.

3.4.9 Kommunikasjon mellom to terminaler med 2,4 m antenne

Resultatene fra Tabell 3.37 og Tabell 3.38 indikerer at kommunikasjon med 8 Mbit/s er mulig mellom to terminaler innenfor 99 % av tiden til noen strøk: For eksempel kan man oppnå

$$\left[10^{\frac{\frac{C}{N_{0, ned, maks}} - \frac{C}{N_{0, ned, 1ch}}}{10}} \right] = \left[10^{\frac{87,7 \text{ dB} - 79,4}{10}} \right] = 6 \quad (3-9)$$

kanaler på 8 Mbit/s når begge terminalene er i spot beam.

Klimasone	Rate	%	C/N ₀ opp	C/N ₀ ned	C/N ₀ Tot	E _b /N ₀
Kystklima til kystklima	8 Mbit/s	1	81,6 dBHz	79,4 dBHz	75,1 dBHz	6,1 dB

Tabell 3.39 Linkbudsjett mellom to terminaler i EHF-bånd med 1 m antenne, begge i spot beam.

3.4.10 Fra jordstasjon til terminal med 3,8 m antenne

Tabell 3.40 viser at det vil være 100 % transponderutnyttelse i EHF-bånd når en stor jordstasjon sender data til en terminal med 3,8 m antenne i 99 % av tiden. Utover dette synker utnyttelsesgraden raskt på grunn av følsomheten for kraftig regn i dette frekvensbåndet.

Klima	% uten forb.	C/N ₀ opp (dBHz)	C/N ₀ ned (dBHz)	C/N ₀ Tot (dBHz)	E _b /N ₀ v/54 Mbit/s (dB)	Kapasitet (Mbit/s)
Lavt innland til lavt innland	1	97	92,1	85,7	8,4	54
	0,1	100,3	87,9	80,8	3,4	37,3
	0,01	60,7	78,8	58,7	-18,6	0,235
Lavt innland til kystklima	1	97	91,7	85,6	8,2	54
	0,1	100,3	86,4	80,3	2,9	33,2
	0,01	60,7	74,3	58,6	-18,7	0,23
Lavt innland til høyt innland	1	97	91,8	85,6	8,3	54
	0,1	100,3	85,6	79,9	2,6	31,0
	0,01	60,7	78,9	58,7	-18,6	0,235
Lavt innland til tropisk	1	97	89,8	84,7	7,4	54
	0,1	100,3	71,8	69,5	-7,8	2,8
	0,01	60,7	52,9	50,3	-27	0,034

Tabell 3.40 Linkbudsjett fra jordstasjon med 13 m antenne i global beam og til terminal med 3,8 m antenne i spot beam i EHF-bånd.

3.4.11 Fra terminal med 3,8 m antenne til jordstasjon

Tabell 3.41 viser at det er mulig å sende data med en rate mellom 8 Mbit/s fra en terminal med en 3,8 m antenne innenfor 99,9 % av tiden i EHF-bånd fra alle sonene bortsett fra tropisk sone hvor raten er 8 Mbit/s innenfor 99 % av tiden. Innenfor 99,99 % av tiden vil raten være begrenset til 32 kbit/s fra høyt- og lavtliggende innlandsklima og ellers er det begrensede muligheter til å overføre informasjon.

Klimasone	Rate	% uten	C/N ₀ opp	C/N ₀ ned	C/N ₀ Tot	E _b /N ₀
-----------	------	--------	----------------------	----------------------	----------------------	--------------------------------

	(Mbit/s)	forb.	(dBHz)	(dBHz)	(dBHz)	(dB)
Lavt innland til lavt innland	8	0,1	78,1	86,1	75,3	6,2
	0,032	0,01	53,3	66,3	51,1	6,0
Kystklima til lavt innland	4	0,1	74,7	83,1	72,1	6,0
Høyt innland til lavt innland	2	0,1	70,8	80,0	68,3	5,3
	0,032	0,01	52,5	66,3	50,4	5,3
Tropisk til lavt innland	8	1	77,7	90,3	75,3	6,3

Tabell 3.41 Linkbudsjett fra terminal med 3,8 m antenne i spot beam til jordstasjon med 13 m i global beam i EHF-bånd.

3.4.12 Kommunikasjon mellom to terminaler med 3,8 m antenne

Resultatene fra Tabell 3.40 og Tabell 3.41 indikerer at kommunikasjon med 8 Mbit/s er mulig mellom to terminaler innenfor 99 % av tiden til noen strøk: For eksempel kan man oppnå

$$\left[10^{\frac{\frac{C}{N_{0, ned, maks}}}{10} - \frac{C}{N_{0, ned, 1ch}}}{10} \right] = \left[10^{\frac{89,8dB - 81,5}{10}} \right] = 6 \quad (3-10)$$

kanaler på 8 Mbit/s når begge terminalene er i spot beam.

Klimasone	Rate	%	C/N _{0opp}	C/N _{0ned}	C/N _{0 Tot}	E _b /N ₀
Tropisk til tropisk klima	8 Mbit/s	1	82,6 dBHz	81,5 dBHz	74 dBHz	5 dB

Tabell 3.42 Linkbudsjett mellom to terminaler i EHF-bånd med 3,8 m antenne, begge i spot beam.

3.4.12.2 Oppsummering

Linkberegningen for EHF-båndet indikerer at kommunikasjonen vil være noe mer påvirket av nedbørsdempning enn for Ka-båndet på grunn av enda høyere frekvens på opplinken. Spesielt i de tilfellene hvor denne linken er den svakeste vil det være vanskelig å opprettholde stabil kommunikasjon under vanskelige forhold.

Små antenner vil ikke være særlig gunstige fordi de vil kreve uforholdsmessig store ressurser i satellitten for å få gjennom lite data. Fra og med antennestørrelse på 2,4 meter vil man ha god utnyttelse av transponderen og samtidig kunne tilby 8 Mbit/s ved behov innenfor 99 % av tiden. Det vil være vanskelig i det hele tatt å opprettholde kommunikasjon i tropisk klima utover 99 % av tiden.

3.5 Optimalt frekvensbånd

Beregningene viser at ut fra forutsetningene gitt, vil X-bånd være det beste alternativet. Dette fordi X-bånd er mindre utsatt for nedbørsdempning enn det høyere frekvenser vil være og at det derfor vil være mulig å opprettholde kommunikasjon i en større andel av tiden.

På grunn av høyere frekvens i de andre båndene enn X-bånd kan man oppnå høyere antennevinning for samme antennestørrelse. Dette kan utnyttes til å forbedre linkmarginen for å oppnå høyere overføringsrate men dette vil gå på bekostning av dekningsområdet. For de høyeste frekvensene vil man uansett ikke kunne kompensere for nedbørsdempningen i de verste periodene.

4 DATA OG TALE OVER SATELLITT

Som beskrevet tidligere i denne rapporten vil kapasiteten på satellittforbindelsen variere avhengig av hvilken satellittløsning som velges. Blant annet vil både terminalstørrelse, frekvensbånd og klimatiske forhold ha innvirkning på kapasiteten.

Det må vurderes om trafikken over satellitten skal være basert på TAS eller IP eller begge deler. For det første vil forsinkelsen som satellitten introduserer gjøre at eksisterende TADKOM komponenter må modifiseres for å kunne håndtere den økte tidsforsinkelsen som en satellittlink vil introdusere. Dersom TAS-trafikk skal gå over satellitten må det være minimum 256 kbit/s fordi dette er den minste trunkkapasiteten som TAS tilbyr betående av inntil 15 data- og talekanaler. Skal man multiplekse TAS og IP krever dette større kapasitet enn 256 kbit/s, i praksis minimum 512 kbit/s. Her vil ikke IP-trafikken påvirke kvaliteten på TAS-trafikken. Alternativt kan man konvertere TAS-trafikken til TDMoIP. På sikt vil TAS bli faset ut og da vil det kun kjøres IP-trafikk over satellitten.

4.1 Tjenestekvalitet (QoS)

Ambisjonsnivået for å utføre effektiv tjenestekvalitet vil til en viss grad være førende for den minste kapasiteten satellittlinken kan være. Data kan klassifiseres i tre klasser som brukes for å utøve QoS med følgende karakteristikk:

- Expedited Forwarding (EF). Data tilhørende EF-klassen er typisk karakterisert med lav forsinkelse, lavt tap og lav jitter. Dette gjelder data som tale og video. EF gis ofte prioritet over alle andre.
- Assured Forwarding (AF). Med AF-klassen vil operatøren være i stand til å gi garantier for levering av data så lenge trafikken ikke overskrider en gitt datarate. Trafikk med høyere rate vil få en økt sannsynlighet for å bli droppet i tilfeller med overbelastning. Innenfor hver av fire AF-klasser gis en tredelt rangordning.
- All trafikk som ikke havner i EF- eller AF-klassene havner i BE-klassen og håndteres etter beste evne.

En mulig fordeling mellom klassene kan være at prioriterte applikasjoner med begrenset påtrykk

allokeres til EF klassen. Ved dynamisk reservasjon av tale vil det bli bedre ressursutnyttelse og mindre blokkering. Den dynamiske håndteringen vil åpne for videokonferanser som allokeres til AF-klassen. All annen trafikk vil være i BE klassen.

5 KONKLUSJON

Denne rapporten har i hovedsak omhandlet linkberegninger for å vurdere hva som er realiserbart for å erstatte dagens radiolinjer i TADKOM med satellitthopp der det er upraktisk å benytte slike.

Ut fra beregningen vil det være mulig å velge en satellittløsning som i mange tilfeller kan støtte kapasiteten på 8 Mbit/s som radiolinjene skal gi slik at man slipper å ha egne QoS regler for satellitthoppet. Beregningene indikerer at å benytte X-bånd vil være den mest stabile løsningen fordi disse frekvensene er minst utsatt for nedbørsdempning. Spesielt i tropiske områder vil det til tider oppstå store problemer i høyere frekvensbånd men også i typisk kystklima vil disse høyeste frekvensene være utsatt for stor dempning.

Når det gjelder størrelse på antenner på terminalutstyret anbefales det å benytte minimum 1 m parabolantenne selv om dette som regel vil gå på bekostning av en noe redusert transponderutnyttelse. Skal man ha mulighet for full transponderutnyttelse viser beregningene at det må brukes minimum 2,4 m antenner.

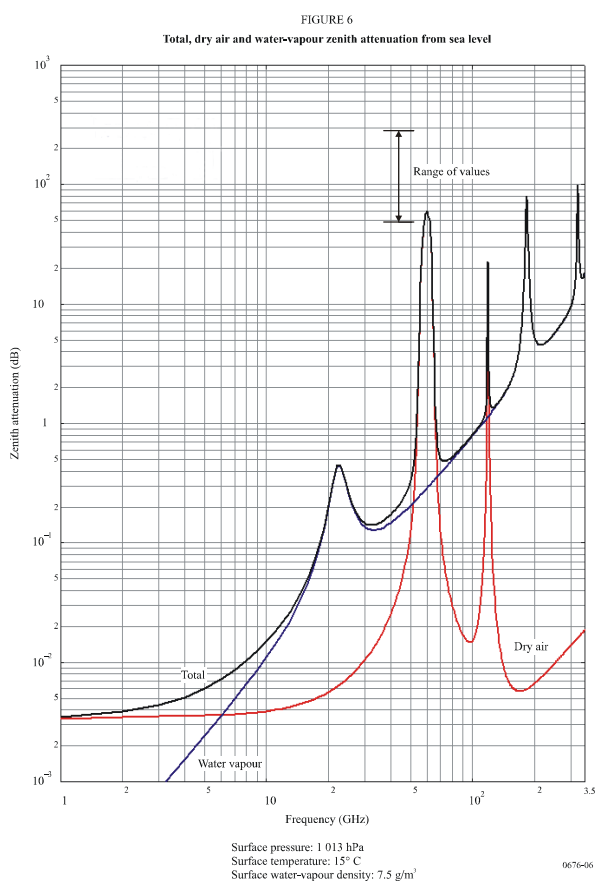
APPENDIKS

A KLIMATISKE FORHOLD I ATMOSFÆREN

Klimatiske forhold i atmosfæren vil påvirke radioforholdene ved satellittkommunikasjon ved at signalet svekkes. De største problemene knytter seg til nedbør i form av våt snø og regn men også vanddamp og O₂-innhold i luft vil gi signalsvekking. Generelt er problemet økende ved økende frekvens.

A.1 Atmosfærisk demping

Radiosignaler i atmosfæren vil hovedsakelig dempes p g a absorpsjon i oksygen (O₂) og vanddamp (H₂O). Dempning som skyldes denne effekten er spesielt gjeldende for frekvenser over 10 GHz. Spesifikk demping for O₂ og H₂O er vist i Figur A.1. For å finne demping på grunn av absorpsjon i O₂ og H₂O må ekvivalent distanse gjennom respektive media bestemmes.



Figur A.1 Spesifikk demping p g a gasser i atmosfæren hentet fra "RECOMMENDATION ITU-R P.676-6: Attenuation by atmospheric gases"

I (1) refereres det til CCIR hvor ekvivalent distanse er gitt ved

$$L_e = \frac{2h}{\sqrt{\sin^2(\varepsilon) + \frac{2h}{R_{eff}} + \sin(\varepsilon)}} \quad (\text{A.1})$$

hvor R_{eff} er effektiv jordradius lik 8500 km, h er effektiv høyde for vanndamp ($h_w = 2,2 - 2,5$ km i frekvensområdet 10 - 20 GHz, $h_o = 6$ km for frekvenser under 50 GHz) og ε er antennens elevasjonsvinkel. Atmosfærisk demping L blir da

$$L = \gamma_o \cdot L_{eo} + \gamma_w \cdot L_{ew} \quad (\text{A.2})$$

hvor L_{eo} er ekvivalent distanse gjennom O_2 , L_{ew} er ekvivalent distanse gjennom H_2O og γ_o og γ_w er spesifikk demping for henholdsvis O_2 og H_2O gitt i Figur A.1.

A.2 Regndempning

I dette avsnittet oppsummeres siste rekommandasjon fra ITU for å estimere gjennomsnittlig regndempningen $A_R(p)$ for prosentvis tid p gjennom et år: (3).

Først må man finne hvor høyt h_R signalet blir dempet av regn. I stede for den gamle sonevise inndelingen av jordkloden er det tabulert punkter for hele kloden i (4) basert på målinger over lang tid. Så finnes veien signalet går gjennom regn. Her deles det i de tilfellene elevasjonsvinkelen ε er over og under 5° . For $\varepsilon \geq 5$ blir L_S :

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \varepsilon} \quad \text{km} \quad (\text{A.3})$$

For $\varepsilon < 5^\circ$ er L_S gitt ved

$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{\left(\sin^2 \varepsilon + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e} \right)^{1/2} + \sin \varepsilon} \quad \text{km} \quad (\text{A.4})$$

Hvis

$$h_R - h_s \leq 0 \quad \Rightarrow \quad A_R(p) = 0 \quad (\text{A.5})$$

Ellers blir A_R som følger:

Beregn først den horisontale projeksjonen L_G av L_S :

$$L_G = L_S \cos \varepsilon \quad \text{km} \quad (\text{A.6})$$

Så finnes regnintensiteten $R_{0,01}$ som overstiger 0.01% av et gjennomsnittlig år. Det beste er om det finnes statistikk basert på lokale målinger. Hvis ikke kan et estimat finnes fra (5) som gir kart over reinintensiteten basert på målinger over 15 år fra European Centre of Medium-range Weather Forecast (ECMWF). Hvis

$$R_R = 0 \quad \Rightarrow \quad A_R(p) = 0 \quad (\text{A.7})$$

Ellers blir A_R som følger:

Først finnes den spesifikke attenuasjonen γ_R gitt ved:

$$\gamma_R = k (R_{0.01})^\alpha \quad \text{dB/km} \quad (\text{A.8})$$

hvor de frekvensavhengige koeffisientene k gitt i (6). Neste trinn blir å beregne den "horisontale reduksjonsfaktoren" $r_{0.01}$ for 0,01 % av tiden:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f} - 0.38 (1 - e^{-2L_G})}} \quad (\text{A.9})$$

Så beregnes den "vertikale justeringsfaktoren" $v_{0.01}$ for 0,01% av tiden gitt ved:

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \varepsilon} \left(31 (1 - e^{-(\theta/(1+\chi))}) \sqrt{\frac{L_R \gamma_R}{f^2} - 0.45} \right)} \quad (\text{A.10})$$

I tilfellene hvor

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_s}{L_G r_{0.01}} \right) > \varepsilon \quad (\text{A.11})$$

blir

$$L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \varepsilon} \quad \text{km} \quad (\text{A.12})$$

Ellers blir

$$L_R = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \varepsilon} \quad \text{km} \quad (\text{A.13})$$

Hvis $|\varphi| < 36^\circ$

$$\chi = 36 - |\varphi| \quad \text{degrees} \quad (\text{A.14})$$

Ellers blir

$$\chi = 0 \quad \text{degrees} \quad (\text{A.15})$$

Den effektive lengden blir så

$$L_E = L_R v_{0.01} \quad \text{km} \quad (\text{A.16})$$

Den beregnede dempningen som overskrider 0,01 % av et gjennomsnittlig år er så gitt ved:

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \quad \text{dB} \quad (\text{A.17})$$

Til slutt finnes den dempningen som overskrider andre prosentvise andeler mellom 0,001 % to 5 % av tiden av et gjennomsnittlig år:

Hvis $p \geq 1\%$ or $|\varphi| \geq 36^\circ$:

$$\beta = 0$$

Hvis $p < 1\%$ og $|\varphi| < 36^\circ$ og $\varepsilon \geq 25^\circ$:

$$\beta = -0,005(|\varphi| - 36) \quad (\text{A.18})$$

Ellers blir:

$$\beta = -0,005(|\varphi| - 36) + 1,8 - 4,25 \sin \varepsilon \quad (\text{A.19})$$

Til slutt finnes Regnedempningen $A_R(p)$ som funksjon av prosentvis tid p :

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-(0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-p) \sin \theta)} \quad \text{dB} \quad (\text{A.20})$$

A.3 Noen verdier for nedbørsdempning og atmosfærisk dempning

Under følger tabeller med nedbørsdempning og atmosfærisk dempning basert på avsnittene A.1 og A.2 for noen utvalgte steder:

Frekvens/Regn GHz %	1 %	0,1 %	0,01 %	Atmosfærisk dempning
7	0,08	0,46	1,66	0,097
8	0,14	0,72	2,5	0,11
11	0,36	1,75	5,6	0,28
14	0,67	3,0	9,2	0,77
20	1,42	5,7	17,3	1,47
30	3,00	11,4	31,8	1,20
44	5,29	19,1	50,0	1,54

Tabell A.1 Regnværs- og atmosfærisk dempning typisk for kystklima med elevasjonsvinkel $21,2^\circ$.

Frekvens/Regn GHz %	1 %	0,1 %	0,01 %	Atmosfærisk dempning
7	0,05	0,24	0,93	0,10
8	0,08	0,43	1,6	0,11
11	0,25	1,2	3,9	0,29
14	0,47	2,1	6,6	0,79
20	1,1	4,4	12,8	1,50
30	2,3	9,0	24,6	1,23
44	4,3	15,7	40,5	1,57

Tabell A.2 Regnværs- og atmosfærisk dempning typisk for lavereliggende innlandsklima med elevasjonsvinkel $20,8^{\circ}$.

Frekvens/Regn GHz %	1 %	0,1 %	0,01 %	Atmosfærisk dempning
7	0,04	0,29	0,80	0,12
8	0,07	0,53	1,4	0,14
11	0,23	1,6	3,6	0,36
14	0,45	2,8	6,3	0,98
20	1,0	6,0	12,3	1,86
30	2,3	12,6	24,2	1,52
44	4,3	22,5	40,8	1,95

Tabell A.3 Regnværs- og atmosfærisk dempning typisk for høyt innlandsklima med elevasjonsvinkel $16,6^{\circ}$.

Frekvens/Regn GHz %	1 %	0,1 %	0,01 %	Atmosfærisk dempning
7	0,22	1,4	3,4	0,036
8	0,36	2,2	5,2	0,040
11	0,93	5,4	11,5	0,10
14	1,8	9,8	19,9	0,29
20	4,3	21,6	40,4	0,54
30	9,9	46,5	81,2	0,44
44	17,9	80,2	132,7	0,57

Tabell A.4 Regnværs- og atmosfærisk dempning i Tropisk område med elevasjonsvinkel $79,5^{\circ}$.

Litteratur

- (1) Maral G, Bousquet M (1998): Satellite Communications systems, third edition, Wiley, 733.
- (2) Stette, Gunnar (1996): Radiokommunikasjon, NTNU, Institutt for Teleteknikk
- (3) RECOMMENDATION ITU-R P.618-8 (2003): Propagation data and prediction methods for the design of Earth-space telecommunication systems.
- (4) RECOMMENDATION ITU-R P.839-3 (2001): Rain height model for prediction methods.
- (5) RECOMMENDATION ITU-R P.837-4 (2004): Characteristics of precipitation for propagation modelling.
- (6) RECOMMENDATION ITU-R P.838-3 (2005): Specific attenuation model for rain for use in prediction methods.