



AALBORG UNIVERSITET

TEKNIK & IT

AFGANGSPROJEKTRAPPORT

WIRELESS LAST MILE I GRØNLANDSKE BYGDER

24. oktober 2016

Aqqalu Josefsen

Resumé

Kort og rammende

Indhold

1	Fremgangsmåde i projektet	2
1.1	Projektets målsætning	2
1.1.1	Formålsbeskrivelsen	3
1.1.2	Projektets leverancer	3
1.1.3	Projektets succeskriterier	3
1.2	Interessentanalyse for projektet	4
1.2.1	Liste over interessenter	4
1.3	Grønland	6
1.3.1	Fakta om Grønland	6
1.3.2	Infrastruktur af telekommunikation	7
1.3.3	Kapacitet	8
1.3.4	Services	8
1.3.5	Dataforbrug	8
1.3.6	Busy hour	8
1.3.7	Prognose	8
1.4	Valg af bygd	11
2	Tabs-konceptet	12
2.1	ITU-R's koncept for tab over radio-forbindelser	12
2.1.1	Systemtabet	12
2.1.2	Transmissionstabet	13
2.1.3	Basistabet og antenneforstærkningen	13
2.2	Longley-Rice's computer metode	14
2.2.1	Input til den ITM modellen	15
2.2.2	Input til den ITM modellen	15
2.2.3	Den glatte kurve gennem terrænet	17
A	Bilag	19
A.1	Telesites	19
*		

Kapitel 1

Fremgangsmåde i projektet

Til støtte for gennemførelse af dette projekt udarbejdes først en handlingsplan bestående af følgende elementer:

1. Målsætning for projektet. Målsætningen neddeles i:
 - (a) en formåls-beskrivelse,
 - (b) en liste over leverancer i projektet og
 - (c) projektets succeskriterier
2. Projektafgrænsning
3. Interessentanalyse
4. Milestone-plan
5. Projektorganisation
6. Arbejdsrum

1.1 Projektets målsætning

For at lave afgangsprojektet har vi behov for en klar målsætning.

Telekommunikationen netværket i Grønland (især i nordgrønland og østgrønland) er nu ved at være forældet. Derfor har Tele Greenland planer om at udskifte den nuværende kommunikationsnetværk med nyere teknologi, som opfylder kundernes behov. Tele Greenland har allerede i dag nyere kommunikationssystem i nogle steder i Grønland, især i større befolkede byer. Det teknologi skal udvides og fornyes i nogle steder. I mindre befolkede byer som i nordgrønland, skal hele kommunikationssystemet skiftes. Planen er at det nye kommunikationsnetværk kun skal være “mobile only”, dvs. den fastnettede kommunikationssystem bliver udfaset.

1.1.1 Formålsbeskrivelsen

Vi ønsker at afklare, hvorledes Tele Greenland's forbindelser mellem kunden og centralen i bygder og mindre byer kan udskiftes fra kabelforbindelser til trådløse forbindelser.

Følgende emner bliver analyseret:

- Størrelsen af Grønland
- Befolkningstal
- Hvilke produkter/services kunderne bruger i hver by og hver bygd

For at projektet leveres og afsluttes tilfredsstillende er der lavet succeskriterier, som kan læses i afsnit 1.1.3

1.1.2 Projektets leverancer

Projektets leverancer er en Rapport - færdiggjort og afleveret inden den 5. januar kl. 12.00 (dansk tid) 2017 indeholdende:

- Case-study af én eller to udvalgte bygder
-

1.1.3 Projektets succeskriterier

Projektet har to sæt succeskriterier. Det ene sæt er kriterierne for en god projektrapport, der bliver evalueret ved afgangseksamen. Her skal rapporten demonstrere, at den studerende:

- "Skal kunne vurdere praksisnære og teoretiske problemstillinger samt begrunde og vælge relevante løsningsmodeller."
- "Skal evne at omsætte akademiske kundskaber og færdigheder til relevant, praktisk problembearbejdning og løsning på diplomingeniørniveau"
- "Skal evne at opstille robuste tids- og arbejdsplaner for eget projekt"
- "Skal selvstændigt og med professionel tilgang kunne indgå i en dialog med professionelle interessenter"

Det andet sæt succeskriterier er kriterierne for en anvendelig løsning, der opfylder formålsbeskrivelsen. Følgende succeskriterier sættes op:

- Udarbejdelse af prognose for kapacitetskrav
- Udarbejdelse af specifikationer for, hvilke interfaces/tjenester, det trådløse Last-Mile koncept skal levere

- Ud fra kapacitetskrav udarbejde krav til dimensionering af det lokale mobilnet ()
- Identifikation af, hvilke informationer, der er nødvendige for at kunne beregne eller analysere kapacitet og dækningsbehov på en given lokation
- Udarbejde en model og en metode, som kan bruges til at beregne placering, antal og typer af antenner - En beregningsmodel som efterfølgende kan genbruges generelt på en given lokation.
- beskrivelse af de værktøjer, der anvendes for - ud fra modellen - at
- Udarbejdelse af specifikationer til valg af bygd, der er velegnet for en case-study (forslag: En bygd, hvor alle tjenester er repræsenteret, og hvor de topografiske forhold er en udfordring)
- Valg af bygd

1.2 Interessentanalyse for projektet

"Hvem skal vi gøre glade" I interessentanalysen findes en liste over projektens interessenter, og en beskrivelse af hvordan interessenterne gøres tilfredse og hvordan de hvert enkel kommer til at bidrage til projektet.

1.2.1 Liste over interessenter

A. Troels Bundgaard Sørensen Associate Professor i Dep.8 (Department of Electronic Systems), Aalborg Universitet, +45 9940 8618

Vejleder for Aqqalu Josefsen. Sidder i projektets styregruppe.

B. John Siegstad (JFS) Afdelingschef for afd.4400 Planning, Tele Greenland A/S, +299554853

Sidder i projektets styregruppe.

C. Haukur Thor Bragason (THOR) Afdelingschef, Tele Greenland A/S, +299555224

Teknisk ansvarlig for "Last Mile" i Grønland (dog ikke kabelnettet og krydsfelterne).

D. Jukka Wagnholt (JUW) Radioplanlægger, 386335, Tele Greenland A/S, +299585688

Planlægger af Grønlands mobilnet. Anvender et Radio Planning og optimerings software udviklet af software-virksomheden "Forsk". Kan potentielt bidrage rigtig meget til projektet.

E. ArKalo Andersen (ARAN) Afdelingschef for afd.6020 TED LTS ("liniefolkene"), Tele Greenland A/S, +299562263

Teknisk ansvarlig for land-kabelnettet og krydsfelterne.

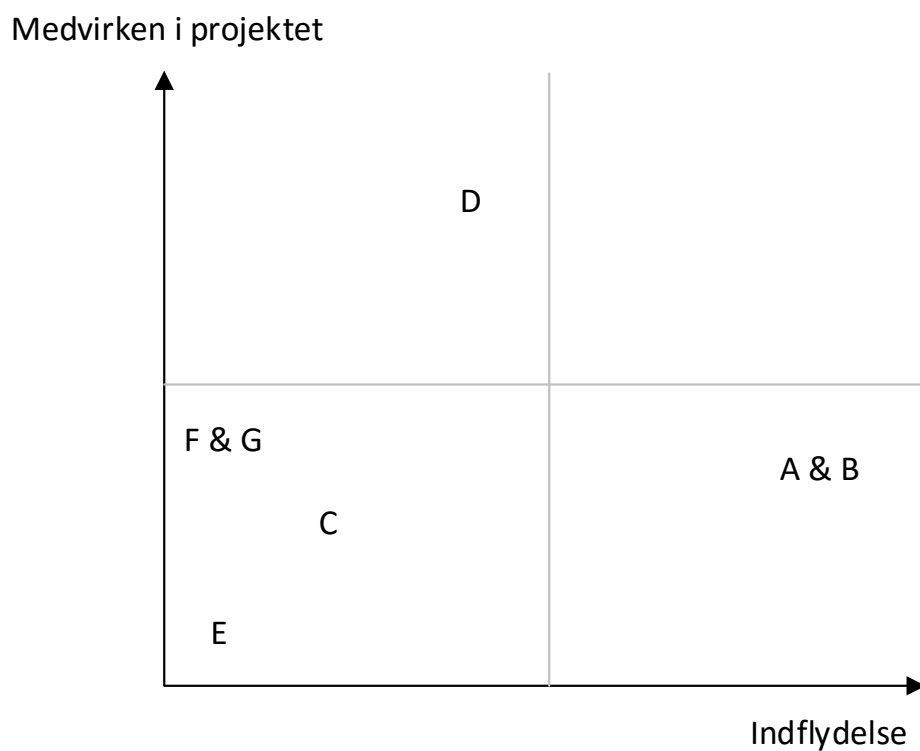
Det videre udfald, der efterfølger dette afleveringsprojekt, vil have indflydelse på hvordan og hvornår Wireless Last Mile erstatter kabelnettet i grønlandske bygder og mindre byer, hvilket igen vil have stor indflydelse på liniefolkenes arbejdsområde.

F. Karin G. Nielsen (KGN) Tegnestueleder, Tele Greenland A/S, +299550915.

Forventes at kunne levere dokumentation som kort, tekniske tegninger og topografiske data til projektet.

G. Mattias Törnquist (MATOR) Planlægningsingeniør i afd.4120 4120 Server/ Database, Tele Greenland A/S +299386485

Forventes at kunne levere statistiske data som antal abonnenter, kapacitetsforbrug, fremskrivninger o.lign.



Figur 1.1: Illustration af hvor interessenterne er placeret i forhold til medvirken og indflydelse for projektet

1.3 Grønland

I denne afsnit vil Grønland blive beskrevet. Her vil størrelsen af landet, byerne samt bygderne og befolkningstallet blive analyseret.

1.3.1 Fakta om Grønland



Figur 1.2: Afstandene mellem byerne er store og største delen af Grønland er dækket med is

Grønland er verdens største (ikke kontinental) ø 1.2, som ligger imellem den nordlige Atlantiske Ocean og den Arktiske Hav. Størrelsen af landet er $2.166.086 km^2$, hvor $410.449 km^2$ er isfrit og kystlinjen strækker sig over 44.000 km. Den isfrie del af Grønland er bjergrig med mange fjorde[grlStat].

Grønland ligger i arktis, det betyder at temperaturen i vinter perioden ligger omkring $-20 \text{ deg } C$ i den nordligste by og $-3 \text{ deg } C$ i den sydligste by, hvor imod i sommer perioden ligger temperaturen omkring $7 \text{ deg } C$ i den nordligste ny og $8 \text{ deg } C$ i den sydligste by[qaanaaq][nanortalik].

Den 1. januar 2016 boede der 55.847 personer og grønlands statistik forventer at befolkningsantallet vil falde til 53.000 personer i de kommende 24 år[grlStatWeb].

Hovedstaden hedder Nuuk og ligger på grønlands vestkyst, hvor i dag bor omkring 12.800 personer.

På tabel 1.1, kan befolkningsantallet ses delt i kommunerne.

1.3.3 Kapacitet

1.3.4 Services

I de seneste år, viser tallene, at både den mobile bredbånd- og mobiltelefonabonnenter er stigende, hvorimod abonnenter for bredbånd via fastnet og telefonlinjer er faldende.

1.3.5 Dataforbrug

1.3.6 Busy hour

Busy hour er en periode som navnet siger, en periode på 1 time hvor data trafikken er på sin højeste inden for 24 timer. Ifølge den amerikanske multinationale firma Cisco har den globale nettrafik øget med 34 procent i 2014. Cisco forudsiger at den globale busy-hour trafik til øges med en faktor på 3,4 fra 2014 til 2019, dvs. den globale busy-hour trafik vil nå 1,7 Pbps (petabits per second) i år 2019[**busy-hour**].

Ud fra de oplysninger har Tele Greenland lavet et prognose over hvor meget befolkningen i Grønland kommer til at bruge i busy-hour perioden. I den næste underafsnit vil prognosen blive beskrevet og forklaret.

1.3.7 Prognose

I takt med at flere benytter sig af den mobile bredbånd- og mobiltelefonabonnenter, stiger også kapacitetsbehovet for brugerne og kommunikationsnetværket i Grønland.

Tele Greenland har udarbejdet en prognose over kapacitetsbehovet over tid (fra 2017 til 2022) og sted i Grønland.

Bemærk, at udregningerne er regnet ved at antage, at den grønlandske befolkning har det samme busy-hour trafik pr. individ..

Først regnes der baglæns, dvs. den globale busy-hour trafik i år 2014 findes først, for at beregne den globale busy-hour trafik i år 2017, ved brug af vækst raten fra 2014 til 2019.

$$\begin{aligned} BusyHour_{2014} &= \frac{BusyHour_{2019}}{vækstfaktor} \\ &= \frac{1,7 \cdot 10^{15}}{3,4} \\ &= 500Tbps \end{aligned} \tag{1.1}$$

Ud fra Busy-Hour trafikken fra 2014 kan Busy-Hour trafikken prognosen udregnes sammen med vækstraten.

Hvor vækstraten findes ved:

$$\begin{aligned} vækstrate &= vækstfaktor^{\frac{1}{5}} \\ &\simeq 1,28 \end{aligned} \tag{1.2}$$

Nu kan den globale Busy-Hour trafik for frem i tiden udregnes:

$$BusyHour = BusyHour_{2014} \cdot vækstrate^n \quad (1.3)$$

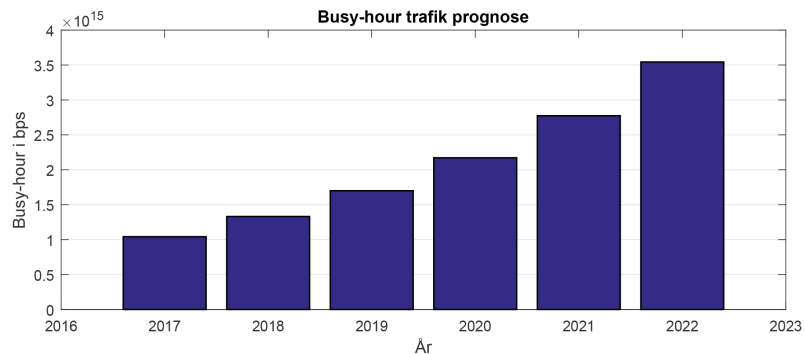
Hvor:

n = er 0 i 2014, 1 i 2015, 2 i 2016 osv.

Fra 2017 til 2022 vil Busy-hour trafikken se således ud, se tabel 1.3.7: Nu hvor Busy-hour

År	Busy-hour i Pbps
2017	1,04
2018	1,33
2019	1,7
2020	2,17
2021	2,77
2022	3,54

Tabel 1.2: Busy-hour trafik prognose fra 2017 til 2022



Figur 1.4: Busy-hour trafik prognose fra 2017 til 2022

trafik prognosen er beregnet, kan Busy-hour trafik pr. individ beregnes ud fra prognosen for den globale befolkningstal. Dermed kan prognosen for Busy-hour trafik i grønland beregnes.

Prognosen for den globale befolkningstal kan ses i tabel 1.3 Tal fra Grønlandsk statistik, som viser befolkningstallet for hele Grønland de seneste 5 år (2011 til 2016) kan ses i tabel 1.4, her kan prognoses også ses. Tallene er beregnet ud fra gennemsnitstallet gemmen de seneste 5 år, og addere tallet hver år der går, frem til 2022. Prognosen for den globale Busy-hour trafik pr. individ og prognoses for befolkningstallet i Grønland frem til 2022 er beregnet. Nu kan prognosen for kapacitetsbehovet i Grønland frem til 2022 findes, det findes ved at multiplicere de to tal. Prognosen kan ses i tabel 1.5.

År	Globalt befolkningstal	Busy-hour trafik pr. individ i kpbs
2017	7515284,153	139
2018	7597175,534	175
2019	7678174,656	221
2020	7758156,792	280
2021	7837028,569	354
2022	7914763,610	448

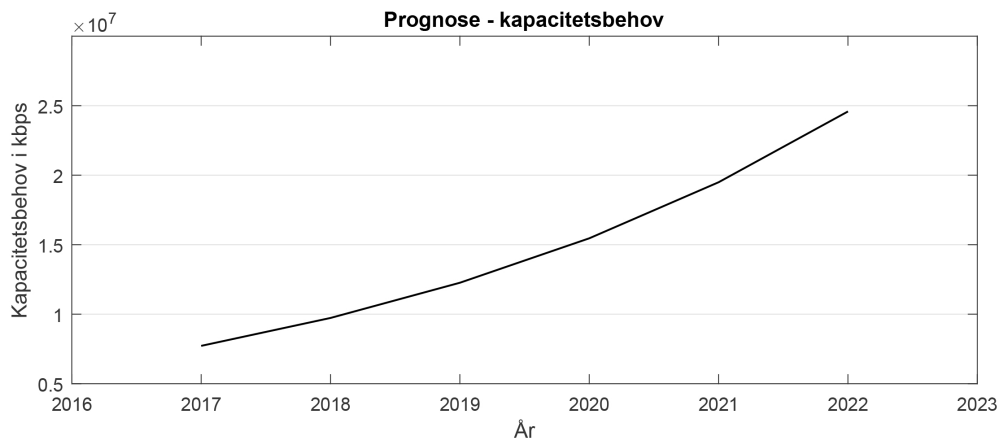
Tabel 1.3: Prognose for globalt befolkningstal

År	2012	2013	2014	2015	2016		Δ
Statistik	56.749	56.370	56.282	55.984	55.846		-154
År	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
Prognose	55.692	55.538	55.385	55.231	55.077	54.923	

Tabel 1.4: Befolkningstal de seneste 5 år, og prognose frem til 2022

År	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Kapacitetsprognose	7.721.583	9.729.586	12.262.526	15.458.505	19.492.132	24.584.091

Tabel 1.5: Kapacitetsbehov frem til 2022 i Grønland



Figur 1.5: Kapacitetsbehov frem til 2022 i Grønland

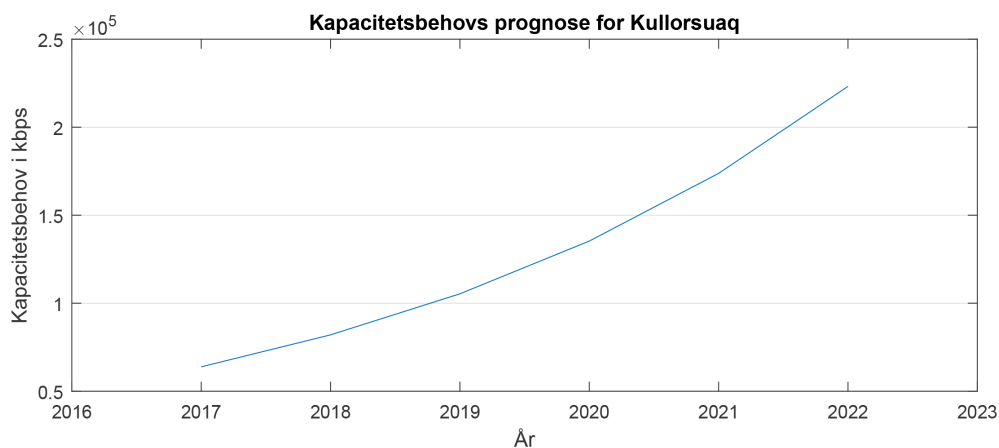
1.4 Valg af bygd

I de tidligere afsnit, blev der foreslået, at valget af bygd skal tages ud fra tjenester og topografiske forhold. Dvs. at den valgte bygd skal have alle tjenester repræsenteret og den topografiske forhold er en udfordring.

Bygden som er velegnet til for en study-case er bygden *Kullorsuaq*. Kullorsuaq er en af de mange bygder som er i Qaasuitsup Kommune i den nordlige del af Grønland. Indbyggertallet er 453 i 2016 [grlStatBefolkning]. De seneste 5 år, har indbyggertallet steget i gennemsnit med 8, hvor imod befolkningstallet i de fleste bygder er faldende.

Kullorsuaq er placeret i den grønne zone, dvs. at kommunikationen udadtil sker ved satellit kommunikation. Satellit jordstationen (SAHO) i nordgrønland som Kullorsuaq er forbundet med er placeret syd for Upernavik (se kort oversigtet her: A.1. Linket mellem SAHO frem til Kullorsuaq er forbundet med 4 repeaterstationer (Tunullersuaq (TUAQ), Tugtorqortoq (TUGT), Tinumanersuaq (TINU) og Kiatarsuaq (HOLM)).

Udregning af trafikprognose er det samme som i afsnit 1.3.7. Busy-hour trafik prognosen for Kullorsuaq fra 2017 til 2022 ses på figur 1.6.



Figur 1.6: Kapacitetsbehov frem til 2022 i bygden Kullorsuaq

Kapitel 2

Tabs-konceptet

Udgangspunktet for beregningerne af en trådløs tjenestes fremkommelighed er en model-
lering af det effekt-tab, som radiosignalet har undervejs fra transmitteren til receiveren.

2.1 ITU-R's koncept for tab over radio-forbindelser

Et udbredt koncept ved anskuelse af transmissionstab er det, der allerede i 1951 første gang blev beskrevet af ITU i rekommendationen ITU-R P.341[**itur·p341-5**].

Konceptet udmærker sig ved at isolere effekttab i radiokomponenter som antenner, filtre, bølgeledere, transceivere etc. fra effekttabet i radiosignalet på sin vej ind over landskabet.

Rekommendationen blev lavet i regnestokkenes tid, så alle effekter (P) er i dB_m mens alle dæmpninger (L) og forstærkninger (G) er i dB .

2.1.1 Systemtabet

Det samlede tab i det viste koncept - kaldet ”*systemtabet*” - er det tab, signalet har fra transmitter til receiver, antennetab indbefattet. Modellen befatter sig ikke med tab i evt. filtre og bølgeledere.

$$L_s = P_t - P_r \quad (2.1)$$

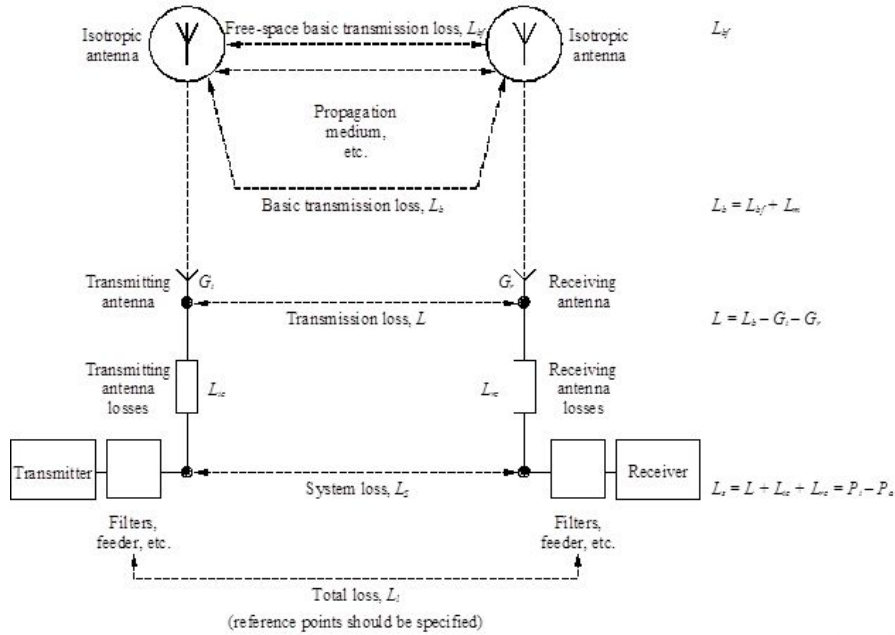
hvor:

L_s : Tab for det samlede system

P_t : Effekt afsendt af transmitteren (på udgangen af evt. filtre og bølgeledere)

P_r : Effekt modtaget af receiveren (på indgangen af evt. filtre og bølgeledere)

FIGURE 1
Graphical depiction of terms used in the transmission loss concept



0341-01

Figur 2.1: Rec. ITU-R P.341-5, figure 1, Graphical depiction of terms used in the transmission loss concept

2.1.2 Transmissionstabet

Transmissionstabet (L) er systemtabet uden tab i antennerne:

$$L = L_s - L_{tx} - L_{rx} \quad (2.2)$$

hvor:

L : Transmissionstabet

L_s : Systemtabet

L_{tx} : Tab i senderantennen

L_{rx} : Tab i modtageantennen

2.1.3 Basistabet og antenneforstærkningen

Basistabet (L_b) er tabet over nogle teoretiske isotropiske (kugleformede) antenner, ækvivaleret med de faktiske antenner ved introduktionen af antenneforstærkningskonceptet:

$$L_b = L + G_t + G_r \quad (2.3)$$

hvor:

L_b : Basistabet

L : Transmissionstabet

G_t : Senderantennens forstærkning (i forhold til en isotrop antenne)

G_r : Modtageantennens forstærkning (i forhold til en isotrop antenne)

Gevinsten ved indførelsen af antenneforstærkningskonceptet er, at man afkobler alle radiokomponenternes (incl. antennernes) karakteristika fra indflydelse på modellen for radiosignalets effekt-tab gennem luften over terrænet på sin vej fra sender til modtager. Definitionen på en antenne-forstærkning er givet i Annex 1, sektion 2 i ITU-R rekommandationen P.341¹ [itur-p341-5].

Sendendeeffekten ved den hypotetiske isotropiske sendeantenne er altså:

$$P_{it} = P_t + G_t \quad (2.4)$$

og modtageeffekten i den hypotetiske isotropiske modtageantenne bliver:

$$P_{ir} = P_r - G_r \quad (2.5)$$

hvor:

P_{it} : Sendendeeffekten ud af den hypotetiske isotropiske sendeantenne

P_t : Sendendeeffekten ud af den faktiske sendeantenne

P_{ir} : Modtageeffekten ind i den hypotetiske isotropiske modtageantenne

P_r : Modtageeffekten ind i den faktiske modtageantenne

2.2 Longley-Rice's computer metode

Et kendt eksempel på praktisk anvendelse af ITU's tabskoncept er den såkaldte Longley-Rice model – også kaldet den *Irregulære Terræn Model* eller ITM. Denne model blev standard i U.S.A. allerede i 1965[nbs-tn101].

Longley og Rice havde kun 3 år efter - i 1968 - beskrevet en metode, hvorved man med en computer kan beregne tabet[ntis-ad676874].

Metoden dækker et stort dynamikområde. I tabel 2.1 er området specificeret ud.

¹"The power gain of an antenna is defined as the ratio, usually expressed in decibels, of the power required at the input of a loss-free reference antenna to the power supplied to the input of the given antenna to produce, in a given direction, the same field strength or the same power flux-density at the same distance. When not specified otherwise, the gain refers to the direction of maximum radiation. The gain may be considered for a specified polarization."

Parameter:	Dynamikområde:
Frekvens	20 til 40.000 MHz
Antennehøjde	0,5 til 3.000 m
Distance	1 til 2.000 km
Luftens brydningsindex (refraktivitet (n))	250 til 400

Tabel 2.1: Longley-Rice modellens dynamikområde

2.2.1 Input til den ITM modellen

2.2.2 Input til den ITM modellen

I ITM modellen indgår parametre som beskrevet herunder:

d er forskellige afstande (f.eks. afstanden mellem sender og modtager). Alle afstande angives i kilometer.

h er højder (f.eks. en antennes højde over jordoverfladen).

k er radiosignalets centerfrekvens (f) målt i radianer ($k = 2\pi f$)

Δh er en parameter, der angiver, hvor ujævnt landskabet er.

N er luftens brydningsindex.

a er en kugles radius (f.eks. jordens radius).

Radiobølgens udbredelse (d)

d er den afstand radiobølgen tilbagelægger. På en Line-of-Sight radiokæde har d én værdi. Det er afstanden mellem sende- og modtageantennen. For rundspredningstjenester som GSM, radiofoni og lignende har d lige så mange værdier som der er punkter i tjenestens dækningsområde.

Antennens højde over jorden (h_g)

h er en given antennes højde over jorden. ITM-modellen skelner mellem antennens faktiske højde (h_g) over terrænet, også kaldet antennens strukturelle højde, og antennens effektive højde (h_e) over jorden, der simpelt sagt er antennens højde over terrænets gennemsnitshøjde over radiobølgens udbredelsesområde.

Radiosignalets centerfrekvens målt i radianer (k)

Radiosignalets centerfrekvens målt i radianer er givet ved:

$$k = 2\pi f \quad (2.6)$$

hvor f er radiosignalets centerfrekvens. Iøvrigt gælder, at:

$$c = \lambda f \quad (2.7)$$

hvor c er lysets hastighed i luft (i omegnen af $2,997 \cdot 10^8$ m/s) og λ er centerfrekvensens bølgelængde.

Luftens brydningsindex (N)

Luftens brydning alias radiosignalets refraktivitet ændrer radiosignalets retning på sin rejse, så signalet typisk krummer. Dette fænomen afhænger af forskellige variabler som luftens tryk, sammensætning, renhed og fugtighed. Der er i ITU-R's rekkommendation P.453 [**itur'p453-11**] forsøgt kortlagt nogle målinger og givet nogle modeller for luftens middelbrydning rundt om i verden. I ITM-modellen bruges målte og kortlagte middelbrydningsværdier ved jordens overflade (N_s) som udgangspunkt. Der ønskes en værdi for N_s , der passer best muligt til virkeligheden, men det virkelige brydningsindex (N) varierer som nævnt med vejret.

Både i ITU-R's rekkommendation P.453-11 og i Longley-Rice's ITM gives en formel, hvor N_s udregnes ud fra:

N_0 , der er "minimum måneds-middelværdier" af N_s "reduceret til havets overflade", og h_s , der for Line-of-Sight forbindelser er højden i [km] over havet (Mean Sea Level) ved den laveste antenne.

ITU-R P.453-11 giver den empiriske formel:

$$N_s = N_0 \cdot e^{(-h_s/h_0)} \quad (2.8)$$

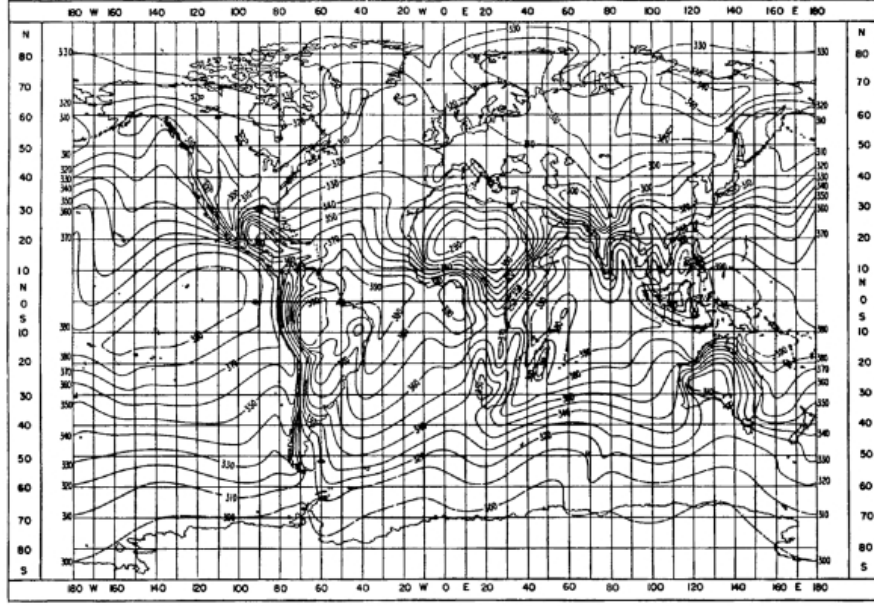
og nævner at h_0 måske kan være 7,35 [km]. Longley og Rice giver formelen:

$$N_s = N_0 \cdot e^{(-0,1057 \cdot h_s)} \quad (2.9)$$

og uddyber, hvorledes de ud fra måledata er kommet frem til denne tilnærmelsesformel (se side 4-1 i [**nbs-tn101**]). At omregningsformlerne er forskellige i de to kilder indikerer, at modellerne bygger på statistik og ikke eksakt videnskab. I figur 2.2 er vist et eksempel på et verdenskort visende N_0 . I sagens natur bør man være kritisk ved anvendelsen af kort som disse og forsøge altid at finde de nyeste målinger.

Jordens effektive radius (a) og krumning (γ_e)

Hvis jorden var helt rund ville jordens krumning være den reciproke værdi af jordens radius, og hvis luften ikke brød et radiosignal ville man i denne ideelle verden have en retlinet signaludbredelse. Jordens effektive radius (a) er den hypotetiske radius, der retter et radiosignals krumme bane gennem luften ud til en ret bane. Jordens effektive krumning (γ_e) er den reciproke værdi af jordens effektive radius. Disse to parametre afhænger altså af luftens brydning.



P0453-01

Figur 2.2: Rec. ITU-R P.553-11, FIGURE 1, Monthly mean values of N0: February

Uagtet jorden ikke er rund sætter Longley og Rice jordens "faktiske" radius til 6370 km og udregner herefter jordens effektive radius (a) i enheden [km] som:

$$a = 6370 \cdot \frac{1}{1 - 0,04665 \cdot e^{0,005577 \cdot N_s}} \quad (2.10)$$

hvor N_s er luftens middel-brydningsindex ved jordens overflade som beskrevet ovenfor. ITU-R P.453-11 har naturligvis en anden formel her, som jeg ikke vil uddybe nærmere. Jordens effektive radius ligger på omkring 4/3 af jordens "faktiske" radius.

2.2.3 Den glatte kurve gennem terrænet

Der laves en cirkelbue gennem terrænet mellem sende- og modtageantennen, således at cirkelbuen skærer gennem terrænet under den laveste antennes mastefod.

Matematisk beskrivelse af terrænet ($\Delta h(d)$)

Terrænets beskaffenhed tages ind i Longley-Rice modellen med blandt andet parameteren $\Delta h(d)$, som er middelværdien af højdeforskellene i terrænet mellem sende- og modtageantennen. Matematisk kan det skrives som:

$$\Delta h(d) = \sum_{n=1}^N \frac{\Delta h_n}{\Delta d_n} \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \Delta h \quad (2.11)$$

hvor:

$\Delta h_n = h_n - h_{n-1}$: er terrænets højdetilvækst på positionen for den n 'te måling [m].

$\Delta d_n = d_n - d_{n-1}$: er afstanden mellem den n 'te og den $n - 1$ 'te måling [km].

Appendix A

Bilag

A.1 Telesites

