

Re-planning of the FM-Band in Denmark

Masters Thesis in Electrical Engineering by Pierre Soelberg

Supervisor: Peter Meincke

Technical University of Denmark - November 2005.

Abstract

Recently, it was decided to re-plan the FM band in Denmark. The purpose of this re-planning is to make space for more stations in the FM-band, both stations with regional coverage and stations with national coverage. This must be done by a more tight spacing of the stations, thus lowering the interference protection ratios, and by use of Single Frequency Networks (SFN), Near Single Frequency Networks (NSFN), and removal of as much as possible of the double-coverage that used to be in many networks.

The decision has been inspired by the recent re-planning of the FM-band in the Netherlands. In the Dutch re-planning, it was accepted that the audio quality would decrease from good to acceptable, and this will also be the case for the Danish re-planning. The first Dutch experiences with the newly re-planned FM band are not as good as expected. Practically no private station has gained all the expected coverage, and public radio has reception problems in some areas. This is the reason why (N)SFN possibilities and limitations are worth investigating.

This report first gives a short overview of the development of private broadcasting in Denmark, from the beginning in 1983, until this decision whose main goal is to make space for more commercial broadcasters.

The practical aspects about running an FM-network are explained. In case of (N)SFN, it is explained what extra synchronization will be required, and how it could be obtained.

The existing recommendations from ITU about frequency planning are explained and compared with the norms used to plan the Dutch FM band.

Tests are carried out in order to determine what the protection ratios for (N)SFN networks should be. After some lab tests, the NSFN performance is almost worse than SFN. The reason for considering NSFN should be that it would perform better in some situations. When this doesn't seem to be the case, NSFN seems to be waste of bandwidth, so field tests are carried out only for SFN.

SFN networks with two or three transmitters are tested, from real transmitter sites. The tests are used to establish a relation between the sound quality deterioration caused by SFN, and the difference in signal strength between the transmitters.

Although it is possible to change this quality deterioration by adjusting transmitter power and time delays, it has not been possible to make an SFN network sound like something the listener wouldn't tune away from, at least on a part of the route from one transmitter to an other.

With the results obtained from the field tests, an alternative way to re-plan the FM-band is proposed, using low power transmitters in a tight grid with extensive double-coverage, to overcome the inevitable problems arising from the use of SFN.

Replanlægning af FM-båndet

Af Pierre Soelberg, diplomingeniør, stud. polyt.

Eksamensprojekt udført i perioden 1. november 2004 - 1. november 2005, ved Ørsted•DTU.

Vejleder: Peter Meincke.

Forord

Dette projekt er lavet ved siden af mit fuldtidsarbejde hos Sky Radio. Tiden der er brugt på det, har været fritid, afspadsering og opsparet ferie, men altså ikke arbejdstid.

Dette eksamensprojekt er således ikke udført for Sky Radio. I kraft af min ansættelse, har jeg haft mulighed for at trække på forskellige ressourcer, låne udstyr mv., både fra Sky Radio og andre steder, som jeg nok ikke havde haft ellers.

Bortset fra det, er der tale om et privat projekt, hvor jeg selv har finansieret transportudgifter, hotelophold mv.

Det er velkendt, at Sky Radio har sin egen dagsorden i forhold til debatten om replanlægning. Derfor er det vigtigt at understrege, at konklusionerne i denne rapport ikke Sky Radios, men mine egne.

En række personer og firmaer har bidraget med viden, lån af udstyr og faciliteter. I den anledning vil jeg gerne takke:

- Jens Ole Borch, Borch Teknik for lån af Telefunken sendere, stik og kabler, og for praktisk assistance i forbindelse med udførelsen af SFN-forsøgene.
- Sky Radio for lån af mastepositioner og forskelligt udstyr, samt sendetid til SFN-forsøg.
- Rob Korver, Sky Radio B.V. for erfaringer vedr. frekvensforholdene i Nederlandene, samt for lån af mobilt måleudstyr.
- Gerjo Bruntink, medforfatter til den nederlandske Zerobase-rapport for forklaringer og information om de nederlandske erfaringer efter at det replanlagte FM-net blev taget i brug.
- Kasper Krüger for historiske fakta om udviklingen af privat radio i Danmark.
- Peter Meincke, Ørsted•DTU for inspiration og forklaringer om spidsfindigheder vedr. sammenlægning af felter og den slags.
- Barbara Bohn-Jespersen for korrekturlæsning praktisk hjælp i øvrigt.

Denne rapport består af to bind. Dette er bind I. Bind II indeholder en større samling bilag med måledata mv.

København, 1. november 2005

Pierre Soelberg

Indhold

Bind I

1	Indledning	1
2	FM-båndet kommerielt og politisk	2
2.1	Danmark: Fra lokalradio til kommerciel radio	2
2.1.1	Lav-effekt lokalradio	2
2.1.2	Professionalisering med høje sendestyrker og networking ind ad bagdøren	2
2.1.3	KPMG Rapporten	3
2.1.4	Værdien af kommerciel radio i Danmark - auktion over to netværk	4
2.1.5	Opkøb og fortsat debat om replanlægning	4
2.2	Replanlægning af FM-båndet i Nederlandene	5
2.2.1	Frekvensplanlægning frem til vedtagelsen af replanlægningen (Zerobase)	5
2.2.2	Zerobase II	6
2.3	Resumé	7
3	Opbygning af FM-sendenet - konventionelt, SFN og NSFN	8
3.1	Definitioner	8
3.1.1	FM-Radio og FM-bånd	8
3.1.2	Frekvensssving og båndbredde	8
3.1.3	Feltstyrke og signalstyrke	8
3.1.4	MPX-signalet - stereo og RDS	9
3.1.5	Forbetoning	10
3.2	Konventionelt FM-netværk	11
3.2.1	RDS til styring af hvilken sender der modtages	11
3.2.2	Synkronisering og distribution	11
3.3	Single Frequency Network (SFN)	11
3.3.1	Synkronisering af carrieren	11
3.3.2	Refleksioner, multipath og fading	13
3.3.3	Synkronisering af MPX-indholdet	15
3.3.4	SFN i USA	16
3.4	Near Single Frequency Network (NSFN)	17
3.4.1	Synkronisering og distribution	17
3.5	Resumé	18
4	Modeller til frekvensplanlægning	19
4.1	Prediktion af feltstyrke	19
4.1.1	ITU-R P.370-7	19
4.1.2	ITU-R P.1546-1	23
4.2	Normer for modtagekvalitet og beskyttelse mod interferens	27
4.2.1	ITU-R BS.412-9	27
4.2.2	Genève Final Acts om anvendelse af retningsbestemte antenner	30

	4.2.3	Nederlandske normer	30
4.3		Resumé	32
5		Forsøg med (N)SFN i statisk opstilling	33
	5.1	Forsøgsopstilling	33
	5.2	Dæmpning som følge af interferens	34
	5.3	Forsøg med SFN	36
	5.3.1	SFN-forsøg med en anden sender	37
	5.3.2	SFN-forsøg med stationær consumer modtager	39
	5.4	Forsøg med NSFN	39
	5.4.1	NSFN-forsøg med stationær consumer modtager	41
	5.5	Konklusioner	41
6		Forsøg med SFN vest for Roskilde	42
	6.1	Positionerne og strækningen	42
	6.2	Målemetode	43
	6.3	Måling af lyd kvalitet fra de to sendere hver for sig	46
	6.4	SFN-forsøg	47
	6.5	Konklusioner	51
7		Forsøg med SFN i Ribe Amt	52
	7.1	Positionerne og strækningen	52
	7.2	Indledende målinger på Vorbasse 100.1 MHz	54
	7.2.1	Sammenligning mellem beregnet og målt dækning	55
	7.2.2	Undersøgelse af målingernes reproducerbarhed	58
	7.3	SFN-forsøg Vorbasse og Sønder Omme	62
	7.4	Sammenligning af SFN med konventionelt FM-net	67
	7.5	SFN med tre sendere	68
	7.6	Forsøg med ekstra tidsforsinkelse og højere effekter	71
	7.6.1	Ændring af opstilling på senderpositionerne	71
	7.6.2	Måling mellem Vorbasse og Sønder Omme	72
	7.6.3	Måling mellem Ølgod og Sønder Omme	75
	7.7	Undersøgelse af beskyttelseskrav for SFN-sendere	76
	7.8	Konklusioner	78
	7.8.1	Forsøg fra rigtige sende-positioner - betingelser og begrænsninger	80
8		Alternativt forslag til replanlægning	81
	8.1	Forudsætninger for FM-radio i fremtiden	81
	8.2	SFN-net med dobbeltdækning	82
	8.2.1	Beregning af dækning og forstyrrelser med en simpel model	82
	8.2.2	Særlige forhold i byer	86
	8.2.3	Forskelle på cellemodellen og den nuværende frekvensplan	87
	8.2.4	Andre praktiske forhold	87
	8.2.5	Beskyttelse af andre stationer	88
	8.3	Resumé	88
9		Konklusion	89

9.1	Vedtagelsen af replanlægningen	89
9.2	Praktiske forhold ved FM-net - særlige forhold ved (N)SFN	89
9.3	Modeller til frekvensplanlægning - internationalt og hollandsk	90
9.4	De udførte forsøg	90
9.4.1	Laboratorieforsøg	90
9.4.2	Resultater af SFN-forsøg	91
9.5	Forslag til en alternativ måde at replanlægge på	92
9.6	Fremtidigt arbejde	92
9.6.1	Målinger	92
9.6.2	Beregninger	93
10	Referencer	94
10.1	Litteratur	94
10.2	Links til omtalte firmaer og produkter	96

Bilag (Bind II)

Statistiske forsøg (SFN og NSFN)

Bilag 1: Forsøg med kun én sender (interferens), beskrivelse og resultater

Bilag 2: Forsøg med to sendere (SFN og NSFN test)

SFN Forsøg

Bilag 3: Roskilde målejournale og grafer med måleresultater

Bilag 4: Ribe Amt oversigt over målinger og grafer for hver måling

Andet

Bilag 5: Matlab Toolbox til beregning af feltstyrker med ITU 1546

1 Indledning

Der er fra politisk side besluttet, at det danske FM-bånd skal replanlægges. Dette sker ud fra et ønske om at få plads til flere kanaler, både regionale og landsdækkende.

Det er desuden besluttet at frekvenserne skal pakkes tættere, og at der skal anvendes *Near Single Frequency Network* (NSFN) og *Single Frequency Network* (SFN), hvor det er muligt.

Beslutningen fremgår af *Mediepolitisk Aftale tillæg* [2005].

I denne aftale henvises direkte til “såkaldt hollandske planlægningsprincipper”, og at planlægningen sker med “*accept af højere forstyrrelsesniveau*”.

Erfaringerne fra Nederlandene med driften af de replanlagte net har vist, at der har været en del problemer med dækningen, og at de fleste stationer ikke har opnået den lovede dækning.

På trods af disse erfaringer er det alligevel vedtaget at lave den danske replanlægning efter den nederlandske model. Det fremgår ikke nogen steder, om erfaringerne, efter at de nederlandske replanlagte FM-net blev taget i brug, har indgået i overvejelserne her hjemme.

Med udgangspunkt i gældende standarder for frekvensplanlægning, samt det materiale der foreligger vedr. replanlægningen i Nederlandene, undersøges hvilke muligheder der er for at anvende SFN og NSFN net i en dansk sammenhæng.

Undersøgelsen vil i så stort omfang som muligt være baseret på praktiske forsøg, med henblik på at opstille en række krav til opbygningen af (N)SFN-netværk. Det gælder på sendersiden, hvor nødvendigheden af evt. synkronisering undersøges, og hvordan en sådan synkronisering i givet fald vil kunne udføres. Desuden undersøges hvilke problemer der bliver på modtagersiden.

De efterfølgende afsnit består først af en kort gennemgang af de vigtigste begivenheder for kommerciel radio i Danmark, siden etableringen af de første lokalradioer i 1983 og frem til i dag. Dernæst gennemgås opbygningen af et FM-sendenet, dvs. flere sendere som sender samme program, og de tids- og synkroniseringsproblemer der i givet fald vil skulle løses hvis senderne skal være en del af et (N)SFN-net.

Herefter gennemgås de standarder der gælder inden for frekvensplanlægning, og hvor den nederlandske replanlægning adskiller sig fra dem.

Der er lavet en række forsøg med (N)SFN, både laboratorie-eksperimenter og forsøg med rigtige senderpositioner, hvor det er undersøgt hvor store forstyrrelser det giver, når flere sendere sender på samme frekvens i det samme område.

Med udgangspunkt i resultaterne af disse forsøg, foreslås en alternativ måde at replanlægge FM-båndet på, hvor et sendenet sættes sammen af flere SFN-net, med brug af massiv dobbeltdækning, for at afhjælpe de problemer, som SFN giver.

2 FM-båndet kommercielt og politisk

I dette kapitel gives en kort introduktion til, hvordan private selskaber traditionelt har opnået tilladelse til udsendelse på FM-båndet i Danmark, den politiske og kommercielle baggrund for ønsker for og imod replanlægning af FM-båndet, samt den kommercielle værdi af et landsdækkende FM-netværk på terrestriske sendere.

2.1 Danmark: Fra lokalradio til kommerciel radio

2.1.1 Lav-effekt lokalradio

I 1983 blev Danmarks Radios monopol på udsendelse af radioprogrammer på FM-båndet brudt, da der blev vedtaget en såkaldt forsøgslov om lokalradio.

Den sendetilladelse man fik, var til udsendelse af 30W ERP 40 m over terræn. Der måtte ikke sendes reklamer, og der var en række restriktive krav til, at programmerne skulle være produceret lokalt (forbud mod networking). Altså rigtig lokalradio.

For at sikre den lokale forankring, var det en betingelse at mindst halvdelen af bestyrelsen, for den forening som havde sendetilladelsen, boede i den kommune tilladelsen var udstedt for. En sendetilladelse kunne kun gives til personer eller foreninger - ikke til selskaber. Samtidig måtte disse personer ikke sælge deres sendetid, og der var krav om at sendetilladelsesindehaverne selv skulle have den fulde indflydelse på programvirksomheden. Man kunne dermed ikke sælge sin sendetilladelse til et selskab.

For at sikre at der nu også var tale om lokal radio, nedsattes en række lokalradionævne, et i hver kommune, som havde til opgave at udstede sendetilladelser, og som skulle føre tilsyn med at lokalradioen nu også var lokal, og i øvrigt overholdt forbuddet mod reklamer. Lokalradionævnene var sammensat af lokale politikere og folk fra det lokale foreningsliv.

Alt dette forhindrede dog ikke en række entusiastiske mennesker fra, at skabe Danmarks største kommercielle radiostation (mens reklameforbuddet var gældende), The Voice.

I 1988 blev det tilladt at sende reklamer, og stationer som Radio Viborg og The Voice, siden efterfulgt af endnu flere, forsøgte sig med at lave professionel radio, som skulle tjene penge på reklamesalg. Sendestyrken var stadig kun 30 W, og der gjaldt de samme regler om forbud mod networking. Begrænsningen i sendestyrken kunne håndhæves ret effektivt, da den eneste sender som var typegodkendt til lokalradio, var en sender fra Arcodan A/S, som kunne levere en udgangseffekt på 20 W. De 30 W blev så opnået ved stakning af antenner eller en mast som var højere end 40 m.

I 1996 blev networking af nyheder tilladt, men der var stadig forbud mod anden networking, og den tilladte sendestyrke for lokalradio sat op fra 30 til 160 W, stadig fra en højde på 40 m. Den radius fra senderen, hvor en lokalradio skulle beskyttes fra interfererende stationer blev dog ikke ændret. Den var 5 km, hvad den også er i dag.

2.1.2 Professionalisering med høje sendestyrker og networking ind ad bagdøren

I år 2000 trådte R&TTE direktivet i kraft. Dette EU-direktiv medførte, at der ikke længere kunne opretholdes særlige danske typegodkendelseskrav til FM-sendere. Hvis en sender var type-

godkendt i et andet EU land, og havde et CE mærke, måtte den anvendes i Danmark. Dette åbnede for salg af sendere som var meget kraftigere end hvad der var nødvendigt for at udsende 160W. Det betød, at en masse lokalradioer skruede voldsomt op for sendestyrken. Af IT & Telestyrelsens kontrolrapporter (fremskaffet ved at søge aktindsigt) fremgår, at overskridelser af den tilladte sendeeffekt med 10-20 dB ikke er ualmindeligt.

I 2002 blev der gennemført en række ændringer i loven om lokalradioer [*Mediepolitisk Aftale, 2002*]. Lovgivningen var blevet utidssvarende, da den i bund og grund stadig var lavet med henblik på lokale radioer, altså små stationer, som ofte ikke var kommercielle.

Et eksempel på den utidssvarende lovgivning var forbuddet mod networking. Med indførelsen af computer-afvikling, fik branchen mulighed for at omgå dette forbud, således at stationen fremstod som én station over for lyttere og annoncører, men juridisk set stadig var mange små lokalradioer med hver sin sendetilladelse. Det foregik ved, at en DJ godt kunne lave radio på flere stationer på én gang, uden at sige det samme eller spille den samme sang på disse stationer samtidigt. Dermed var det ikke networking i juridisk forstand, for det var ikke det samme der blev sendt samtidigt, men for lytterne var det den samme station, uanset om de hørte den i Jylland eller København, bortset fra lokale reklamer og evt. lokale nyheder.

Lovændringen medførte en ophævelse af forbuddet mod networking, dog kunne de lokale nævn stadig stille visse krav om at en del af programmerne skulle være produceret lokalt.

Desuden indførtes at selskaber kunne søge sendetilladelser, og kravet om sendetilladelsesindehavernes lokale tilknytning (kravet om at mindst halvdelen af bestyrelsens medlemmer skulle have folkeregisteradresse i den kommune hvor sendetilladelsen var udstedt) blev ophævet.

Samtidigt blev loven om den (næsten) landsdækkende 5. radiokanal og den delvist landsdækkende 6. radiokanal vedtaget, og en række lokalradioer fik tilladelse til at øge sendestyrken til 500 W, dog uden at interferensbeskyttelsesgrænsen dermed blev udvidet. Selv om en øgning til 500 W måske lyder af meget, var de udstrålingsdiagrammer, frekvenserne blev udmeldt med, ofte begrænset så meget og så besværlige at realisere, at det ofte ikke kunne betale sig at bygge et antennesystem, som passede til udstrålingsdiagrammet.

2.1.3 KPMG Rapporten

Branchen kunne ikke leve med de lave sendestyrker i længden. Godt nok kunne man som regel slippe afsted med at sende både 10 og 15 dB for kraftigt, men man var ikke sikret imod, at der lige pludselig blev udmeldt en ny forstyrrende frekvens, mellem ens egen sender og den by man ønskede at sende til. Samtidig udgjorde risikoen for et kontrolbesøg fra Telestyrelsen, med deraf følgende lavere sendestyrke (og måske et komplet tab af dækning i den by man solgte reklamer til) i en periode, et for usikkert grundlag for at drive en fornuftigt forretning.

Det medførte et krav om replanlægning af FM-båndet, og politisk pres fik så Kulturministeriet til at bede KPMG lave en rapport, hvor man, baseret på den netop gennemførte hollandske replanlægning, ønskede at få undersøgt, om der kunne laves en replanlægning efter nederlandsk forbillede i Danmark [*KPMG, 2003*].

Her gennemgås den politiske proces i Nederlandene (se afsnit 2.2). Det konkluderes desuden, at det vil være muligt at gennemføre en replanlægning i Danmark, men der er en række usikkerheder. Dels om markedet har råd til en så omfattende proces, og dels at man har opblødt

planlægningskriterierne for at kunne få plads til flere frekvenser. På det tidspunkt hvor KPMG skriver rapporten, er de nye nederlandske replanlagte netværk ikke i luften, og derfor kan KPMG ikke skrive noget om de praktiske erfaringer.

Politisk ville man ikke igangsætte en replanlægning, uden at der i det mindste var opbakning fra branchen som helhed. Derfor blev der afholdt en konference hos KPMG i København den 24. marts 2003, hvor KPMG fremlagde deres rapport, og hvor de fleste kommercielle radiostationer var repræsenteret. Branchen var stærkt splittet mellem en række aktører med ambitioner om at blive landsdækkende, herunder SBS (dengang Voice og PopFM) og Sky Radio som var for en replanlægning. Imod var så en række jyske aktører, samt Clear Channel (dengang Radio 2, Uptown og Nyhedsradioen 24-7) og TV2, som på det tidspunkt troede sig sikre på at få enten den 5. eller 6. landsdækkende kanal [*Radionyt.com* 6748].

2.1.4 Værdien af kommerciel radio i Danmark - auktion over to netværk

Den 18. juni 2003 blev der holdt auktion over den 5. næsten landsdækkende kanal og 6. delvist landsdækkende kanal, med en befolkningsdækning på hhv. 78 og 37 %.

8 selskaber deltog i auktionen hvor man købte retten til at sende på de to netværk i 8 år: Den 5. landsdækkende kanal blev solgt til Sky Radio A/S for 54 Mkr/år og den 6. landsdækkende kanal blev solgt til Talpa Radio International B.V. for 22.5 Mkr/år. Talpa Radio driver stationen Radio 100 FM.

Det er specielt interessant at bemærke, at 3 selskaber var villige til at give 50 Mkr årligt for den 5. kanal, nemlig TV2 som ville give 50 Mkr/år, SBS som ville give 53 Mkr/år, og altså endelig Sky Radio som endte med kanalen for 54 Mkr/år.

I den anledning er det værd at bemærke, at forskellen i pris på de to netværk, alene skyldes forskellen i FM-dækning. Begge kanaler har ret og pligt til at sende på DAB, hvor de vil få samme dækning. Begge kanaler kan desuden lave samarbejde med lokalradioer, streame på internettet og blive distribueret på kabel og satellit. Ud over dette er der begrænsninger for den 5. kanal, i form af en public service forpligtelse til at producere en vis mængde nyheder og magasinprogrammer, samt et forbud imod at regionalisere sendefladen. Således må der ikke sendes lokale reklamer et sted i landet, samtidigt med at der sendes andre lokale reklamer andre steder i landet. Den 6. kanal har ikke denne begrænsning, og det er derfor tilladt for Radio 100 FM at sende forskellige programmer på senderen i København og i Randers, hvad man også gør på visse tider af dagen.

Så prisforskellen på den 5. og den 6. kanal er udelukkende begrundet i forskellen i FM-dækning fra terrestriske sendere, og havde public service kravene og forbuddet mod regionalisering ikke været der for den 5. kanal, ville den 5. kanal nok have været endnu dyrere. I den forbindelse, er det dog vigtigt at huske, at værdien for den 5. kanal blev høj, fordi det var den eneste landsdækkende reklamefinansierede kanal. Hvis den var blevet udbudt sammen med flere andre landsdækkende kanaler, var prisen ikke blevet så høj.

2.1.5 Opkøb og fortsat debat om replanlægning

Auktionen hos Bruun Rasmussen gik ikke som ret mange havde ventet. Et dansk, men engelsk ejet selskab (Sky Radio A/S) og et nederlandsk selskab (Talpa Radio International B.V. - driver Radio 100 FM), vandt kanalerne. TV2 fik ingen ting, og det gjorde SBS og Clear Channel heller

ikke [Radionyt.com 7315].

Ser man på de politiske udmeldinger før og efter auktionen fremgår det, at stemningen hos regeringspartierne, specielt Venstre, er vendt. Før auktionen gik man ikke ind for en replanlægning, men nu gør man [Radionyt.com 6895 og 6941 vs. 8334].

Alle i branchen var klar over, at de glade dage hvor man bare skruede op for senderen, ville være forbi når de to nye kanaler gik i luften. *Børsen, MediaMarked, 18. juni 2003*, bragte således en stor artikel netop om dette, som altså udkom på selve dagen for auktionen. Uanset hvem der fik kanalerne, ville de selskaber, som nu har betalt dyrt for den legale adgang til lytterne, ikke finde sig i, at skulle konkurrere mod gratister, som i visse tilfælde sendte kraftigere ulovligt, end FM5/FM6-køberne måtte sende lovligt. Man måtte derfor forudse en klapjagt på de stationer der sendte for kraftigt [Radionyt.com 7304].

Ganske kort efter auktionen købte SBS Clear Channels radioaktiviteter, som på købstidspunktet omfattede stationerne Radio 2, Radio Uptown og Nyhedsradioen 24-7, med en del sendere over hele landet. Dermed kunne der opnås tilstrækkelig stor tæthed af lokalradiosendere, så en pæn del af landet kunne dækkes, selv med lovlig sendestyrke, nu hvor en del sendetilladelser er opgraderet til 500W ERP fra 40 m.

Dette har dog ikke formindsket ønsket fra visse aktører, specielt TV2, om at der skal være en replanlægning, og 22. juni 2005, blev det vedtaget som tillæg til den mediepolitiske aftale fra 2002, at igangsætte en undersøgelse af mulighederne for replanlægning [*Mediepolitisk Aftale tillæg, 2005*].

I første omgang skal selve planlægningsopgaven sendes i udbud. Der accepteres større forstyrrelser som følge af, at frekvenserne bliver pakket tættere og der skal anvendes SFN og NSFN hvor det er muligt (SFN og NSFN vil blive forklaret i kap. 3). Der skal regnes på to scenarier, et hvor DR's frekvenser indgår og et hvor de ikke indgår.

Når forslaget til de nye frekvensplaner foreligger, vil aftalepartierne (Regeringen og Dansk Folkeparti) beslutte, om den nye frekvensplan skal udmøntes i praksis, og i givet fald hvilket scenario der skal vælges.

Det fremgår ikke af aftalen, hvornår frekvensplanlægningen skal være færdig, eller hvornår det forventes, at en ny frekvensplan vil kunne være i luften. Desuden fremgår det ikke, hvor lang levetid det forventes, at FM-radio fortsat skal have.

2.2 Replanlægning af FM-båndet i Nederlandene

Baggrunden for diskussionerne om en dansk replanlægning, er den gennemførte replanlægning i Nederlandene. *KPMG [2003]* har, som en del af analysen af mulighederne for replanlægning i Danmark, gennemgået tilblivelsen af den nye nederlandske frekvensplan, som her resumeres kort.

2.2.1 Frekvensplanlægning frem til vedtagelsen af replanlægningen (Zerobase)

Frem til 1987 fandtes der kun den hollandske public service radio, med både landsdækkende og regionale programmer, som vi kender det fra DR, samt hvad man nu kunne høre af udenlandske stationer, på det hollandske FM-bånd. Som mange andre steder i Europa, har man værnet om den

offentlige radio, ved at forhindre adgang for private aktører, eller ved at begrænse denne adgang så meget som muligt.

I 1987 måtte den hollandske medielov ændres, så udenlandske selskaber fik adgang til markedet. Dette skyldtes EU-regler om fri konkurrence, og betød at udenlandske (private) selskaber fik adgang til det hollandske marked, dog uden at hollandske selskaber fik det. Frem til 1992 var private aktører udelukket fra at anvende terrestriske FM-sendere, man var henvist til distribution via satellit og kabel. Begrundelsen var, at der ikke var ledige frekvenser.

Private aktører kunne påvise at der fandtes ledige frekvenser, og ved at gå rettens vej, fik de private aktører tilladelser til at sende på FM med terrestriske sendere. Sendetilladelser blev udstedt efterhånden som private aktører kunne påvise at frekvenserne var ledige, og flere rapporter påpegede uhensigtsmæssighederne ved den måde at uddele sendetilladelser på.

Stort set alle ændringer i den hollandske medielov er således kommet igennem, enten pga. EU-lovgivning, ved at private aktører er gået rettens vej, eller ved andre former for politisk pres. Frem til replanlægningen i 2003, er alle ændringer således blevet lavet oven på noget eksisterende, og da ændringerne ofte har været i form af en domstolsafgørelse, hvor staten idømmes at give en bestemt aktør adgang til FM-båndet, har der ikke kunnet laves en langsigtet plan for, hvor mange nationale, regionale og lokale netværk man vil have.

Dette medførte så et politisk ønske om at “starte forfra”. Navnet Zerobase stammer herfra, og dækker over en replanlægning af FM-båndet, hvor man kun tager hensyn til de udenlandske sendere, der allerede er koordineret, og herefter planlægges frekvenser i FM-båndet, så der bliver flest mulige antal kanaler, og dobbeltdækning undgås.

Dette førte til at TNO-FEL i 1997 lavede den første rapport (kaldet Zerobase I), som i hovedtræk konkluderede at der ikke var flere ledige frekvenser. TNO er en statslig nederlandsk forskningsinstitution. Denne rapport blev dog forkastet, da der blev udarbejdet andre rapporter både fra den engelske FM-netværksoperatør NTL og fra Broadcast Partners i Holland, som påviste at denne rapport var for konservativ, bla. fordi der ikke var medtaget mulige gevinster ved at anvende (N)SFN-teknikker.

2.2.2 Zerobase II

I 1999 sættes Zerobase II så i gang. Opgaven er den samme som ved Zerobase I, og denne gang er det de to hollandske FM-netværksoperatører Broadcast Partners og Nozema som står for arbejdet. Fordelingen mellem nationale og regionale/lokale netværk er ikke fastlagt. Zerobase II rapporten [*Binnenmarsch et al., 2000*] indeholder 4 scenarier, med forskellig vægtning mellem regionale og nationale netværk. Scenarie 4 vedtages i 2001, som giver 9 nationale FM-netværk til kommerciel radio og 4 til offentlig radio. Kun de offentlige kanaler får 100% dækning. Resten må nøjes med huller rundt omkring, og opnår en dækning på 60-70%.

De tekniske specifikationer og detaljer om frekvensplanlægningen, vil blive gennemgået i et senere afsnit.

2.3 Resumé

I Danmark som i Nederlandene, er den private radiosektor ikke opstået på grund af politiske ønsker, men på trods af dem. I begge lande var udgangspunktet frekvensplaner, som var skabt til noget andet end det de reelt blev brugt til. Den første undtagelse i Danmark var salget af den 5. og 6. kanal, som i sagens natur ville være kommercielle. Den næste undtagelse bliver så replanlægningen. I begge lande har processen frem til vedtagelsen af replanlægningen, været meget lang og kompliceret, og først og fremmest har den været styret af politiske og juridiske forhold, men ikke tekniske.

Vedtagelsen af replanlægning i Danmark sker med henvisning til hollandske principper, herunder SFN og NSFN. Der er ikke lavet en tidsplan i forbindelse med vedtagelsen, hvilket gør hele projektet noget usikkert. Usikkerheden består i, om en replanlægning overhovedet vil være relevant på det tidspunkt, hvor den vil kunne komme i luften.

3 Opbygning af FM-sendenet - konventionelt, SFN og NSFN

I dette kapitel introduceres de forskellige måder et FM-netværk kan opbygges på, og udtryk som MPX, SFN og NSFN vil blive forklaret. Desuden gennemgås mere praktiske problemer i forbindelse med opbygning af et FM-netværk, specielt synkronisering af signalet fra flere sendere, hvis de indgår i et (N)SFN-netværk.

3.1 Definitioner

3.1.1 FM-Radio og FM-bånd

For ingeniører og andre som beskæftiger sig med højfrekvenskommunikation, er det normalt ikke nok bare at beskrive et system ved hvilken modulationsform der anvendes. Står man til gengæld i en radio/TV forretning, så betyder FM-radio kun én ting, nemlig en radio som kan modtage et analogt lydsignal på op til 15 kHz i stereo og med RDS, i frekvensbåndet 87.5-108 MHz.

I resten af denne tekst vil vi udelukkende beskæftige os med denne slags FM-radio, og forkortelsen FM vil altså ikke blot betyde frekvensmodulation, men hele denne definition.

3.1.2 Frekvensssving og båndbredde

For FM-radio gælder, at frekvensssvinget for et signal ikke må overstige 75 kHz, og båndbredden som optages af et signal er så den dobbelte, nemlig 150 kHz.

Frekvensmaske og krav til dæmpning af signalet uden for ± 75 kHz kan findes hos ETSI [ETSI 300 384].

En god FM-modtager vil dermed have en IF båndbredde der er lidt større, mellem 150 og 200 kHz, mens dårlige modtagere kan have op til 400 kHz eller mere.

Når man inden for ovenstående definition af FM-radio taler om en senders frekvens, så er det altid carrieren der refereres til, og de 75 kHz der så ligger til hver side er underforstået.

3.1.3 Feltstyrke og signalstyrke

Det elektriske felt har dimensionen V/m, og i FM-radio sammenhænge måles feltet i dB(μ V/m), som skrives dB μ V/m. Det er effektiv-værdien af det elektriske felt i luften.

Når feltstyrken måles, sker det ved hjælp af en antenne, som er tilsluttet en måletuner. På denne måletuner aflæses en signalstyrke. Det er den spænding, som fremkommer på indgangen af måletuneren, og som altså kommer fra antennen. I et elektrisk kredsløb opfattes antennen som en spændingsgenerator med en udgangsmodstand på 75 Ω . Kablet mellem antenne og måleinstrumentet indfører et tab (en modstand mere), og spændingen måles så over belastningen som også er 75 Ω . Signalstyrken måles i dB μ V.

Dermed er den signalstyrke der måles = feltstyrken $\cdot$ en konstant (i dB). Konstanten dækker så over den spændingsdeling der er i kredsløbet, antennens (frekvensafhængige) gain og orientering i forhold til feltets polarisation. Hvad konstanten er, er ikke så vigtigt, da de målinger der bliver lavet altid sammenligner en signalstyrke med en anden signalstyrke. Da konstanten netop kun

er en konstant ved en bestemt frekvens, vil en målt forskel i signalstyrke betyde, at der findes den samme forskel i feltstyrke.

3.1.4 MPX-signalet - stereo og RDS

De første FM-radioer var mono, og stereo blev først indført i 1960'erne. Systemet, som anvendes til transmission af stereo, skulle derfor være bagud-kompatibelt med de eksisterende mono-modtagere.

Et stereopar består af to signaler: Left og Right (L og R). Af dem dannes et andet par: L+R og L!R. Mono-modtagere vil derfor skulle modtage L+R, og ignorere alt andet.

Hvis både L+R og L!R moduleres med 90% af det maksimale frekvensssving, vil mono-radioer stort set modtage det samme signal, som hvis der blev sendt mono. Samtidig udnyttes, at L+R og L!R ikke begge kan være 90% af det maksimale frekvensssving samtidigt. For de fleste stereoprogrammer gælder at $L+R \gg L!R$, og skulle man komme til at sende i modfase, så bliver $L+R \ll L!R$.

Audio level (spændingen) fra L og R vil så hver især skulle være 6 dB lavere end hvis der havde været sendt mono, og disse vil så netop blive så kraftige som det oprindelige monosignal, når de bliver lagt sammen.

Selv den noget urealistiske situation, hvor L og R er ukorrelerede (to forskellige mennesker der taler i munden på hinanden i hver sin kanal), vil der være taget højde for på den måde. L og R er 6 dB lavere end det tilsvarende mono-signal. Da de netop er ukorrelerede, bliver L+R og L!R ikke højere end L og R var, når de bliver lagt sammen. Derfor kommer L+R og L!R så kun til at bruge halvdelen af det frekvensssving der er til rådighed, og da dette var 90% af det fulde frekvensssving, kommer de hver især til kun at brug 45% af frekvenssvinget [Cook & Liff, 1968].

Et MPX-signal er det multiplexede signal, som skal frekvensmoduleres. Det består så af L+R fra 0-15 kHz. Der er ikke gjort mere ved det, end at signalerne er blevet lagt sammen, og inden da er signalerne blevet LP-filtreret, så der ikke er frekvenser over 15 kHz. Hertil lægges L!R, som er blevet DSB-SC moduleret omkring 38 kHz. Da carrieren på 38 kHz ikke sendes med, sendes en pilot-tone på 19 kHz. I modtageren ganges 19 kHz tonen så med 2, og den 38 kHz tone der kommer ud af det, bruges så til at demodulere DSB-SC signalet. L og R kan så igen dannes ud fra L+R og L!R.

RDS er igen en overbygning på den eksisterende standard. Da 19 kHz piloten allerede findes i MPX-signalet, er det logisk at modulere RDS omkring 38 kHz, altså 57 kHz. RDS er en langsom datakanal (QPSK moduleret), som bruges til at identificere stationen og fortælle en mobil radio om alternative frekvenser for det program man lytter til, så modtageren selv kan finde en kraftigere sender med samme program, samt en del andre ting.

Desuden er visse sendere/stereogeneratorer forberedt for, at der kan sendes andre signaler, bla. DARC som så vil være endnu højere i MPX-signalets frekvensbånd.

Så en FM-kanal i Europa består af et frekvensmoduleret MPX-signal, som består af L+R, L!R en pilottone og et RDS-signal. Tilstedeværelsen af pilottonen på 19 kHz forklarer i øvrigt hvorfor båndbredden på det analoge audiosignal aldrig kan blive højere end ca. 15 kHz. Hvis man forestillede sig at 15 kHz LP-filtrene i modtageren ikke var der, ville man kunne høre pilottonen.

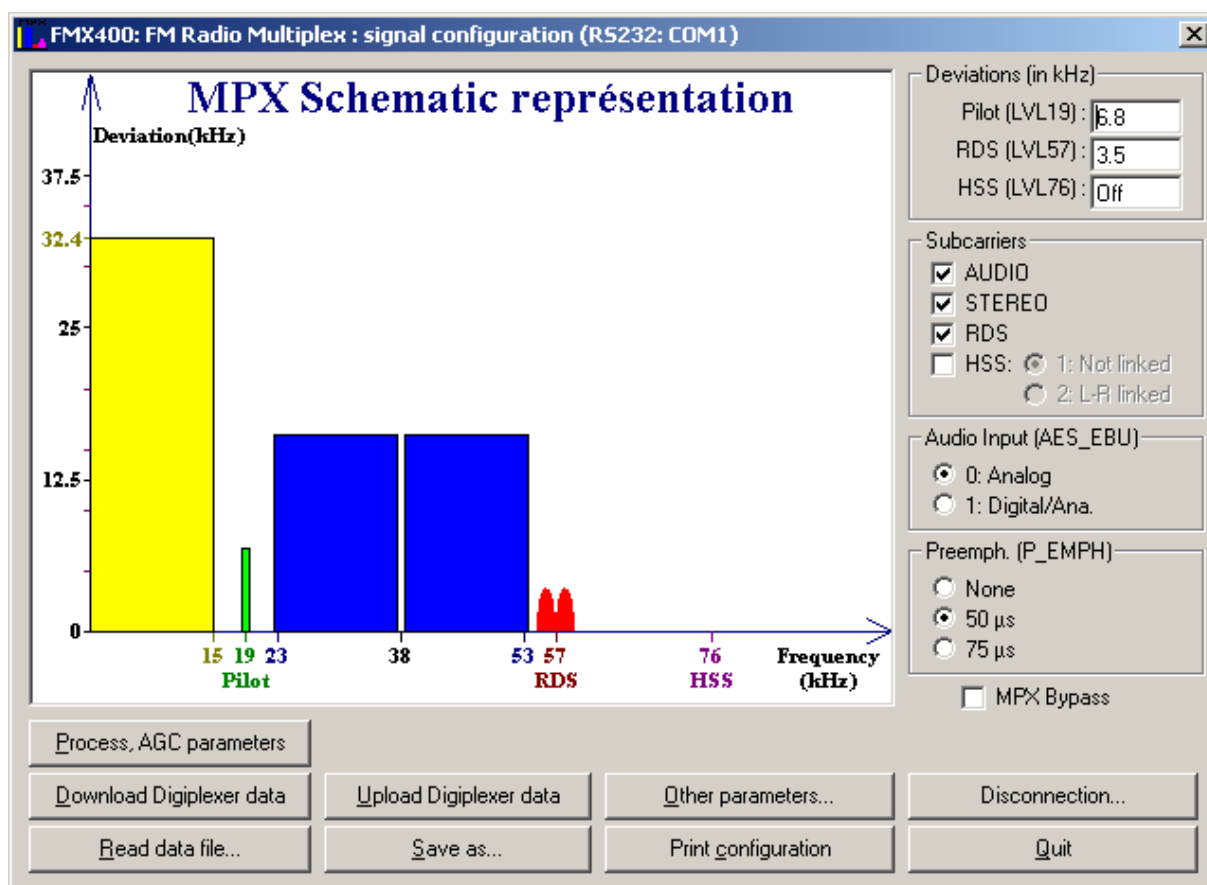
Figur 1 viser et eksempel på opsætningen af en stereo encoder, som genererer et MPX-signal.

Ofte er stereo encoderen ikke en del af selve senderen. Dermed er det muligt for en radiostation med flere sendere, at nøjes med at have én stereo-encoder, som befinder sig på stationen, og herfra distribueres så det færdige MPX-signal, enten med microbølgelink eller digitalt gennem en 2 Mbit E1 forbindelse, ud til senderne. Ofte vil stereo encoderen (og evt. RDS-encoderen) være en del af en digital enhed (en *broadcast processor*), som reducerer dynamikken og tilfører loudness til programmet. Det er også broadcast processoren som sørger for at audio level holdes under en bestemt værdi, da en overskridelse vil medføre overmodulation (for stort frekvens-sving). Som lytter vil man kunne erfare, at den samme sang lyder forskelligt på to forskellige stationer. Denne forskel skyldes i al væsentlighed valget af broadcast processor og indstillingen af den.

3.1.5 Forbetoning

Af støjensyn sendes audiosignalerne igennem et forbetoningskredsløb, som hæver de høje frekvenser. Dette kredsløb er et RC-kredsløb, med en tidskonstant på 50 μ s (i USA er dette 75 μ s) [Laverghetta, 1991].

Dette foregår også i stereo encoderen, og som det fremgår af figur 1, er der valgt 50 μ s.



Figur 1 MPX-signal. X-aksen viser frekvens-spekteret i MPX-signalet, y-aksen viser det frekvens-sving dette signal antages at ville bidrage med (disse skal ikke tages alt for højtideligt, og afhænger af kalibrering af stereogenerator og sender). Billedet er fra det program der bruges til at indstille en Aztec FMX-480 stereogenerator og RDS-encoder.

3.2 Konventionelt FM-netværk

Med et konventionelt FM-netværk forstår vi et netværk, som består af flere sendere med hver sin frekvens, og som udsender samme program. Alle FM-net i Danmark i dag, er af denne type. Der er ikke nogen form for synkronisering af hverken carrier eller MPX-signal. Som regel er frekvenserne planlagt, så senderne lige så godt kunne have sendt noget forskelligt. Ved planlægningen beskyttes den ønskede sender mod interferens fra uønskede sendere, ved at feltstyrken fra den ønskede sender, skal være et vist antal dB kraftigere end feltstyrkerne fra de uønskede sendere. Mere herom i kap. 4.

3.2.1 RDS til styring af hvilken sender der modtages

Det eneste som gør, at en mobil modtager er i stand til at skifte fra den ene sender til den anden, ofte uden at lytteren hører det, er RDS.

RDS indeholder en tekst lytteren kan se på radioens display, information om hvilken type program der sendes (Talk/Pop music/News osv.), om der sendes trafikinformationer mv. Derudover indeholder signalet også en Program Identifikationskode (PI). Det er en kode på 4 hex-cifre, som er en unik identifikation for det pågældende FM-net. Det vil sige at en radiomodtager må skifte til en anden sender, hvis denne anden sender udsender samme PI. For at modtagerne ikke skal scanne hele frekvensbåndet igennem hele tiden i deres søgen efter en bedre sender, udsendes der også en liste med Alternative Frekvenser (AF). Dermed kan modtagerne nøjes med kun at scanne disse frekvenser.

3.2.2 Synkronisering og distribution

Der stilles ikke andre krav til synkronisering og ens signal, end at en lytter ikke skal kunne bemærke nogen forskel når der skiftes mellem sendere, hverken i lydniveau eller i tidsforsinkelse. Distributionen af programmet til senderne kan ske på mange måder. Til hovedsenderne oftest gennem telenettet eller via satellit, og til mindre sendere ofte med en modtager som lytter til en hovedsender. Denne distributionsform kaldes *ballempfang*. Ballempfang-modtageren er så en FM-radio med en MPX-udgang, som så fødes direkte ind i hjælpesenderen. Denne metode kræver så at der er passende afstand mellem den frekvens der modtages, og den frekvens der sendes på lokalt. Til lokalradio ses også ofte et såkaldt MPX-link, hvor MPX-signalet genereres som det skal være på radiostationen, FM-moduleres på en frekvens omkring 2.3 GHz, sendes ud til senderen med microbølgelink, for her at blive demoduleret til et MPX-signal. Dette MPX-signal sendes så ind i den lokale sender, og udsendes så på en anden frekvens.

3.3 Single Frequency Network (SFN)

Med SFN forstås, at to eller flere sendere sender på samme frekvens, og at deres dækningsområder muligvis overlapper. Hvis dækningsområderne ikke overlapper, er senderne geografisk tættere på hinanden, end beskyttelseskravene ville have tilladt, hvis der var tale om sendere, der ikke udsendte det samme. Det nye ved planlægning af SFN-netværk er tidsforsinkelse og synkronisering af signaler.

Synkronisering kan være af audio-signalet alene, af MPX-signalet (og dermed af audio-signalet), og af carrieren.

3.3.1 Synkronisering af carrieren

Med synkronisering af carrieren forstås synkronisering af den oscillator, som styrer hvilken frekvens der sendes på. Hvis et SFN-net har sendere, hvor disse oscillatorer ikke har nøjagtigt samme frekvens, vil en lille forskel på to oscillator-frekvenser betyde, at interferensen på en modtageposition skiftevis vil være positiv og negativ. Er der fx 100 Hz forskel på de to carrier-frekvenser (svarende til at der er en forskel på ca. 1 PPM), vil signalstyrken hoppe op og ned med måske 20 dB 100 gange i sekundet. Det vil naturligvis give en del problemer for modtagerne.

I princippet må det være muligt at synkronisere disse oscillatorer, således at en stationær modtager ikke vil opleve problemer med interferens.

Dernæst vil fasen skulle afhænge af en nøje afmålt afstand mellem senderne, ned til brøkdele af en bølgelængde. En bølgelængde antages at være 3 m, svarende til 100 MHz.

Hvis modtageren er mobil, vil dens egen bevægelse medføre variationer i interferensen. For at finde de steder hvor der er stor negativ interferens, findes de steder hvor forskellen i afstand til senderne er en halv bølgelængde.

Situationen er skitseret på figur 2.

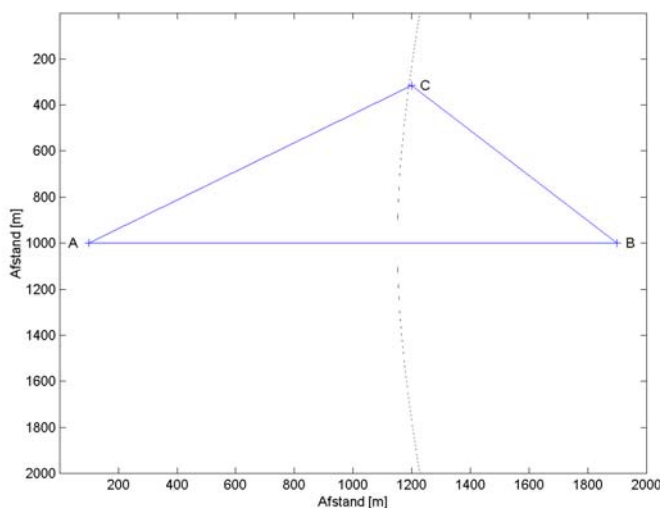
I punkt A og B er en sender, og afstanden $|AB|$ er et helt antal bølgelængder.

Modtageren er i punkt C, og der vil så være max. destruktiv interferens, når:

$$|AC| = |CB| + n\lambda + \lambda/2 \quad (1)$$

- hvor n er et helt tal og λ er bølgelængden.

Den stiplede linje viser så hvor der opstår interferens for den valgte værdi af n . I dette tilfælde er senderne så placeret 1800 m fra hinanden. Dette er naturligvis alt for kort, men den valgte afstand tillader at vise samtlige interferenslinjer mellem de to sendere, som det er gjort på figur 3. Figuren er beregnet i pixels på 101 m, og (1) er så ændret til, at pixlen skal markeres, hvis:



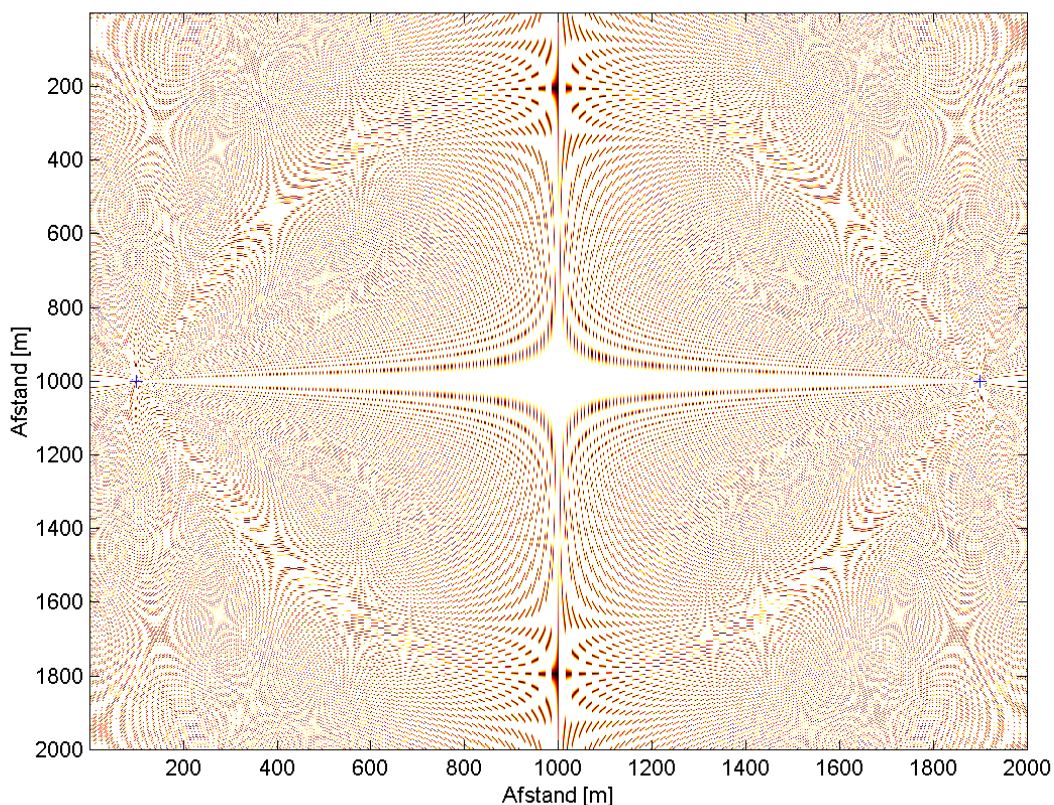
Figur 2 Interferens fra to sendere, $\lambda = 3$ m.

$$|AC| - |BC| - n\lambda - \lambda/2 < g \quad (2)$$

Indførelsen af størrelsen g sikrer at en pixel også bliver markeret, hvis værdien er tæt på 0.

Senderne er markeret med +, og som det kan ses på figuren, bliver der ikke problemer med interferens på en lige linje mellem senderne. Ellers er der interferens stort set alle andre steder. En tilfredsstillende modtagelse med en mobil modtager vil derfor normalt kun kunne lade sig gøre, i de områder hvor den ene sender er dæmpet så meget i forhold til den anden, at det reelt kun er den anden sender der bliver modtaget.

Hvis hastigheden, som modtageren bevæger sig med, er 30 m/s (108 km/h), vil den passere en interferenslinje op til 10 gange/sec. Om det går godt, vil i høj grad afhænge af modtageren.



Figur 3 Interferenslinjer mellem to sendere. Mørke farver viser stor interferens.

Interferensproblemer fordi modtagerne flytter sig, er der ikke noget at gøre ved, andet end at sørge for at undgå dem så vidt muligt, ved at planlægge så de kommer til at befinde sig der, hvor de vil genere færrest muligt. Alternativt ved at indsætte en lille hjælpesender i sådan et område på en anden frekvens. Det kunne fx anvendes til en situation hvor to byer hver har en sender på samme frekvens. På strækningen imellem dem, hvor der forventes interferensproblemer, opsættes en lille sender på en anden frekvens, som hovedsageligt bare skal dække selve strækningen, hvorefter det overlades til modtagerne at finde den bedste frekvens ved hjælp af RDS.

Da det ene interferensproblem ikke lige er til at løse, er det tvivlsomt om det er værd at ofre så meget på at løse det andet. Det vil nemlig være ganske kompliceret at synkronisere sendernes carrierfrekvenser.

Når nu interferensproblemet er det samme, hvad enten det er en modtager der bevæger sig, eller to ikke synkroniserede sendere med en stationær modtager, har vi dermed fået en metode til at studere den interferens der fremkommer ved at modtageren flytter sig, nemlig ved anvendelse af to sendere som ikke er synkroniserede. Mere om det i kap. 5.

3.3.2 Refleksioner, multipath og fading

Figur 3 viser kun hvor forskellen i afstand fra et punkt til to andre er $(n+1/2)\lambda$. Aftagende feltstyrke som funktion af afstanden er ikke regnet med. Havde den været det, ville figuren vise

at interferensproblemerne er størst for punkter med nogenlunde samme afstand til begge sendere.

I den virkelige verden vil refleksioner fra jord, bygninger osv. give noget helt andet. Signalet fra én sender er ikke længere kun én bølge med en amplitude og fase, men mange bølger med forskellige amplituder og faser. Nogen gange vil forskelle i afstande mv. betyde at forskellige ankomsttidspunkter vil medføre en faseforskel, som vil virke som destruktiv interferens. Dette kaldes *multipath* effekt.

Signalet ved modtageren, $V(t)$, kan opfattes som:

$$V(t) = r(t) \cos(\omega t) \quad (3)$$

hvor $r(t)$ er signalets *envelope*, som er fremkommet ved mange additioner af samme signal. Envelopen er fremkommet som kvadratroden af kvadratsummen af en *in-phase* komponent og en *kvadratur*-komponent, som begge er normalfordelte. Samlet giver dette at $r(t)$ bliver Rayleigh-fordelt. Pozar [2001] gennemgår udførligt hvordan sammenlægningen af mange versioner af samme signal, ender med at blive Rayleigh-fordelt.

Multipath giver så en hurtig *fading* af signalet. Ved SFN vil der så være to eller flere sendere, og signalet fra hver sender vil så være udsat for denne fading. Hvis modtageforholdene ikke er så gode i forvejen, kan indførelsen af en ekstra sender i heldige tilfælde medføre en forbedret modtagekvalitet. Normalt må det dog forventes at den i gennemsnit bliver dårligere, da det må forventes at blive meget svært at få god synkronisering under sådanne betingelser.

I begyndelsen af 1990'erne lavede TDC Mobil [Petersen, 1992] nogle forsøg med modtagelse fra en vandret polariseret sender med lodret polariserede modtage-antenner til brug for ERMES (160 MHz). Når det er muligt at modtage noget i sådan en situation, skyldes det netop refleksioner. De anvendte frekvenser er forholdsvis tæt på de frekvenser der anvendes til FM-radio, og derfor kan resultaterne herfra give en indikation af hvad der kan forventes. Som sendeposition blev radio/TV senderen i Gladsaxe anvendt, så sendeforholdene svarer til hvad der anvendes for FM-radio.

For forskellige landskabstyper blev forskellen i *Path Loss* målt, fra (1) horisontal sender til vertikal modtager, i forhold til (2) fra vertikal sender til vertikal modtager. En stor forskel er tegn på et stort signaltab som følge af polarisations-mistilpasning, og dermed på at der ikke er så mange refleksioner til at dreje polarisationen af feltet.

Denne forskel i path loss opgives så som en middelværdi og en spredning. I forhold til SFN må det forventes at mange refleksioner (lille forskel i path loss) og en stor spredning vil give problemer.

Her har bebygget område (*suburban*) en forskel i path loss på 10 ± 10 dB. Denne spredning er den største i undersøgelsen. Den laveste forskel i path loss generelt ses for skov, på 5 ± 5 dB. Storby (København) har en path loss forskel på 10 ± 5 dB.

Det må derfor forventes, at noget af det sværeste at frekvensplanlægge et SFN-net til, er bebygget område, hvor højden af bygningerne varierer meget. Her ses en standardafvigelse på 10 dB. At træer og buske skulle reflektere mere end bygninger virker lidt overraskende, men med en path loss forskel på 5 dB, er det åbenbart tilfældet.

Endelig må det forventes at det faste antal bølgelængder mellem senderne varierer noget. Iflg. Broadcast Service Danmark, er det ikke ualmindeligt at en 2-300 m høj mast svajer op til 65 cm.

Hvis to master svajer modsat i forhold til hinanden, bliver det mindre end en halv bølgelængde, men det vil dog bidrage til en noget svingende feltstyrke. Disse variationer vil dog være så langsomme, at det ikke skulle være noget problem for modtagerne, da den situation ikke adskiller sig så meget fra hvad en mobil modtager ellers udsættes for af variationer i feltstyrken, forudsat at denne feltstyrke ellers er høj nok.

3.3.3 Synkronisering af MPX-indholdet

Det er vigtigt at have styr på tidsforsinkelserne i distributionen af audio-signalet og synkronisering af stereo-inkodningen. Hvor synkronisering af carrieren handler om at sikre, at oscillatorerne har nøjagtigt samme frekvens, skal synkronisering af MPX-indholdet sikre, at det signal der moduleres også er det samme på alle sendere samtidigt. Ballempfang vil normalt ikke kunne lade sig gøre, da der skal modtages på samme frekvens som der skal sendes på lokalt. Dette havde ellers været godt til synkronisering af MPX-signalet. Da der kun er tale om analoge trin, er der ingen tidsforsinkelse i sender og modtager, andet end hvad kabellængder mv. bidrager med. Således vil det næsten være muligt at skabe en situation, hvor et MPX-signal som modtages enten via ballempfang eller 2.3 GHz link udsendes igen uden tidsforsinkelse. Helt uden tidsforsinkelse bliver det dog ikke. Hvis sendeantennen fx befinder sig 170m oppe i masten, og modtageantennen er 30m oppe, og selve elektronikken befinder sig på jorden, bliver der 200m antennekabel. Hvis kablet har en velocity factor på 2/3, giver det så en tidsforsinkelse på 1 μ s.

Et MPX-signal består af frekvenser op til ca. 60 kHz.

Korrekt detektering af det DSB-SC modulerede L/R signal, stiller krav til modtagelse af 19 kHz piloten. Problemer med denne detektering vil kunne få modtageren til at slå over i monomodtagelse eller give støj og skrat i lyden [ITU 412].

Her har ITU fundet at problemerne er størst, hvis tidsforsinkelsen er $\frac{2n\%1}{4 \cdot 19\text{kHz}}$, $n = \dots, -1, 0, 1, \dots$ - altså hvis tidsforsinkelsen er 1/4 eller 3/4 af en 19 kHz periode.

1/4 af en 19 kHz periode er 13 μ s, og den maksimale tidsforsinkelse skal altså ligge et stykke under dette for at undgå problemer med stereo-dekodningen.

En så præcis synkronisering vil være ganske kompliceret at lave i praksis. Anvendes digitale linjer til senderne, vil samplingsfrekvensen ofte være 48 kHz. Det giver en samplingstid på 20.8 μ s. Derfor vil brug af digitale enheder kræve en eller anden form for delay-enhed, som anvender en væsentlig højere samplingsfrekvens end 48 kHz, eller en mulighed for at styre linjens D/A converter med en ekstern clock, som så kan synkroniseres med en præcision i størrelsesordenen 1 μ s. Professionelt udstyr har som regel mulighed for at lade dets digitale udgang styre af et lokalt *sync* signal. Dermed skulle det kunne lade sig gøre at få clocket de enkelte samples ud på det rigtige tidspunkt, hvis man ellers kan lave sync signalet præcist nok.

ITU [ITU 412] referer til nogle forsøg, hvor konklusionen for monomodtagelse er, at beskyttelsen ikke behøver at være mere end 2 dB, forudsat at tidsforsinkelsen mellem signalerne er 5 μ sec eller derunder. For stereomodtagelse er kravene dog væsentlig større, og der er ikke lavet forsøg hvor der også er RDS i signalet.

ITU har samlet resultater hvor lyden, der er kommet ud af det, er evalueret efter ITU's *5-scale impairment grade*. Den bruges til lytteforsøg, hvor en lytter vurderer hvor slem en forstyrrelse er. Karakteren 5 gives når en forstyrrelse ikke er hørbar, 4 for hørbar men ikke generende, 3 lettere generende, 2 for generende og 1 for meget generende.

Evalueringsmetoden, hvis resultat er denne karakterskala, anvendes på et lydsignal, som har været udsat for et eller andet, fx forvrængning eller MPEG kompression. Lydprøven sammenlignes med sig selv uden denne forstyrrelse. Forsøget foregår ved, at en forsøgsperson har tre signaler til rådighed, og kan skifte rundt mellem dem, ved at trykke på tre knapper. Det første signal er referencen, og dette signal er kendt (dvs. lytteren ved hvilken knap det er på). Det ene af de to andre signaler er så reference-signalet en gang til og det andet er så det forstyrrede signal. Lytteren ved ikke hvad der er hvad, og der byttes rundt på signalernes placering på en tilfældig måde, hver gang der skal evalueres et nyt lydclip.

De ukendte signaler vurderes så i forhold til referencen, og lytteren giver så en karakter 1-5 til begge ukendte signaler. Poulsen [2001] beskriver metoden, som er baseret på en ITU rekommandation BS.1116-1.

Der er testet med forskellige størrelser tidsforsinkelse, og resultaterne gengives i tabel 1. Tabellen angiver hvor stor beskyttelsesgraden skal være mellem den ønskede og den interfererende sender, som funktion af hvor stort delay der er mellem de to signaler, og alt efter hvor stort støjproblemet må være for lytteren. Tidsforsinkelsen er også omregnet til hvor stor forskellen i afstand mellem senderne må være, hvis det antages, at tidsforsinkelsen udelukkende skyldes sendernes afstand, og ved en bølgeudbredelseshastighed $v_p = c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

Tidsforsinkelse [μ s] Afstand i km	Impairment Grade 3 (lettere generende)	Impairment Grade 4 (hørbart, men ikke generende)
2 μ s (0.6 km)	4 dB	6 dB
5 μ s (1.5 km)	10 dB	12 dB
10 μ s (3 km)	14 dB	16 dB

Tabel 1 Evaluering af lydskvalitet fra SFN-forsøg. Tabellen angiver hvad dæmpningen af en interfererende sender skal være, med en bestemt tidsforsinkelse, hvis lydskvaliteten skal have karakter 3 eller 4. Fra [ITU 412].

Forsøget her er lavet uden RDS. Det er således ikke til at sige, om kravet om modtagelse af RDS vil skærpe kravene til tidsforsinkelse.

3.3.4 SFN i USA

Harris Corporation er et firma, som fremstiller forskelligt broadcast udstyr, bla. sendere. Harris markedsfører også et produkt til synkronisering signaler, SyncroCast™ [Gould & Eu, 1999]. Dette er først og fremmest rettet mod det amerikanske marked, hvor RDS er ret ukendt. Vil en radiostation derfor dække mere end hvad en enkelt sender kan, må man enten satse på at lytterne selv er i stand til at skifte frekvens, eller forlade sig på SFN. Som muligheder angives dækning af en vejstrækning, to nabobyer eller en større by ved hjælp af 3 sendere placeret rundt om byen i forstæderne. Når det sidste overhovedet er interessant, skyldes det, at prisen man skal betale til FCC (*Federal Communications Commission*, som udsteder sendetilladelser), afhænger kraftigt af hvor sendetilladelsen udstedes til. Derfor vil det i visse tilfælde bedre kunne betale sig at købe 3 frekvenser uden om en by, end at købe en frekvens i selve byen.

Her regner man 6 dB som den forskel, der som minimum skal være på de to senderes feltstyrke,

for at der ikke bliver problemer med støj fra den interfererende sender.

Systemet benytter synkronisering af carrieren og MPX-signalet (ved synkronisering af audio og pilot, og dermed genereringen af L + R signalet). Præcisionen opgives til at være $\pm 2 \mu\text{s}$.

Der gives ingen løsninger på, hvad man så kan gøre i de områder hvor der så er mindre end 6 dB's forskel på feltstyrkerne, andet end at man ved justering af tidsforsinkelsen og effekten kan skubbe placeringen af dette overlap-område, så det kommer til at ligge der hvor det generer mindst muligt, fx på en bjergtop eller over en sø.

Som det vil fremgå i afsnit 4.2.1 kan der dog forventes ganske store variationer lokalt inden for et lille område på 100-200 m. Derfor virker udsigterne til at kunne dække en hel by med flere sendere i et SFN-netværk noget optimistiske.

Som det er fremgået, er der heller ikke taget hensyn til RDS i dette forsøg, og forekomsten af RDS vil muligvis forværre situationen for det foreslåede setup. En radio uden RDS, vil i sagens natur blive stående på den frekvens, der nu er valgt. Derfor vil forstyrrelser kun være et problem for radiostationen, hvis de er langvarige eller hyppige nok, til at lytteren finder en anden station. En RDS-radio vil derimod begynde at søge efter alternative frekvenser, en proces som tager adskillige sekunder, og hvor radioen derfor ofte er tavs. I et SFN-net, hvor der ikke er andre frekvenser end den ene, er det eneste man ikke ønsker, at radioen skal begynde på det. Desværre er der ikke så meget at gøre for at undgå det. Selv om AF-listen er tom, fordi der ikke er nogen alternative frekvenser, vil de fleste radioer scanne hele båndet igennem alligevel, hvis modtagelsen bliver for dårlig. En del bilradioer har mulighed for at slå AF-funktionen fra. Den funktion findes dog ofte ganske dybt i en undermenu, som man ikke kan forvente at lytterne kan finde ned til. Desuden vil benyttelse af SFN nogen steder sandsynligvis blive kombineret med andre frekvenser, som er en del af samme netværk, men ikke samme SFN, og som radioen dermed ikke finder, hvis AF-funktionen er slået fra.

3.4 Near Single Frequency Network (NSFN)

Et FM-netværk, hvor der anvendes NSFN, er et konventionelt FM-net, hvor man udnytter at der sendes samme program fra flere sendere, som både er tæt på hinanden geografisk og frekvensmæssigt.

Normalt vil der skulle være en ganske stor geografisk afstand mellem to senderes dækningsområder, før samme frekvens kan genbruges. Hvis forskellen på de to frekvenser er 100 kHz vil denne afstand stadig skulle være ganske stor på grund af de overlappende frekvensbånd. Er afstanden 200 kHz behøver den geografiske afstand ikke længere være så stor, men på grund af ulineariteter og ikke-ideelle filtre i modtagerne, skal der stadig være en vis afstand.

Med NSFN udnytter man, at den forstyrrelse der kommer fra en nabosender i samme netværk, sender det samme program. Dermed vil den støj, som denne nabosender bidrager med, være kraftigst når lydniveauet fra den nærmeste sender også er det. Støjen som skyldes interferens fra en nabosender, vil derfor kunne skjules noget, hvis nabosenderen sender det samme program.

3.4.1 Synkronisering og distribution

Bortset fra synkronisering af carrieren, som ikke længere er aktuel, er synkronisering af MPX- eller audio-signalet stadig aktuelt. Formålet er nu udelukkende at maskere den støj, som en sender med en frekvens 100 kHz fra den ønskede frekvens, vil bidrage med. Derfor er det sandsynligvis nok med synkronisering af audio-signalet, men hvor fasen af piloten ikke behøver at være det.

3.5 Resumé

FM-radio består af et FM-moduleret signal med et frekvenssving på op til 75 kHz. Det signal, som FM-moduleres, er i forvejen et multiplex af to lydkanaler, et RDS-signal og en 19 kHz pilottone. Pilottonens harmoniske bruges til demodulering af stereoinformation og RDS. Dette multiplex kaldes et MPX-signal.

FM-radio er ikke tiltænkt som noget, der kan indgå i et SFN-net, og derfor vil indførelsen af (N)SFN give problemer i forhold til interferens af carrieren og af MPX-signalet. Hvis det lykkes at synkronisere carrieren, så den clock som styrer dens frekvens, bliver nøjagtig ens på alle sendere, vil der stadig være problemer med mobile modtagere, som vil flytte sig igennem skiftende destruktiv og konstruktiv interferens. Dernæst er det relevant at beskæftige sig med synkronisering af MPX-signalet. Ideen her er, at selv om det ikke er muligt at synkronisere carrieren, så bør størrelsen af frekvenssvinget være det samme, uanset hvilken sender der lyttes til. Dermed vil FM-demodulationen måske gå lidt bedre, selv om der er flere interfererende sendere.

4 Modeller til frekvensplanlægning

Frekvensplanlægning til FM-radio og de standarder der bruges til det, består af to dele. Den første del, som gennemgås i afsnit 4.1, handler om udbredelse af bølger i et terræn. Det er en model, som kan bruges til at forudsige en sandsynlighed for at en feltstyrke er større end en vis værdi på et givent sted.

Den anden del, som gennemgås i afsnit 4.2, handler specifikt om FM-radio og beskriver hvor høj feltstyrke, der så skal være for at få en god modtagelse og forhold omkring interferens fra andre sendere.

Her gennemgås både ITU's rekommandation og de beskyttelseskriterier, som blev anvendt ved replanlægningen i Nederlandene.

4.1 Prediktion af feltstyrke

I det følgende vil ITU's metoder til beregning af en modtaget feltstyrke blive gennemgået. Formålet er at kunne beregne hvor stor feltstyrke der vil være et givent sted, ud fra oplysninger som højde af sendere, modtagere og terrænet.

Metoderne kan anvendes til andet end frekvensområdet 87.5 - 108 MHz, ligesom der er metoder til beregning af situationer som typisk ikke vil forekomme for FM-radio, som fx meget lave mastehøjder. Ved den efterfølgende gennemgang lægges der vægt på det, som har betydning for FM-radio. Gennemgangen vil desuden begrænse sig til at omtale geografiske forhold som er relevante for Danmark, så særlige forhold i tilfælde af meget høje sendere (placeret på bjergtoppe) er ikke medtaget.

4.1.1 ITU-R P.370-7 (efterfølgende kaldet ITU 370)

Denne norm stammer tilbage fra 1951, og er blevet revideret 12 gange siden, senest i 1995. Den er nu trukket tilbage, og afløst af ITU-R P.1546-1, omtalt i afsnit 4.1.2.

Det er aftalt i *Genève-aftalen* [ITU Final Acts, 1984] mellem en række lande i ITU, at ITU's prediktionsmodel skal anvendes til planlægning af frekvenser landene imellem.

ITU 370 har været den gældende i 50 år, og den er dermed grundlaget for planlægningen af de fleste frekvenser man kan høre i dag.

Modellen består af en samling kurver som kan bruges til at forudsige en given feltstyrke i dB μ V/m, når flg. oplysninger kendes:

- h_1 [m]: Den *effektive* højde af senderen, i intervallet 37.5 til 1200 m. Den effektive højde beregnes som højden over gennemsnittet af terrænet i retning mod modtageren, i afstand 3-15 km fra senderen. Dermed kan den effektive højde godt blive negativ. Der findes en særlig procedure for det tilfælde, som dog ikke vil blive gennemgået her.

- d [km]: Afstanden mellem sender og modtager

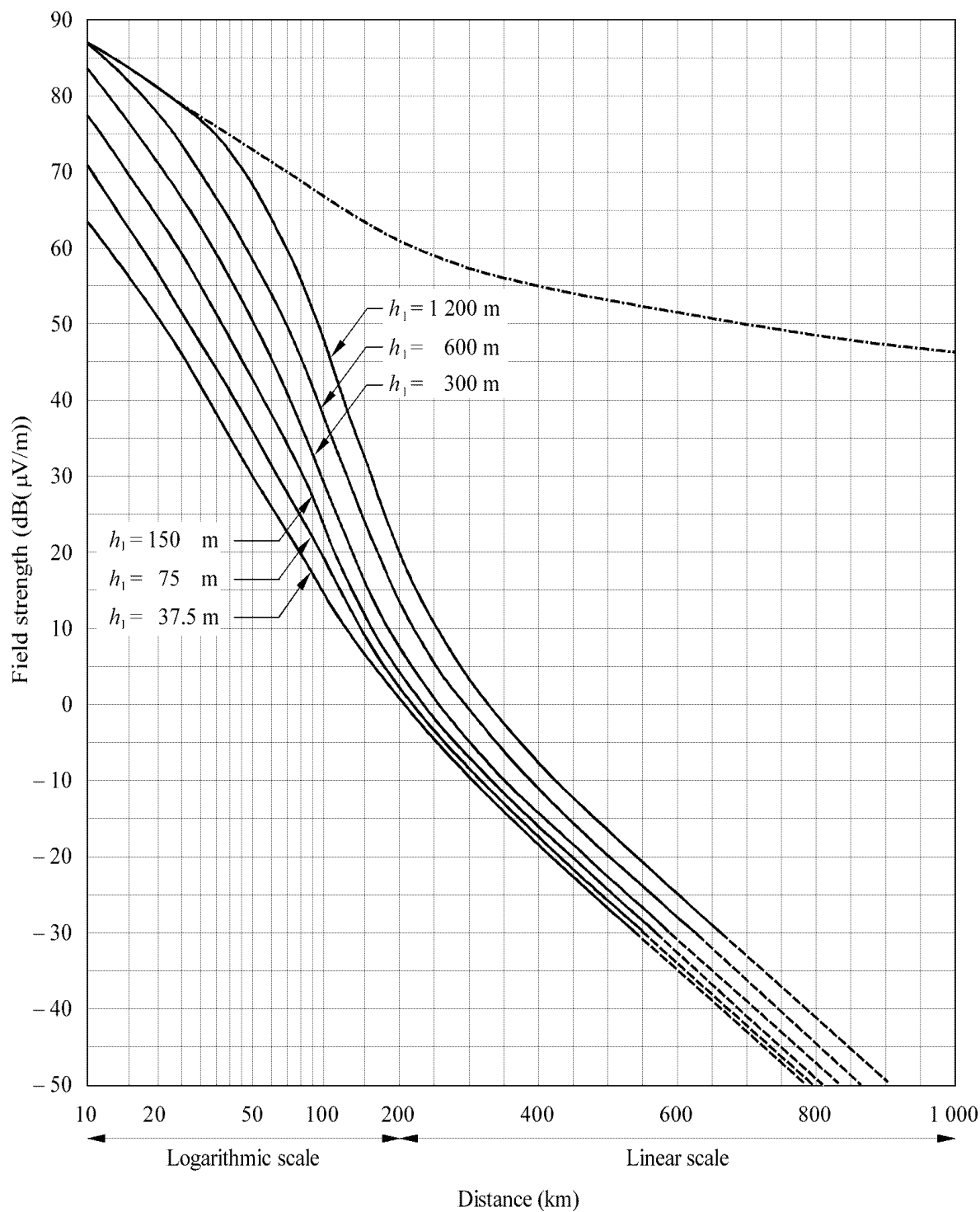
Et eksempel på en kurve findes på figur 4.

Fælles for kurverne gælder:

- det antages at der sendes med 1 kW ERP.

- Modtagehøjden, h_2 er 10 m, men de aflæste værdier kan omregnes til andre modtagehøjder.

Field strength (dB($\mu\text{V/m}$)) for 1 kW e.r.p.



Frequency: 30-250 MHz (Bands I, II and III); land; 50% of the time;
50% of the locations; $h_2 = 10$ m; $\Delta h = 50$ m

Figur 4 Feltstyrke som funktion af afstanden fra senderen. h_1 er sendeantennens effektive højde. Fra [ITU 370]

Der er tale om en statistisk model, som opererer med en stedsandsynlighed og en tidssandsynlighed for en feltstyrke. Opdeles et område i kvadrater på 200x200 m, vil stedsandsynligheden være den del af et kvadrat hvor feltstyrken er større end eller lig med en given værdi. Kurverne anvender en stedsandsynlighed på 50 %. Feltstyrken bliver dermed en medianfeltstyrke for dette område.

Tidssandsynligheden er så den andel af tiden, hvor feltstyrken vil være større eller lig med en given værdi. Der er forskellige kurvesæt, for tidssandsynligheder på hhv. 50%, 10%, 5% og 1%. Tidssandsynligheder på 50% bruges når man skal sikre sig, at et signal kan modtages tilfredsstillende, og de andre tidssandsynligheder bruges når man vil sikre sig at et signal ikke forstyrres.

Der er forskellige kurver, alt efter om der sendes over land eller over vand.

For signalveje over vand, er der forskellige kurver, afhængig af vandets temperatur.

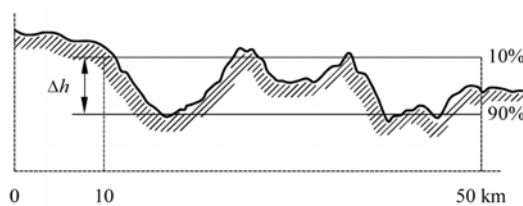
For signalveje over land defineres parameteren Δh som er et mål for hvor store højdevariationer der er i terrænet mellem sender og modtager.

Det kan måske virke lidt forvirrende, at der i samme kurver og formler indgår længdemål i forskellige enheder. Således måles højde i m og længde i km. Denne form er dog anvendt konsekvent i alle relevante ITU publikationer, og vil derfor også blive bibeholdt her.

Beregning af terrænets betydning for feltstyrken

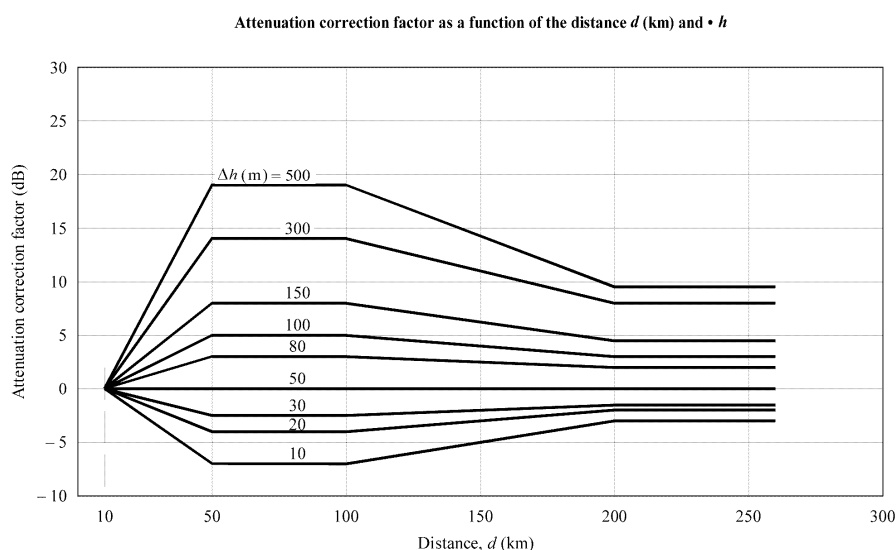
Alt afhængig af hvor gode terrændata der er til rådighed kan dette gøres på to måder. Den letteste, Δh , er forskellen mellem det højeste og laveste punkt i en afstand mellem 10 og 50 km fra senderen, dog således at de højeste 10% og de laveste 10% af terrænet ikke medregnes. Se figur 5.

Med denne Δh aflæses så en dæmpnings-korrektionsfaktor, som funktion af d på figur 6.



Figur 5 Figur til illustration af Δh .
Senderen befinder sig på pos. 0 km.
Fra [ITU 370].

I modsætning til andre korrektionsfaktorer i ITU's standarder, så er dette en dæmpningskorrektionsfaktor. Det vil sige at den skal trækkes fra den feltstyrke der er aflæst på kurven, og således kommer store terrænvariationer til at betyde en lavere feltstyrke, og Δh får størst betydning når d er mellem 50 og 100 km.

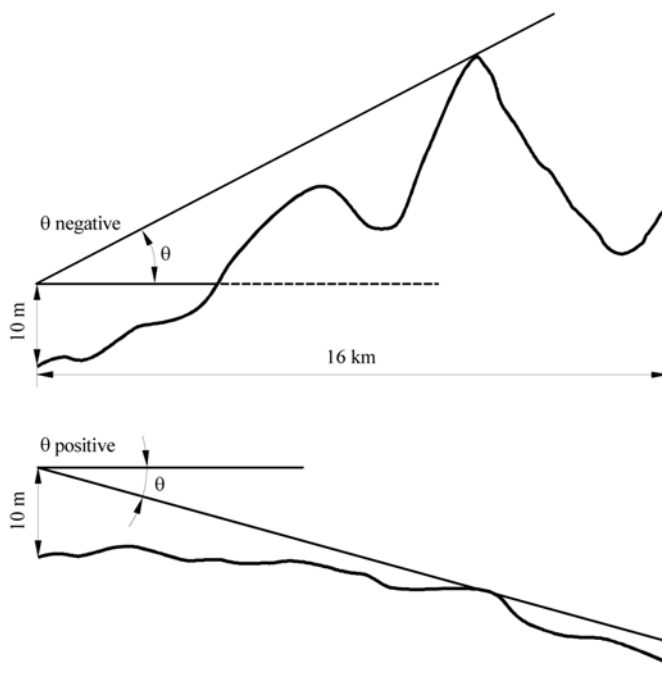


Figur 6 Dæmpningskorrektionsfaktor som funktion af d og Δh .
Fra [ITU 370].

I forbindelse med udarbejdelsen af frekvensplanen i 1984, er der regnet med Δh for Danmark på 50 m, hvilket har betydet at der ikke skulle korrigeres for Δh , jf. figur 6 [Andersen, 1986]. Det har betydet, at en senders rækkevidde er under-estimeret i flade områder som Vestjylland og Lolland, mens den kan være over-estimeret i det bakkede Østjylland.

Hvis oplysningerne om terrænet tillader det, anbefaler ITU at korrektionen med Δh erstattes med *Terrain Clearance Angle*, *TCA*.

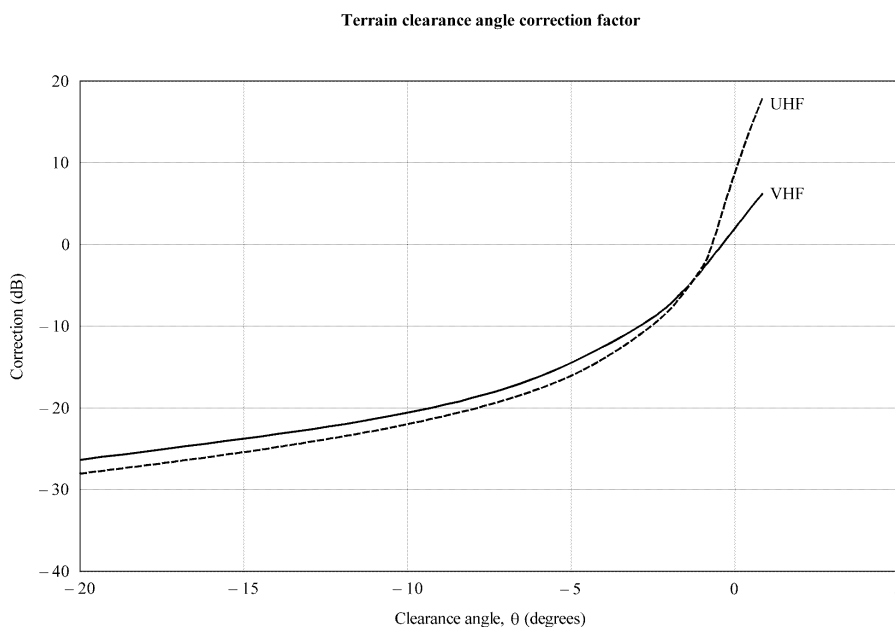
I modsætning til Δh , udgangspunktet er terrænet ved senderen, er det terrænet ved modtageren der anvendes her. For en modtageantennehøjde på 10 m, er vinklen θ den ene vinkel i en retvinklet trekant, hvor den hosliggende vandrette side er 16 km, den modstående side er lodret, og hypotenusen lige præcis ligger over alle terrænvariationer inden for 16 km i vandret afstand. Se figur 7.



Figur 7 Illustration af Terrain Clearance Angle. Fra [ITU 370].

Denne vinkel kan være både positiv og negativ. Bemærk den lidt specielle anvendelse af fortegnet for vinklen θ . Tilsyneladende har ITU også selv fundet dette fortegn så specielt, at man har lavet det om i den næste standard.

Med den fundne θ aflæses så en korrektionsfaktor ved hjælp af VHF-kurven i figur 8, som lægges til den aflæste værdi fra figur 4 (eller en tilsvarende kurve). Dermed vil den modtagne feltstyrke ende med at blive mindre for store negative værdier af θ .



Figur 8 Korrektionsfaktor for Terrain Clearance Angle. Fra [ITU 370].

4.1.2 ITU-R P.1546-1 (efterfølgende kaldet ITU 1546)

Denne er så efterfølgeren til ITU 370. Første udgave er fra 2001, og den er så revideret i 2003. Som forgænger er det en prediktionsmodel til bestemmelse af den modtagne feltstyrke, ud fra afstand til senderen, hvad der ligger imellem osv.

Senderens effektive højde, h_1 , defineres på samme måde som for ITU 370, nemlig som den gennemsnitlige højde af terrænet mellem sender og modtager, 3-15 km fra senderen. Hvis afstanden, d , mellem sender og modtager er kortere end 15 km, defineres den effektive højde som den gennemsnitlige højde over terrænet fra $0.2d$ til d km fra senderen.

Aflæsning af kurverne foregår efter samme princip som for ITU 370, dog er der værdier for afstande ned til 1 km, og lavere effektive sendeantennenhøjder. Til brug for FM-radio findes der nu kurver for 100 MHz. Eksempel på en kurve findes på figur 9.

Der er en del nyt at beregne ved modtageren. Kurverne for signalveje over land angiver en feltstyrke ved modtagelse i en højde, som svarer til *representative clutter*, dvs. at det antages at modtagelsen finder sted lige over de højdevariationer, som huse, træer, broer osv. giver anledning til. Det bliver så reference-højden, R . Denne referencehøjde er 10 m for landlige omgivelser, men er 20 m for byområder og 30 m for tæt bybebyggelse. Ved omregning af modtagehøjden (h_2) fra 10 m til fx 1.5 m, får det altså større betydning om vi er på landet eller i byen. Beregning af ændringen af den modtagne effekt pga. en anden modtagehøjde foregår på flg. måde:

Først beregnes en korrigeret højde af *representative clutter*, R' [m]:

$$R' = \frac{1000d R + 15h_1}{1000d + 15}, \text{ dog kan } R' = R \text{ hvis } h_1 < 6.5d + R. \quad (4)$$

Omregningen af R til R' har altså kun betydning for relativt høje sendemaster og korte afstande fra sender til modtager. Korrektionen beregnes som:

$$\text{Korrektion [dB]} = \begin{matrix} 6.03 - J(v) & \text{for } h_2 < R' \\ K_{h_2} \log(h_2 / R') & \text{for } h_2 \geq R' \text{ eller når der er} \end{matrix} \quad (5)$$

tale om landlige omgivelser.

- hvor:

$$J(v) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v + 0.1)^2 + 1} v + 0.1 \right) \quad (6)$$

$$v = K_v \sqrt{h_{dif} \theta_{clut}} \quad (7)$$

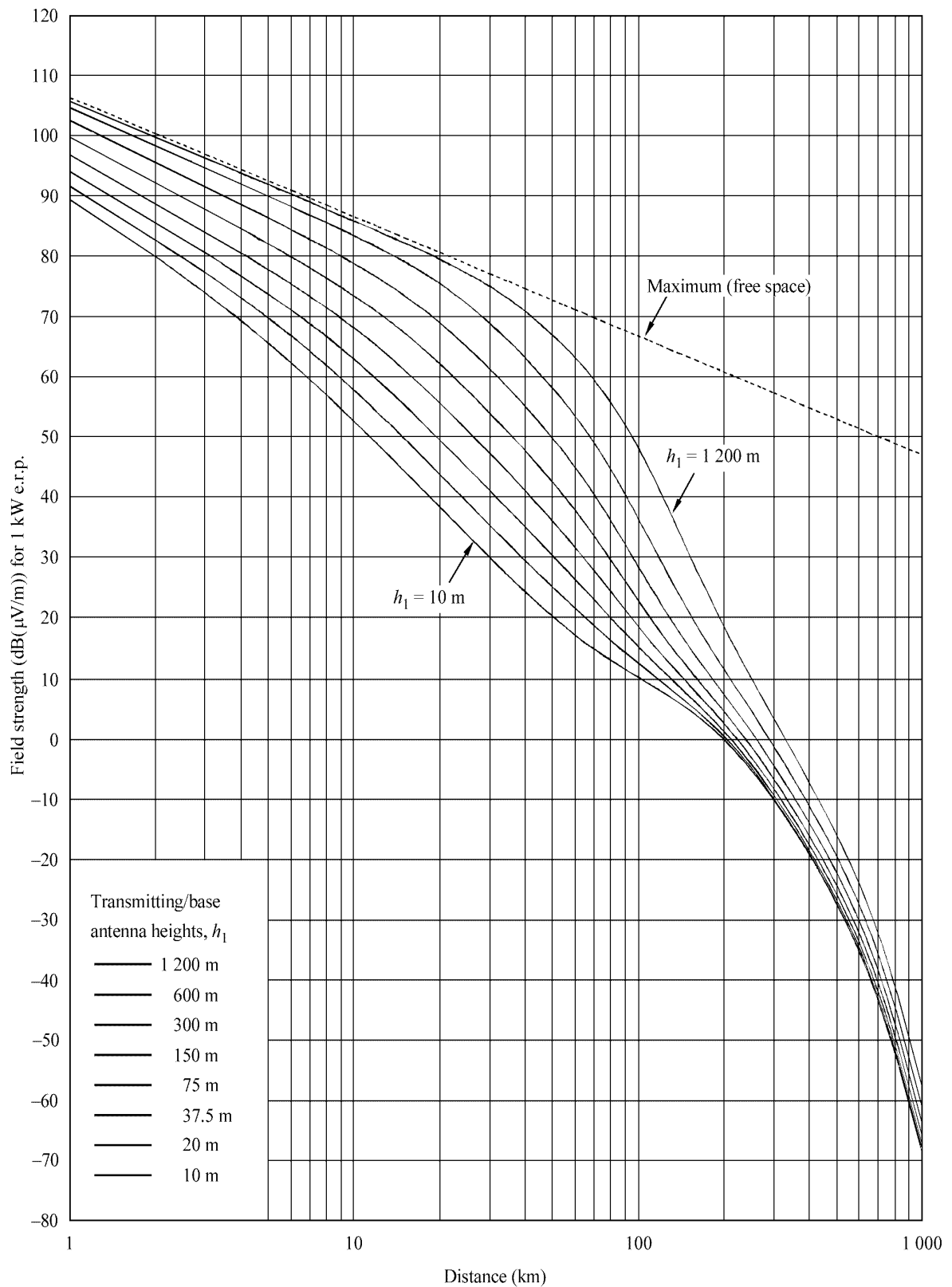
$$h_{dif} = R' - h_2 \quad [\text{m}] \quad (8)$$

$$\theta_{clut} = \arctan(h_{dif} / 27) \quad [\text{grader}] \quad (9)$$

$$K_{h_2} = 3.2 + 6.2 \log(f) \quad f: \text{frekvens [MHz]} \quad (10)$$

$$K_v = 0.0108 \sqrt{f} \quad (11)$$

100 MHz, land path, 50% time



50% of locations

h_2 : representative clutter height

1546-01

Figur 9 Kurve til bestemmelse af modtaget feltstyrke. Fra [ITU 1546]

ITU 412 (omtalt i afsnit 4.2.1), som foreskriver minimums-feltstyrker for at opnå en god modtagelse, anvender reference-højden 10 m. Resultatet af aflæsning af figur 9, giver feltstyrken i R m. Da ITU 412 stadig går ud fra højden 10 m, vil resultatet fra ITU 1546 derfor skulle omregnes til $h_2 = 10$ m, for at resultaterne kan bruges i ITU 412.

Ved brug af disse modtagehøjdekorrektionsformler (og hvis det forudsættes, at $R' = R$) kan det så beregnes, at hvis omgivelserne er "urban" (bymæssig bebyggelse), så skal der trækkes 11 dB fra de værdier der aflæses på kurverne, for at gå fra $R = 20$ m til 10 m.

Hvis omgivelserne er "dense" (tæt og høj bebyggelse), så bliver $R = 30$ m, og der skal så trækkes 16 dB fra, for at få feltstyrken for 10 m.

Ud over kurverne, som den på figur 6, leverer ITU også et sæt formler, så feltstyrkerne kan udregnes på en computer i stedet for at blive aflæst. Senere i denne rapport, er der beregnet en del feltstyrker, og derfor er der lavet en lille toolbox til Matlab, som kan beregne feltstyrken når effekten, h_1 og d kendes, ligesom den omvendte beregning kan udføres, hvor den ønskede feltstyrke er kendt, men d er ukendt. Desuden er modtagehøjdekorrektionsformlerne implementeret. Toolboxen er beskrevet nærmere i bilag 5.

Terrænets indflydelse beregnes med *Terrain Clearance Angle* (TCA). Parameteren Δh som fandtes i ITU 370, findes ikke her. TCA beregnes på samme måde som i ITU 370, bortset fra at den vandrette linje, som vinklen før blev beregnet i forhold til, nu er erstattet af en anden linje, som skal angive vinklen mellem sender og modtager.

Denne vinkel beregnes således:

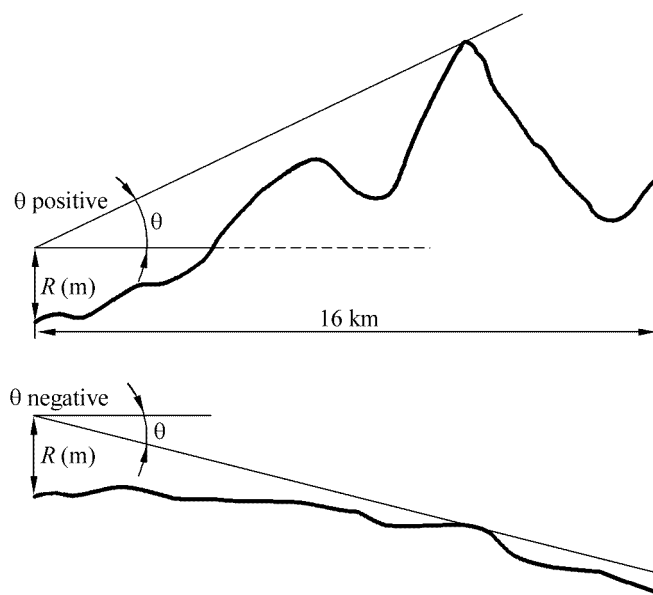
$$\theta_r = \arctan\left(\frac{h_{1s} + h_{2s}}{1000d}\right) \quad (12)$$

- hvor h_{1s} og h_{2s} er højde over hav, af henholdsvis sender og modtager.

Vinklen θ findes som vist på figur 10. Dette er samme procedure som for ITU 370, bortset fra at θ har skiftet fortegn. Desuden er højden ikke længere 10 m, men R m, hvor R så er reference-højden, enten 10, 20 eller 30 m.

Vinklen θ_{tca} , som skal bruges til indsættelse i enten figur eller formel, for at finde den faktor der skal korrigeres med, er så:

$$\theta_{tca} = \theta - \theta_r \quad (13)$$



Figur 10 Illustration af *Terrain Clearance Angle*. Bemærk fortegnsskift ift. figur 7, samt at de 10 m nu er R m. Fra [ITU 1546].

Forestiller man sig den ret almindelige situation, at en bakketop gør at sender og modtager ikke kan se hinanden, og at senderen i øvrigt er højere oppe end modtageren, får vi nu en θ_{tca} som er positiv, men mindre end θ . Korrektionsfaktoren fås så ved at anvende 100 MHz kurven i figur 11.

Det bemærkes at korrektionen bliver 0 for en lille positiv vinkel (men ikke for $\theta_{tca} = 0$). De små

positive vinkler er den typiske situation ved modtagelse, så kurverne som den på figur 9 vil således ikke nødvendigvis skulle korrigeres for TCA, men kun evt. for modtagehøjde.

ITU angiver nu også en formel for beregning af andres sandsynlighed end 50%. Ved hjælp af eksperimentelle studier, er sandsynligheden for at feltstyrken minimum er E (dBμV/m) som funktion af den ønskede stedsandsynlighed q %, fundet som:

$$E(q) = E(\text{median}) + Q_i(q / 100) \sigma_L(f) \quad (14)$$

hvor:

- $E(\text{median})$, så er den medianværdi for feltstyrken som er fundet ved anvendelse af modellen.
- Q_i er den inverse kumulative normalfordeling.
- σ_L er standardafvigelsen, som for FM-radios vedkommende kan antages at være 8.3 dB.

Den mere generelle formel for standardafvigelsen angives som:

$$\sigma_L = K + 1.6 \log(f) \quad (15)$$

- hvor K er 5.1 for analoge broadcast systemer.

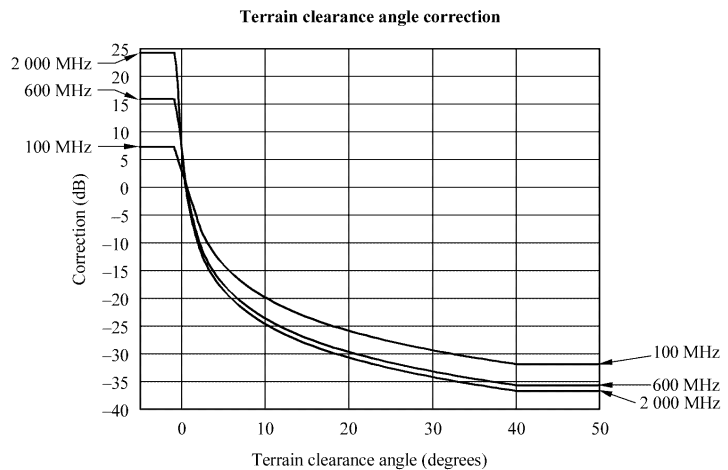
Denne sammenhæng gælder for analog broadcast, hvor modtagelsen ikke sker på eller ved hav eller søer, og for 1% # q # 99 %.

Selve Q_i -fordelingen er angivet på tabelform, og nedenfor er angivet de vigtigste værdier, sammen med hvilken korrektion den medfører af E .

q %	$Q_i(q / 100)$	E korrektion (dB)
1 / 99	+/- 2.327	+/- 19.3
5 / 95	+/- 1.645	+/- 13.6
10 / 90	+/- 1.282	+/- 10.6
25 / 75	+/- 0.674	+/- 5.6

Tabel 2 Korrektion af E som funktion af den ønskede stedprocent.
Fra [ITU 1546].

Denne fordeling bliver relevant, når det skal estimeres hvor store variationer, der kan forventes i feltstyrken fra en sender, når der anvendes en mobil modtager. Det gælder specielt hvis denne sender indgår i et (N)SFN-netværk sammen med en anden sender, og hvor begge sendere evt. ville have været kraftige nok, til begge at kunne blive modtaget på et givent sted.



Figur 11 Figur til bestemmelse af korrektionsfaktor ud fra θ_{tca} Fra [ITU 1546]

Hvis man således ønsker at sikre sig at stedsandsynligheden for modtagelse er 90%, skal der trækkes 10.6 dB fra den fundne E(median) værdi. Ønsker man samtidigt at sikre sig at en forstyrrende sender, som fx kan være en anden sender i samme SFN-netværk, kun har en stedsandsynlighed på 10% skal der så lægges 10.6 dB til dens E(median) værdi. Hvis de to stedsandsynligheder i øvrigt antages at være uafhængige, vil den samlede sandsynlighed for at det går galt (både at den ønskede senders feltstyrke er for lav, samtidig med at den uønskede er for høj) således være 1%.

Antagelsen om at procentsatserne blot kan ganges sammen, bygger på en antagelse om at sandsynlighederne er ukorrelerede.

Da formålet med sådanne sendere er, at de skal placeres forskellige steder, vil signalvejen til modtageren også være vidt forskellig. Dog kan lokale forhold ved modtageren, som fx huller i terrænet gøre at begge sendere bliver svagere samtidigt. Intet taler for at det modsatte skulle være tilfældet - den ene sender vil ikke blive kraftigere fordi den anden bliver svagere. Dermed vil sandsynlighederne være positivt korrelerede, og den samlede sandsynlighed for at det går galt, vil dermed blive lidt mindre. Procentsatsen, som opnås ved at gange de to procentsatser sammen, vil dermed være et konservativt skøn.

4.2 Normer for modtagekvalitet og beskyttelse mod interferens

Hvor modellerne i forrige afsnit bruges til at bestemme, hvor stor feltstyrken bliver under bestemte forudsætninger, handler dette afsnit om, hvor stor feltstyrken skal være for at kunne bruges til FM-radio, og hvor stor en evt. forstyrrende feltstyrke må være.

4.2.1 ITU-R BS.412-9 (ITU 412)

Denne norm stammer tilbage fra 1956, og er blevet revideret 10 gange siden, senest i 1998.

En del af den er skrevet ind i den internationale aftale vedr. en international frekvensplan, som blev underskrevet i Genève i 1984 [ITU Final Acts, 1984].

Den angiver, hvor stor feltstyrken som minimum skal være for at opnå en acceptabel modtagelse, afhængig af hvor tæt bebyggelsen er. Acceptabel modtagelse er defineret som et signal/støj-forhold på 50 dB ved maksimalt frekvensssving.

Feltstyrken angives som den mindste brugbare feltstyrke i dB μ V/m afhængig af området:

	Monomodtagelse	Stereomodtagelse
Rural (landlig)	48	54
Urban (bymæssig)	60	66
Large cities	70	74

Tabel 3 Krav til signalstyrken i dB μ V/m (modtagehøjde: 10m), for at opnå tilfredsstillende modtagelse. Fra [ITU 412].

Den angivne feltstyrke er medianfeltstyrken som skal beregnes ved hjælp af ITU 1546, med anvendelse af modtagehøjde 10 m over terræn. Denne tabel er en af de få ting, som ikke findes i ITU Final Acts [1984]. Her nævnes kun 48 og 54 dB μ V/m, men altså ikke noget om at feltstyrkerne skal være højere for byer og storbyer. Der nævnes ikke noget om hvorfor disse

værdier er udeladt, men muligvis har det ikke været anset for at være et internationalt anliggende.

Alle beregningsmodeller giver en median eller en anden procent-værdi som resultat, med mulighed for at estimere spredningen. Når der planlægges dækning, sker det således altid med en procentsats for tid og sted. For en ønsket sender beregnes således, at en ønsket signalstyrke minimum er opfyldt med en tidssandsynlighed på fx 50 % og en stedsandsynlighed på 50 %. Lige præcis 50% værdierne svarer så til den median man er kommet frem til med modellen.

Dette virker umiddelbart ikke af meget. Hvis sandsynlighederne for at ligge over grænsen er lige så store som for at ligge under, og det antages at tid- og stedsandsynlighederne er ukorrelerede, bliver sandsynligheden for, at begge betingelser er opfyldt kun 25%. Men iflg. ITU 412 er det altså tilstrækkeligt, hvis ellers de beregnede feltstyrker er som i tabel 3 eller højere.

Samme fremgangsmåde anvendes til bestemmelse af feltstyrke fra en uønsket sender. Der skelnes mellem to tilfælde: Konstant interferens og sporadisk interferens, som følge af troposfæriske variationer mv., og hvor beskyttelseskravene er størst ved konstant interferens.

Her anvendes igen en stedsandsynlighed på 50%, og tidssandsynligheden sættes til 50% for konstant interferens og en del lavere, fx 1% eller 5% for troposfærisk interferens.

For konstant interferens er problemet ikke så kompliceret. Feltstyrken fra den ønskede sender skal være x dB kraftigere end det resulterende interferensfelt fra de uønskede sendere. De regnes sammen som angivet i *ITU Final Acts* [1984, annex 2, kap. 4]. Her er tale om en statistisk metode, hvor interfererende sendere betragtes som støjkilder. Fælles for den slags metoder er en grundlæggende antagelse om, at disse støjkilder er ukorrelerede. Hvis de interfererende sendere er en del af samme SFN-system, vil antagelsen om at de er ukorrelerede ikke længere være gyldig.

For troposfærisk interferens, er tidssandsynlighederne forskellige. For den ønskede sender er den stadig 50%, og for den uønskede er den nu 1%, men andre værdier kan også vælges. Det fremgår af *ITU Final Acts* [1984, annex 2, § 2.1.3.1] at det er aftalt, at der skal anvendes 1% til international frekvenskoordinering.

Beskyttelseskravene angives som funktion af afstanden mellem de den ønskede og den uønskede senders carrier frekvenser. Værdierne angives som kurver som vist i figur 12.

For at afgøre om der skal regnes med konstant eller troposfærisk interferens beregnes:

$$E_s = P + E(50,50) + A_s \quad \text{Uønsket felt, konstant interferens} \quad (16)$$

$$E_t = P + E(50,T) + A_t \quad \text{Uønsket felt, troposfærisk (sporadisk) interferens} \quad (17)$$

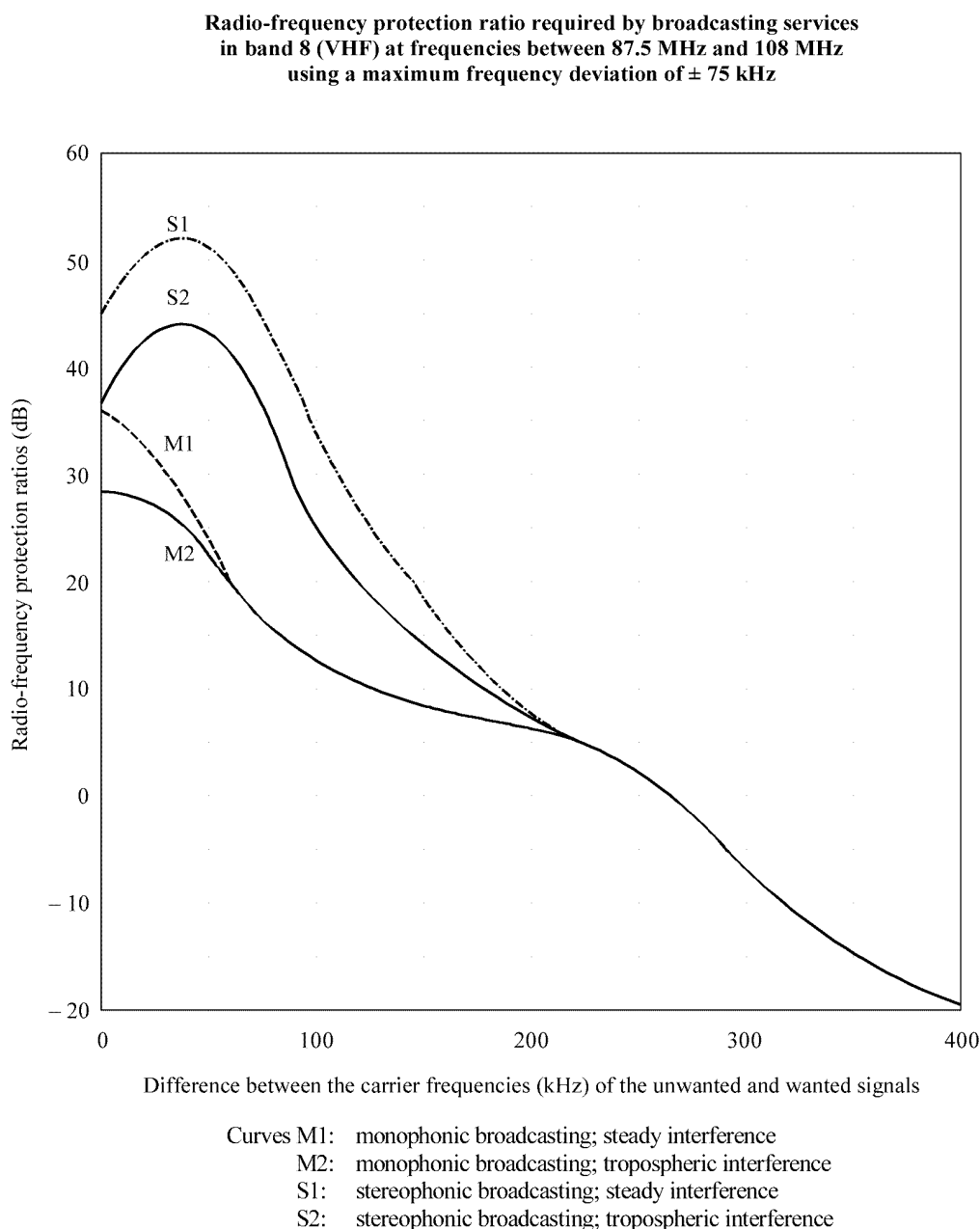
- hvor:

- P er sendeeffekt i dB(1 kW) for den interfererende sender.
- A_s er beskyttelseskravet for konstant interferens, aflæst på figur 12.
- A_t er beskyttelseskravet for troposfærisk interferens, aflæst på figur 12.
- T er den valgte tidssandsynlighed for troposfærisk interferens (fx 1%)
- $E(50,50)$ eller $E(50,T)$ så er den feltstyrke man når frem til ved benyttelse af ITU 1546 eller ITU 370, og hvor udgangspunktet er aflæsning af en kurve med en tidssandsynlighed på 50 eller T , men uden at omregne sendeeffekten, hvis denne ikke er 1 kW.

Om der skal regnes med troposfærisk eller konstant interferens, afgøres af hvilken af de to E_s eller E_t der bliver størst. Beskyttelseskravet A vælges så:

$$A = A_s \text{ hvis } E_s \leq E_p, \text{ ellers er } A = A_i \quad (18)$$

Kurven i figur 12 gælder hvis de to sendere ikke udsender det samme program. Hvis der udsendes samme program, er beskyttelseskravene ikke så høje. ITU refererer til nogle forsøg med SFN, og hvilken sammenhæng der er mellem lyd kvalitet, tidsforsinkelse mellem senderne og beskyttelsesgraden. Dette er omtalt i afsnit 3.3.3, s. 15.



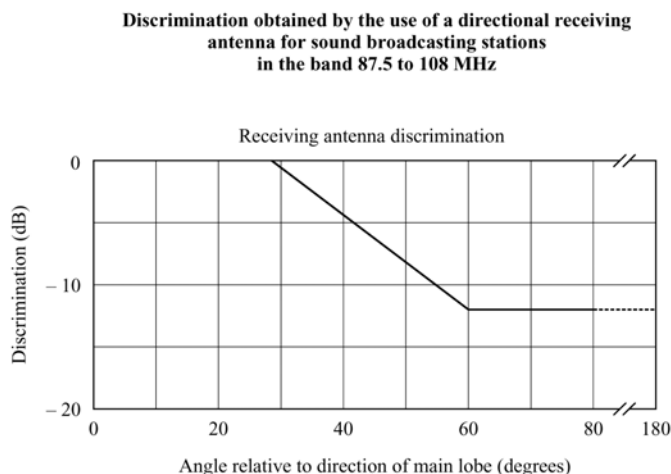
Figur 12 Beskyttelseskrav mod interfererende sendere. Hvis en sender ønskes modtaget et givent sted, og en interfererende senders carrier-frekvens er x kHz større eller mindre end den ønskede senders, skal feltstyrken fra den interfererende sender være y dB lavere end den ønskede sender. Fra [ITU 412]

4.2.2 Genève Final Acts om anvendelse af retningsbestemte antenner

I 1984 afholdtes en europæisk frekvensplanlægningskonference, hvor FM-båndet blev fordelt mellem de europæiske lande. *Andersen [1986]* beskriver hvordan konferencen forløb, og slutdokumentet er så *ITU Final Acts [1984]*. Den beregningsmetode som er anvendt her, er for det meste en afskrift af ITU 370 og 412.

Der er dog tilføjet et par ting, som ikke findes i ITU 370 eller 412, og her er den vigtigste anvendelsen af retningsbestemte antenner til at hjælpe med at diskriminere en uønsket sender fra en ønsket. Udstrålingsdiagrammet kan ses på figur 13. Hvis en uønsket sender ligger i samme retning som den ønskede sender i forhold til modtageren, gør indførelsen af denne antennemodel ingen forskel for, hvor stor dæmpningen af den uønskede sender skal være. Hvis den uønskede sender til gengæld fx befinder sig vinkelret i forhold til den ønskede sender set fra modtageren, betyder det at det antages, at den uønskede sender dæmpes 12 dB i antennen.

Feltstyrken fra den uønskede sender må dermed være 12 dB kraftigere end den ellers havde måttet være.



Figur 13 Antenneudstrålingsdiagram for modtageantenne. Fra [ITU Final Acts, 1984]

Det er tydeligt at denne model er tiltænkt en vandret VHF antenne på et hustag, i en tid hvor antennen pegede mod senderen (for der var kun den samme). Den omstændighed at lytterne gerne vil høre forskellige stationer, som ikke nødvendigvis sender fra samme position, har ikke rigtig været aktuel, da de fleste lande for det meste bare havde stats-radiokanaler, som alle blev sendt fra samme position, og hvor denne position også var sendeposition for VHF TV.

Transistorradioer, bilradioer, clockradioer og radioer med stueantenne diskriminerer slet ikke så meget. Da der nu er langt flere sendepositioner, som man gerne vil kunne stille ind på, er en sådan diskrimination heller ikke længere ønskelig i dag.

4.2.3 Nederlandske normer

Den nederlandske replanlægning er lavet ud fra en norm som er fremstillet til lejligheden. Den findes i rapporten *Binnenmarsch et al., [2000]* fra de to hollandske netværksoperatører Broadcast Partners og Nozema. Normen findes i en oprindelig udgave, og en udvidet norm. Ingen af dem svarer dog nøjagtigt til ITU's normer.

Den oprindelige udgave, er baseret på ITU 370 som udbredelsesmodel, modtagerantennens højde er 10 m, Δh er 10 m, og der regnes ikke med TCA.

Feltstyrkekravene ændres også, som det fremgår af tabel 4.

Som det fremgår, er feltstyrkekravene sat noget ned, og "storby" kategorien findes ikke mere. Desuden indføres også andre interferensbeskyttelseskrav end hvad der står i ITU 412. Disse findes i tabel 5. Efterfølgende kaldes denne norm for TNO-II.

	ITU 412 (10 m)	TNO-II (10 m)	TNO-II (1.5 m)
Rural (landlig)	54 dB μ V/m	50 dB μ V/m	37 dB μ V/m
Urban (bymæssig)	66 dB μ V/m	60 dB μ V/m	47 dB μ V/m
Large cities	70 dB μ V/m	-	-

Tabel 4 Mindste brugbare feltstyrke. Sammenligning mellem ITU 412 ved modtagelse 10 m over terræn, og TNO-II ved modtagelse hhv. 10 og 1.5 m over terræn. TNO normerne er fra Binnenmarsch et al., [2000].

Den udvidede udgave, som efterfølgende vil blive kaldt TNO-II+, er anderledes i forhold til TNO-II på en række punkter. Vigtigst er, at der er indført et ekstra sæt beskyttelsesgrader når der anvendes (N)SFN, som også ses i tabel 5.

	ITU 412 (Stereo)	TNO-II / II+	TNO-II+ (N)SFN
0 kHz - konst. interf. Troposfærisk interf.	45 dB 37 dB	40 dB 32 dB	2 .. 25 dB
100 kHz - konst. interf. Troposfærisk interf.	33 dB 25 dB	30 dB 22 dB	5 dB
200 kHz	7 dB	-2 dB	-5 dB
300 kHz	-7 dB	-15 dB	(-15 dB)
400 kHz	-20 dB	-25 dB	(-25 dB)

Tabel 5 Beskyttelsesgrader for ITU 412, TNO-II / II+ og (N)SFN. ITU 412 svarer til aflæsning fra figur 12, TNO normerne er fra Binnenmarsch et al., [2000]. Alle værdier er ved stereomodtagelse. For 300 kHz og derover er der ikke længere forskel på beskyttelsesgraden mellem TNO med og uden N(SFN).

Desuden anvendes TCA sammen med topografiske og morfologiske data (hvordan er terrænet, og hvad befinder der sig på det) i stedet for Δh .

Fælles for de to er tid- og stedsandsynlighederne, som opgives til 50% sted og 50% tid for en ønsket sender. For en interfererende sender er sandsynlighederne 50% sted og 10% tid i for troposfærisk interferens, og 50% tid for konstant interferens.

Tidssandsynligheden på 10% giver dårligere beskyttelse mod interferens, end 1% som er vedtaget i ITU-regi [ITU Final Acts, 1984].

Det fremgår ikke af Binnenmarsch et. al. [2000] hvordan man er kommet frem til værdierne i tabel 5. Ifølge Gerjo Bruntink, som er medforfatter til rapporten, skyldes noget af det, at TNO's arbejde ikke er blevet udgivet som en standard, eller foreslået til ITU som en ændring af deres standard. Det efterfølgende er derfor baseret på hans udlægning af forløbet.

Der var en generel opfattelse blandt folk i Holland, at ITU normen var forældet på mange punkter. Det gælder modtagehøjden på 10 m, anvendelsen af de retningsbestemte modtageantennener og forbedrede modtagere mht. dæmpning af nabo-stationer. For at finde nogle nye værdier lavede TNO en række forsøg med forskellige modtagere, primært stationære modtagere og bilradioer. Små bærbare lommeradioer blev udelukket fra undersøgelsen, da de er så dårlige, at

de ikke engang vil fungere på ITU's betingelser. Der blev lavet forsøg med 100 forskellige typer radioer, hvor dæmpningen af nabostationer blev undersøgt. Medianen af disse målinger blev en NAD-1600 tuner for de stationære radioer og en Blaupunkt DAB-106 (Hannover) for bilradioerne. Denne blev så brugt til et efterfølgende forsøg, skulle evaluere forstyrrelser efter *1-5 impairment* metoden (omtalt i afsnit 3.3.3, s. 16).

Det resultat blev så brugt til at vælge nogle nye beskyttelsesværdier, og dette blev så TNO-I normen. Det viste sig at bilradioen var for god, så derfor var det kun NAD-tuneren, som blev brugt til at lave normen.

Sådan som fremgangsmåden er gengivet her, kan det virke noget optimistisk at anvende median-radioen til at fastlægge standarden efter. Bortset fra de bærbare lommeradioer og lignende, var de fleste radioers egenskaber dog tæt på denne median.

TNO-I normen adskiller sig fra TNO-II ved kun at omhandle beskyttelse af sendere mod interferens fra andre sendere, som sender noget andet. At beskyttelseskravene ikke nødvendigvis behøver at være så høje, hvis den interfererende sender udsender det samme, som den sender der skal beskyttes, er først medtaget i TNO-II.

Selv om der altså blev indført nye og mindre restriktive beskyttelseskrav, blev konklusionen på dette arbejde, at denne standard blev forkastet, som omtalt i afsnit 2.2.1, s. 6.

Den vigtigste grund var, at man ikke havde undersøgt muligheder for (N)SFN.

Derfor fortsatte *Nozema* og *Broadcast Partners* med at lave forsøg for at finde beskyttelseskrav når der blev anvendt N(SFN) og for situationer, hvor der var mindre end 200 kHz forskel på de to sendere. Dette blev så til normen i tabel 5.

De efterfølgende erfaringer har så vist, at specielt NSFN-planlægningen med 100 kHz afstand mellem nabosenderne ikke er hensigtsmæssig. Årsagen er, at selv meget små forskelle i feltstyrke fra en interfererende sender, medfører meget store forskelle i lydkvaliteten af det modtagne signal. Dermed opstår der problemer hvis den sædvanlige median anvendes uden en form for sikkerhedsfaktorer, eller ekstra dæmpning i dB af en interfererende sender.

Iflg. Gerjo Bruntink, var dette en decideret fejl, som nu er ved at blive ændret så NSFN erstattes af SFN på de steder hvor afstanden geografisk og feltstyrkemæssigt er lille.

4.3 Resumé

Prediktion af en feltstyrke med ITU 1546, består af en kombination af aflæsning af en kurve og beregning af indfaldsvinkel ved modtageren. Som udgangspunkt beregnes 50% tid og sted, men både tidsprocenten og stedprocenten kan omregnes til andre værdier efter formler som er angivet i standarden.

Normerne for sikring af god modtagelse beskriver dels hvor stor feltstyrken skal være alt efter omgivelserne (land/by), samt hvor stor beskyttelsen mod interfererende sendere skal være.

De hollandske principper for replanlægning (TNO-II+ normen), er først og fremmest en nedsættelse af de beskyttelseskrav, som ITU 412 foreskriver, sammen med tilføjelse af beskyttelseskrav for (N)SFN, som ITU 412 ikke foreskriver. TNO-II+ normen nedsætter minimumskravet til feltstyrke og beskyttelsen mod interferens fra andre sendere. Den del af normen, som ikke vedrører (N)SFN, er baseret på en række forsøg, som TNO har foretaget.

5 Forsøg med (N)SFN i statisk opstilling

Vi ønsker at finde begrænsningerne i NSFN og SFN for FM-radio. I dette kapitel vil det blive forsøgt med en prøveopstilling, hvor to sendere sender ind i en combiner som så er tilsluttet til en modtager. Formålet er at finde ud af hvor meget en sender skal være dæmpet i forhold til en anden, før den ikke længere forstyrrer, og hvis den forstyrrer, hvad denne forstyrrelse så består i.

5.1 Forsøgsopstilling

Både sendere og modtager befinder sig på faste positioner, og med en meget veldefineret signalvej imellem sig. Den meget veldefinerede signalvej er nogle antennekabler, som forbinder sendere og modtagere, og som dermed er fri for refleksioner, fading, multipath og alle de andre fænomener fra den virkelige verden, som gør det svært at vide, hvad den præcise årsag er til, at noget opfører sig som det gør.

Dette gøres i praksis ved at anvende almindelige FM-sendere, men i stedet for at tilslutte antenner til RF-udgangen, tilsluttes en dummy-load. De anvendte sendere har alle en monitor-udgang, som er samme signal som på RF-udgangen, men bare dæmpet, fx 60 dB. Denne udgang tilsluttes så til et kabelnet, som så agerer combiner med et andet signal eller interferens-netværk. Dette kabelnet kan også analyseres på en netværksanalyser, og dermed er der fuldstændigt styr på hvad



Figur 14 Forsøgsopstilling. PC'en blev brugt til at optage lyden fra måletuneren. Th. fra oven: USB lydkort til PC, Telefunken 100W sender, 2 Proline SFDx retransmissionstunere, Telefunken 250W sender, CD afspiller med programmateriale, AZTEC RDS & Stereo encoder.

der sker med signalet. Kabelnettet kan så ændres ved indsættelse af dæmpeled, variation af kabellængder, og i de tilfælde hvor to sendere er aktive samtidigt, kan udgangseffekterne varieres på senderne, så situationer med en ønsket og en interfererende sender kan genskabes. Opstillingen kan ses på figur 14.

Navnet statisk betyder derfor ikke, at der ikke laves variationer, men at der ikke er andre variationer i systemet, end dem vi selv vælger, og at det dermed er muligt at reproducere et givent resultat.

5.2 Dæmpning som følge af interferens

Første del af forsøget går ud på, at finde hvor stor dæmpning der kan opnås som følge af interferens i et kabelnet, og om en interferens også medfører problemer med lyden.

I den virkelige verden, vil de fleste signaler komme frem til modtageren ad mange veje. Dette forsøg er en meget simpel udgave af denne verden, nemlig den hvor et signal splittes ud i to kabler, som ikke er lige lange, for derefter at blive samlet igen. Dermed kan længden af kablerne sættes, så forskellen mellem dem er en halv bølgelængde.

Interferensmæssigt, må det værste scenario være, at man netop har to signaler, som er lige kraftige, og hvor det ene ankommer til modtageren med netop en halv bølgelængdes forsinkelse. Er der et tredje signal oven i, som ankommer med en anden forsinkelse end den halve bølgelængde, vil dette signal være det kraftigste, og dermed vil de to signaler, der ankommer med en halv bølgelængdes forskel, ikke længere have den store betydning.

Derfor er tilfældet med to signaler forskudt med en halv bølgelængde interessant, fordi det giver en indikation af, hvor stor en dæmpning af et indkommende signal der kan opnås ved interferens. I teorien ville der slet ikke blive modtaget noget, hvis de to signaler er præcis i modfase.

Signalet der har været anvendt, er et musikprogram med stereomodulation og RDS. Modulationen er tilstræbt at ligne et rigtigt radioprogram så meget som muligt. Det anvendte programmateriale, har således været igennem en processering, med henblik på at forøge loudness.

Dette prøveprogram er indspillet på en CD, og denne CD er så indexeret, så der starter et nyt track, hver gang der starter noget nyt i programmet (dette kan være en ny sang, nyheder, jingler eller reklamer).

Senderen er en Telefunken 250 W sender, som benyttes her hjemme og i udlandet til broadcast. Denne sender er relativt dyr, og her hjemme anvender de fleste lokalradioer også sendere af dårligere kvalitet. Modtageren er en Profline SFDx tuner, som egentlig er en tuner, som bruges til retransmission (ballempfang). Ud over at være retransmissionstuner, er den også udmærket til at lave målinger på det indkomne signal. Den kan vise modtaget signalstyrke i dB μ V, frekvenssving, pilot (i kHz), RDS (i kHz) og RDS BER (*Bit Error Rate* i %). Den sidste kan anvendes som kontrol af, at signalet, som er modtaget, er intakt, og at den dæmpning signalet udsættes for pga. interferens, ikke gør andet ved signalet end at dæmpe det.

Desuden er der blevet lyttet til programmet undervejs.

De anvendte kabler og splitter/combinere, er af lidt blandet herkomst, men alt sammen noget der anvendes i kabel-TV/radio-distributionsnet.

For nærmere detaljer om hvilket udstyr der blev brugt, hvordan det var indstillet og de konkrete målinger, henvises til forsøgsjournalen, bilag 1.

De anvendte kabler har en *velocity factor* på 0.66, og dermed bliver bølgelængden 2 m ved 100

MHz, og den halve bølgelængde bliver dermed 1 m. Netværket blev opbygget så det ene kabel var 1 m længere end det andet. For at måle på varierende længder omkring den halve bølgelængde, blev frekvensen varieret mellem 88 ..108 MHz.

Den største dæmpning der blev målt var 27 dB. Dette var ved 100.0 MHz.
Ved indføjelse af et dæmpeled på 3 eller 6 dB var dæmpningen markant lavere.
Ved indsættelse af et 3 dB dæmpeled var den største dæmpning nu 12 dB.
Ved indsættelse af et 6 dB dæmpeled var den største dæmpning 7 dB.

Den største hurtige ændring i interferens der kan laves med det forhåndenværende udstyr, laves ved at tilslutte eller afbryde den ene af forbindelserne. På måletuneren var det eneste resultat, at den målte signalstyrke ændrede sig, men der kunne ikke høres så meget som et klik på lyden, og RDS BER forblev på 0%.

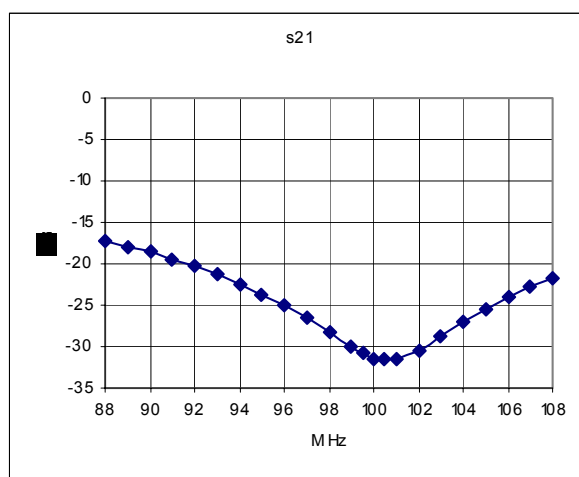
En foreløbig konklusion på disse målinger er således, at hvis der ellers er signalstyrke nok, er interferens ikke noget problem for modtageren. Den største dæmpning opnås når begge signaler er lige kraftige. Er der bare 3 dB's forskel på de to signaler er den maksimale dæmpning væsentligt lavere.

Hvis dette forsøg bliver gentaget i den virkelige verden, må det forventes at den maksimale dæmpning bliver noget mindre i de fleste tilfælde. Der vil altid være mere end to signaler, og dermed vil dæmpningen ikke kunne blive så stor. De 27 dB skal derfor kun ses som en øvre grænse for hvor stor dæmpningen kan blive. Pozar [2001] nævner dog at 20-30 dB's fading er muligt i ekstreme tilfælde, og det stemmer udmærket over ens med resultatet her.

Netværket er målt igennem med den netværks-analyzer. Resultatet ses på figur. 15. Der er anvendt to splitter/combinere. Combineren har et indsætningstab på ca. 1 dB, og splitteren dæmper med 5.5 dB. Resten skyldes at der er negativ interferens i hele det interessante frekvensbånd.

Formålet med at måle med en netværksanalyser var at sikre at der ikke skete noget uventet, og at de komponenter netværket var opbygget af, alle fungerede korrekt.

Denne måling giver ikke anledning til at tro at der skulle være nogen problemer med at lave forsøg hvor en simpel model af virkeligheden opbygges med et kabelnet. Parametrene s_{11} og s_{22} er også målt, og her er heller ikke noget at bemærke. Nærmere detaljer omkring målingen findes i forsøgsjournalen, bilag 1.



Figur 15 Måling af s_{21}

5.3 Forsøg med SFN

Næste forsøg er et forsøg på at lave et SFN-netværk i et kabelnet, og finde ud af hvornår det giver problemer, at der er to sendere, som sender det samme MPX-signal, men hvor carrierne ikke er synkroniserede. MPX-signalet kommer fra samme kilde, men fødes så ind i to uafhængige sendere, som begge er indstillet til 98.0 MHz. Vi må derfor forvente en lille forskel i carrier-frekvensen. Der vil derfor opstå interferens med en frekvens som afhænger af forskellen mellem de to senderes carrier-frekvenser. Ud over at genskabe den situation, hvor to sendere sender med samme carrier men uden synkronisering, bliver denne situation også det tætteste vi kommer på at simulere en modtager, som bevæger sig mellem to sendere, og hvor man hele tiden vil bevæge sig ind og ud af en interferens-bølgedal.

Vi ønsker at vide hvor lille forskellen i signalstyrke fra de to sendere må være, før der kan høres mislyde, samt hvad disse mislyde består i.

For at resultaterne kan blive så præcise som muligt, skal frekvenssvinget justeres, så det er så ens som muligt ud fra de to sendere. Da der er tale om analog elektronik, er det ikke givet, at de to senderes output er det samme, bare fordi inputtet er det. Frekvenssvingets størrelse er en funktion af spændingen på MPX-signalet. Små forskelle i kabler og indgangstrin gav umiddelbart en forskel på 2 kHz i frekvenssving ved modulation med en tone. Ved lidt justering lykkedes det at få samme frekvenssving ud af begge sendere for samme input. Nærmere detaljer om udstyr og indstillingen af det, findes i forsøgsjournalen, bilag 2.

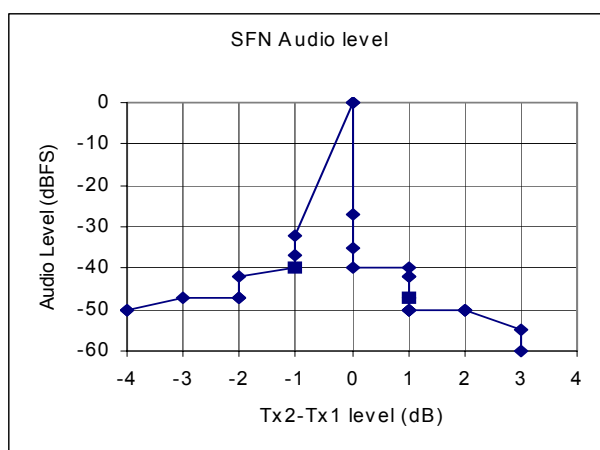
Ved indstilling af sendeeffekterne på samme værdi høres en meget høj og irriterende knitren. Den kunne høres, når der var op til 3 dB's forskel på den modtagne signalstyrke fra de to sendere. For at måle hvor meget forstyrrelsen egentlig var, blev CD'en stoppet, således at der kun blev moduleret stilhed. Frekvenssvinget bestod dermed kun af pilot og RDS.

Støjen, som nu var eneste hørbar lydssignal, kunne herefter aflæses på tunerens indbyggede meter. Den anvendte skala er en dBFS-skala, hvor 0 dB svarer til fuld modulation af et digitalt audiosignal. Ved afspilning af test-CD'en (uden interfererende sender) var det højeste aflæste niveau -5 dBFS.

En aflæst værdi af støjniveauet på - 50 dBFS giver dermed et signal/støjforhold på 45 dB. Det er næsten godt nok til at kunne blive kaldt en acceptabel modtagelse iflg. ITU, som foreskriver et signal/støjforhold på 50 dB [ITU 412].

Kurven med resultater kan ses på figur 16. Sendernes udgangseffekt kan justeres i trin på 1 W. Måletuneren angiver kun signalstyrke som dB μ V uden decimaler. Derfor kommer funktionen til at se sådan ud. Når der blev sendt noget andet end tavshed, var der hørbar problemer når der var 1 dB's forskel eller mindre.

På figuren er to punkter markeret med en . De angiver, hvor forstyrrelserne ikke længere var hørbare, når der blev spillet andet



Figur 16 Støjniveau som funktion af forskellen på de to senderes signalstyrke

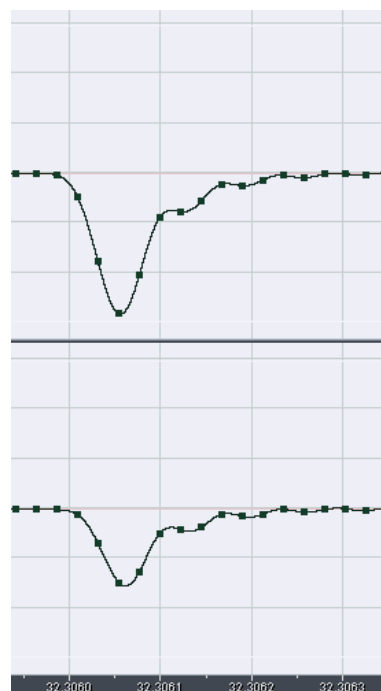
end tavshed. Selv om der er lidt uoverensstemmelse mellem Audio Level værdierne af disse punkter, ligger de begge ud for ± 1 dB.

Desuden ses det, at hvis forskellen i signalstyrke bliver mere end 3-4 dB, så bliver støjen -60 dBFS, og dermed ikke længere målelig eller relevant.

Fænomenet omtales som *capture*-effekten flere steder, bla. af Rohde et. al., [1997]. Denne effekt betyder, at med mindre to signaler på samme frekvens er næsten lige kraftige, vil det kraftigste dominere så meget, at det kun vil være det der bliver detekteret.

Ved nærmere undersøgelse viste det sig, at den knitren der kunne høres, bestod i pulser, som den der ses på figur 17. Disse pulser gentages med en frekvens, som varierer langsomt mellem 10 og 140 pulser/sec.

Cook & Liff [1968] gennemgår forskellige typer støj i FM-systemer, og opdeler disse i *pop*'s og *click*'s, alt efter om støjen får carrierens phasor til at tage en ekstra tur omkring *origo* eller ej. Den gang var det relevant fordi alle modtagere havde manuel tuning, og mistuning var derfor et reelt problem. Pop's har et større indhold af lave frekvenser end click's. Hvis der er tale om et pop, er der blevet indført en periode for meget eller for lidt i carrieren. Resultatet af sådan et tilfælde er en puls, som netop minder om den på figur 17. Det bemærkelsesværdige ved denne puls er, at den kun har negative værdier (hvad de alle sammen har). Og det kan altså genkendes som samme fænomen, som hvis sender og modtager ikke var tunet til helt den samme frekvens.



Figur 17 Et enkelt klik fra støjen fra SFN. Der er 1 sample (44.1 kHz) mellem firkanterne. Skalaen i bunden er sekunder. Venstre kanal er øverst.

Det samme omtales af Rohde et. al., [1997] som *Rice click-noise*. Et *click* her, er en impuls, som forøger faseren med $\pm 2\pi$. Denne click-teori kan så også bruges til at estimere signal/støj forholdet af det demodulerede signal, som funktion af carrier/noise forholdet. I tilfældet SFN er støjen en anden carrier, og dermed kan click-teorien og den kurve der kommer ud af den, ikke sammenlignes direkte med det resultat der er fremkommet ved dette forsøg.

5.3.1 SFN-forsøg med en anden sender

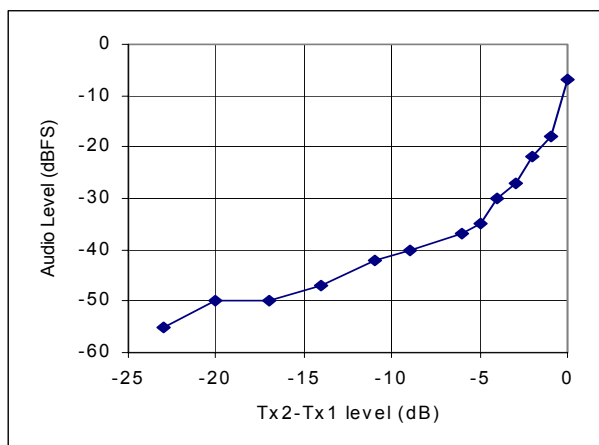
Som en lille kuriositet er dette forsøg gennemført hvor den ene Telefunken sender er skiftet ud med en Crown sender. Denne koster 1/4 af en tilsvarende Telefunken sender, og vil desuden nok aldrig være et "bedst til prisen"-køb. Når denne sender alligevel er lidt interessant, skyldes det dens særlige historie på det danske marked. Da det blev tilladt at hæve sendestyrken for lokalradioer til 160W, var der ingen typegodkendte sendere til formålet. R&TTE-direktivet var ikke trådt i kraft, så man var henvist til den særlige danske typegodkendelse, som Telestyrelsens stod for. Det lagde en stærk dæmper på udvalget, men en af de få sendere der blev typegodkendt, var en Crown FM250 med en max. udgangseffekt på 250W. Typegodkendelsen var betinget af, at der blev monteret en ekstern cirkulator af et bestemt fabrikat på RF-udgangen.

På grund af dens nærmest monopolagtige status i nogle år, befinder der sig ganske mange af den slags sendere rundt omkring. Senderen kan ikke få CE-mærkning, men det er fortsat tilladt at bruge den med den omtalte cirkulator. Desuden forhandles en opgradering til den, så den kan få

et CE-mærke og sende uden cirkulator. - Senderen, der er testet med her, er uden opgradering og CE mærke og uden cirkulator. Formålet med cirkulatoren er at sikre, at reflekteret effekt fra antennesystemet og andre signaler, som modtages fra antennesystemet, ikke giver blandingsprodukter i senderen, som så sendes ud på andre frekvenser. Den slags forstyrrelser vil i værste fald forstyrre en stor del af FM-båndet, ILS (*Instrument Landing System*, et FM-baseret system hvor en automatisk stemme fra en sender ved landingsbanen fortæller piloten om flyets placering i forhold til landingsbanen) og meget andet. Den manglende cirkulator får dog ingen betydning her, da RF-udgangen bare er tilsluttet en dummy load.

Fremgangsmåden er den samme som i forrige forsøg, og resultatet kan ses på figur 18.

Som det ses, forsvinder støjen ikke hvis der er få dB's forskel på signalstyrken fra de to sendere. Det lykkedes faktisk ikke at undgå at høre støjen, inden for de begrænsninger som dummy loads mv. stillede for regulering af effekterne.



Figur 18 Crown vs. Telefunken: Støjniveau som funktion af forskellen på de to senderes signalstyrke.

Støjen her er meget højfrekvent, og helt anderledes at høre på end i forrige tilfælde. Et lille udsnit af den kan ses på figur 19.

Under testen blev et ganske spøjst fænomen opdaget. Støjens frekvens ændrer sig hvis Crown-senderen udsættes for rystelser. Dermed kan der altså være tale om et piezzo-elektrisk fænomen, som påvirker carrierfrekvensen. Nu kan dette være en særlig fejl ved test-eksemplaret, det var trods alt bare en pensioneret sender fra et lager.

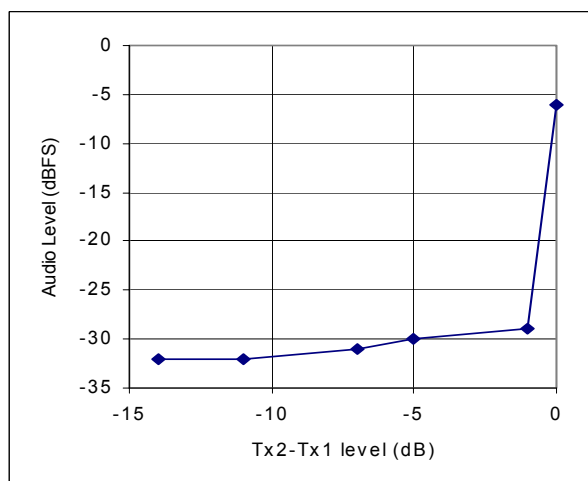
Men ser man bort fra dette særlige fænomen, er konklusionen stadig, at denne sender er totalt uegnet til anvendelse i SFN-net. Der vil derfor ikke blive lavet yderligere forsøg med den.



Figur 19 SFN-støj, når den ene sender er Crown og den anden Telefunken. Lydniveauet her er -20 dBFS, og skalaen for neden er sec.

5.3.2 SFN-forsøg med stationær consumer modtager

Da det er de færreste, som har en radio til over 15.000 kr, som den Profline-tuner der har været anvendt indtil nu, er forsøget gentaget med en almindelig consumer-radio, en Pioneer F-208RDS. Det er en radio til 1-2000 kr., som svarer til hvad man kan finde i et almindeligt stereoanlæg. Indledningsvis bemærkes det, at støjen ud af tuneren, når kun den ene sender var tændt, var -33 dBFS. Da lydniveauet max. blev -5 dBFS, er signal-støjforholdet 28 dB (!). Når begge sendere tændes, optræder der en dyb uregelmæssig tone, på omkring 250 Hz. Denne tone forsvinder ikke, selv om forskellen på de to senderes signalstyrker bliver 14 dB. Dog er der kun ganske lille forskel mellem niveauet af tonen, og den støj tuneren selv producerer, men en tone vil altid være mere hørbar end hvid støj, selv om niveauet er det samme. Støjen som funktion af forskellen i signalstyrke på de to sendere er vist på figur 20.



Figur 20 Støjniveau som funktion af forskellen på de to senderes signalstyrke. Modtager: Pioneer consumer-radio.

Dermed bliver konklusionen at forskellen på sendernes signalstyrke skal være større end 14 dB, hvis en tuner som denne skal kunne modtage et SFN-net, eller også skal carrierne synkroniseres. Helt slemt bliver det dog først når begge sendere er lige kraftige.

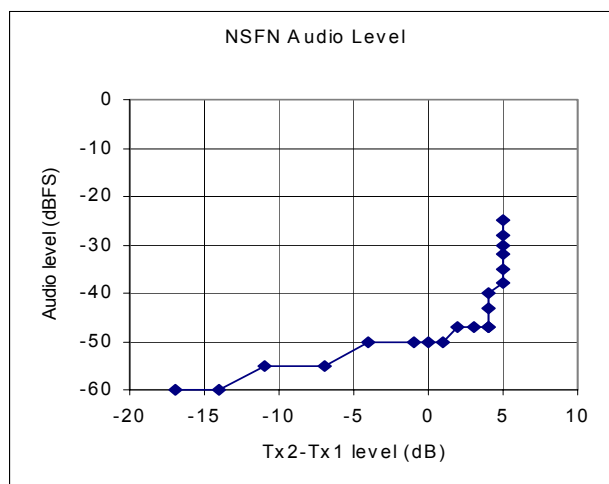
5.4 Forsøg med NSFN

Dette forsøg anvender samme opstilling som det forrige, og formålet er igen at finde ud af hvor kraftig en uønsket sender kan være i forhold til den ønskede, inden der optræder forstyrrelser. Måletuneren er igen Profline. Den ene senders carrier er stadig 98.0 MHz, mens den anden nu sættes til 98.1 MHz. I forrige forsøg var der ikke nogen forskel på de to senderes roller. Begge sendere var lige ønskede, og problemet her var, at de ikke måtte være lige kraftige.

For NSFN er man ovre i den mere almindelige opfattelse at tingene, nemlig at man har en ønsket sender og en uønsket sender.

Forstyrrelsen her lyder mere som en syden end en knitren, til gengæld høres der altid støj inden for de effektværdier forsøget

kunne gennemføres ved. Ved afprøvning med musik, høres en ganske svag støj, når den uønskede sender er 4 dB svagere end den ønskede. Når forskellen bliver mindre end det, høres tydelig skrat på bas og trommer. Denne lyd svarer til hvad man som lytter er udsat for, når man forsøger at modtage en svag station. Forsøgene med at sende stilhed er også gennemført her, og resultatet



Figur 21 Støjniveau som funktion af forskellen på signalstyrken fra den ønskede sender (Tx1) og den uønskede sender (Tx2)

ses på figur 21. Der er dog ikke længere så god overensstemmelse mellem forsøget med stilhed, og når der er musik på. Således ser det ikke ud som om der sker noget i området mellem -4 og +1 dB, hvad der heller ikke gør, når støjen høres alene. Der er dog væsentlig forskel på, hvordan musikken lyder inden for samme interval. Det er faktisk her, at lyden går fra at være med støj - men acceptabel og uden andre problemer, til at være med tydelig hørbar støj og knas på tale og musik.

En forklaring på dette skal nok søges i den måde et FM-signal demoduleres.

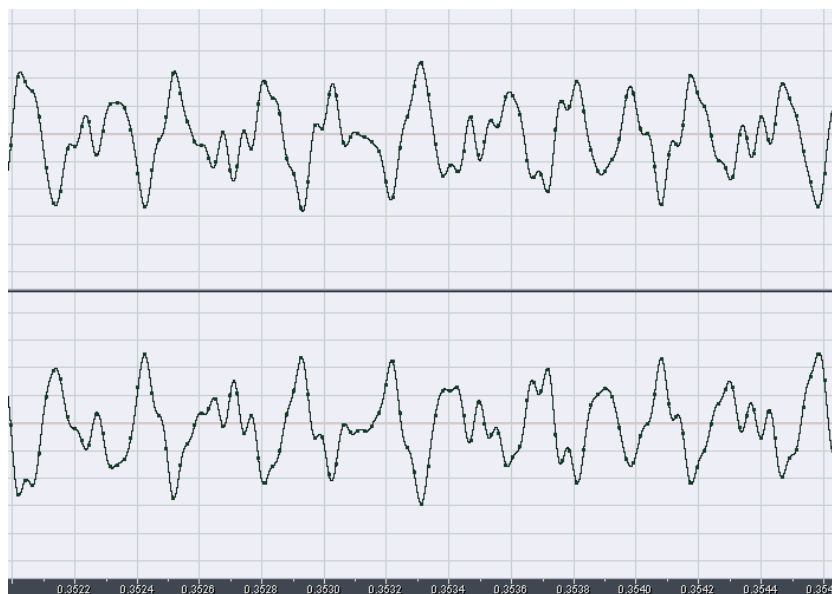
Hvis der sendes stilhed, vil der være to carriere med 100 kHz afstand, og ikke noget imellem. Dermed tester vi kun tunerens evne til at låse til den ene carrier. Frekvenssvinget er dog ikke helt 0. Der er stadig pilot og RDS, og disse giver tilsammen et frekvenssving på omkring 10 kHz.

Hvis den ønskede carrier er 98.0 MHz og frekvenssvinget max. er 75 kHz, betyder det at den højeste frekvens, dette signal kan indeholde er 98.075 MHz. Ligger der så en carrier på 98.1 MHz med pilot og RDS, som giver et frekvenssving på 10 kHz, vil den laveste frekvens dette signal kan indeholde være 98.090 MHz. Dermed er det lige præcis uden for det frekvensbånd, som en modtager indstillet på 98.0 MHz vil skulle demodulere. Dermed afhænger resultatet i høj grad af kvaliteten af filtre og ulineære enheder i modtageren.

Hvis der til gengæld er det samme program på begge sendere, vil begge sendere have et frekvenssving på 75 kHz, og dermed vil der være et overlap mellem 98.025 og 98.075 MHz. Det forklarer så hvorfor resultatet med at sende stilhed tilsyneladende ser så relativt pænt ud, men samtidig lyder skrækkeligt så snart der sendes noget andet end stilhed.

Dette viser så også en central forskel på SFN og NSFN. Hvor SFN ikke kræver gode filtre i modtagerne, gør NSFN det. Da filtrene i måletuneren her er gode, må det forventes at det går værre med en almindelig tuner.

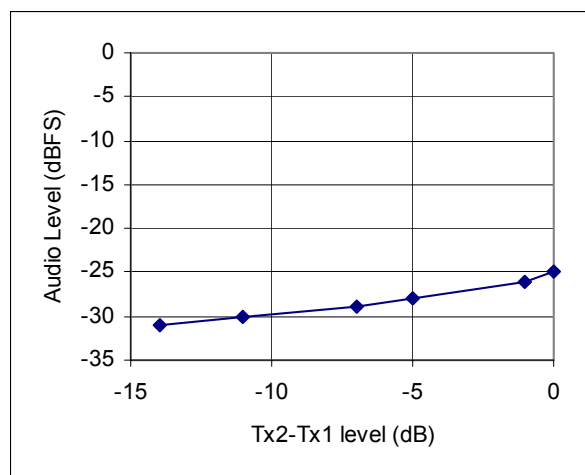
Ser man nærmere på støjen, ligner den mere almindelig støj, end tilfældet var for SFN. Figur 22 viser et lille udsnit af støjen. Uden at det er undersøgt nærmere, ser det ud som om denne har middelværdien 0, og ved aflytning konstateres også, at denne støj overvejende høres i høje frekvenser. Dermed er der ikke tale om pop's som for SFN, men om click's som er kendetegnet ved, at carrieren ikke tager en ekstra tur rundt om *origo*. [Cook & Liff, 1968].



Figur 22 NSFN-støj. Der er zoomet kraftigt i vertikal retning for at kunne se noget, og lydniveauet her er kun -47 dBFS. Øvrige data er som i figur 17.

5.4.1 NSFN-forsøg med stationær consumer modtager

Som ved SFN-forsøget, blev NSFN også afprøvet på Pioneer-tuneren. Resultatet ved tavshed ses på figur 23. Støjen her er en stærkt generende højfrekvent tone, og selv om -31 dB ser lavt ud, er den generende hele tiden, medmindre der spilles så larmende musik, at den ikke kan høres. Som sidst er støjen ved tavshed ikke det værste problem. Når der er fuld modulation, og forskellen på de to senders signalstyrke bliver mindre end 4 dB, begynder lyden at blive fyldt med knas og skrat. Her er ikke den store forskel på denne tuner og Proflin-tuneren.



Figur 23 Støjniveau som funktion af forskellen på signalstyrken fra den ønskede sender (Tx1) og den uønskede sender (Tx2). Modtager: Pioneer tuner.

5.5 Konklusioner

Ud fra de gennemførte forsøg, ser det indtil videre ud som om at SFN er bedre end NSFN.

Ved anvendelse af Proflin-tuneren som modtager, blev signalet perfekt for SFN, når forskellen på sendernes signalstyrke var 4 dB eller derover, men helt ned til 1 dB's forskel giver stadig pænt signal/støjforhold. Når den uønskede sender bliver kraftigere end 1 dB i forhold til den ønskede, går NSFN fra at lyde nogenlunde, til at lyde ganske forfærdeligt, når den uønskede sender er +1 dB i forhold til den ønskede sender.

Ved forsøget med Pioneer-tuneren, var der støj i form af forskellige toner, uanset om der blev anvendt SFN eller NSFN. Disse toner var dog væsentlig mere generende for NSFN end for SFN.

Dermed virker TNO-II+ beskyttelseskravene (tabel 5, s. 31) noget optimistiske, hvilket også er blevet bekræftet af *Gerjo Bruntink* (afsnit 4.2.3, s. 30), som en regulær fejl. Fejlen er først og fremmest, at få dB's øgning af feltstyrken fra den interfererende sender, får lyden til at gå fra god til forfærdelig, når forskellen på de to senders feltstyrke er ca. 5 dB. Men en så pludselig overgang, kan den sædvanlige fremgangsmåde hvor man beregner en medianfeltstyrke, og planlægger direkte efter den, ikke længere bruges. Med 5 dB's beskyttelseskrav, vil lyden altså gå hen og blive forfærdelig halvdelen af stederne, hvor man har beregnet, at denne beskyttelse lige netop er opfyldt med de sædvanlige 50% sted og 1, 10 eller 50% tid.

SFN synes dermed indtil videre at være bedre end NSFN. SFN er testet uden synkronisering af carrieren. Hvis det er muligt, bør synkronisering af carrieren anvendes. Det må forventes, at det vil kunne hjælpe på nogle af støjproblemerne. Det vil ikke løse problemer i forhold til mobile modtagere, som stadig vil opleve problemer med en signalstyrke som hopper op og ned pga. interferens, men en billig stationær modtager vil nok have nemmere ved at modtage et signal som er dæmpet af en konstant interferens, end en varierende. Uanset om der modtages mobilt eller stationært, vil synkronisering af carrierne i hvert fald ikke gøre tingene værre.

6 Forsøg med SFN vest for Roskilde

Efter at have set på SFN i en statisk opstilling, er tiden kommet til et indledende forsøg med SFN i den virkelige verden.

Forsøget er gennemført vest for Roskilde. Den del af Sjælland er ret bakket, og selv uden SFN kan det være ganske svært at få en fornuftig dækning på alle strækninger. Vi ønsker at vide hvor stor en forstyrrelse det giver, at sætte en ekstra sender op på samme frekvens som en allerede eksisterende sender. Målingerne foregår ved at køre den samme strækning igennem, først hvor der kun er tændt for den ene sender, så kun den anden, og så med begge sendere på samme frekvens.

6.1 Positionerne og strækningen

Sendepositionerne og ruten mellem dem ses på figur 24. Ruten er tegnet op med forskellige farver alt efter modtagekvaliteten, som vil blive forklaret nedenfor.

Sendepositionerne kan ses på tabel 6.

Senderne er typiske lokalradiosites, monteret på vognmandsmaster eller mobilmaster.

I Kr. Såby er antennen en 2-stakket lodret polariseret dipol, rettet mod Holbæk. I Viby består antennen af 4 cirkulære antenner (dejkroge), rettet mod Køge. Antennernes max. udstråling går altså væk fra den rute der bliver kørt, som netop går fra den ene sender til den anden. Synkronisering af MPX foregår ved at begge sendere modtager og retransmitterer samme MPX-signal fra en sender inde i Roskilde. Den sender på en anden frekvens og bliver således aldrig en del af SFN-nettet. Tidsforskellen på MPX-signalet fra de to sendere bliver 18 μ s.

Sender-Navn	Højde o.t.	Koordinater.	Afstande
Kr. Såby	40 m	55°38.482 N 11°50.861 E	Til Viby: 17.0 km Til Roskilde: 17.5 km
Viby	40 m	55°33.146 N 12°01.442 E	Til Kr. Såby: 17.0 km Til Roskilde: 12.1 km
Roskilde	40 m	55°38.699 N 12°07.618 E	(hovedsender)

Tabel 6 De involverede positioner og deres indbyrdes afstande



Figur 24 Positionerne Viby og Kr. Såby og ruten mellem dem.



Figur 25 Masten i Viby, med de 4 cirkulære antenner og ballempfang-antennen nederst.



Figur 26 Ruten mellem de to sendere. Farverne angiver kvaliteten. Senderen i Kr. Såby er øverst tv. og senderen i Viby er nederst th. Ved den viste måling blev der kun sendt fra Kr. Såby, med 85 W tilført effekt.

6.2 Målemetode

Der måles med en Audemat FM-MC4. Dette er en måletuner, som bla. er beregnet til mobilt brug. Den kan måle og analysere modulation, RDS mv. Desuden har den mulighed for at tilslutte en GPS-antenne. Alle resultater sendes over i en bærbar PC som er med ude på køreturen. Der er også en audio-udgang, så det er muligt at optage signalet mens man er ude. Med de medfølgende programmer er det så muligt at vende tilbage, og høre hvad der blev optaget på en bestemt position. (Se skærbillede, figur 26.). Den anvendte antenne er en piskantenne, monteret magnetisk på taget af en bil. Bilen kan ses på figur 27 og 28.

Samme strækning er så blevet kørt flere gange, først hvor senderne kun er tændt enkeltvis og siden hvor begge sendere er tændt og evt. med forskellige kombinationer af sendestyrke.

For at evaluere resultaterne, er der defineret en 5-trins skala (se tabel 7). Denne skala er defineret ud fra de optagelser der er lavet, men således at kvaliteten beregnes ud fra de parametre der er målt. På trods af ligheden med 5-trinsskalaen indført på s. 16, er der en række forskelle i den måde skalaen anvendes.

De parametre, der var til rådighed, var RF (modtaget signalstyrke), MPX (frekvensssving), Pilot og RDS. Desuden beregner Audemat'en nogle afledte af disse, bla. *multipath*. Et SFN-interferensproblem må forventes at vise sig som et multipath problem. Audemat har dog ikke

dokumenteret hvorledes denne multipath beregnes, og da netop multipath bliver målt på lidt forskellig måde fra fabrikat til fabrikat, er den ikke velegnet til dette forsøg.

Kvalitet	Farve	Betydning
5	rød	Ingen hørbare problemer
4	gul	Svagt hørbare, ikke generende problemer
3	grøn	Hørbare problemer
2	lys blå	Hørbare og generende problemer
1	mørk blå	Meget generende problemer - dette skruer man væk fra

Tabel 7 Skala til evaluering af lyd kvalitet ud fra det modtagne MPX-signal.

Den mest sigende af parametrene RF, MPX, Pilot og RDS er MPX. I tilfælde af skrattende modtagelse vil denne have en højere værdi end de 75 kHz den ellers må have. I tilfælde af dårlig modtagelse vil RDS og Pilot også have kraftige udsving. Dog vil et udsving fra disse to ikke altid føre til et hørbart problem. Den modtagne signalstyrke RF siger intet om den lyd kvalitet, der ender med at komme ud af det, men kan vi visse tilfælde forklare hvorfor lyd kvaliteten er dårlig.

Derfor er kvalitetsskalaen baseret på MPX-signalet. De enkelte skalatrin er fremkommet ved at justere på parametrene samtidig med at forskellige optagelser blev aflyttet.

Resultatet er en kvalitetsskala, som er subjektiv, men som er den samme for alle målinger, og som er beregnet direkte ud fra frekvenssvinget, således at når dette overskrider 75 kHz, så medfører det en dårligere kvalitet, og hvor dårlig den så bliver, afhænger af hvor stor overskridelsen er.

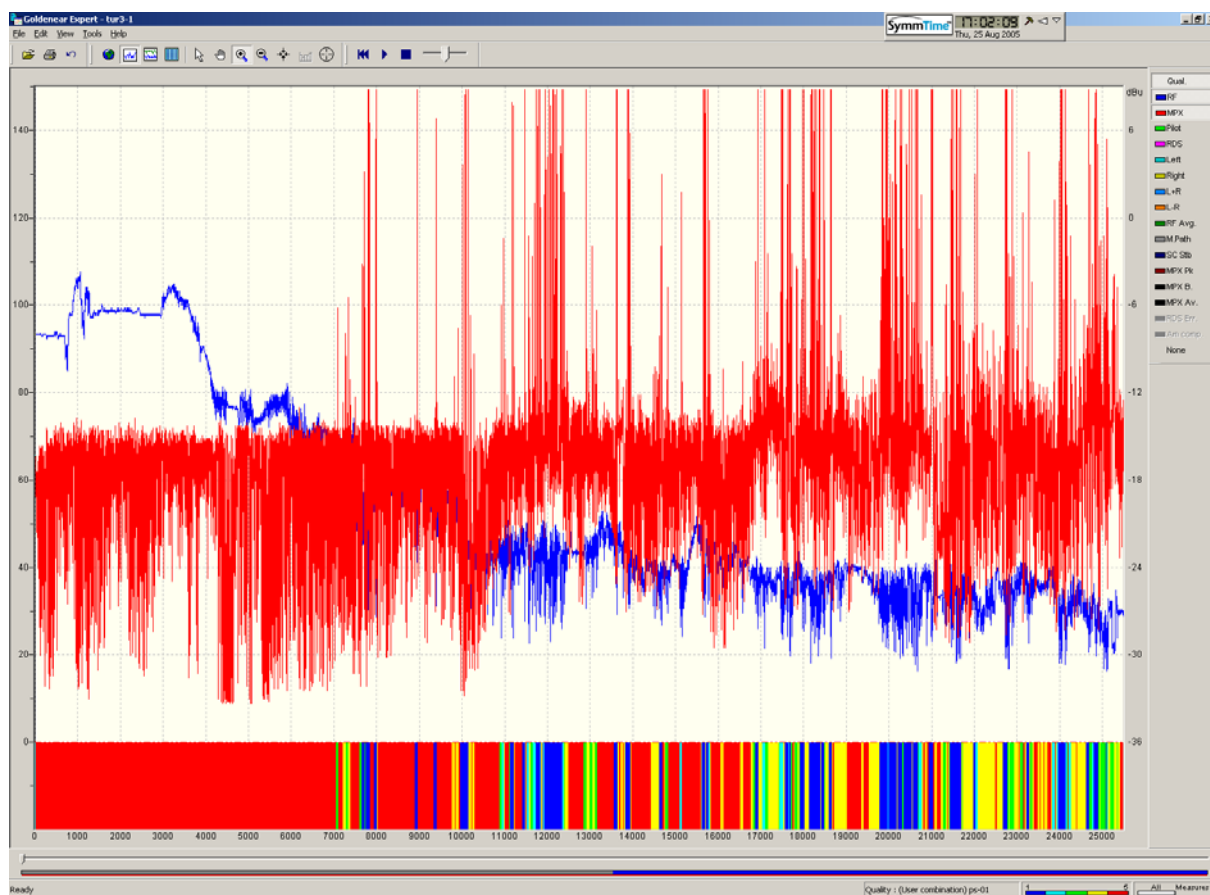
5-trins skalaen anvendes dermed på en væsentlig anden måde, end den var tiltænkt. Ved den oprindelige udgave, afgav lyttepersonen den endelige vurdering. Denne vurdering blev så checket for fejl ved at evalueringen også gjaldt for referencen, men efter at



Figur 27 Klarøring af målebil. 220V skaffes med en switch-mode converter fra batteriet.



Figur 28 Audemat FM-MC4 og PC til dataopsamling.



Figur 29 Signalerne som er målt på ruten fra figur 26. Nederst ses kvaliteten i 5 farver. Den blå kurve er signalstyrken i $\text{dB}\mu\text{V}$ og den røde er frekvenssvinget. Skalaen tv. (y-aksen) er en kombineret frekvenssvingskala [kHz] og signalstyrkeskala [$\text{dB}\mu\text{V}$].

resultaterne var checket, og flere lyttepersoners resultater var behandlet statistisk, så forelå resultatet.

Her bruges 5-trins skalaen til at definere nogle målekriterier, så lyttepersonen dermed ikke længere er nødvendig. Dermed bliver skalaen et udtryk for én persons evne til at sammenholde en vis mængde sus og skrat med et frekvenssving, og beslutte hvilken karakter dette frekvenssving så skal have.

Når det så er gjort, er resultatet ikke længere afhængigt af selve programmateriale eller af variationer i humør og andre ting hos en lytte-test-person. Det er naturligvis en svaghed, at hele skalaen kun er baseret på én persons evaluering af nogle optagelser, og denne persons evne til at relatere dette til et givent frekvenssving og definere skalaen ud fra det. En involvering af mange lytte-eksperter, som hver især skulle have lyttet dagvis af optagelser igennem, ville have været for tidskrævende.

Derfor bør resultaterne ikke bruges til andet, end at sammenligne med andre resultater opnået på samme måde.

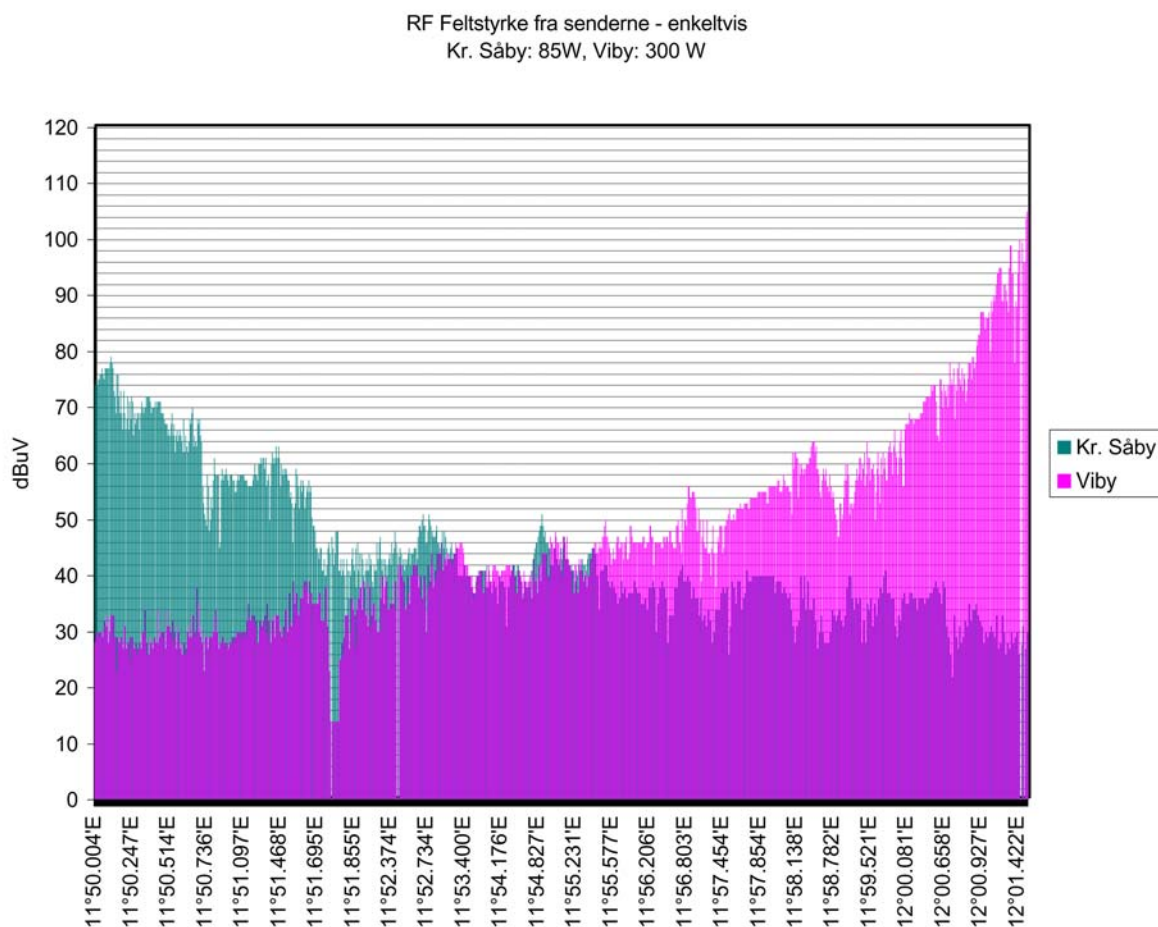
Figur 26 viser måleruten og modtagekvaliteten. Som det kan ses her, er kvaliteten stærkt varierende, og denne rute har også "sorte huller", hvor der vil være modtagelsesproblemer, næsten uanset hvad man gør.

Figur 29 viser det samme signal som er optaget langs ruten fra figur 26. I den første del ses at signalstyrken er over $70 \text{ dB}\mu\text{V}$, og her er frekvenssvinget pænt under 75 kHz . Når signalstyrken så bliver svagere, begynder der så at blive problemer, og her ses så, at frekvenssvinget ikke

længere holder sig under 75 kHz, og dermed bliver kvaliteten også dårligere. Skrat vil vise sig som frekvenssving over 80 kHz, men hvor det skal over 100 kHz før det begynder at genere.

6.3 Måling af lyd kvalitet fra de to sendere hver for sig

For at kunne sammenligne med SFN, er det målt hvor god modtagelsen er fra hver sender. Figur 30 viser signalstyrkerne fra de to sendere - i dette tilfælde sendes der med 85W fra Kr. Såby og med 300W fra Viby. Kurven her er interessant fordi vi forventer problemer med SFN, når signalerne er nogenlunde lige kraftige. Den lyd kvalitet der så kommer ud af det, kan ses på figur 31. Det overrasker ikke, at signalet er godt, når signalstyrken også er det. Desuden



Figur 30 Sammenligning af signalstyrken som funktion af positionen.



Figur 31 Sammenligning af kvaliteten som funktion af positionen (samme x-akse som figur 30).

bemærkes at overgangen mellem kvalitet 5 og 1 sker ganske brat mange steder, og at kvaliteten også kommer ned på 1 selv på steder hvor signalstyrken egentlig burde være høj nok. Dette var dog forventet på denne rute.

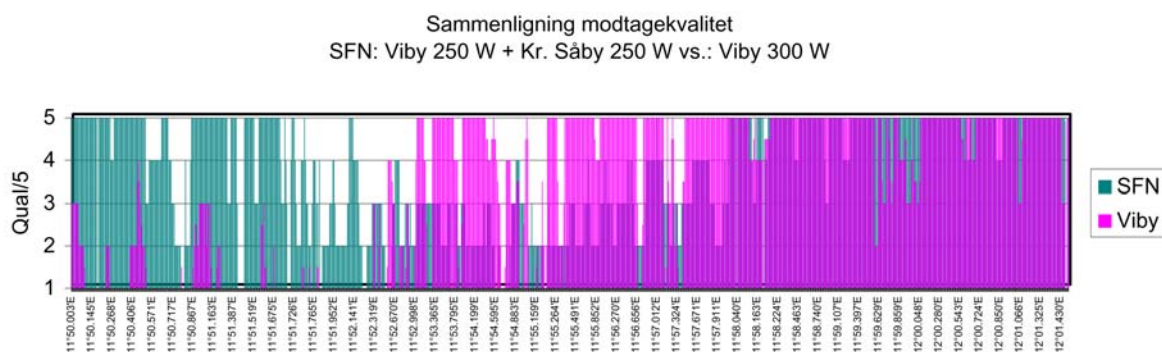
Figurene med disse resultater er temmelig komprimerede som de er vist her. Samme resultater kan ses i bilag 3, hvor figurene er opdelt i 3, og som derfor er vist mere tydeligt.

I en del tilfælde er der flere observationer fra samme position. I så fald anvendes gennemsnittet af observationerne til de videre beregninger. I en del tilfælde er der kun en observation på en given position i den ene af målingerne. I sådanne tilfælde, er der sammenlignet med den nærmeste observation fra den anden måling.

For at simplificere måleresultaterne, er de arrangeret som funktion af længdegraden. Dermed er Kr. Såby målingen på figur 30 og 31 en projektion af måledata fra figur 26 ned på x -aksen. Det som blev vist i farver på figur 26 vises nu som søjler i figur 31. Af figur 26 fremgår det, at sådan en projektion vil give flere værdier for visse x -værdier, fx omkring $12^{\circ}58'E$. For at undgå dette, er visse områder klippet ud af målingerne, så positionen på ruten, kan være entydigt bestemt, alene ved dens længdegrad.

6.4 SFN-forsøg

Vi sammenligner situationen hvor den tilførte effekt fra Viby er 300W med en SFN-situation hvor der også sendes fra Kr. Såby med 250W tilført effekt. Resultatet kan ses på figur 32. Viby kurven kan genkendes fra figur 31. Dog er der små forskelle som skyldes at målepositionerne skal passe sammen. Da positionerne stammer fra to forskellige gennemkørsler, vil der være små forskelle. Positionerne kommer fra to lister, og hvis en position fra den ene liste ikke findes i den anden, så vælges den næste position. Det kan så indføre en positionsfejl på få m, og at visse positioner bliver sprunget over ved den ene sammenligning og ikke ved den anden. Disse forskelle er dog ubetydelige.



Figur 32 Sammenligning af kvaliteten som funktion af positionen

SFN-kvaliteten er god i nærheden af senderne, og mindre god imellem senderne. Det var også forventet, og spørgsmålet er så bare, hvor stor en kvalitetsforringelse indførelsen af sender nr. 2 (i dette tilfælde Kr. Såby) har betydet. Til det bestemmes kvalitetsforskellen som funktion af forskellen i signalstyrke.

Kvalitetsforskellen som funktion af positionen x kan udtrykkes som:

$$Q_d(x) = Q_{\text{SFN}}(x) - Q_1(x) \quad (19)$$

Q_{SFN} er så SFN-kvaliteten når begge sendere er tændt, og Q_1 er kvaliteten af sender 1 alene. Vi ønsker at finde Q_d som funktion af forskellen i signalstyrke fra de to sendere (hver for sig uden SFN). Hvis denne forskel kaldes S_d , så er:

$$S_d = S_1(x) - S_2(x), S_d \geq 0 \quad [\text{dB}] \quad (20)$$

- hvor $S_1(x)$ er signalstyrken fra sender 1 og $S_2(x)$ er signalstyrken fra sender 2 i position x . Bemærk at SFN-signalstyrken ikke indgår her. S_d skal være større end 0 fordi vi kun ønsker at sammenligne SFN-kvaliteten med den kraftigste ikke-SFN-sender. Dermed bliver der kun resultater fra den ene halvdel af ruten, indtil der byttes om på sender 1 og 2, hvilket så skal ske i både (19) og (20).

For en fastholdt værdi af $S_d = d$ (på et bestemt antal dB) findes så den mængde positioner hvor (20) er opfyldt. Kaldes denne mængde S_d bliver:

$$S_d(x) = \{ x \mid S_1(x) - S_2(x) = d \} \quad (21)$$

positioner anvendes så i (19), hvorefter gennemsnittet (og standardafvigelsen) af de værdier af Q_d der så er kommet ud af det kan bestemmes. Kvalitetsforskellen som funktion af signalstyrkeforskellen bliver så:

$$Q_d(d) = \mu(Q_d(S_d(x))) \quad (22)$$

- hvor $\mu()$ angiver at vi tager middelværdien. I stedet for middelværdien kan en række andre statistiske størrelser findes, og her er standardafvigelsen også relevant.

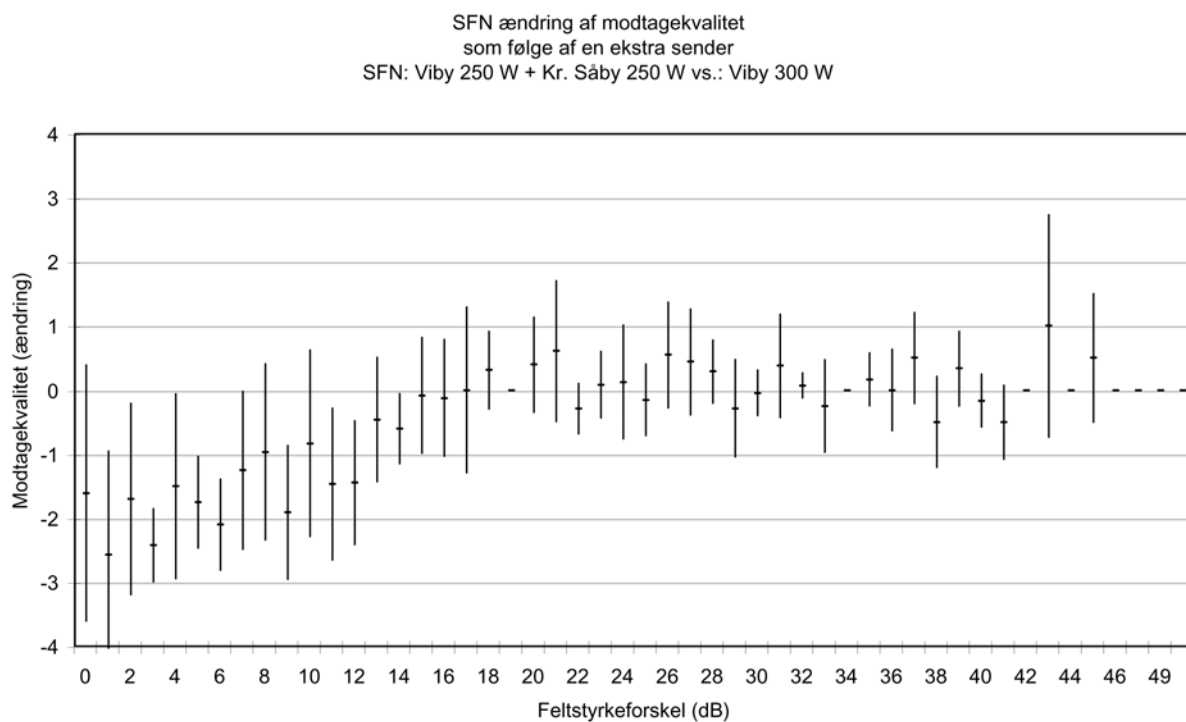
Resultatet af denne analyse kan ses på figur 33. Resultatet her er ganske interessant og bekræfter en del af de forventninger der lå forud for forsøget. Det fremgår at hvis S_d er mindre end ca. 15 dB, så vil SFN betyde en forringelse af den modtagne kvalitet, og at denne forringelse kan se ud som om den afhænger lineært af S_d .

I forhold til forsøgene med den statiske opstilling, var der problemer hvis $S_d \geq 3$ dB. Denne opstilling var også garanteret fri for refleksioner, og derfor overrasker det ikke, når S_d skal være noget større for at undgå problemer ude i den virkelige verden.

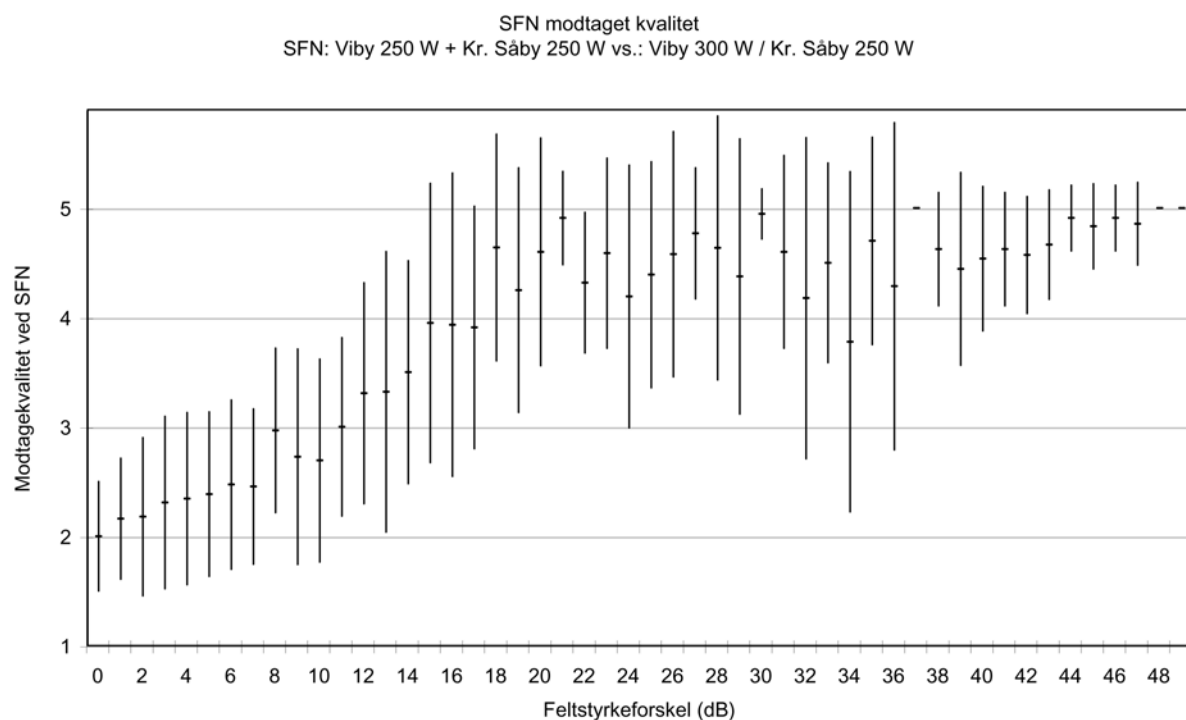
Den samlede lyd kvalitet af hele køreturen blev 3.8 ved SFN, hvor den var 3.2 når der kun var senderen i Viby. Selv om det umiddelbart virker pænt, skal man ikke tage fejl af, at lyd kvaliteten mellem de to sendere blev så dårlig, at ingen lyttere ville blive på frekvensen så længe, i håb om at det blev bedre.

Hvis der skal være god dækning hele vejen kommer man dermed ikke uden om, at skulle anvende en ekstra frekvens og lade radioen skifte til den ved hjælp af RDS.

I forhold til synkronisering af MPX-signalet, skulle tidsforsinkelsen mellem disse to så være 0 μs 5.75 km fra senderen i Kr. Såby. Dermed kunne man forvente et bedre signal lige her på strækningen. Dette rammer dog lige ned i et af de sorte huller på strækningen, og selv om der ser ud til at være et lidt større stykke med god modtagelse på en af SFN-målingerne, end der var når der kun blev sendt fra Kr. Såby, er det ikke muligt at konkludere noget ud fra målingerne her.



Figur 33 Middelværdi $\pm$ standardafvigelse af kvalitetsforskellen mellem én ikke-SFN-sender og to SFN-sendere.



Figur 34 SFN-modtagekvalitet som funktion af forskellen i feltstyrke mellem de to sendere.

Ud over forskellene i kvalitet på ikke-SFN og SFN, er det også interessant bare at se på kvaliteten af SFN, Q_{SFN} . Det er så en modificeret udgave af (22), og forskellen er at (20) ikke beregnes.

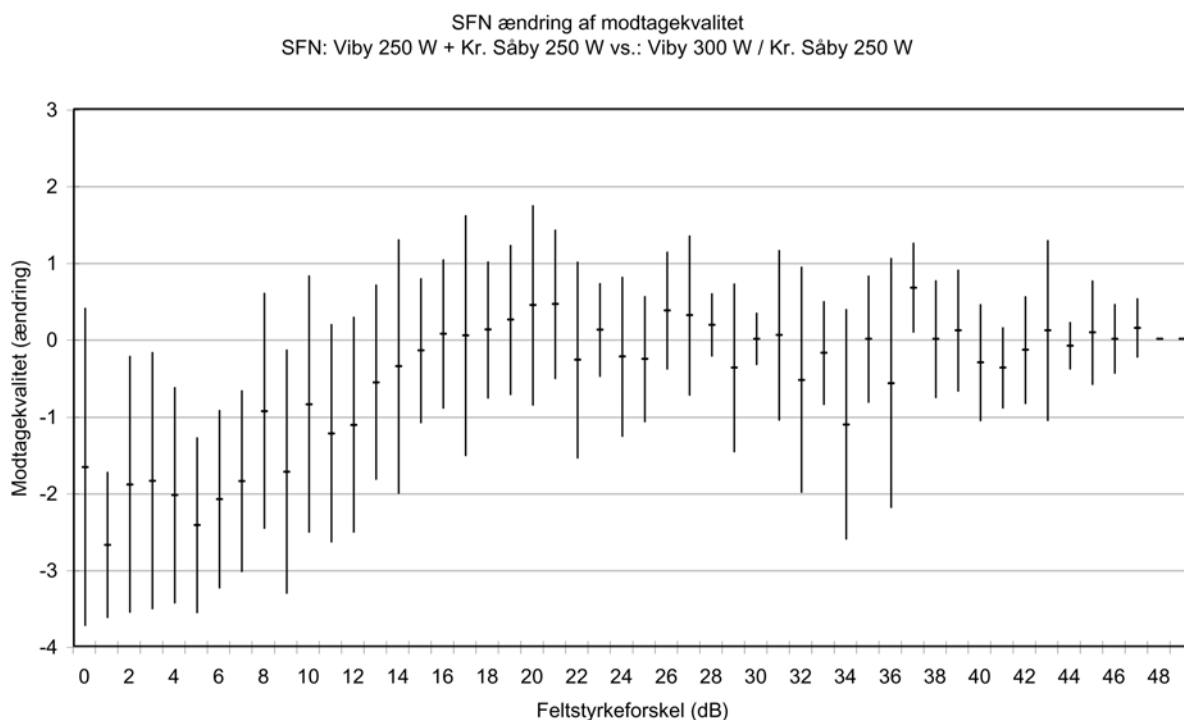
$$Q_{SFN}(d) = \mu(Q_{SFN}(S_d(x))) \quad (23)$$

Figur 34 viser kvaliteten af SFN som funktion af forskellen mellem de to senderes signalstyrke. For forskelle større end ca. 15 dB ligger middelværdien af kvaliteten over 4, bortset fra få tilfælde. Under 15 dB falder den jævnt til 2. Dette fald er nogenlunde det samme, som når man ser på forskellen i kvalitet mellem SFN og ikke-SFN.

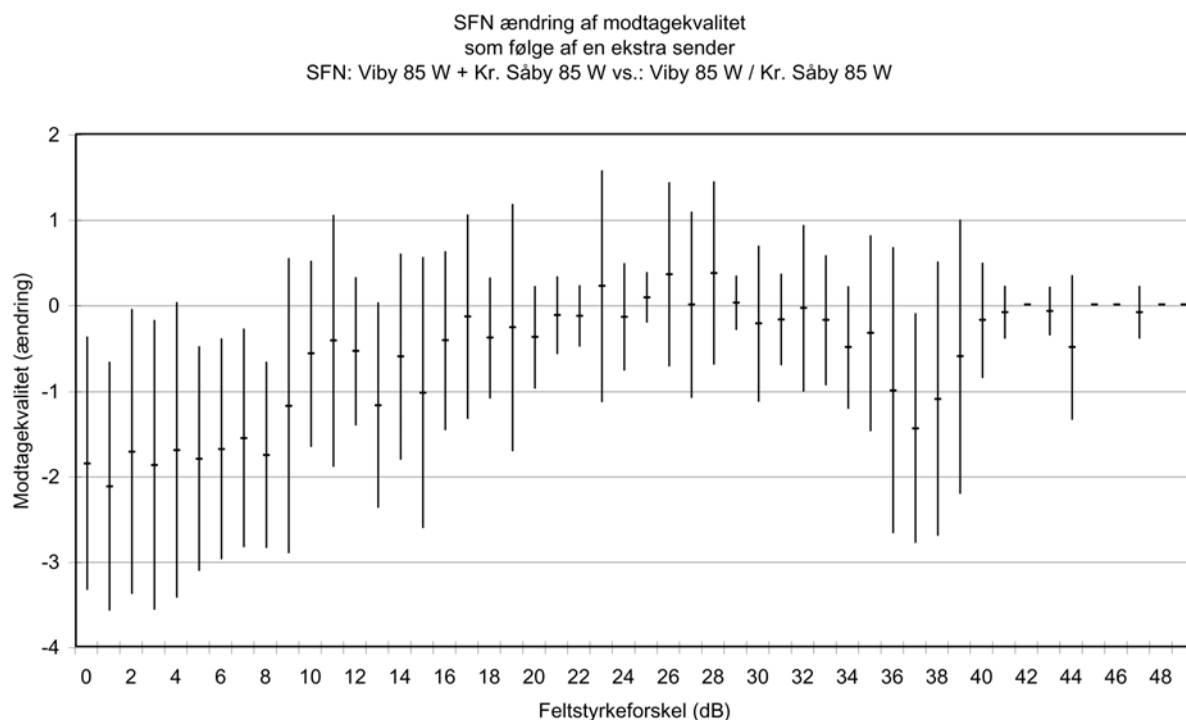
Faldet i kvalitet skyldes dermed først og fremmest indførelsen af SFN, og ikke særlige omstændigheder langs ruten, som tilfældigvis var sammenfaldende med en lille signalstyrkeforskel fra senderne. Dette bekræftes også af, at hvis ruten køres igennem med en almindelig RDS-FM-radio, så oplever man ikke de store problemer, bortset fra visse huller i dækningen på nogle bestemte steder, men hvor disse steder ikke indgår i målingerne.

SFN med to sendere kan også sammenlignes med begge sendere samtidigt. Det vil svare til situationen, hvor de to sendere sender på hver sin frekvens, og hvor modtageren selv vælger den bedste med RDS, sammenlignet med de to sendere i en SFN-situation.

Figur 35 viser dette. Det er altså samme analyse som figur 33, bortset fra at (20) nu forstås lidt anderledes. Kravet $S_1(x) \neq S_2(x)$ gælder stadig, men hvor x før ikke skulle medtages hvis det ikke var opfyldt, skal sender 1 og sender 2 nu altid vælges, så det bliver opfyldt. Dermed fås forskellen i signalstyrke på de to sendere som et tal større end eller lig med 0. For hver position bliver den kraftigste sender altså udnævnt til at være sender 1 og den anden sender 2, og med dette valg beregnes (19), (20) og (21). Dermed bliver der ca. dobbelt så mange observationer fra den samme køretur. De tilfældige variationer i området S_d ser lidt mindre ud, og det er stort set også hvad der er at sige om forskellen på de to resultater.



Figur 35 Middelværdi $\pm$ standardafvigelse af kvalitetsforskellen mellem to ikke-SFN-sendere og to SFN-sendere.



Figur 36 Middelværdi $\pm$ standardafvigelse af kvalitetsforskellen mellem to ikke-SFN-sendere og to SFN-sendere, nu med lavere sendestyrke.

Til sidst gentages sammenligningen, denne gang med lavere sendeeffekter på figur 36. Nedgangen i kvalitet starter stadig ved en forskel på senderne på ca. 15 dB, men kvalitetsforskellen bliver ikke længere så stor, hvilket hovedsageligt skyldes at ikke-SFN-kvaliteten gik ned pga. den lavere sendestyrke. Samtidig ses, at standardafvigelsen er gået noget op for små feltstyrkeforskelle.

6.5 Konklusioner

Dette var de første SFN-forsøg ude i virkeligheden.

Selve metoden med at måle på senderne hver for sig og sammen, har vist sig at fungere udmærket. Ellers havde der ikke været en så klar sammenhæng mellem forskellen i signalstyrke mellem de to sendere målt hver for sig, og forskellen i kvalitet når der blev sendt SFN, i forhold til når der ikke gjorde.

Sammenligningen hvor to FM-sendere først sender hver for sig og siden samtidigt, viser at der er problemer med modtagelsen, der hvor signalstyrkeforskellen fra senderne er for lille, hvilket i dette forsøg så viste sig at være ca. 15 dB. Forsøget blev gennemført uden synkronisering af carrieren. MPX-signalet var synkroniseret ved, at signalet, der blev udsendt, var det samme, men det ankom til modtageren på forskellige tidspunkter fra hver sender. Det sted på ruten, hvor tidsforsinkelsen så var den samme fra begge sendere, lå så uheldigt, så det ikke var til at se nogen særlig forbedring her, i forhold til andre steder.

7 Forsøg med SFN i Ribe Amt

Forsøget er gennemført i den nordlige del af Ribe Amt. I modsætning til området vest for Roskilde, er dette landskab ganske fladt, og man skulle derfor forvente de optimale betingelser for SFN, på grund af færre spring i sendestyrken og refleksioner, som følge af bakker og dale. To af de anvendte sendere har desuden næsten samme afstand til hovedsenderen, og resultaterne af den synkronisering af MPX-signalerne der kommer ud af det, vil derfor blive undersøgt nærmere.

7.1 Positionerne og strækningen

Som i forrige forsøg, er der tale om lokalradiosites. Netværket består af i alt 8 sendere, og 3 af dem er så anvendt til forsøg. Hovedsenderen i Nordenskov (også kendt som TV2 Varde) føder de andre sendere. Antennen her er i 170m's højde, hvilket gør det muligt for de andre sendere at modtage signalet herfra, selv om afstanden til hovedsenderen er op til ca. 25 km.



Figur 37 Senderen i Vorbasse. Antennen er en 2-stakket dipol på toppen af masten

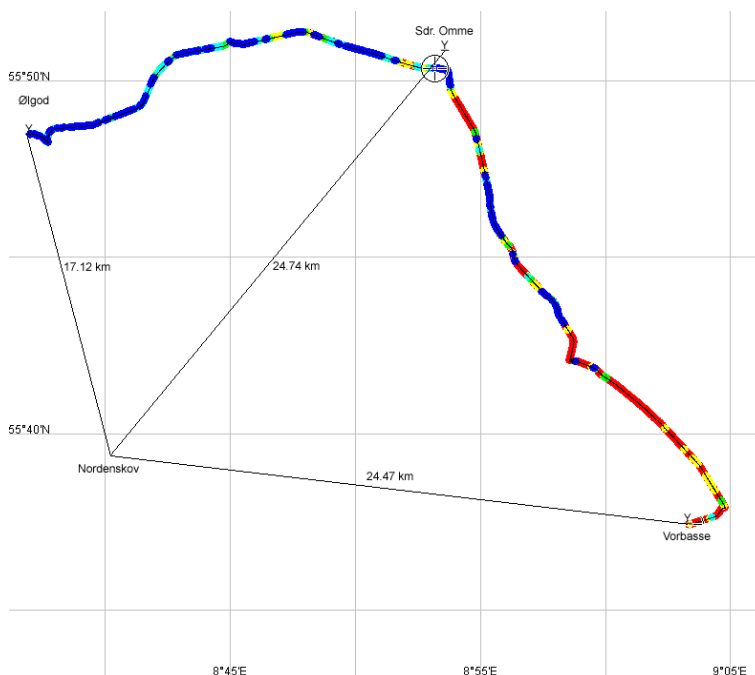
Sender-Navn	Højde	Koordinater	Afstande
Ølgod	80 m kote: 59	55°48.455 N 08°37.039 E	Til Nordenskov: 17.12 km [57.6 μ s] Til Sdr. Omme: 17.44 km Til Vorbasse: 34.29 km
Sdr. Omme	75 m kote: 56	55°50.531 N 08°53.391 E	Til Nordenskov: 24.74 km [83.0 μ s] Til Vorbasse: 26.43 km
Vorbasse	40 m kote: 100	55°37.425 N 09°03.424 E	Til Nordenskov: 24.47 km [81.9 μ s]
Nordenskov	170 m	55°39.396 N 08°40.279 E	Hovedsender

Tabel 8 De involverede positioner og deres indbyrdes afstande

Senderne, deres positioner og indbyrdes afstande, samt tidsforsinkelsen fra hovedsenderen, er samlet i tabel 8. De angivne tidsforsinkelser er incl. en tur op og ned gennem ballempfang-senderens antennekabler. Figur 38 viser placeringen af senderne i forhold til hinanden. Den farvede linje, der bugter sig fra den ene sender til den anden, viser selve ruten der er kørt. For enden af de linjer hvor der er angivet en længde i km, står en af de sendere der indgår i forsøget.

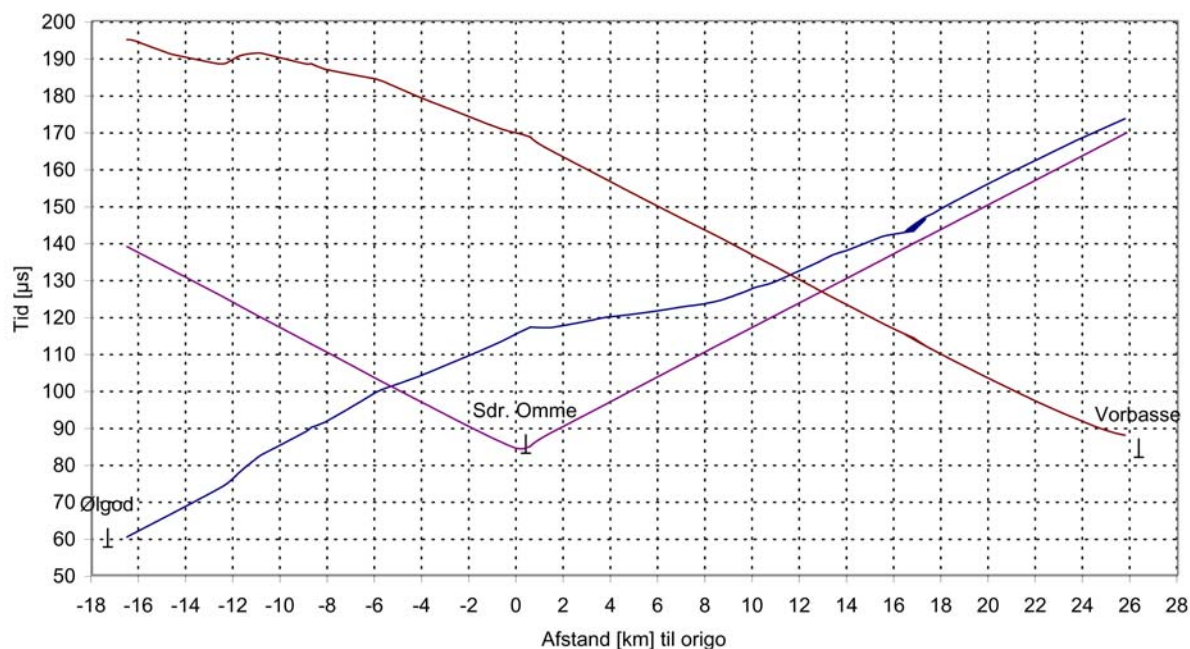
For nemt at kunne vise kvaliteten som funktion af placeringen, skal denne omregnes til kun at være én variabel. Her kunne længdegraden have været brugt igen, men det ville så betyde en

flertydighed ca. 2/3 nede af ruten fra Sønder Omme til Vorbasse. Derfor er der valgt et *Origo* på ruten, tæt på senderen i Sønder Omme. Ved så at omregne alle positioner til en afstand fra Origo, er det muligt at undgå dobbelttydigheder. De eneste undtagelser er helt ude ved senderne i Ølgod og Vorbasse. Lige som i Roskilde-forsøget, er disse steder ret uinteressante, da der aldrig vil være modtageproblemer så tæt på en sender. Eneste dobbelttydighed er, om vi er på den ene eller anden side af Origo, og det er klaret ved et fortegnsskift for alt hvad der ligger til venstre for Origo. Således at ruten Ølgod - Sønder Omme angives med negative positioner.



Figur 38 Senderne og deres placering i forhold til hinanden. Cirklen med kryds markerer Origo. Bemærk at Sønder Omme senderen ikke står helt på selve ruten. Den står for enden af 24.74 km linjen.

Afstandene fra hovedsenderen ud til de tre sendere er omregnet til tidsforsinkelse i μs , og kabellængden fra ballempfang-antennen og ned og fra senderen og op i sendeantennen er regnet sammen og lagt til. Det giver så den tidsforsinkelse som findes i tabel 8, hvor hastigheden i kablet antages at være 200 m/ μs . For Sønder Omme og Vorbasses vedkommende betyder det, at forskellen i tidsforsinkelse bliver ca. 1 μs , hvilket er i samme størrelsesorden, som hvad Harris' system kan præstere (se afsnit



Figur 39 Tidsforsinkelse fra de tre sendere, langs ruten, som funktion af afstanden til Origo. Dette er tidsforsinkelsen helt fra Nordenskovsenderen, frem til et givent sted på ruten.

3.3.4, s. 16). Dermed er MPX-signalet altså stort set så synkroniseret som det kan blive, men carrieren er naturligvis ikke.

Tidsforsinkelsen fra de tre sendere og hen til et punkt på ruten, kan så beregnes og lægges til værdierne fra tabel 8. Det er så gjort for hele ruten, og resultatet kan ses på figur 39. Kurvernes skæringspunkter angiver så steder på ruten, hvor der ikke vil være forskel i tidsforsinkelsen mellem to signaler. Sønder Omme og Vorbasse kurven skærer hinanden i pos. 12.9 km.

I denne del af forsøget, er der kørt 20 ture mellem senderne. Tabel 9 viser en oversigt over turene. Nummereringen starter ved 20.

		Tur-nr.	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Sender	Frekvens	Effekt	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↓	↑	↓
Ølgod	100.1	100 W																				
	99.9	100 W																				
	91.2	20 W																				
Sønder Omme	100.1	35 W																				
		100 W																				
	99.9	100 W																				
		35 W																				
	106.2	35 W																				
		50 W																				
Vorbasse	100.1	205 W																				
		100 W																				

Tabel 9 Oversigt over de korte ture. Farven angiver hvilken rute der er kørt. De farvelagte felter angiver tilsammen hvilke sendere der har været tændt under den pågældende tur, og med hvilken effekt (ud af senderen) de har sendt med og frekvensen.

Tabellen bruges således: Sammenlignes tur 20 og 21, ses at kun Vorbasse 100.1 sender med 205 W. Eneste forskel på de to ture, er at tur 20 er kørt både på strækningen Ølgod-Sønder Omme og Sønder Omme-Vorbasse, mens tur 21 kun er kørt på Sønder Omme-Vorbasse. På tur 22 er der kommet en ekstra sender til, nemlig Sønder Omme med 35 W, og den sammensætning er så målt på strækningen Sønder Omme-Vorbasse.

Tur: Ølgod <-> Sønder Omme	
Tur: Sønder Omme <-> Vorbasse	
Tur: Ølgod <-> Vorbasse	

Bilag 4 indeholder en signalstyrke- og kvalitetskurve som funktion af positionen for alle målinger. Det er et sæt figurer som figur 42 og 43. Desuden er der en del sammenligninger mellem to målinger. Det er et sæt figurer som figur 44 og 45.

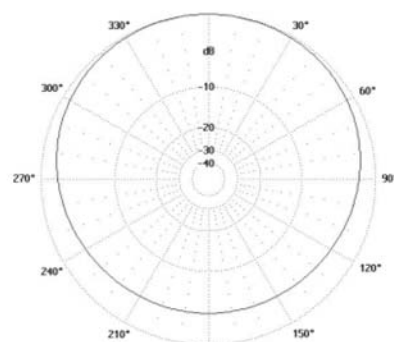
7.2 Indledende målinger på Vorbasse 100.1 MHz

Vorbasse senderen har den mest uforstyrrede frekvens, og var derfor velegnet til at sammenligne teorien fra ITU med egne målinger.

Antennen befinder sig på en TDC mobilmast (figur 37), og senderen står i TDC's hus. På grund af de begrænsede adgangsforhold det medfører, var det kun muligt at komme ind én gang og stille på senderen. Den ene gang blev så brugt til at regulere effekten.

7.2.1 Sammenligning mellem beregnet og målt dækning

Eksemplet på figur 38 viser den første måletur fra Ølgod mod Vorbasse, hvor det kun er senderen i Vorbasse som er i luften. Farven langs ruten angiver kvaliteten, som beregnes på samme måde som i forsøget ved Roskilde. Antennens udstrålingsdiagram er vist på figur 40. Antennens gain er opgivet til at være 6 dBi. Antennen er vendt, så retningen mod Sønder Omme er retning 270°, hvilket giver en dæmpning på 3 dB. Feederkablet har en dæmpning på 1.19 dB/100 m, og antages at være ½ dB, og med 205 W tilført effekt, bliver effekten i retning mod Sønder Omme 360 W. Ved en senere lejlighed vil den tilførte effekt blive skruet ned til 100 W, hvilket så giver 175 W.

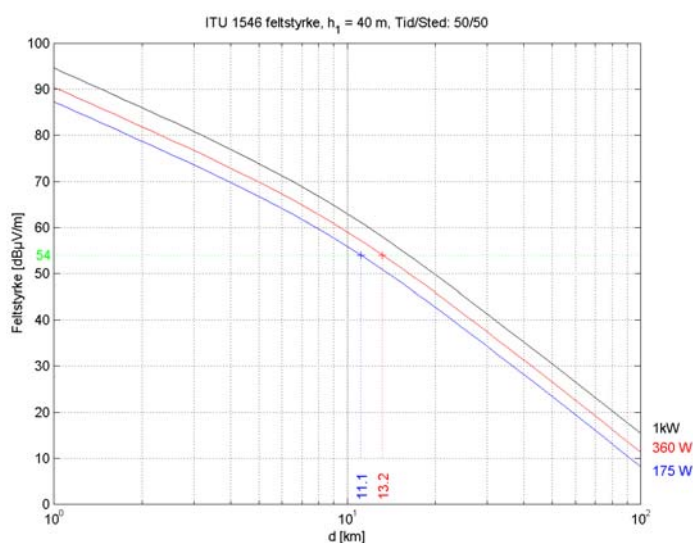


Figur 40 Udstrålingsdiagram, vandret plan, Aerial AV-1440.

Iflg. ITU-412 skal feltstyrken være 54 dB μ V/m i 10 m's højde for at få en god modtagelse. Dermed kan senderens dækningsområde (radius) bestemmes ved hjælp af figur 9.

ITU-1546 angiver et sæt formler som kan anvendes for at implementere feltstyrkemodellen i en computer. Dette er gjort i Matlab, hvor standardkurverne så er omregnet til andre sende-effekter og andre højder. Figur 41 viser feltstyrkekurverne for de relevante sendestyrker, og deres 54 dB μ V/m-grænser.

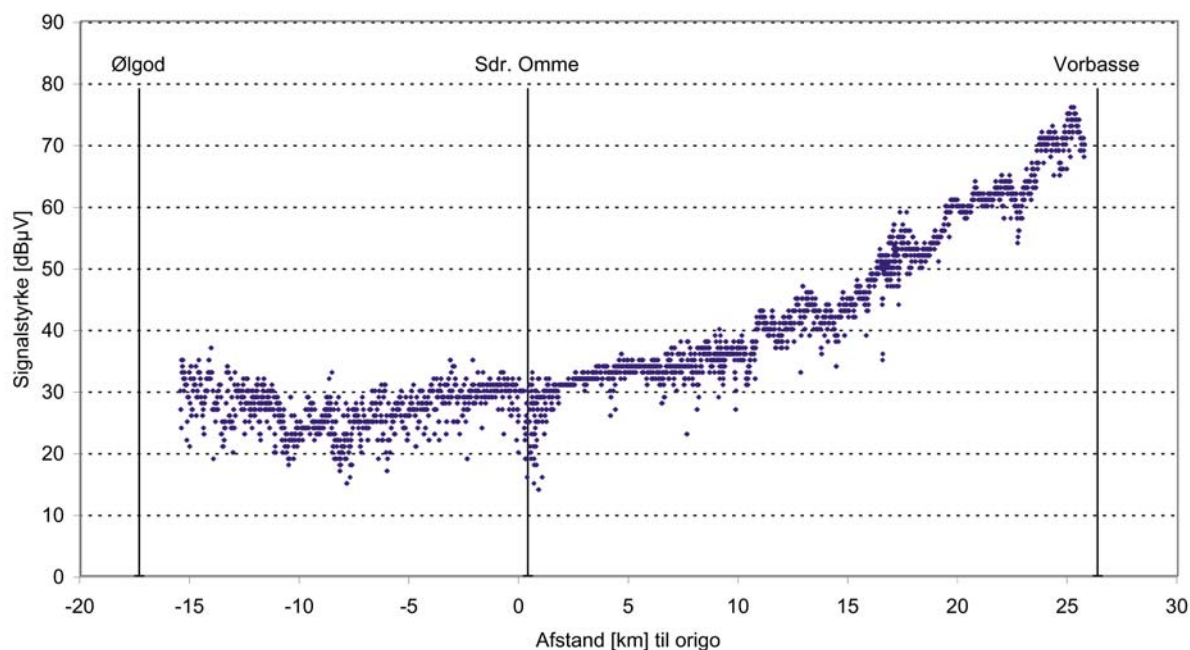
Afstanden ved 205 W tilført effekt bliver dermed 13.2 km. Afstande mindre end 13.2 km fra Vorbasse svarer til positioner større end km 13.163, når de regnes om til afstand fra Origo.



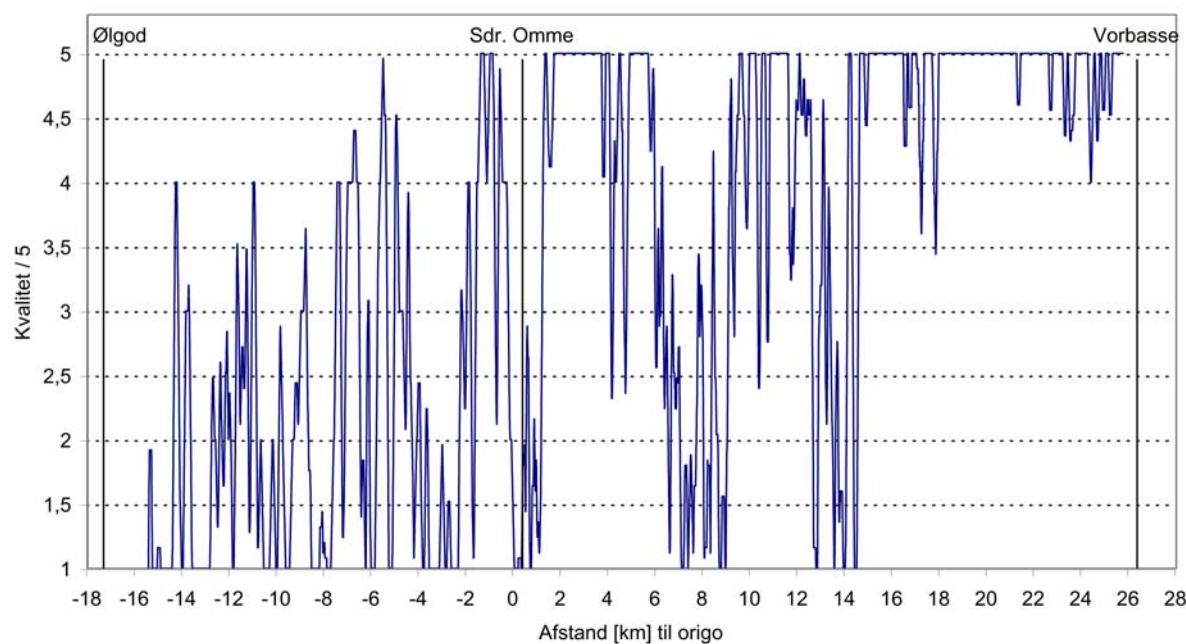
Figur 41 ITU 1546 feltstyrkekurver implementeret i Matlab. 54 dB μ V/m-grænsen er vist for de to anvendte sendestyrker. Den sorte kurve er 37.5 m-kurven fra figur 9

Figur 42 og 43 viser henholdsvis signalstyrken og modtagekvaliteten som funktion af placeringen for denne måletur.

Denne serie forsøg skal bla. bruges til at undersøge om det er muligt at flytte en SFN-interferenszone frem og tilbage mellem senderne ved at variere effekten. Dermed bliver der tale om mange datasæt som skal sammenlignes med hinanden, og derfor er det valgt, at lade alle områder indgå med lige stor vægt, uanset hvor hurtigt der er kørt på strækningen. Det er sket ved at opdele afstanden fra Origo i intervaller på 5 m, og aflæse signalstyrke og kvalitet ved det nærmeste målepunkt. Det giver så ca. 8200 værdier langs hele ruten. Signalstyrken på en given position er vist som en prik. Dermed fremgår det også, at der er ganske stor forskel i signalstyrke, selv inden for en ganske lille afstand.



Figur 42 Signalstyrke som funktion af placeringen. De lodrette streger viser placeringen af senderne langs ruten. (tur: 20)



Figur 43 Kvalitet som funktion af placeringen. Gennemsnit over 120 m. (tur: 20)

Noget af denne forskel skyldes hurtig fading som følge af multipath, omtalt i afsnit 3.3.2, s. 13. For bedre at kunne sammenligne resultater fra forskellige ture, er der i visse tilfælde anvendt en løbende middelværdi.

Lee [1982] angiver at en middelværdi over 40 bølgelængder kan anvendes til at finde en lokal middelværdi, og af standard-afvigelsen ved dette er mindre end 1 dB. 40λ svarer til 120 m ved 100 MHz.

Selv om resultaterne dermed kan komme til at se pænere ud, er det dog vigtigt at huske, at multipath fading også bidrager til lytterens oplevelse. Derfor er mange resultater gengivet i rå form, uden midling, eller som en kombination, hvor både de rå data ses som enkelt-punkter og en løbende middelværdi er vist som en kurve. I forhold til lytterens oplevelse af den tid der er gået, svarer 120 m til ca. 5 sec, hvis lytteren kører 80 km/h. I en normal lyttesituation, vil et meget kort udfald på mindre end 1 sec, sandsynligvis dårligt nok blive opdaget. Hvis der er skratten i 5 sec eller der over, så begynder det at blive et problem. Så hvis det forekommer at kvaliteten falder til 1 i middel over 120 m, så begynder kanalen at være i fare for at blive valgt fra. Derfor er midling i kvalitet også relevant, og her er så ligeledes valgt at vise en løbende middelværdi over 120 m.

På Figur 43 bemærkes, at der er nogle ret markante dyk i kvaliteten omkring position 7 og 14 km. På de samme positioner, ses ikke de samme dyk i signalstyrken, bortset fra nogle enkelt-observationer, som skiller sig ud fra "skyen" af observationer, ved at ligge op til 10 dB lavere end alle de andre. Det gælder fx 33 dB ved pos. 12.825 km.

Disse enkelte afstikkere kan dog ikke alene forklare de kraftige dyk i kvaliteten, som må skyldes refleksioner eller interferens fra en ukendt sender. Inden forsøgene gik i gang, blev det undersøgt hvilke andre sendere der var omkring 100.1 MHz. I Danmark er der kun Radio 100 FM fra Hove på 100.0 MHz og på 99.9 MHz findes DR fra Rangstrup og Radio 100 FM fra Randers. Altså ikke noget som burde forstyrre en god modtager, som kan forventes at have en god dæmpning af stationer 200 kHz fra modtagefrekvensen.

Første gang (set fra Vorbasse) kvaliteten i gennemsnit falder helt til 1, er på pos. 14.47 km, hvilket må siges at være ganske tæt på de beregnede 13.163. Samtidig bemærkes, at kvaliteten stort set ikke kommer under 4 inden da.

Den beregnede dækningsradius, er naturligvis en ganske løs beregning, hvor der ikke er medregnet terrænforhold. Desuden er der ikke taget hensyn til, at modtagehøjden ikke er 10 m. Det korrigeres ved brug af formlerne i afsnit 4.1.2 (s. 23), og her findes at feltstyrken i 1.5 m's højde er 13 dB lavere end ved 10 m.

Med den anvendte antenne er sammenhængen mellem feltstyrke og signalstyrke, at feltstyrken i $\text{dB}\mu\text{V/m}$! 11 dB = signalstyrke i $\text{dB}\mu\text{V}$ ved 100.1 MHz. Audemat-programmet omregner selv, ud fra dens egne og antennens kalibreringsdata, impedanser og kabeltab.

Omregning af $54 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ for $h_2 = 10 \text{ m}$ bliver så $41 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ for $h_2 = 1.5 \text{ m}$, og dette bliver så $30 \text{ dB}\mu\text{V}$ når signalet er nået frem til indgangen på tuneren.

Det svarer ganske godt til hvornår selv dyre tunere begynder at få problemer med modtagelsen. For eksempel vil Proflin tuneren, som blev anvendt ved de stationære forsøg, mute udgangen, hvis signalstyrken kommer under $30 \text{ dB}\mu\text{V}$. Det skyldes så, at den først og fremmest er en retransmissionstuner, og logikken her er, at hvis signalet bliver så svagt, så er det ikke værd at retransmittere.

Så selv om ITU's antagelse om 10 m's modtagehøjde i sig selv kan virke noget forældet, så bevirker de tilsyneladende høje feltstyrkekrav, som denne modtagehøjde kombineres med, at en senders dækningsområde forbliver det samme, hvis der anvendes en moderne tuner med en almindelig piskantenne i 1.5 m's højde.

Endelig er det værd at bemærke den gode kvalitet, der opstår visse steder uden for senderens dækningsområde, specielt pos. 2-4 km. Her bemærkes, at den modtagne signalstyrke er mere

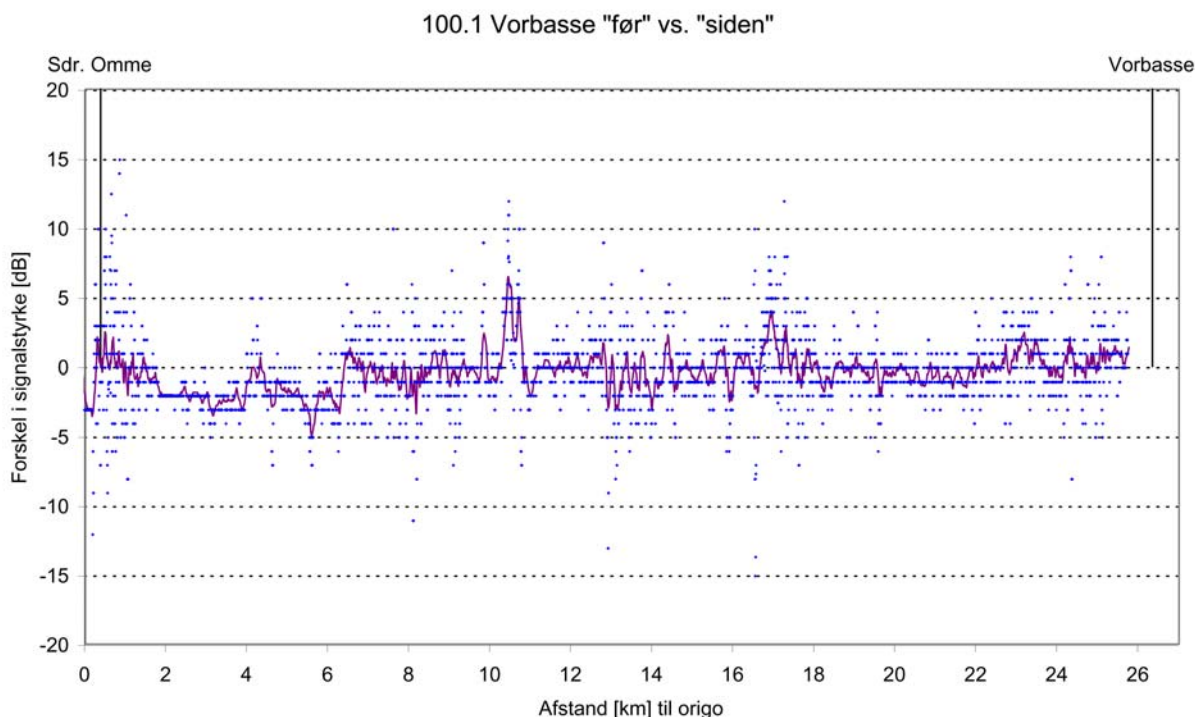
konstant end mange andre steder på strækningen, "skyen" på figur 42 er tyndere her. Vejen det sidste stykke mod Sønder Omme stiger svagt. Den svage stigning i terrænet medfører sandsynligvis færre refleksioner, hvad der kan forklare at lydkvaliteten bliver bedre.

7.2.2 Undersøgelse af målingernes reproducerbarhed

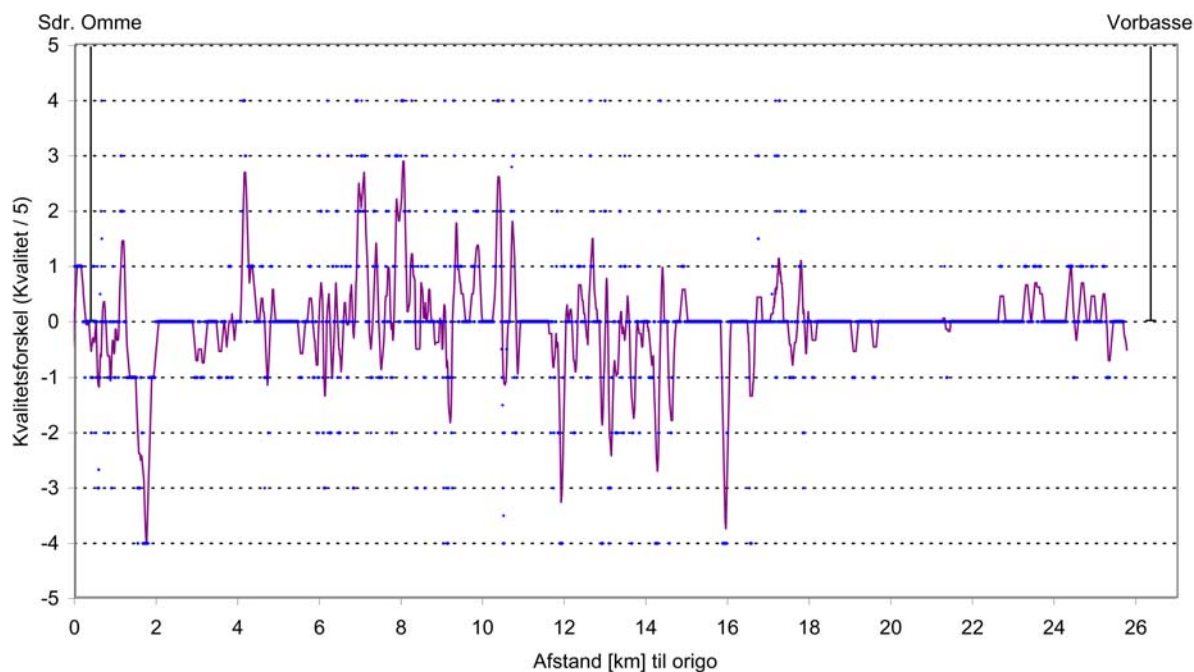
For at undersøge hvor reproducerbare resultaterne var, blev den samme strækning kørt flere gange under de samme betingelser. Forskellen ses ved at trække signalstyrke og kvalitet som funktion af positionen fra hinanden. Dette er gjort på figur 44 og 45. En blå prik er en enkelt observation, trukket fra den tilsvarende observation i den forrige tur. Kurven er en løbende middelværdi over 120 m.

Umiddelbart virker forskellene i kvalitet ganske store, når der nu ideelt set ikke burde være nogen forskel. For at undersøge det nærmere, er kvaliteten (midlet over 120 m) for begge ture vist på figur 46.

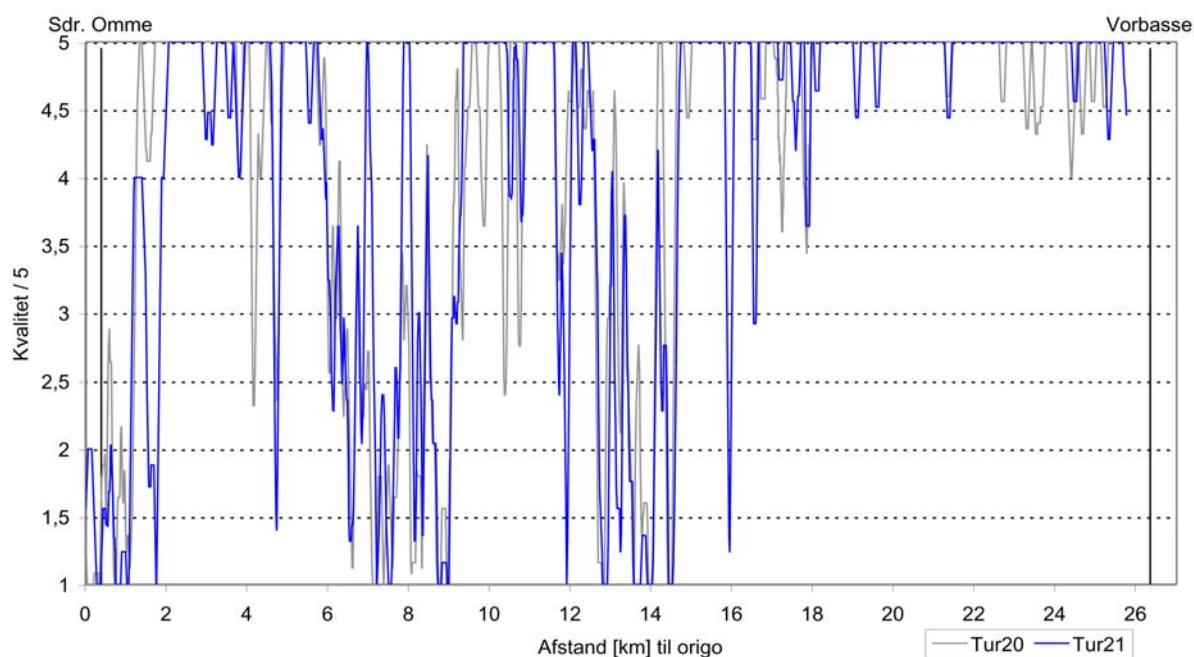
I nærheden af senderen (Vorbasse), er kvalitetsforskellene meget små, hvad der ikke overrasker - kvaliteten her er stort set altid 5. 10 km væk fra senderen, begynder der at komme en del kvalitetsforskelle. Da hvert punkt i kurven er et gennemsnit af 25 observationer, skal der altså mere end en enkelt "outlier" til at give dette resultat.



Figur 44 Næste tur på strækningen Sdr. Omme - Vorbasse (tur:21) trukket fra den forrige tur (tur: 20). Prikkerne viser signalstyrkeforskellen i hver position, uden midling. Kurven viser det samme, men midlet over 120 m.

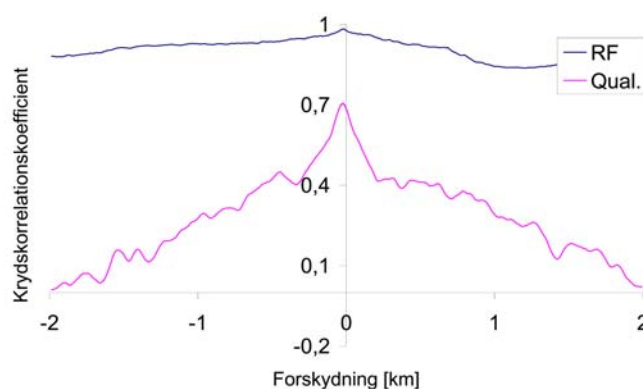


Figur 45 Kvaliteten af den seneste tur, med kvaliteten af forrige tur trukket fra. De blå prikker er enkelt-observationer trukket fra hinanden, og kurven er løbende gennemsnit over 120 m. Bemærk at udsnittet af x-aksen ikke længere går helt til Ølgod. (tur: 21-20)



Figur 46 Næste tur på strækningen Sdr. Omme - Vorbasse (tur:21), vist med blå, som sammenlignes med den relevante del af figur 43, vist med gråt (tur: 20)

Da afstandene imellem toppene også ser ud som om de er ens flere steder, fx omkring 17-18 km, hvor det næsten kan se helt periodisk ud på figur 45, kunne det tænkes at der var et problem med målingerne, fx en fejl i positionsbestemmelsen af den ene måling. Noget lignende kan ses ved sammenligning af andre sæt målinger. For at finde ud af om det er tilfældet, blev krydskorrelationen af signalstyrken (RF) og kvaliteten (Qual.), mellem de to målinger beregnet. Den ville kunne afsløre om der fx var systematiske positionsfejl. Hvis krydskorrelationskoefficienten ikke har sin max-værdi ved forskydning 0, vil det være et tegn på at noget er galt. Som det ses på figur 47, ligger den ikke helt på forskydning 0, men på pos. -20 m for signalstyrken (RF) og på pos. -25 m for kvaliteten. Med en hastighed på 80 km/h, svarer dette til 1 sec. GPS-informationen opdateres kun 1 gang pr. sec, og da der er kørt hver sin vej på de to ture, vil en positionsfejl på hvad der svarer til den kørte strækning på 1 sec være forventelig.



Figur 47 Undersøgelse af evt. positionsfejl. Tur20 er fastholdt, og tur21 er forskudt.

For at se hvor stor forskel det så giver, sammenlignes resultaterne fra figur 44 og 45 med de tilsvarende figurer, hvor tur21 målingen så netop er forskudt med -20 m. Da det stort set ikke er til at se forskel på de figurer, trækkes den ene figur fra den anden. Figur 48 og 49 viser de nye kurver der fremkommer hvis målingen fra den ene tur forskydes med -20 m. Sammen med denne kurve vises så en ny kurve med fejlen. Som man næsten kan se direkte, får denne positionsfejl ikke den store betydning. Når kurverne er gennemsnit af måledata over 120 m, bliver den største fejl i signalstyrken 1.4 dB og 0.64 i kvaliteten.

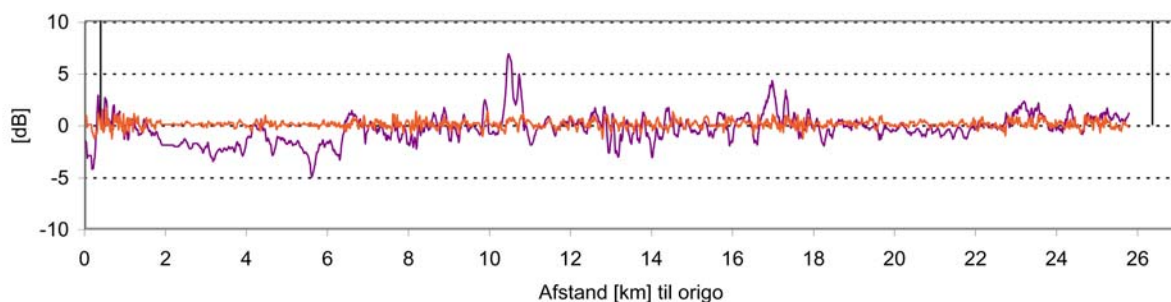
Hvis de to ture sammenlignes uden at den ene er forskudt -20 m, bliver middelværdien af forskellen af signalstyrke langs hele ruten -0.31 dB, og kvalitetsforskellen bliver -0.05 med en standardafvigelse på 1.15. Med forskydningen på -20 m bliver den tilsvarende standardafvigelse 1.12. Da andre tal ændrer sig ikke.

Da denne korrelation er en ret tidskrævende opgave, vil de efterfølgende sammenligninger blive foretaget uden at der findes en optimal forskydning af det ene sæt målinger. Det vil dog blive tilstræbt at sammenligne ture hvor køreretningen har været den samme, hvis muligt.

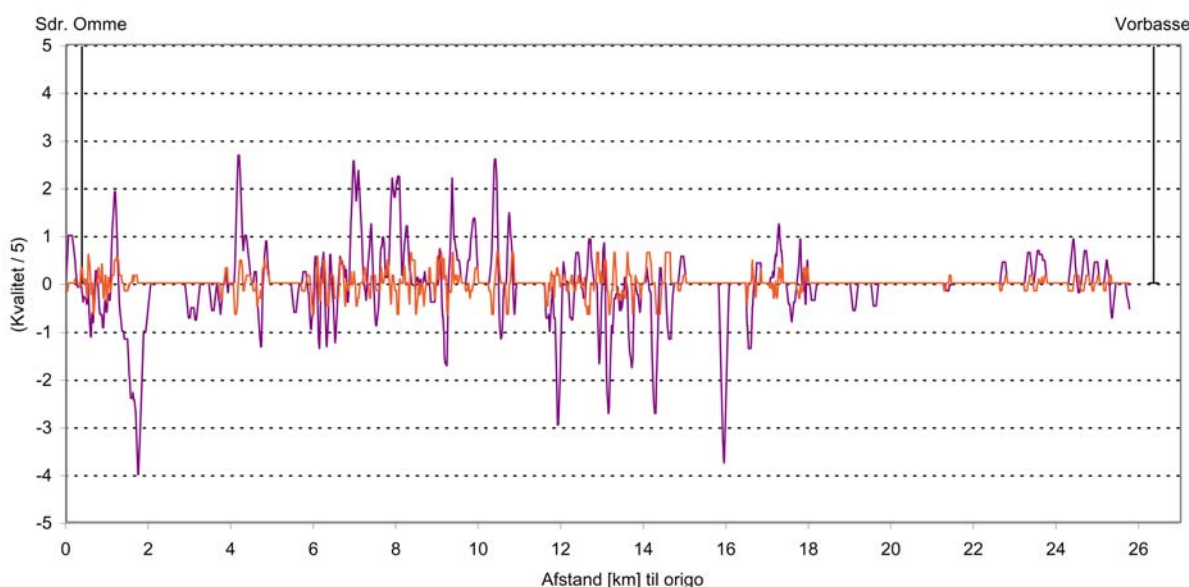
I de efterfølgende afsnit vil der blive præsenteret mange figurer som figur 44 og 45. Specielt ude ved grænserne af dækningsområdet må der altså forventes en del forskelle i målesættene, som alene skyldes den slags små forskelle i positioner. Samlet set bliver disse variationer stort set 0, som det også fremgik af middelværdien her.

I figurerne indgår en lokal middelværdi af et vindue af målingerne på 120 m. Denne længde blev valgt i forrige afsnit, men andre vindueslængder er også blevet afprøvet. Formålet med den lokale middelværdi er, at finde et kompromis mellem de rå data som lytterne hører, og få nogle målinger som ikke er forstyrret for meget af hurtigt varierende fading.

For at finde ud af hvor store afvigelser der dermed blev skjult af denne løbende middelværdi, er middelværdien af summen af afvigelserne bestemt. Beregningen minder en del om en normal



Figur 48 Resultat af positionsfejl på signalstyrken. Violet kurve svarer til den violette kurve fra figur 44, men hvor der er indført en forskydning af (tur21) på -20 m. Orange kurve viser så forskellen på denne violette kurve, og den fra figur 44.



Figur 49 Resultat af positionsfejl på kvaliteten. Violet kurve svarer til den violette kurve fra figur 45, men hvor (tur21) er forskudt -20 m. Orange kurve viser forskellen på de to, og dermed fejlen.

estimering af varians og standardafvigelse, bortset fra at den anvendte middelværdi nu ikke længere er den samme.

Hvis denne modificerede varians kaldes R^2 , så beregnes:

$$R_v^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^N \left(x(n) - \bar{x}_v(n) \right)^2 \quad (24)$$

hvor:

v angiver hvor langt et vindue middelværdien er taget over, i antal observationer.

N er det samlede antal observationspunkter der indgår i sammenligningen.

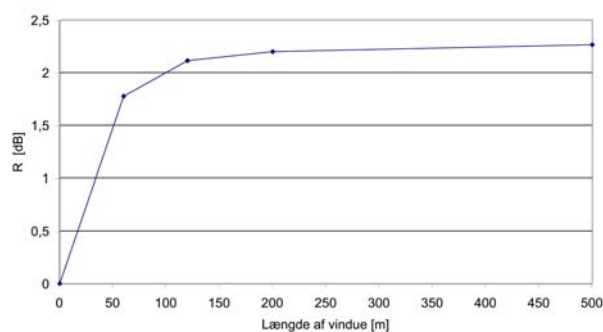
$x(n)$ er forskellen i signalstyrke mellem den første og den anden måling for positionen n .

$\bar{x}_v(n)$ er middelværdien af disse forskelle, taget i et vindue indeholdende v observationer omkring positionen n . Dermed er dette ikke en normal varians, for så skulle $\bar{x}$ have været den samme hele tiden. Her er det så kun en lokal middelværdi omkring en observation.

R_v er så beregnet for forskellige vindueslængder, og kan ses på figur 50. Som det ses, flader kurven ud hvis middelværdien beregnes af mange målepunkter. Dermed fremgår det, at de

hurtige lokale variationer ligger inden for de første ca. 100 m, og at længere vinduer ikke medfører at R stiger nævneværdigt.

Det tyder så på at variationerne forårsaget af den hurtige multipath fading kan rummes inden for 120 m, svarende til 25 punkter, og den gennemsnitlige standardafvigelse bliver så 2.11 dB. Umiddelbart virker 25 punkter som et punkt for meget, men på grund af symmetrien er det lettest med et ulige antal punkter, symmetrisk omkring $x(n)$.



Figur 50 R som funktion af længden af det vindue der anvendes til bestemmelse af lokal middelværdi.

7.3 SFN-forsøg Vorbasse og Sønder Omme

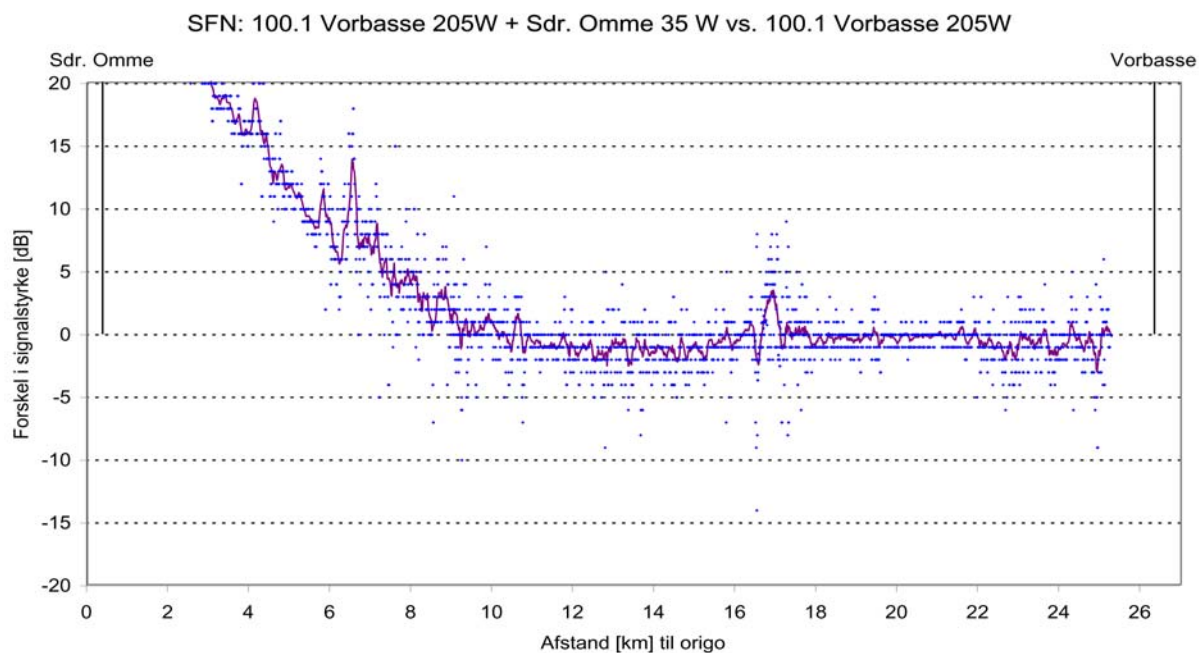
Der tilføjes nu en ekstra sender i Sønder Omme. Effekten er 35 W tilført. Antennesystemet er et ældre system, som ikke er særlig veldokumenteret. Systemet består af 4 cirkulære “dejkrogs” antenner. Antennesystemet kan ses på figur 51. I modsætning til Aerial AV-1440 antennen i Vorbasse, er disse antenner temmelig smalbandede. De er lavet til 106.2 MHz, og den reflekterede effekt går drastisk op ved skift af frekvens til 100.1 MHz. Ved tilførsel af 100 W målte senderen 12.1 W reflekteret, hvor den kun var 3.4 W ved 106.2 MHz. Der foreligger desuden ikke noget udstrålingsdiagram af antennesystemet. Til forsøg med ændring af effekten, har dette dog mindre betydning, men det har ikke været muligt at beregne en 54 dB μ V/m-grænse.

Signalstyrken og kvaliteten af senderen i Sønder Omme + senderen i Vorbasse sammenlignes med senderen i Vorbasse alene. Resultaterne kan ses på figur 52 og 53. I forhold til feltstyrken, ses en forskel for positioner mindre end 10 km. Kvaliteten bliver ikke ubetinget bedre af, at få indsat en ekstra sender. Det er faktisk kun inden for de første 2 km, at det er tilfældet. Herefter varierer kvaliteten en del, og mest ned. Middelforskellen i kvalitet for hele ruten bliver således -0.26 med en standardafvigelse på 1.4. Det bemærkes dog, at det sted hvor kvaliteten stiger lidt, nemlig omkring 7-9 km også var det sted, hvor kvaliteten var særlig dårlig på figur 43. Ved området omkring 3-5 km og 12 km, hvor kvaliteten på figur 43 var ret god, får vi til gengæld ødelagt noget.

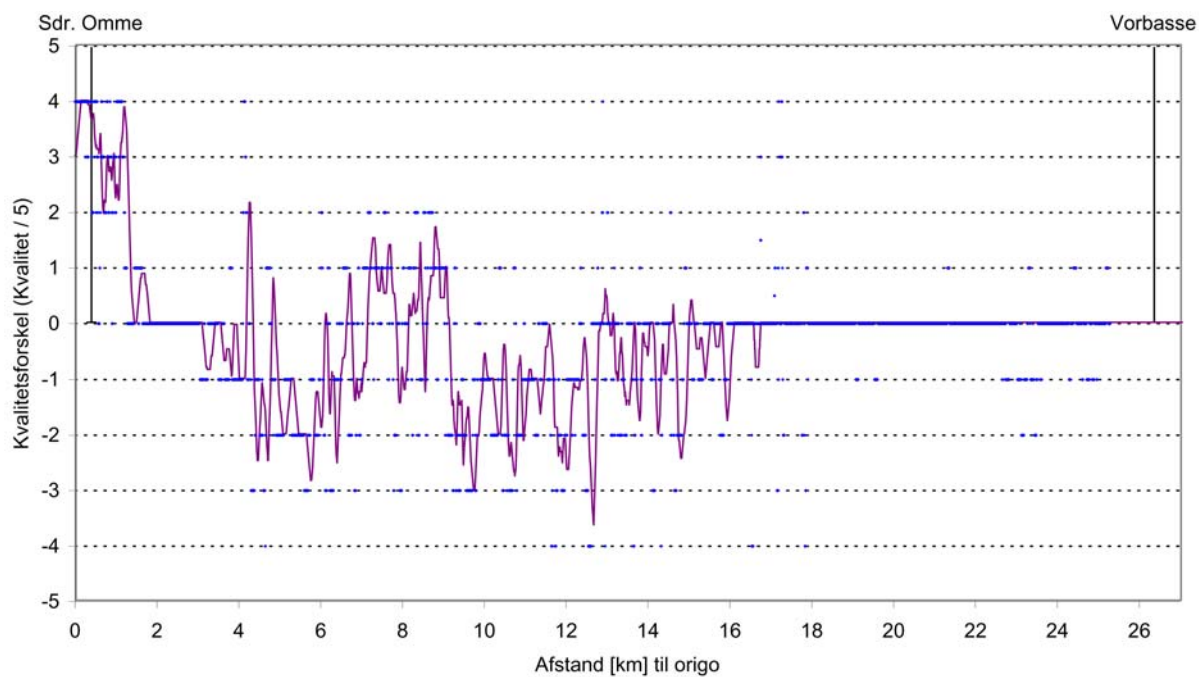
Ved kontrol af SFN-målingen over for den anden måling hvor Vorbasse sender alene (tur 22-21), er billedet nogenlunde det samme og kvalitetsforskellen her bliver -0.22 med en standardafvigelse på 1.6.



Figur 51 4 Cirkulære dipol-antennener i Sønder Omme

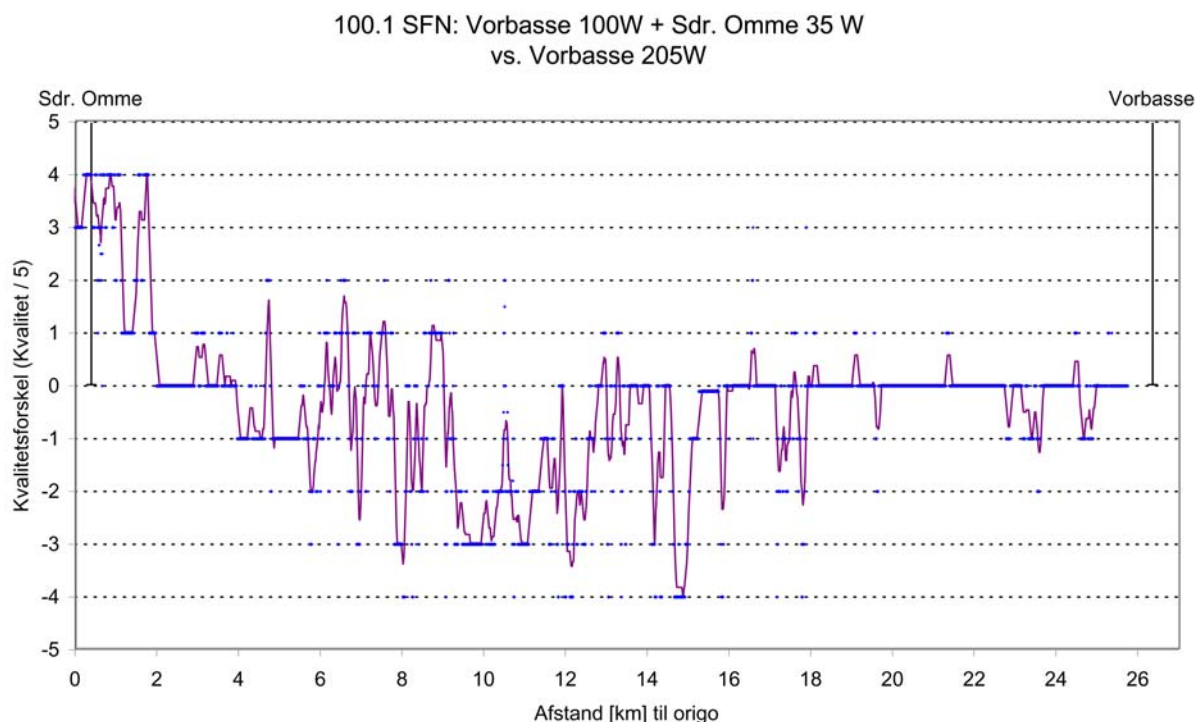


Figur 52 Signalstyrkeforskel, hvor signalstyrken når Vorbasse sender alene er trukket fra SFN-forsøget (tur 22-20, samme køreretning).



Figur 53 Kvalitetsforskel, hvor kvaliteten når Vorbasse sender alene er trukket fra SFN-forsøget (tur 22-20, samme køreretning).

Herefter er effekten på Vorbasse senderen sat ned til 100W. Den udståede effekt i rutens retning svarer så til 175 W, og 54 dB μ V/m grænsen er nu 11.1 km fra senderen. Det betyder at positionen nu skal være større end 15.265 km for at feltstyrken er større end 54 dB μ V/m.



Figur 54 Kvalitetsforskel efter nedsættelse af effekt fra Vorbasse til 100 W (tur 23-21, samme køreretning, men modsat køreretning ift. tur 20-22).

Sammenlignes den nye sender/effektkombination med den gamle, bliver kvaliteten lidt bedre i nærheden af Sønder Omme, og værre mod midten af ruten. Resultatet kan ses på figur 54, som så er den nye SFN-situation, sammenlignet med ikke-SFN-situationen.

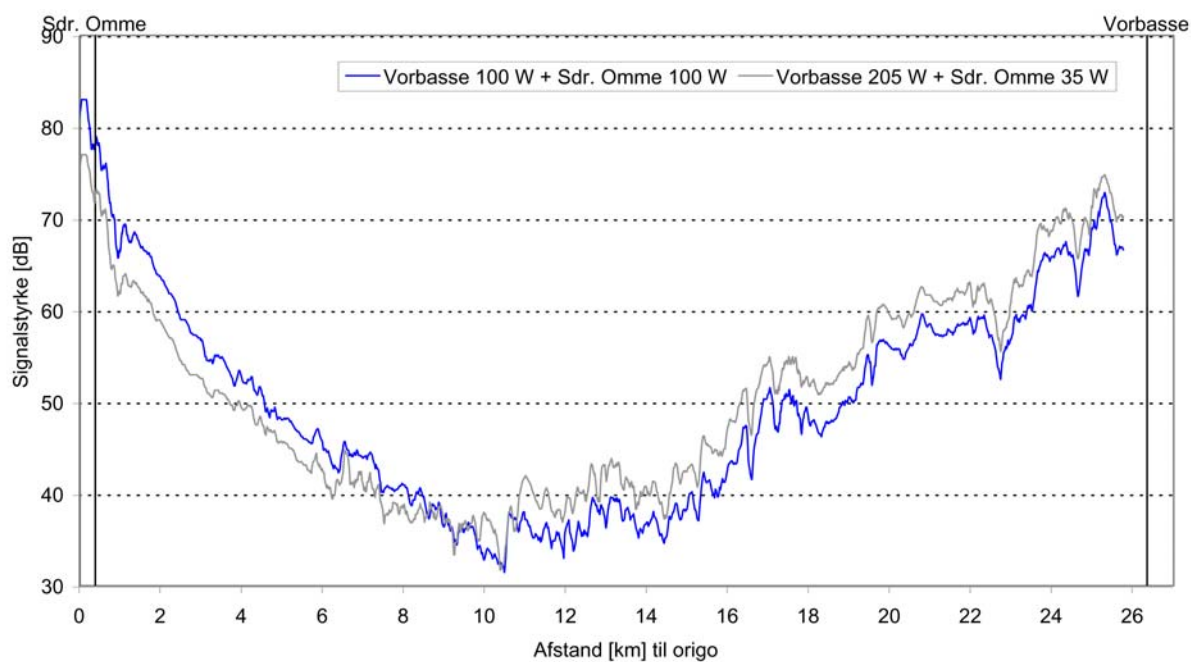
Det ses at forstyrrelserne er flyttet mod Vorbasse. Området 4-6 km er bedre nu, end det var før. Samtidigt er området 14-16 km nu blevet værre.

Kvaliteten langs hele ruten er ændret med -0.32 med en standardafvigelse på 1.6. Effektnedsættelsen har nok haft den største betydning her, hvilket bla. ses i område 16-24 km, som er inden for Vorbasse senderens dækningsområde, men hvor der er nedgang selv så tæt på senderen som omkring pos. 24 km.

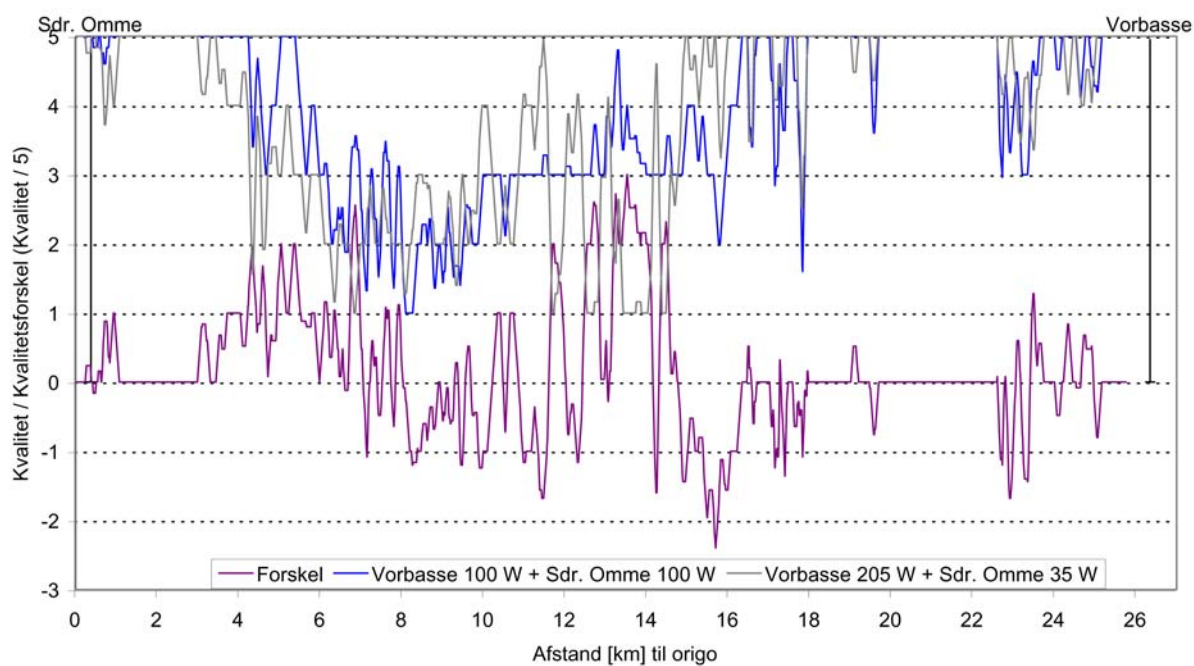
Dette effektforhold kan forskydes endnu mere, denne gang ved at skrue op for senderen i Sønder Omme.

Figur 55 viser signalstyrken for de to målinger. Figur 56 viser kvaliteten i begge målinger og forskellen.

Området omkring 12-14 km er interessant. Det bemærkes at SFN-kombinationen Sønder Omme 35 W + Vorbasse 205 W havde en meget dårlig kvalitet her, på trods af, at signalstyrken ikke var den dårligste på ruten. Dette område har nu en kvalitet på 3 eller der over. Det passer med at være det område hvor tidsforskellen mellem senderne bliver 0, hvad den gør på pos. 12.9 km.



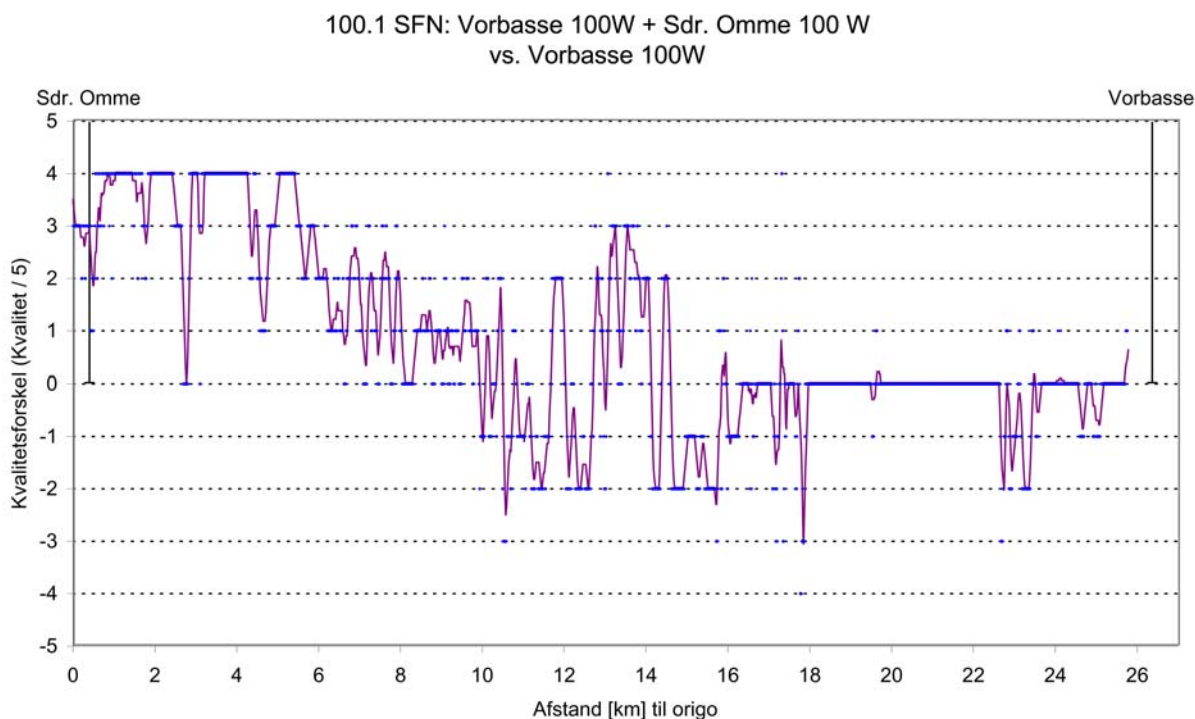
Figur 55 Signalstyrke for de to SFN-effektcombinationer (tur24-22, samme køreretning).



Figur 56 Ændring i kvalitet for de to SFN-kombinationer (tur24-22, samme køreretning).

Vender vi tilbage til at sammenligne en SFN- med en ikke-SFN-situation, kan denne køretur sammenlignes med Vorbasse senderen alene, denne gang med 100 W tilført effekt. Det er gjort på figur 57. Her ses naturligt nok kraftige stigninger ved Sønder Omme, og en kraftig stigning i området omkring 11-14 km, hvor Vorbasse alene var meget dårlig. Det interessante er, at der faktisk kun er meget få steder, hvor kvalitetsforskellen er negativ. Gennemsnitligt er kvaliteten forbedret 0.75 med en standardafvigelse på 1.8.

Selve kvaliteten lader stadig en del tilbage at ønske, og selv om det er lykkedes at øge den noget, vil de fleste lyttere nok skrue over på en anden station undervejs. En radiostation vil dog måske alligevel vælge SFN, hvis alternativet er, at der ellers kun er én by der kan dækkes.



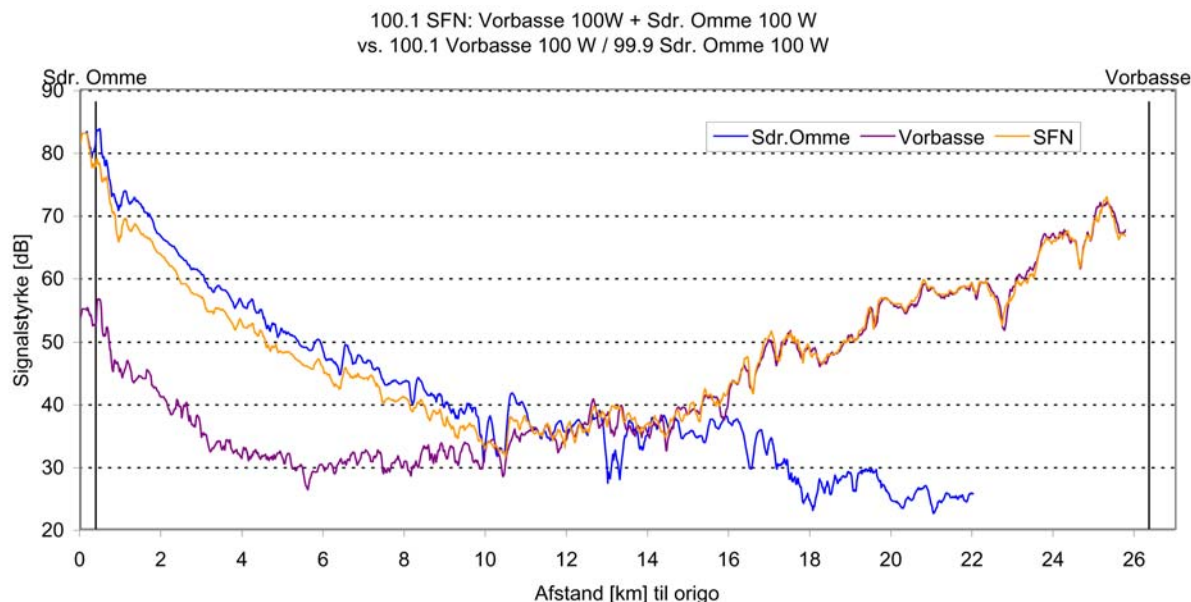
Figur 57 Kvalitetsforskel ved tilføjelse af en ekstra SFN-sender i Sønder Omme, i forhold til hvis Vorbasse sender alene (tur 24-31, modsat køreretning).

7.4 Sammenligning af SFN med konventionelt FM-net

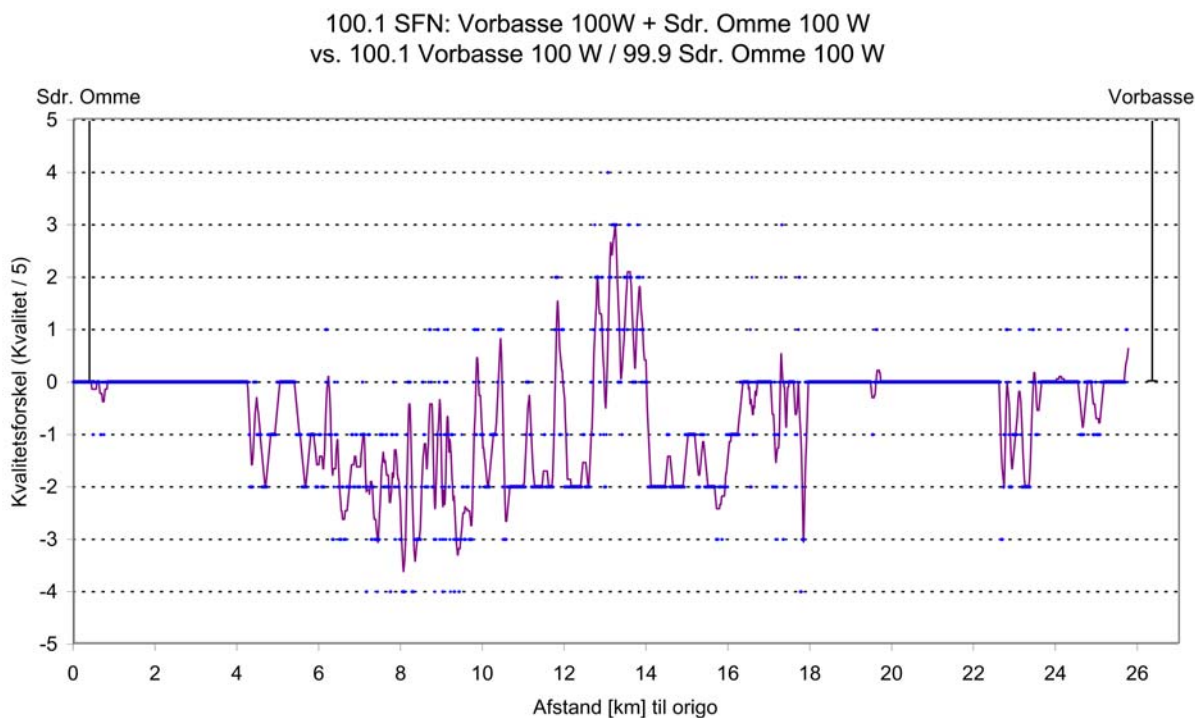
I forrige afsnit blev SFN sammenlignet med én ikke-SFN-sender. Det svarer til den amerikanske situation, hvor RDS ikke er udbredt [Gould & Eu, 1999].

Hvis man skal sammenligne med den FM-dækning lokalradioer har i dag, skal man sammenligne en SFN-situation med flere ikke-SFN-sendere samtidigt.

I praksis sammenlignes SFN med den signalstyrke og kvalitet som den kraftigste ikke-SFN-



Figur 58 Sammenligning af signalstyrke mellem to SFN-sendere i forhold til de samme to sendere hver for sig (SFN: tur 24, solo: tur 31 og 37).



Figur 59 Forskel i kvalitet mellem to SFN-sendere i forhold til de samme to sendere hver for sig (tur 24-(37+31)).

sender giver på en bestemt position. Det vil så svare til at en RDS-radio selv vil stå og skifte frem og tilbage mellem flere ikke-SFN-sendere. Fremgangsmåden er den samme som i afsnit 6.4 s. 47. Figur 58 og 59 viser resultatet. De største udsving findes ikke overraskende på midten af ruten. Lidt overraskende, så er SFN bedre end de to sendere hver for sig mellem position 12.7-14 km. En mulig forklaring kan være, at signalerne fra de to sendere netop når frem samtidigt på dette sted.

På figur 39 fremgår at Sønder Omme- og Vorbasse-kurverne netop skærer hinanden her, og ved aflæsning af de tal der ligger bag, findes at tidsforsinkelsen på pos. 12.7 km er $-1.4 \mu\text{s}$ (så Sønder Omme kommer først), og på pos. 14 km er den $7 \mu\text{s}$ (så her kommer Vorbasse først).

Inden der kan siges noget om hvorvidt dette skyldes den mindre tidsforsinkelse, er det dog nødvendigt at se nærmere på signalstyrkerne fra senderne på figur 58. Det bemærkes at Sønder Omme senderen har et dyk her, som gør at signalet fra den er 5-10 dB lavere end signalet fra Vorbasse. Dog er de nogenlunde lige kraftige op til pos. 13 km. Pos. 12.7-13 km svarer til intervallet $-1.4 \mu\text{s}$ til $0.5 \mu\text{s}$. Lige her synes det altså ikke at være noget problem at have to sendere med samme feltstyrke og frekvens, og det falder sammen med at tidsforskellen er omkring $1 \mu\text{s}$.

Det bemærkes endvidere, at Sønder Omme og SFN-kurven ikke ligger oven i hinanden i nærheden af Sønder Omme. Den mest naturlige forklaring på dette er antennesystemet. Da disse antenner er temmelig smalbandede, og der var meget effekt reflekteret, er det tænkeligt at udstrålingsdiagrammet har ændret sig lidt, da frekvensen blev ændret fra 100.1 MHz til 99.9 MHz. Forskellen er på 2-3 dB. Da forskellen ikke er den samme over det hele, er der dog ikke korrigeret for den, men usikkerheden er så lidt større end den ellers havde været.

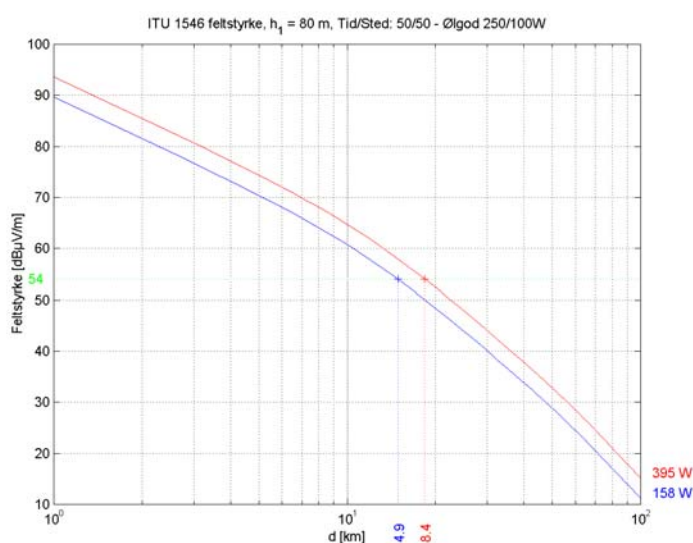
Nogle målinger blev lavet på 99.9 MHz fordi senderen i Vorbasse sendte på 100.1. Det var ikke muligt at slukke denne sender, så når Sønder Omme eller Ølgod skulle måles uden Vorbasse, måtte det foregå på en anden frekvens, som så blev 99.9 MHz.

7.5 SFN med tre sendere

Senderen i Ølgod tilføjes nu til SFN-nettet. Ligesom senderen i Vorbasse har den en Aerial AV-1440 antenne. Antennen peger mod nord, og rutens retning ligger så ca. i retning 90° på udstrålingsdiagrammet (figur 40, s. 55). Antennen havde en gain på 6 dBi, hvorfra der så trækkes 3 dB fra udstrålingsdiagrammet og 1 dB fra kablet (kablet er ca. 85 m, svarende til 1 dB's dæmpning). Hvis den tilførte effekt er 100 W, bliver den udståede effekt 158 W i rutens retning. Højden er 80 m over terræn.

På figur 60 ses at 54 dB $\mu\text{V/m}$ -grænsen dermed kommer til at ligge 14.9 km fra senderen, svarende til pos. -2.843 km.

Figur 61 viser signalstyrken fra de tre sendere enkeltvis, og sammenlignet med signalstyrken ved SFN.

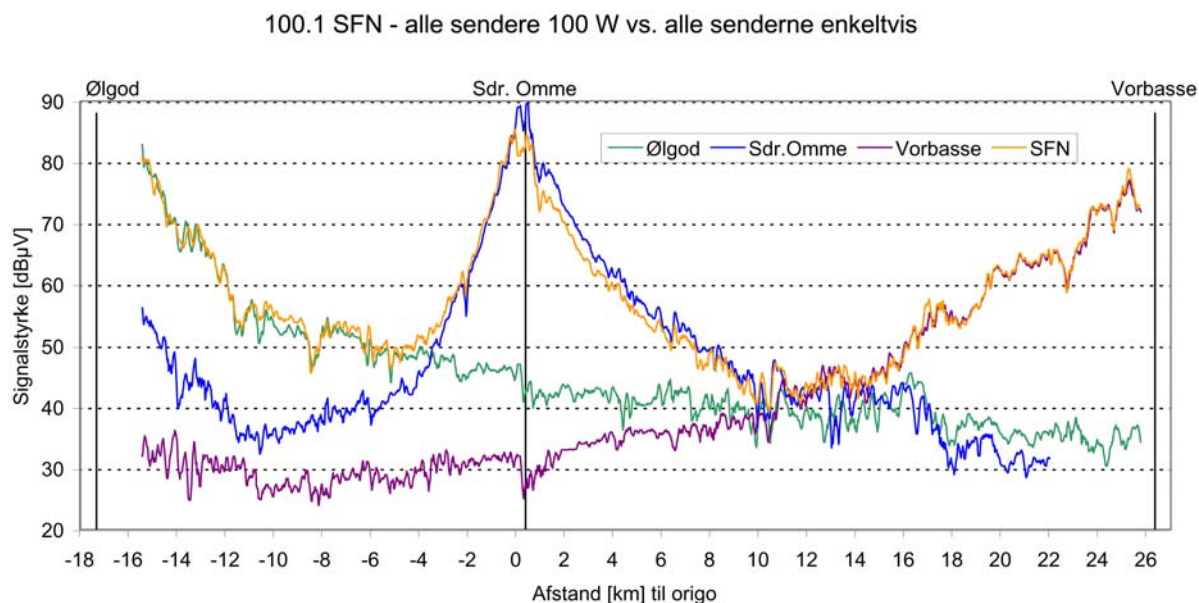


Figur 60 ITU 1546 beregning af feltstyrken i retning mod Sønder Omme.

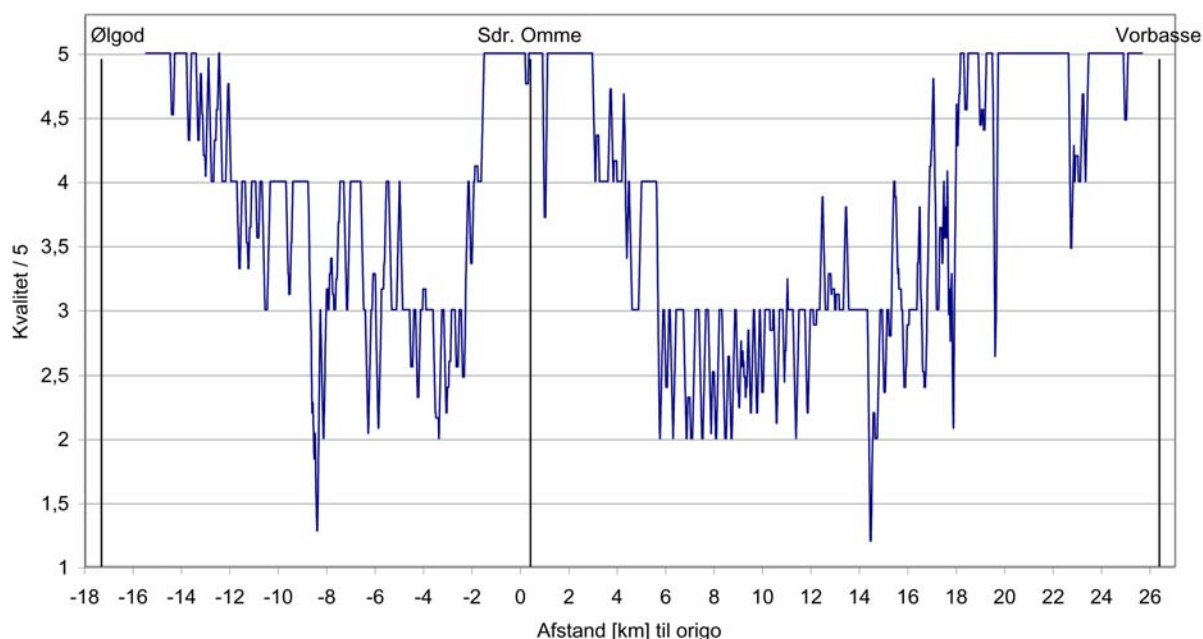
SFN-kurven følger altid den kraftigste af de andre kurver tæt. Kvaliteten af lyden langs hele ruten når alle sendere var på, kan ses på figur 62. En del steder er det o.k., men stadig ikke noget man som lytter ville blive ved med at lytte til hele vejen.

Den nye situation kan sammenlignes med den forrige på figur 63 og 64. På figur 63 bemærkes specielt den hævede signalstyrke mellem Sønder Omme og Vorbasse. Den gør sig specielt gældende fra pos. 10 km og opefter, men med store variationer. Den position er også der, hvor signalerne fra alle sendere er nogenlunde lige kraftige.

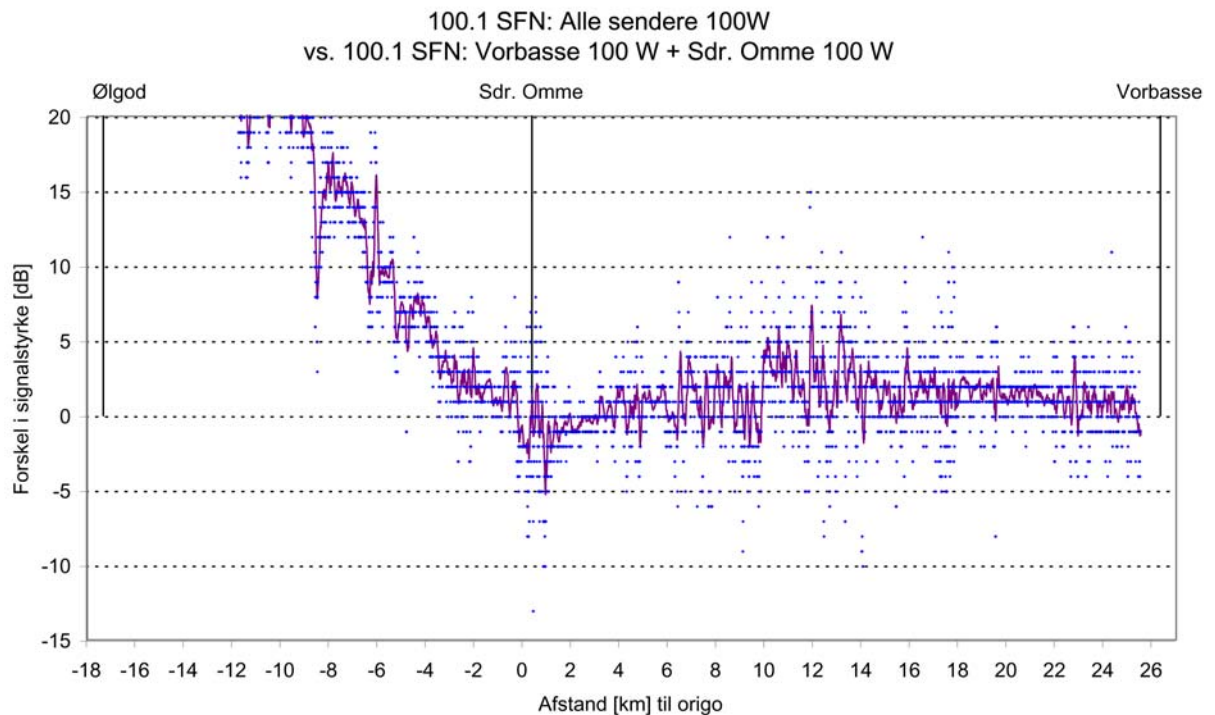
Ser man på kvaliteten på figur 64, bemærkes at selv med denne øgede signalstyrke, bliver kvaliteten ikke nødvendigvis bedre. Omkring -5 og 5 km, ses endvidere et tydeligt dyk i



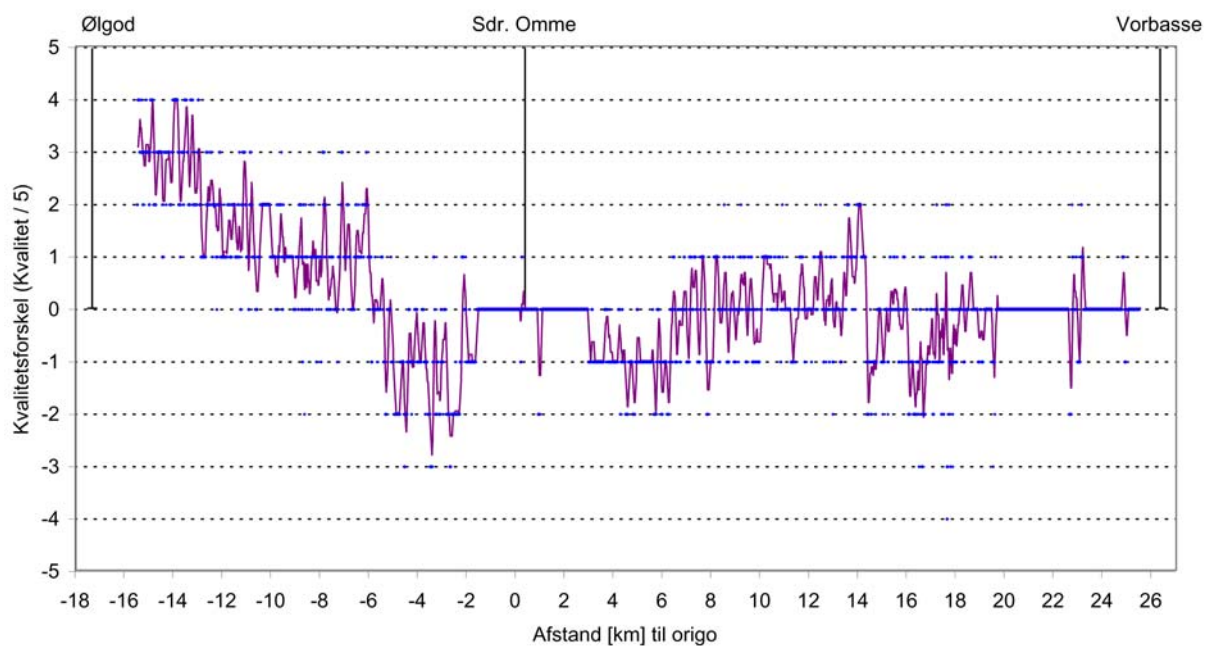
Figur 61 Signalstyrke fra de 3 sendere enkeltvis, sammen med SFN fra alle sendere (tur 27).



Figur 62 Kvalitet af SFN-net med alle tre sendere (tur 27).



Figur 63 Forskel i signalstyrke efter indsættelse af senderen i Ølgod (tur 27-(25+26)).



Figur 64 Forskel i kvalitet efter indsættelse af senderen i Ølgod (tur 27-(25+26)).

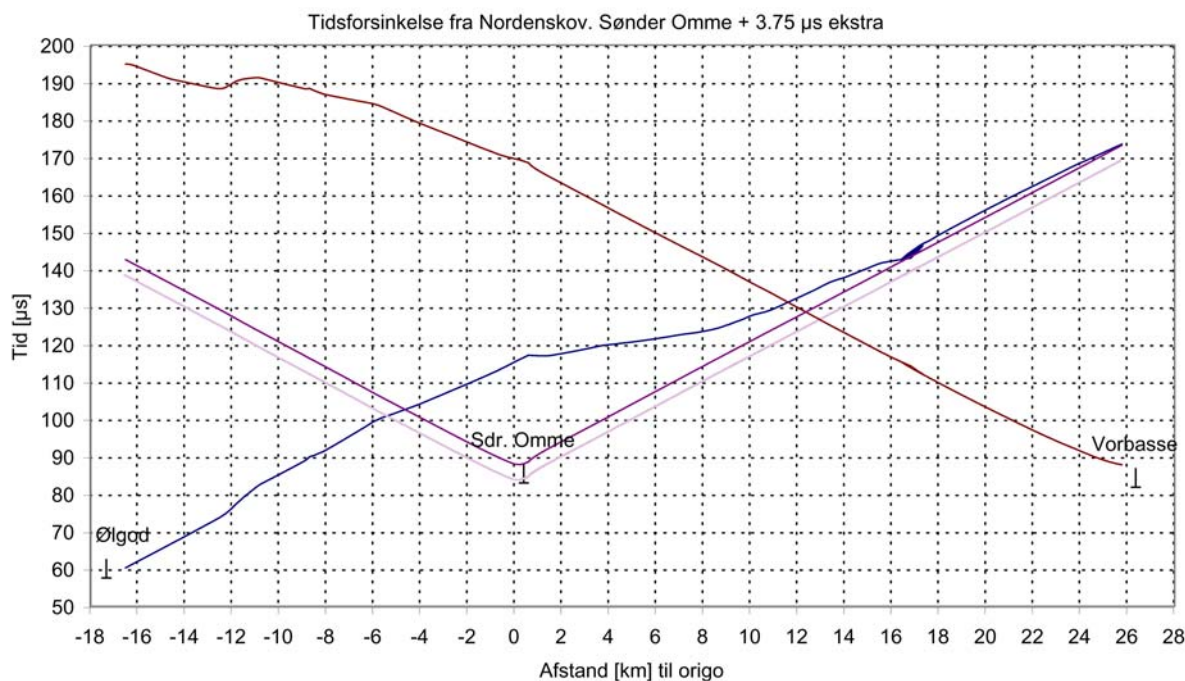
kvaliteten. At kvaliteten falder omkring -5 km, er ikke så mærkeligt, da Sønder Omme og Ølgod er lige kraftige her. Omkring +5 km, burde der til gengæld ikke ske noget særligt. Sønder Omme er klart kraftigere end de andre sendere. På den del af ruten, som allerede var dækket med SFN (Sønder Omme-Vorbasse), har indførelsen af den ekstra sender, gennemsnitligt ændret kvaliteten med -0.18 med en standardafvigelse på 0.8.

7.6 Forsøg med ekstra tidsforsinkelse og højere effekter

Efter at have analyseret de målinger der er gennemgået indtil nu, blev der lavet en serie målinger mere. I denne sidste serie målinger undersøges hvilken forskel det giver, hvis signalerne ankommer til modtageren fra to sendere samtidigt. Samtidigt er der fremskaffet nogle kraftigere sendere, så det er muligt at undersøge hvad der sker, når to SFN-sendere sender så kraftigt, at deres dækningsområder overlapper.

7.6.1 Ændring af opstilling på senderpositionerne

Af figur 39 (s. 53) fremgår, at en oplagt mulighed for at synkronisere to signaler, så tidsforskellen bliver så lille som mulig over en større afstand, er ved at tidsforsinke signalet fra Sønder Omme med ca. 5 μs . Af praktiske grunde kunne tidsforsinkelsen dog højest blive 3.75 μs , og med denne forsinkelse kommer figur 39 nu til at se ud som figur 65.



Figur 65 Indførelse af 3.75 μs tidsforsinkelse i Sønder Omme. Den lyse lilla kurve viser den oprindelige placering uden tidsforsinkelse.

Det interessante område bliver så positioner over 16 km, hvor tidsforskellen mellem Ølgod og Sønder Omme bliver mellem -0.4 og +1.9 μs .

Det ligger uden for senderens dækningsområde. Da denne undersøgelse netop går ud på at finde ud af hvad det betyder for lyd kvaliteten, hvis to sendere dækker samme område med samme signal, skulle der indsættes kraftigere sendere.

Det blev gjort ved at Telefunken senderen i Sønder Omme nu blev brugt som exiter til et 1 kW PA trin fra D.B. Elettronica. På grund af mistilpasningsproblemer med antennen i Sønder Omme, kunne der dog ikke tilføres mere effekt end 500 W.

Senderen i Ølgod blev udskiftet med den Telefunken 250 W sender, som tidligere havde været anvendt i de stationære forsøg. Den nye 54 dB $\mu\text{V}/\text{m}$ rækkevidde kan ses på figur 60 og bliver 18.4 km.

De forsøg, der er lavet indtil nu, har været med relativt lave sendestyrker, med henblik på at to SFN-senders dækningsområder skulle mødes, men uden at de skulle overlappe. Forsøgene har været lavet med de sendere, der fandtes på positionen i forvejen. Da de anvendte senderpositioner til dagligt må sende med en effekt der svarer til 160W ERP fra 40m over terræn, var det begrænset hvor meget senderne kunne yde af ekstra effekt.

Dette forsøg vil dermed også kunne bruges til at undersøge hvad der sker med to SFN-sendere, når der er et større overlap mellem dækningsområderne.

Forsøgene som ses i tabelform i tabel 10, er gennemført efter at resultaterne fra de forrige forsøg var blevet analyseret. Som det fremgår har senderen i Vorbasse været slukket under alle forsøgene.

		Tur-nr.	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	
Sender	Frekvens	Effekt	↓	↑	↑	↓	↓	↑	↓	↑	↑	↓	↑	
Ølgod	100.1	250 W												Tur: Ølgod <-> Sønder Omme
Sønder Omme	100.1	500 W	T	T	T	T		T			T			Tur: Sønder Omme <-> Vorbasse
Vorbasse	100.1													Tur: Ølgod <-> Vorbasse

Tabel 10 Oversigt over de kørt ture. Farven angiver hvilken rute der er kørt. De farvelagte felter angiver tilsammen hvilke sendere der har været tændt under den pågældende tur, og med hvilken effekt (ud af senderen) de har sendt med. Hvis der har været indført ekstra tidsforsinkelse i Sønder Omme, er dette markeret med et "T".

Indførelse af tidsforsinkelse er ikke helt enkelt. På en ballempfang sendeposition er det eneste lavfrekvente signal MPX-signalet. Forestiller man sig, at dette demoduleres yderligere, så kunne det analoge L- og R-signal indsættes i en digital delay enhed, konverteres til analog igen og MPX-encodes. Dermed ville synkroniseringen af piloten og RDS-signalet gå tabt, og først og fremmest ville signalet ikke længere være det samme. Desuden er en 48 kHz sample 20 μ s, og den tid det tager for A/D og D/A-convertere af konvertere signalet er ikke medregnet, ligesom præcisionen vil være ukendt. Digital delay på MPX-niveau kan måske nok lade sig gøre, men der findes ikke nogen færdige produkter til det.

For at komme ud over dette problem, udnyttes at antennekabler af en god kvalitet, har en veldefineret velocity factor. Således kan et signal forsinkes 3.75 μ s ved brug af 1 km kabel med en velocity factor på 0.89 ved 100 MHz. Dette kabel tilsluttes så til modtageantennen, inden retransmissionstuneren. Almindeligt antennekabel kan have en dæmpning på 5-10 dB/100m. Med en dæmpning på 50 dB vil der med andre ord skulle tilføres 90 dB μ V for at Profline tunerens kan have 40 dB μ V tilbage. Derfor skal kablet være bedre end almindeligt antennekabel, og selv med et godt kabel, vil signalet skulle have en antenneforstærker på, inden signalet sendes ind i det lange kabel. Løsningen kan ses på figur 66. Kablet har en velocity factor på 0.89 og en dæmpning på 2.6 dB/100m, hvilket så giver en samlet dæmpning på 26 dB, hvad en god antenneforstærker godt kan rette op på.

7.6.2 Måling mellem Vorbasse og Sønder Omme

Da der er anvendt nye sendeeffekter og da disse forsøg er gennemført ca. 1 måned efter de første forsøg, er referencemålingerne, hvor én sender måles ad gangen med alt andet slukket, gennemført på ny. På strækningen hvor tidsforsinkelsen var den samme (pos. 16-26 km), skulle signalstyrken også gerne være det. Signalstyrkerne fra Sønder Omme og fra Ølgod blev målt på



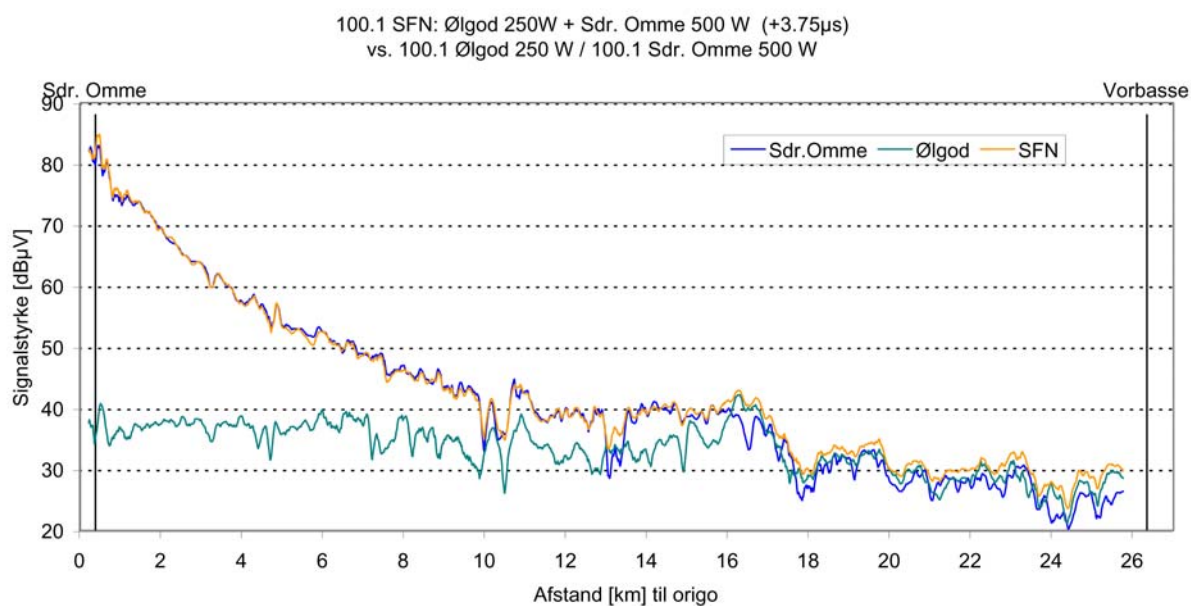
Figur 66 1 km antennekabel til indførelse af tidsforsinkelse på 3.75 μ s Kabel er venligst udlånt af Borch Teknik, som også har stået for levering og afhentning i Sønder Omme.

denne strækning hver for sig, for så efterfølgende at kunne justere dem, så de blev lige kraftige. Det viste sig dog, at de sendestyrker, der var gættet på fra starten, passede. De enkelte signalstyrker kan ses på figur 67.

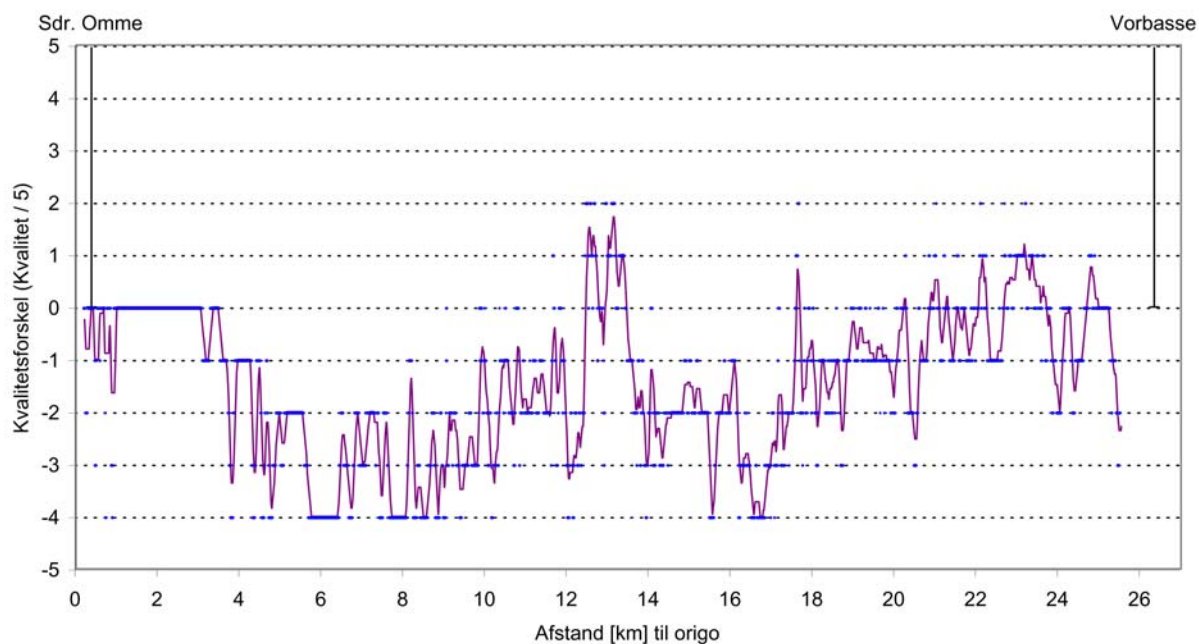
Herefter blev begge sendere tændt, og det lød ganske forfærdeligt.

Som det fremgår af figur 68, er der en ganske betydelig nedgang i kvaliteten. Samtidig kommer den metode, som lydkvaliteten er beregnet ud fra indtil nu, til kort. Bortset fra de første par km, var der stort set ikke noget tidspunkt, hvor signalet var til at holde ud at høre på. Støjen var også anderledes, end den plejede, og var nu mere sus end skrat, samtidig med at visse lyde fra forsøgene fra kap. 5 kunne genkendes. Kvalitetsmålingen viser dermed ikke længere alle problemer. Ingen af de andre parametre, som Audemat'en var i stand til at måle, så ud til at give et bedre billede af situationen. Derfor er det fortsat MPX-level, som er udgangspunktet for målingerne, selv om den ikke giver en fuldstændig beskrivelse af situationen. Selv der hvor forskellen i tidsforsinkelse kun burde være ca. 1-2 μ s, var programmet ikke til at holde ud at høre på.

Der er lavet to sammenligninger (en for hver køreretning) med de ekstra 3.75 μ s tidsforsinkelse, og to uden. Umiddelbart var det ikke til at høre forskel på det to, men ved at se på de opsamlede data for positioner større end 16 km, viser der sig dog en lille forskel.



Figur 67 Signalstyrke af de to sendere hver for sig og for SFN. Det interessante område er pos. 16 km. og op.



Figur 68 Kvalitetsforskel mellem SFN og de to sendere hver for sig. Her er brugt 3.75 µs tidsforsinkelse i Sønder Omme. (tur: 45-(41+47), samme køreretning).

Kvalitetsforskellen mellem SFN og ikke-SFN, for positioner over 16 km fra figur 68 er -0.94. En tilsvarende sammenligning, men hvor referencemålingerne er taget i den modsatte køreretning, giver en kvalitetsforskel på -0.32. I begge tilfælde har der været anvendt 3.75 µs tidsforsinkelse.

De tilsvarende sammenligninger uden ekstra tidsforsinkelse giver en kvalitetsforskel på -1.24 og -0.63. Altså betyder indførelsen af tidsforsinkelsen, at lyden bliver mindre dårlig, end den ellers havde været, og denne mindre kvalitetsforringelse er ca. 0.3.

Resultatet her er interessant, omend mest af ren akademisk interesse, da ingen vil kunne holde ud at høre på det alligevel.

De 4 sammenligninger findes som en del af bilag 4, på s. 65, 66, 68 og 69.

7.6.3 Måling mellem Ølgod og Sønder Omme

Et andet sted hvor der er en strækning, hvor signalet fra to sendere ankommer samtidigt, er mellem Ølgod og Sønder Omme, ca. pos. - 5 km. Her er det en mere almindelig situation, hvor signalernes tidsforsinkelse krydser. Dermed vil den strækning hvor de ankommer samtidigt være ganske kort.

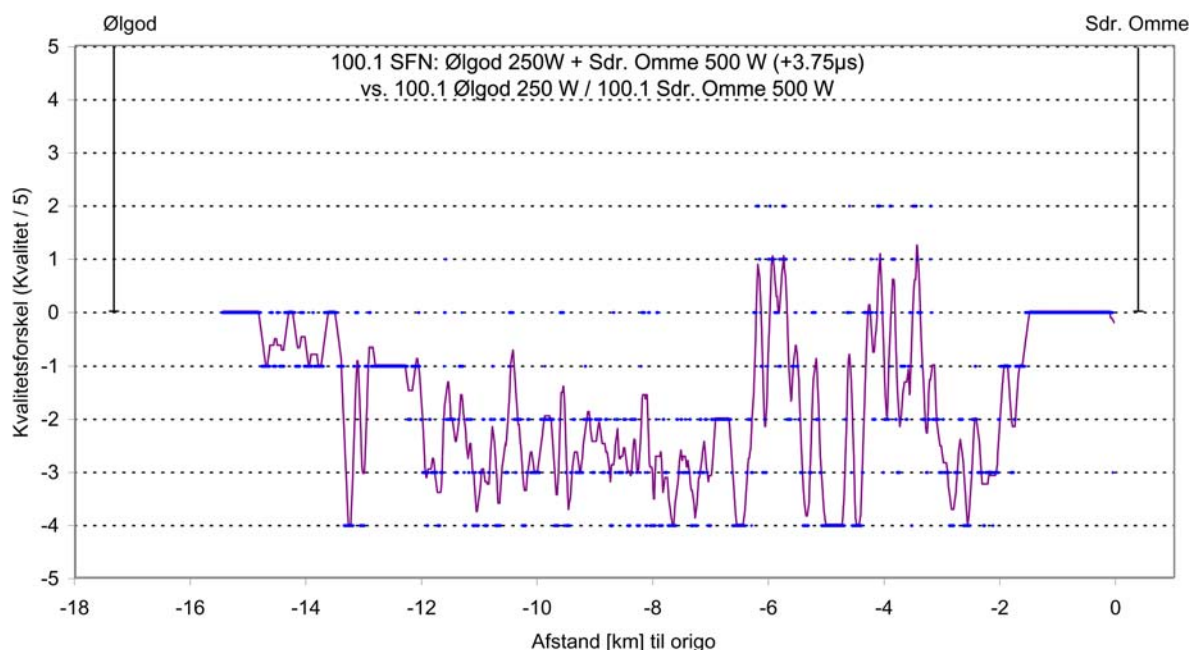
Alligevel er det forsøgt at måle kvaliteten på strækningen med og uden den ekstra tidsforsinkelse. Skæringspunkterne mellem kurverne på figur 66 er pos. -4.66 km med ekstra tidsforsinkelse og -5.34 km uden. Ved at vælge en strækning på 600 m omkring hvert punkt, skulle denne strækning så være den hvor tidsforskellen mellem de to sendere er mindre end 2 μ s.

Dermed udvælges to strækninger omkring de to positioner, og kvalitetsforskellen af dem sammenlignes så med og uden de 3.75 μ s tidsforsinkelse.

Kvalitetsforskellen mellem SFN og ikke-SFN er omkring -2 for alle forsøg i de udvalgte strækninger, og resultaterne indikerer i øvrigt ikke nogen sammenhæng mellem kvalitetsforskellen og om hvorvidt signalet har været forsinket 3.75 μ s eller ej.

På strækningen hørtes desuden en del af de støjfænomener, som også kunne høres i kap. 5, som skyldes manglende synkronisering af carrieren. Derfor er der grund til at tro, at nogle af disse problemer kan afhjælpes ved synkronisering af hele signalet, og ikke kun MPX-signalet. Der hørtes dog også meget andet sus og skrat, og derfor kan det ikke forventes at alle problemer vil være løst hvis hele signalet synkroniseres.

Som i forrige forsøg, høres der meget sus og knitren under hele turen, og ikke alt var sammenfaldende med for store frekvenssving. Kvalitetsforskellen på en af turene kan ses på figur 69.



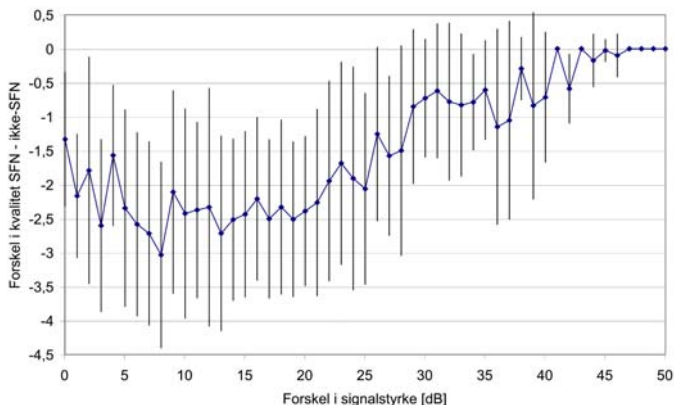
Figur 69 Kvalitetsnedgang efter indførelse af SFN. En del problemer kunne høres, uden at målingerne viste noget forkert, specielt tæt på senderen i Sønder Omme. (tur: 42-(42+50)).

7.7 Undersøgelse af beskyttelseskrav for SFN-sendere

En af de vigtige ting ved disse undersøgelser er, at finde ud af hvor stor signalstyrkeforskellen skal være mellem to SFN-sendere, for at det ikke medfører forringelser i kvaliteten. I Roskilde-forsøget i afsnit 6.4 s. 47, viste bla. figur 35 en ganske klar sammenhæng mellem forskel i signalstyrke og kvalitetsnedgang, som kunne tilskrives anvendelse af SFN.

Dette er også undersøgt for Ribe Amt målingerne. Et eksempel på et tilsvarende resultat kan ses på figur 70. Det er ikke det samme klare resultat, som forsøgene ved Roskilde. Specielt er der underligt, at hvis forskellen på signalstyrken fra de to sendere er 0 dB, bliver kvalitetsnedgangen mindre, end hvis forskellen er 10 dB. Samtidigt bemærkes, at forskellen skal være over 40 dB, før indførelsen af SFN ikke længere medfører en kvalitetsnedgang.

Billedet her er nok noget af det værste, og er fra en af de målinger der var kraftigt forstyrret af støj næsten hele tiden.

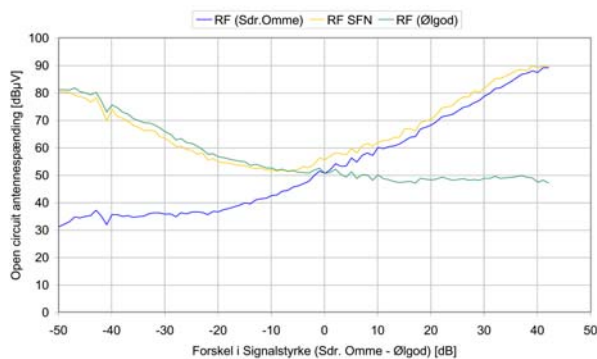


Figur 70 Kvalitetsændring ved indførelse af SFN. Sammenligning mellem Ølgod og Sønder Omme, med 250/500 W tilført. (tur:43-(42+50)).

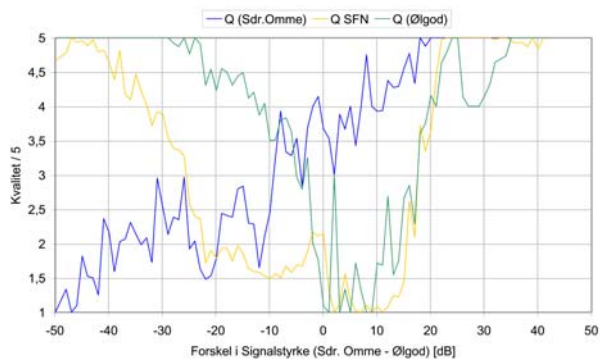
Selv om billeder som figur 68 og 69 kan være udmærkede til at se hvad indførelsen af SFN betyder for modtagekvaliteten på en strækning, er det ikke lige til at se på den figur og den tilsvarende figur for signalstyrken, hvorfor figur 70 ender med at se ud som den gør.

Derfor er signalstyrken og kvaliteten vist som funktion af forskellen mellem de to senders signalstyrke, når disse måles hver for sig. Så x defineres som signalstyrken fra sender 1 ! signalstyrken fra sender 2. Figur 71 viser signalstyrken fra senderne som funktion af x . Denne kurve er måske ikke så interessant i sig selv, da to af kurverne tilsammen danner den funktion, som de samme kurver afbildes efter. Den grønne kurve, trukket fra den blå, bliver simpelt hen x -aksens værdi. Men det bliver nemmere at forstå figur 72, som så er samme x -akse, men hvor det nu er kvaliteten for SFN og de to sendere hver for sig.

Her er flere ting som er værd at lægge mærke til. Den første er Ølgod, som pludselig går op på 5 for $x > 20$. Signalstyrken fra Ølgod er ellers nogenlunde konstant helt fra $x > 0$. Dermed er der ikke umiddelbart nogen forklaring på hvad der får kvaliteten til at stige fra 1 til 5, når den burde være konstant. Det har ikke noget med SFN at gøre, da Ølgod kurven blev målt med Sønder



Figur 71 Signalstyrker som funktion af forskellen i signalstyrke ml. Ølgod og Sdr. Omme.



Figur 72 Kvalitet som funktion af forskellen i signalstyrke ml. Ølgod og Sønder Omme.

Omme slukket.

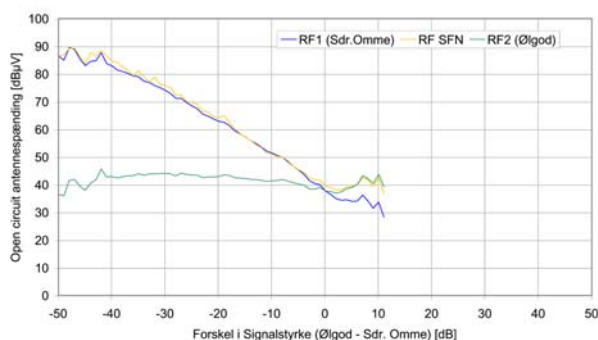
SFN-kurven for $x > 20$ ser pæn ud, men her var der så problemer med sus, som ikke blev målt men kun hørt. I forhold til figur 70, forklarer det dog hvorfor kvalitetsnedgangen er relativt lille for små feltstyrkeforskelle, da området for $x > 20$ så kommer til at blive talt med til de målinger hvor kvalitetsforskellen er lav. Samtidigt falder kvaliteten af Ølgod også mere end den burde omkring $x = 0$. Et signal ud af modtageantennen på 50 dB μ V burde ikke give nogen modtageproblemer overhovedet, så problemerne må skyldes refleksioner.

Den anden ting, der er værd at lægge mærke til, er SFN-kurven omkring $-40 < x < -20$ dB. I forhold til de målinger der er gennemført ved Roskilde, burde kvaliteten være i top her. Selv om Ølgod kvaliteten altså af en eller anden grund aftager kraftigt fra $x > -20$, så forklarer det ikke hvorfor SFN-kurven nærmest er forskudt -20 dB i x-retningen.

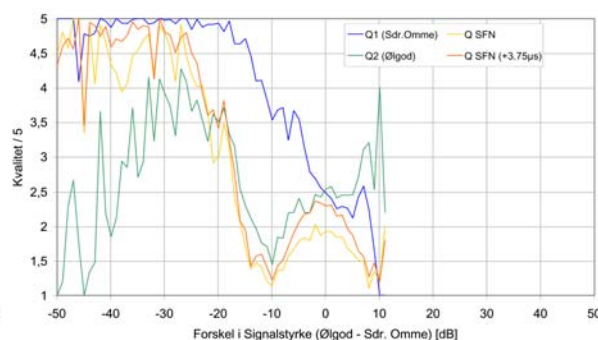
SFN-kurven i figur 71 og 72 er dannet ud fra et gennemsnit af flere ture (tur 43, 48 og 49), som så er sammenlignet med Sønder Omme (tur 42) og Ølgod (tur 50). Der var ikke den store forskel på de enkelte SFN-ture, så der har ikke været tale om en enkelt "uheldig" måling.

Figur 73 og 74 viser de samme sendere, men nu målt mellem Sønder Omme og Vorbasse, hvilket forklarer udseendet af figur 73. Signalstyrken fra Ølgod er næsten konstant. Figur 67 viser signalstyrken som funktion af placeringen, og af den fremgår, at alle positioner fra omkring 10 til 26 km bliver vist i $-10 < x < 10$ på figur 73 og 74. På figur 74 er der to SFN-kurver, alt efter om der blev anvendt 3.75 μ s tidsforsinkelse i Sønder Omme eller ej. Specielt bemærkes forskellen på SFN-kurverne for $-10 < x < 10$. Her øges kvaliteten med op mod $\frac{1}{2}$, og det bemærkes at indførelsen af forsøget på at synkronisere MPX-signalet fra de to sendere, betyder mest jo mindre forskellen mellem signalstyrkerne er. Samtidig bemærkes at SFN-(+3.75 μ s)-kurven følger den dårligste kvalitetskurve, når den numeriske værdi af forskellen på signalstyrkerne er mindre end ca. 25 dB. Det ses både på figur 72 og tydeligst på figur 74. Billedet forstyrres noget af, at Ølgods kvalitet er så svingende, selv om dens signalstyrke er nogenlunde stabil. Kurverne for Q1 og Q2 er gennemsnit af to ture (én i hver retning).

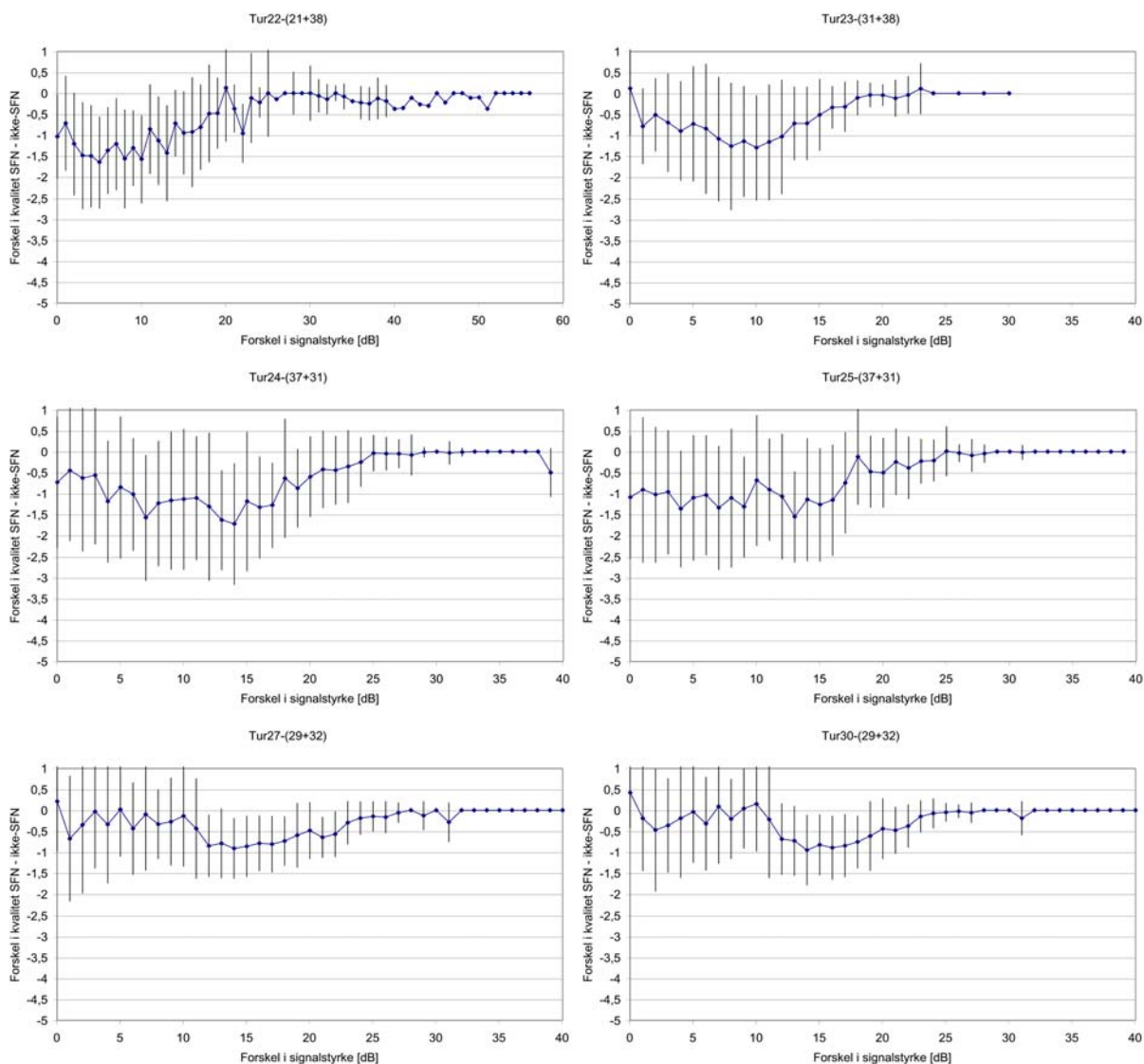
Der er lavet tilsvarende undersøgelser af de ture hvor der blev anvendt lavere effekter (tur20-39). Resultaterne, som kan ses på figur 75, minder mere om resultaterne fra Roskilde. Dog er det ikke helt godt nok med en dæmpning af den interfererende SFN-sender med 15 dB. En dæmpning på 20 dB vil være godt nok i det fleste tilfælde, og kan den blive 25 dB, vil det være bedst.



Figur 73 Signalstyrker som funktion af forskellen i signalstyrke ml. Ølgod og Sdr. Omme. Målt mellem Sønder Omme og Vorbasse.



Figur 74 Kvalitet som funktion af forskellen i signalstyrke ml. Ølgod og Sønder Omme. Målt mellem Sønder Omme og Vorbasse.



Figur 75 Kvalitetsændring som funktion af signalstyrkeforskel. Række 1 er Sønder Omme + Vorbasse med hhv. 35+205 W og 35+100 W. Række 2 er Sønder Omme + Vorbasse, begge med 100 W og hvor SFN-måleturen så er kørt to gange, så disse skulle ideelt set være identiske. Række 3 er Ølgod + Sønder Omme, begge med 100 W, og igen med SFN-turen kørt to gange.

7.8 Konklusioner

Der er i alt blevet kørt 31 ture mellem senderne, med forskellige kombinationer af effekter og tidsforsinkelse. Det er ikke lykkedes at få et SFN-net til at lyde acceptabelt hele vejen mellem to SFN-sendere.

Visse kombinationer af tidsforsinkelser og effekter viser, at noget er bedre end andet, men intet af det er noget man som almindelig lytter, vil lytte til hele vejen.

Forsøgene har vist, at det er muligt at flytte det område mellem to sendere, hvor lyd kvaliteten er dårlig, ved at variere på sendestyrkerne.

Forsøgene med højere effekter og tidsforsinkelse af MPX-signalet viser, at det er muligt at forbedre situationen noget ved at sørge for, at MPX-signalet fra to sendere når samtidigt frem til

modtageren. Det har ikke været muligt at synkronisere carrieren, så hvor stor en betydning det ville få, vides ikke. Når nogle af problemerne kunne genkendes fra den statiske opstilling, er der altså grund til at tro at synkronisering af carrieren kunne hjælpe noget. Der kunne dog også høres mange andre problemer, som ikke var der med den statiske opstilling. Derfor er der også grund til at tro, at alt ikke vil være ordnet hvis carrierne synkroniseres.

De ekstra problemer der kunne høres ved de højere effekter antyder, at virkningen af en forstyrrende SFN-sender, ikke kun er et spørgsmål om forskellen i signalstyrke fra senderne, men også bare er en funktion af signalstyrken fra den forstyrrende sender. Dermed skulle den samlede lyd kvalitet af en given rute, ikke alene være afhængig af hvor meget den ene sender er dæmpet i forhold til den anden, men også af feltstyrkerne i det hele taget, hvor den sidste afhængighed ikke som ventet ville betyde at højere feltstyrke vil medføre øget lyd kvalitet.

Hvis to senderes effektforhold og placeringer er fastlagt, indikerer de øgede problemer med lyden ved højere sendestyrker, at der må findes en optimal sendestyrke, som bliver et kompromis mellem at sikre feltstyrke nok til svagt dækkede områder, og at undgå at signalstyrken fra den uønskede sender bliver for høj.

Det ville have krævet væsentlig flere målinger at verificere, om en sådan optimal feltstyrke findes, eller om kvaliteten udelukkende afhænger af forskellen i feltstyrke mellem senderne, og i den forbindelse skulle det være muligt at synkronisere både carrier og MPX. Det har så ikke været muligt at undersøge i denne omgang.

Samtidigt viser figur 72 og 74, at hvis forskellen i signalstyrke fra to sendere, er mindre end ca. 25 dB, så vil lyd kvaliteten fra SFN svare til lyd kvaliteten fra den dårligste sender. Når lyd kvaliteten fra den dårligste sender er dårlig, skyldes det ikke altid en for lille feltstyrke. Det kan skyldes refleksioner eller andre forstyrrelser. Kurven fra den dårligste sender er målt, når det kun var den sender alene, der var i luften. Så når SFN-kurven følger den, så må det have noget at gøre med signalvejen hen til modtageren, og altså ikke noget med synkronisering af carrier eller MPX. Hvis SFN skal lyde godt, så må det betyde, at i de områder hvor feltstyrkeforskellen er mindre end ca. 25 dB, skal dækningen planlægges, så signalvejen fra den svageste sender ikke udsættes for så mange forstyrrelser, så lyd kvaliteten bliver dårlig af det.

Sammenlignes forholdene fra forsøget ved Roskilde med forsøgene her, er den største forskel, at i Roskilde var det nok at feltstyrkeforskellen mellem to SFN-sendere var ca. 15 dB, for at indførelsen af SFN ikke længere betød noget for kvaliteten. Det indikerer, at en mere bakket landskabstype måske er en fordel i SFN-sammenhæng. Fordelen skulle være, at sendere som befinder sig længere væk har større sandsynlighed for at komme til at befinde sig bag en bakke, end en sender tæt på. Landskabet i Ribe Amt er ret fladt, og dermed vil signalet fra en fjern sender i samme SFN, have lettere ved at nå frem.

Værdien 25 dB findes også i TNO-II+ normen, som den maksimale beskyttelse der kan være nødvendig for SFN-sendere (tabel 5, s. 31). Her er så godt nok også angivet at beskyttelsen kan blive helt ned til 2 dB. Ud fra de forsøg der er gennemført her, er det svært at se hvordan den nogen sinde skal kunne komme ned på det. Hvis lyd kvaliteten, og dermed den nødvendige beskyttelse, er en funktion af feltstyrkerne i sig selv, er det dog ikke umuligt at beskyttelsen kan være lavere end 25 dB, som det var tilfældet ved Roskilde.

Hvis man ikke vil høre kvalitetsforringelser pga. SFN, så er 2 dB dog ikke engang godt nok til et laboratorieforsøg med kabler og en combiner. Hvis 2 dB skal accepteres må det derfor være fordi man accepterer at signal/støj-forholdet i lyden bliver mindre end 50 dB.

7.8.1 Forsøg fra rigtige sendepositioner - betingelser og begrænsninger

Forsøgene i dette og forrige kapitel, er på godt og ondt udført med de forhåndenværende midler. Etableringen af en sendeposition til lokalradiobrug, koster mellem 100-200.000 kr. for antennen, feederkabel, senderen, retransmissionstuner, ballempfang-antenne og montering af det hele, hvis de enkelte komponenter skal være af en god kvalitet. Udgifter til bygning eller leje af mast og housing er ikke medtaget. Det er således ikke noget, nogen ville ofte penge på at bygge, bare fordi det kunne være interessant at lave et SFN-forsøg.

Når først sådan en position er bygget, så vil radiostationen der har den, normalt ikke acceptere at den bliver taget ud af drift et par dage, for pludselig at sende på en anden frekvens, og på en måde som lyder mærkeligt.

Den eneste grund til at det kunne lade sig gøre i dette tilfælde, var at der var tale om positioner, hvor deres dækningsområde i forvejen var dækket af kraftigere sendere. Med andre ord, var det positioner hvis kommercielle værdi var begrænset, fordi der siden var kommet kraftigere sendere på andre positioner, men hvor udsendelserne fra disse mindre positioner så er fortsat, fordi nu var de bygget. Samtidigt var det også nødvendigt, at positionerne fik deres signal gennem luften fra en anden sender i nærheden, så det blev sikret at MPX-indholdet var det samme, og så der var styr på tidsforsinkelserne helt fra hovedsenderen via ballempfang senderne og ud til modtageren. De i alt 5 senderpositioner og to hovedsendere der er blevet brugt, opfyldte disse kriterier, og der var ikke flere muligheder.

Da det er en ret unik situation, at der sådan er 5 sendepositioner "til overs", som opfylder alle disse betingelser, er det derfor næppe sandsynligt, at der vil blive lavet lignende forsøg lige foreløbigt andre steder.

Når muligheden, for at anvende rigtige sendepositioner til sådan et forsøg, bød sig, så var der til gengæld ingen mulighed for at være kræsen, med hensyn til den antenne der var monteret, den retning den vendte, mastens position, adgangsforhold eller omgivelsernes beskaffenhed i øvrigt. Derfor har det blandt andet været nødvendigt at leve med cirkulære antenner med et ukendt udstrålingsdiagram på to positioner.

Disse positioner var overtaget fra tidligere radiostationer, som de var, og selv om valget af antenner ikke var optimalt (heller ikke til deres normale brug), var det dog ikke så ringe, at man ligefrem ville bekoste en udskiftning af antennen.

Positionerne var heller ikke altid de bedste i forhold til hinanden, bla. med hensyn til afstande (og tidsforsinkelse) til hovedsenderen. Det havde også været en fordel hvis antennerne havde været vendt mod det område hvor SFN-dækningen skulle testes, da det kunne have givet højere feltstyrker på de ruter der blev kørt.

Forsøgene er dermed endt med at blive udført under forhold, som i høj grad ligner dem, som et helt netværk vil skulle bygges under. Ved opbygning af et rigtigt net, må der også indgås kompromiser, når man ikke kan få den mastposition man gerne vil, eller når andre antenner tilføjer uønskede variationer i udstrålingsdiagrammet.

8 Alternativt forslag til replanlægning

I dette kapitel gives et forslag til en anden måde at replanlægge det danske FM-bånd på, end den "Hollandske model". Forslaget er baseret på de målinger der er foretaget i de sidste kapitler. En rigtig replanlægning kræver softwarepakker som fx CHIRPlus fra L&S Telecom og en detaljeret database over terrænet. Det har ikke kunnet lade sig gøre, så en kontrol af om de ideer, der vil blive præsenteret her, også kan lade sig gøre i virkeligheden, har ikke kunnet gennemføres.

8.1 Forudsætninger for FM-radio i fremtiden

Hvis en replanlægning af FM-båndet skal gennemføres i Danmark, vil der gå flere år, før lytterne kan komme til at høre resultatet af den. I al den tid vil der blive solgt flere DAB radioer, og traditionel radio vil få yderligere konkurrence fra forskellige former for lydtransmission gennem andre medier. Disse medier kan være netradio (streaming) via trådløse netværk, enten med 3G mobiltelefoni eller Wireless LAN. Desuden kan det være forskellige former for bærbare optagere, MP3 afspillere, PodCasting osv.

Traditionel radio kendetegner sig ved envejskommunikation og meget begrænsede muligheder for lytterne, for at vælge ting man ikke gider høre fra. Uanset om FM-båndet replanlægges eller ej, vil traditionel radio skulle konkurrere om lytternes tid med alternative on-demand lydmedier. DAB-radio (og DRM for den sags skyld) er også traditionel radio, i og med at de heller ikke har nogen ekstra muligheder for individuelt til- eller fravalg. Den smule tekst-information man har mulighed for at sende med et DAB-program ændrer ikke ved, at DAB stadig er til envejs kommunikation, og ikke i sig selv giver mulighed for interaktion.

I forhold til DAB, kan FM være med så længe modtagelsen tillader det, og så længe program-udbuddet på FM er attraktivt nok. De få lyd-entusiaster der vil skifte til DAB, alene for at få samme program i 48 kHz digital stereo er ganske få, hvis de da ikke samtidigt helst vil være fri for den MPEG1 Layer II kompression der følger med.

Resten af befolkningen er tilfredse med den lyd kvalitet FM-radio tilbyder, så længe deres modtagelse er så god, at de kan slippe for sus og skrat.

Formålet med den Hollandske model for replanlægning har været at få plads til flere kanaler ved at lydkvaliteten skulle gå *"fra at være god til at være acceptabel"* (Citat: Gerjo Bruntink). Det har også været resultatet. Når man ser bort fra de fejl der nu er ved at blive rettet, fx ved anvendelsen af NSFN, så bliver resultatet stadig at flere lyttere ikke modtager deres FM-signaler lige så godt som før.

Nu er der truffet en politisk beslutning om, at FM-båndet skal replanlægges. Da det tager nogle år inden de nye netværk kommer i luften, og det vil tage yderligere en del år at få tjent penge nok til at betale regningen for replanlægningen, må der ligge en forudsætning om, at FM-radio forventes at leve i mindst 15 år endnu, bag sådan en beslutning.

I en situation hvor alle andre lyddistributionsformer tilbyder bedre lyd kvalitet, er vejen frem for FM derfor ikke at tilbyde dårligere lyd kvalitet. Vælger man at replanlægge FM-båndet på nuværende tidspunkt, må det være fordi man gerne vil forlænge levetiden af FM. En forudsæt-

ning for, at det kan lade sig gøre er, at lytternes generelle opfattelse af FM-radio ikke bliver, at det er noget skrattende og støjende noget.

Derfor må en replanlægning i dag sigte mod, at give lytterne lige så god modtagelse, som de har i dag eller bedre. Det vil betyde, at der muligvis ikke bliver plads til at presse helt så mange kanaler ind på det samme FM-bånd, som med den hollandske model. Med baggrund i den øgede konkurrence fra andre lyd-udbredelsesmedier, vil tiden også være løbet fra den lyd kvalitet, som en replanlægning efter hollandsk model, kan tilbyde.

Derfor må det være på sin plads at foreslå en dansk model. De FM-net, som er kendt for god modtagelse her hjemme, som fx DR's net, er kendetegnet ved en meget høj dobbelt-dækning. De fleste lyttere har prøvet at scanne FM-båndet, og her er det ikke udsædvanligt at støde på forskellige DR programmer måske 10 gange i løbet af hele turen gennem FM-båndet, selv om DR kun sender 4 programmer. Dobbeldækningen er med til at sikre, at stort set uanset hvad man forestiller sig af uheldige kombinationer af bygninger, terræn, broer osv., så vil der næsten altid være et godt signal fra en af senderne. Hvis man har en bilradio med RDS og som samtidigt viser den frekvens der aktuelt lyttes til, vil man også kunne lægge mærke til, at denne frekvens kan skifte meget mere end man normalt ville forvente, uden at man lægger mærke til det.

Replanlægningen efter den hollandske model gik ud på at fjerne så meget dobbeltdækning som muligt. Set ud fra et frekvensøkonomisk synspunkt var det fornuftigt nok, for den plads kunne så gå til nye kanaler, men det var ikke fornuftigt ud fra et synspunkt om at sikre levering af signal til alle lyttere i en acceptabel kvalitet.

Ved fjernelse af dobbeltdækning fjernes også den redundans, som RDS-radioerne bruger for at levere en god lyd kvalitet til lytterne.

Derfor må det logiske svar være, at lave en replanlægning med dobbeltdækning, faktisk mere dobbeltdækning end vi er vant til i dag. Denne dobbeltdækning kan så kombineres med andre "nye" værktøjer som SFN.

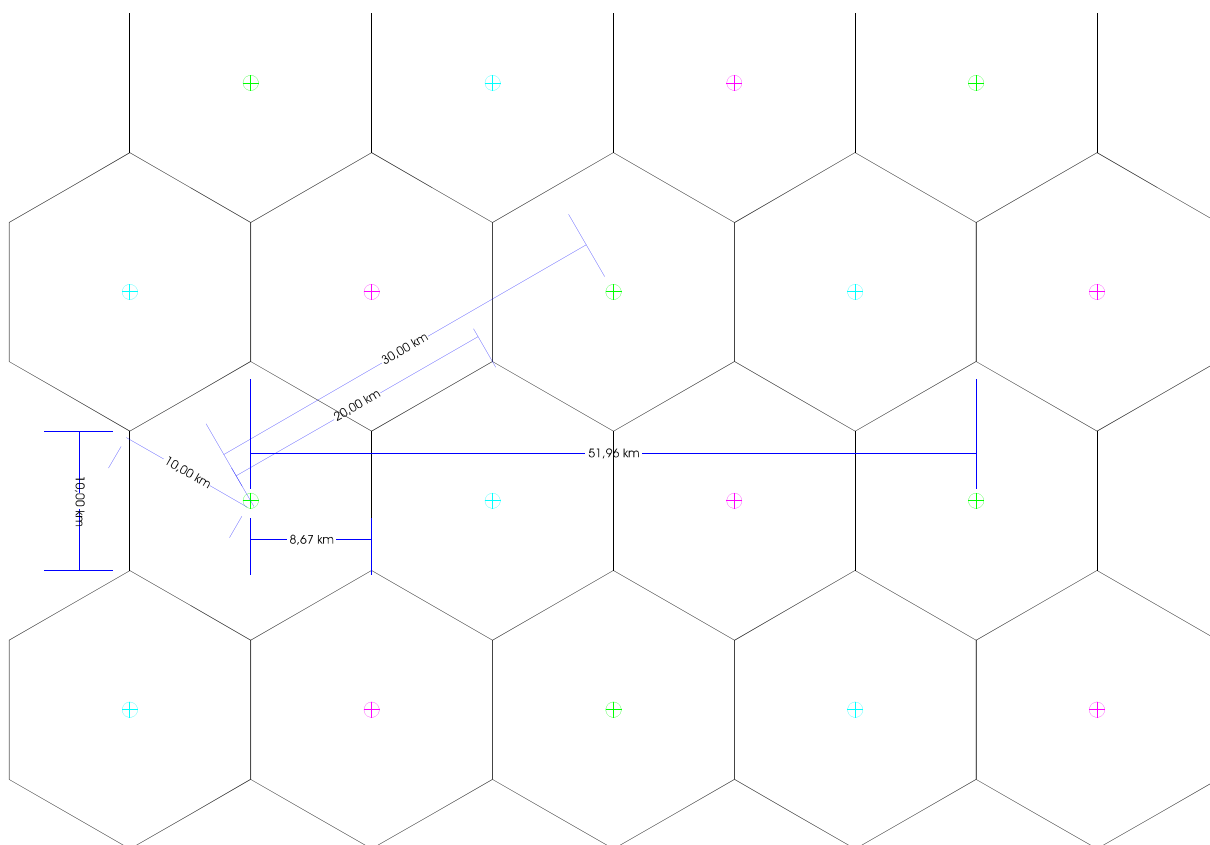
8.2 SFN-net med dobbeltdækning

8.2.1 Beregning af dækning og forstyrrelser med en simpel model

Af målingerne i de forrige kapitler fremgår, at selv om man kan gøre forskellige ting for at mindske generne, så bliver lyd kvaliteten aldrig rigtig god omkring grænsen mellem to SFN-senders dækningsområde. Da dårligere lyd kvalitet ikke accepteres, må der som forudsætning gælde, at to nabosendere ikke sender på samme frekvens.

Den problematik kendes fra andre brancher, fx mobiltelefoni. Her opfattes en senders dækningsområde som en celle, og i den indledende fase, hvor man endnu ikke har et konkret terræn at tænke sit dækningsområde ind i, vil denne celle som regel være 6-kantet. Hver gang der er en kant mellem to celler, må der ikke sendes på samme frekvens på begge sider af kanten.

Det mindste antal frekvenser der så kræves er 3. Dermed vil vi have et FM-net som består af 3 SFN-net, og alle de steder hvor det ene SFN-net har problemer med at to senders dækningsområder støder sammen, vil der være en uforstyrret sender på en anden frekvens. Situationen kan ses på figur 75.



Figur 75 Eksempel på FM-net med 3 frekvenser. De farvede prikker i cellerne angiver en sender, hvor én farve svarer til én frekvens.

Her er valgt en sidelængde på 10 km. Det svarer nogenlunde til størrelsen af dækningsområdet fra en lokalradiosender. En række andre afstande, der har betydning for modtagelse og forstyrrelse er tegnet ind på figuren. Med et så fintmasket net, vil der skulle være FM-sendere rigtig mange steder, og da det næppe vil blive accepteret at plastre hele landet til med høje master, må strukturen være baseret på eksisterende master. De eneste master der findes i så stort omfang, er mobilmaster, evt. suppleret med gamle fællesantennemaster i visse dele af landet, vognmandsmaster og den slags.

Da antennepaneler til mobiltelefoner sidder på siden af masten, er det som regel muligt at montere en antenne på toppen af masten, hvis denne antenne monteres på et bærerør, eller ved brug af fx en Aerial AV-1440, som det var gjort ved senderen i Vorbasse. Antennens effektive højde bliver dermed ca. 40 m. Hvis antennen antages at være rundstrålende, betyder det, at hvis 54 dB μ V/m-grænsen skal befinde sig 10 km væk, så skal sendeeffekten være 115W ERP (ITU 1546, 50% tid, 50% sted).

Selv om en sender ikke bliver forstyrret af sin nabosender, vil der være sendere længere væk, som forstyrrer. Som eksempel bruges de to grønne sendere, som har en afstandslinje på 30 km imellem sig.

Hvis den ene sender skal sende uforstyrret til en radius på 10 km, betyder det, at den anden sender skal være dæmpet til et passende niveau 20 km ude. Feltstyrken fra den forstyrrende sender vil være 40.9 dB μ V/m (ITU 1546, 50% tid, 50% sted).

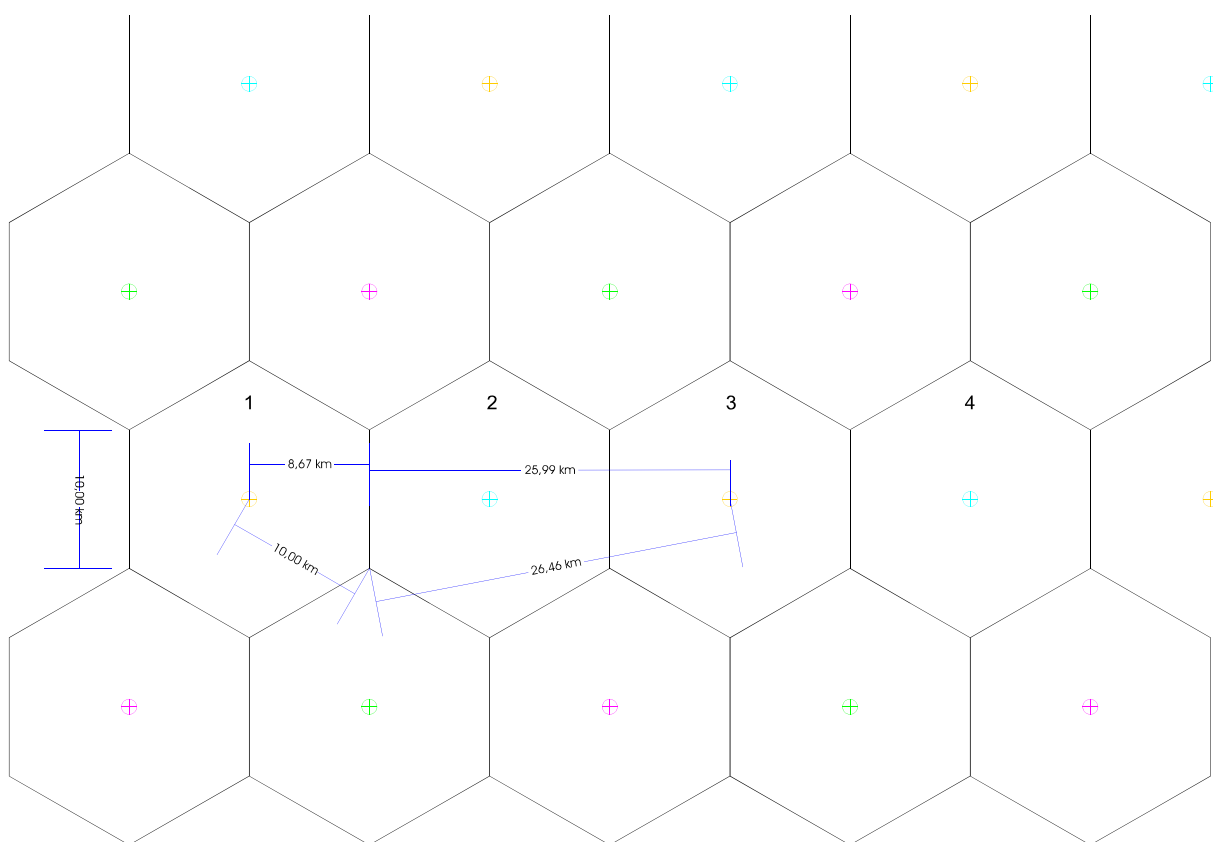
Dermed bliver beskyttelsen kun 13 dB, hvilket er for lidt, i forhold til de målinger der er lavet. ITU 412 foreskriver at der altid regnes 50% tid og 50% sted, når feltstyrken fra en interfererende sender skal beregnes, bortset fra der beregnes sporadisk forstyrrelse. I SFN-sammenhænge, hvor

beskyttelsen er meget mindre, kan 50% sandsynlighed dog ikke anses for at være godt nok. Regnes den samme feltstyrke med 10% tid og 50% sted, fås 41.8 dB μ V/m, og dermed er forskellen i feltstyrke fra de to sendere kun 12.3 dB.

Det er nok i underkanten til at sikre en god modtagelse hele tiden. Godt nok vil en modtager have to frekvenser at vælge imellem langs en cellegrænse, men den alternative frekvens vil være udsat for samme forstyrrelser. Samtidigt er der ikke noget at give af, til de variationer som følger af terrænet.

Derfor er strukturen ændret, så der bruges 4 frekvenser. Figur 76 viser den nye situation. En senders dækningsradius er den samme som før, men den forstyrrende sender er nu rykket længere væk. På den lige linje mellem de to gule sendere (celle 1 og 3), skal første del af strækningen være dækket forstyrrelsesfrit ud til 8.67 km. Afstanden til den forstyrrende sender er så 26 km, og forskellen i de to senderes feltstyrke, på grænsen mellem den gule og den blå sender bliver så 17.4 dB, når den ønskede sender er regnet med 50% tid og 50% sted, og den uønskede er regnet med 10% tid og 50% sted.

Hvis der regnes ud til hjørnet af cellen, bliver forskellen 19.5 dB under de samme forudsætninger.



Figur 76 Eksempel på FM-net med 4 frekvenser.

Nu er 10% sandsynlighed for forstyrrelse stadig i overkanten, og her er det så at den massive dobbeltdækning bliver nyttig. For hvis sandsynligheden for dårlig lyd på det gule SFN-net er 10%, og sandsynligheden for dårlig lyd på det blå SFN-net er 10%, så bliver den samlede sandsynlighed for dårlig lyd kun 1%, hvis kvaliteten af de to SFN ellers er ukorreleret. Da senderne står forskellige steder, og frekvenserne i sagens natur er forskellige på de to net, skulle dette være ganske sandsynligt.

Så kan der være lokale forhold, som huller i terrænet. Her vil feltstyrken fra alle net sandsynligvis være lavere, men da den begrænsende faktor her er forskellen i feltstyrke mellem SFN-senderne, vil feltstyrken for alle sendere blive lavere. Hvis feltstyrken generelt er høj nok, vil det dog ikke være noget problem.

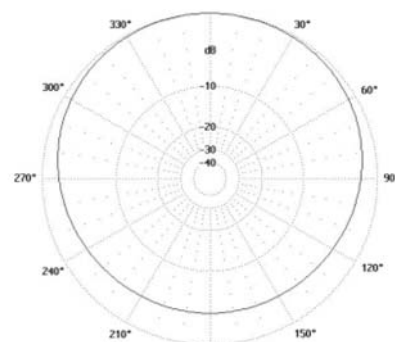
Minimums-feltstyrken er valgt til at være 54 dB μ V/m. Det er den, fordi det står i ITU 412. I forhold til cellemodellen og de 4 SFN-net, kan den dog sagtens vælges til at være noget andet. Det vil medføre at alle sendere skal sende kraftigere, men det får ikke nogen betydning for feltstyrkeforskellene.

Størrelsen af cellerne kan også ændres. I eksemplet blev der valgt 10 km fordi det var et pænt tal, men mastetætheden i et givent område, kan tale for at der vælges noget andet.

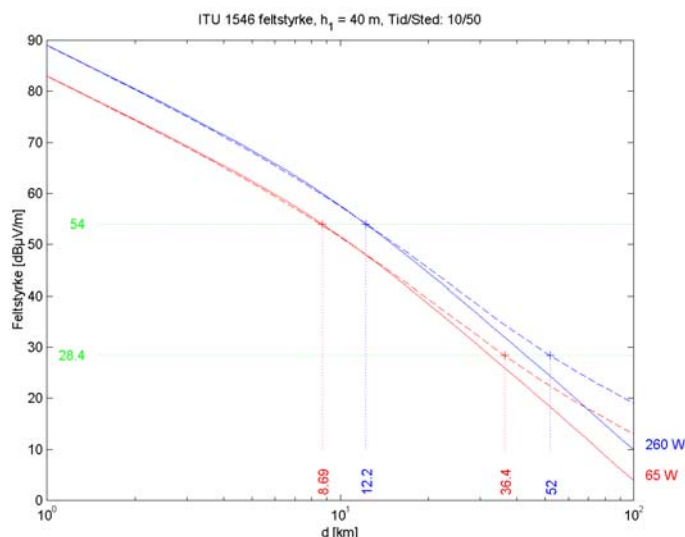
I forhold til den dæmpning systemet giver af interfererende sendere i samme SFN, så viser målingerne fra Ribe Amt, at en forskel på 17.4 dB mellem den ønskede og den uønskede sender er i underkanten.

Hvis der skal laves en planlægning, som med garanti virker i denne cellemodel, så skal der bruges mere end 4 frekvenser, hvis alt skal laves fuldstændig symmetrisk. Det bliver det aldrig i virkeligheden alligevel, og det er også en fordel. At symmetrien er et problem, indses ved at studere figur 76, med udgangspunkt i den første blå frekvens for neden (celle 2). Til højre for den, er en gul frekvens (celle 3), og på overgangen mellem de to, vil både den gule og den blå frekvens være forstyrret lige meget, fra hhv. den blå frekvens til højre for grænsen (celle 4) og af den gule frekvens til venstre for grænsen (celle 1). Her må så sikres, at den gule og blå frekvens ikke forstyrres lige meget. Hvis nogle af frekvenserne gøres lidt svagere eller kraftigere, så vil de ikke længere være udsat for samme forstyrrelse samme sted.

Det vil fx være tilfældet hvis masten ikke står nøjagtigt i cellens centrum, eller hvis der anvendes en antenne, der ikke er rundstrålende. Det sidste kan nok anbefales under alle omstændigheder, da en rundstrålende antenne er større, og der-



Figur 77 Aerial AV-1440 udstrålingsdiagram.



Figur 78 SFN-net i celler, med 20 dB beskyttelse 90% af tiden. De fuldt optrukne linjer er 50% tid, de stiplede er 10% tid.

med tungere og dyrere at have i masten.

Hvis der fx anvendes en Aerial AV-1440, med udstrålingsdiagram vist i figur 77, fås et for-bag forhold på 6 dB.

Figur 78 viser to feltstyrkekurver, hvor forskellen i sendeeffekt er 6 dB. Der er 25.6 dB's forskel på de vandrette grønne linjer.

54 dB μ V/m-grænserne er vist for begge sendere. De andre feltstyrkegrænser er hvis senderne opfattes som en uønsket sender, og er så beregnet til de stiplede linjer, som angiver at feltstyrken er større end eller lig med kurvens værdi i max. 10% af tiden.

Figur 78 kan også vises på en anden måde. Med udgangspunkt i cellerne fra figur 76, viser figur 79 feltstyrkerne på en lige linje mellem to SFN-sendere. Senderen med de røde kurver er nu flyttet to celler væk, og befinder sig 34.66 km fra den første sender. Afstanden vises nu på en lineær skala, men ellers er kurverne de samme som på figur 78. Den første (blå) cellegrænse går ved 8.67 km, og her er forskellen i feltstyrke så 25.6 dB. 26 km fra sender 1 går den anden (røde) cellegrænse, og her er forskellen kun 13.5 dB.

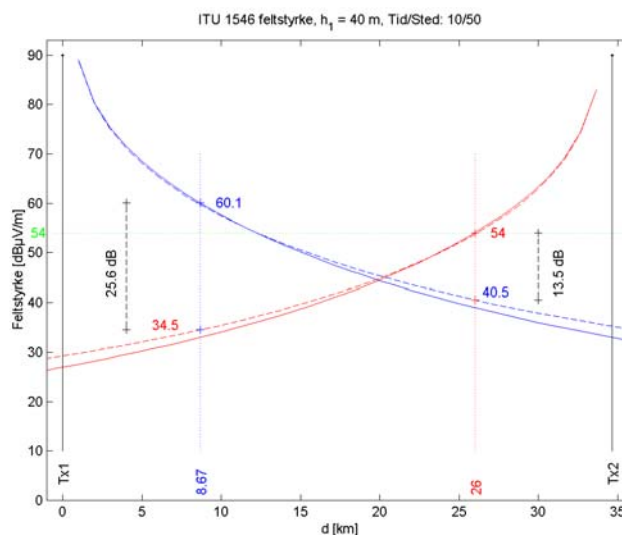
I mellem de to cellegrænser ligger en celle fra et andet SFN-net. Sen-

derne i dette SFN-net skal så have antenner der vender den anden vej, så det har 25.6 dB's forskel på den røde grænse og 13.5 dB på den blå grænse. Dermed bliver der et SFN-net med 25 dB's beskyttelse mod interferens, uanset hvilken cellegrænse der vælges.

Dermed er der stadig mulighed for at variere på den udsendte effekt og dermed på cellernes størrelse. Den udsendte effekt kan også anvendes alene til at forskyde grænsen mellem cellerne.

8.2.2 Særlige forhold i byer

Cellemodellen er tænkt til anvendelse i landlige omgivelser og små byer. Generelt må det forventes at der vil være for mange refleksioner i bymæssig bebyggelse til, at hele landet vil kunne dækkes som foreslået her. Derfor bliver det nok nødvendigt at tilføje nogle kraftigere sendere til hver by, på fx 1-3 kW fra en effektiv højde på fx 100 m. I storbyer som København skal der også mere til end det, her er minimum nok 10 kW fra Gladsaxe-senderen. Om det vil kunne lade sig gøre at benytte cellemodellen i byer, og hvor mange frekvenser der i givet fald vil skulle bruges der, vil skulle undersøges nærmere.



Figur 79 SFN-net i celler fra figur 76. Tx1 og Tx2 angiver sendernes placering. De lodrette linjer ved 8.67 og 26 angiver grænserne mellem cellerne.

8.2.3 Forskelle på cellemodellen og den nuværende frekvensplan

Som det er i dag, bruges der en del meget kraftige sendere på at dække landområder. Et eksempel er Næstved-senderen på 100 kW. Det er en sender, som ikke dækker en eneste storby, men en hel masse mindre byer, som kunne dækkes fra hver sin 1-3 kW sender. Til gengæld bliver Næstveds frekvenser ikke genbrugt et eneste sted i landet. Det samme er tilfældet for mange andre høj-effektsendere.

I forhold til lytterne, vil en ny frekvensplan måske nok gøre en station sværere at finde, fordi hver sender dækker et mindre område. Hvis disse frekvenser placeres 200 kHz fra hinanden, så vil en radiostation alligevel kunne markedsføre sin kanal som fx "91 FM", hvilket betyder 91.0-91.9 FM. Lyttere med en ældre stationær radio, hvor frekvensen vælges på en gammeldags drejeknap, vil dermed ikke mærke nogen forskel, da de altid har været vant til, at man lige skal dreje lidt frem og tilbage indtil man finder den bedste kopi af signalet. Mobile radioer med RDS vil selv kunne skifte til den bedste version af signalet. Til gengæld vil mobile radioer uden RDS være nærmest ubrugelige, med mindre brugeren ikke bevæger sig uden for sit nærområde.

8.2.4 Andre praktiske forhold

Det mest nærliggende spørgsmål er så hvad det koster. For at besvare det, kræves at hele nettet er regnet igennem, med programmer til formålet, hvad der ikke har været muligt her.

Der er dog en række praktiske ting, som er værd at huske, og som man ofte først tænker på bagefter, når frekvenserne er planlagt.

Med en så massiv dobbeltdækning, er der ingen grund til at anvende redundante sendere. Hvis en sender står af, så bliver den midlertidige forringelse for lytterne så lille, og vil gå ud over så få, at det vil være godt nok hvis senderen bliver skiftet i løbet af nogle timer. Det samme gælder service af antennen mv. Det er ikke nogen katastrofe hvis en site er nede en halv dag.

Ved frekvensplanlægningen i Nederlandene måtte der designes antenner med frekvensafhængige udstrålingsdiagrammer [*Sautter, 2004*]. Ved anvendelse af høj-effekt sendere, som vi kender i dag, vil det være umuligt at forestille sig, at der kan presses flere frekvenser ind, uden at nogle af dem skal dæmpes i forskellige retninger. Hvis det ikke skal gå ud over alle andre, må udstrålingsdiagrammerne gøres frekvensafhængige. Dermed er det meget svært at justere på dækningen efterfølgende. Ved anvendelse af små sites, vil langt de fleste kunne gøres rundstrålende, eller næsten rundstrålende. I hvert fald skulle det være muligt at alle sender med samme udstrålingsdiagram. Finder man efterfølgende ud af, at der skal laves rettelser, fx fordi der skal tilføjes en frekvens på en given antenne, vil det kunne gøres forholdsvis let.

Det viste eksempel er lavet med udgangspunkt i en antenne, der er realistisk til formålet. Antennen er bredbåndet, og vil derfor være velegnet hvis flere stationer skal combines ind på den samme antenne.

Den er egnet til at sidde på toppen af en mobilmast. Desuden er der et fornuftigt forhold mellem antennehøjde og effekter, men samtidigt en stor frihed til fx at gå op på 500W ERP og større celler, hvor det måtte være nødvendigt.

8.2.5 Beskyttelse af andre stationer

De lavere beskyttelseskrav, som indgår i forslaget her, er udelukkende tiltænkt SFN-net, som sender samme program. Når der skiftes til andre stationer, som sender et andet program, bør alle ITU's beskyttelseskrav stadig overholdes.

Det er muligt at beskyttelseskravene nedsættes noget. Det har ikke været undersøgt i denne rapport. Men selv om det måtte være tilfældet, så er der også grunde til alligevel at bruge retningslinjerne fra ITU 412.

Ved opbygning af flere SFN-net med små sites, vil en station som regel kun genere sig selv, hvis en sender er indstillet forkert, fx ved at der anvendes for stort frekvenssving, eller for kraftig sendestyrke, fordi alle nabofrekvenser i 200 kHz afstand og alle nabosendere på samme frekvens, er stationens egne.

Som det er i dag, vil det typisk gå ud over andre stationer, hvis en station ikke overholder reglerne, og hvis frekvenserne pakkes tættere, vil dette bare blive endnu værre.

Inden for mobiltelefoni opererer man med såkaldte *guard-bands*, som er frekvensbånd som skal adskille de forskellige operatørs frekvenspakker fra hinanden. Tankegangen her må være, at hvis en operatør har et problem med sine sendere, så skal det så vidt muligt sikres, at det ikke går ud over andre operatører.

Så selv om det kan vises, som TNO har gjort, at det er muligt at nedsætte beskyttelseskravene i forhold til ITU 412, så er der behov for *guard-bands* eller *guard-distances*, som i FM-sammenhænge så passende kan være som ITU 412 beskriver dem.

Erfaringerne fra Nederlandene viser også, at når et SFN-net sættes i luften, er der behov for at finjustere - nærmest i det uendelige. Her vil en mulighed for fx at kunne øge sendestyrken fra en bestemt sender med 3 dB, uden at skulle spørge nogen, og uden at det går ud over andre, være meget relevant.

8.3 Resumé

De simple beregninger her viser, at det skulle være muligt at lave et FM-net baseret på en simpel struktur med små sendere. Hvis det antages at hvert net fylder 1 MHz, skulle der så kunne blive i alt 20 net. Herfra skal så trækkes udenlandske kraftige sendere, og evt. kraftigere bysendere. En del af disse net vil skulle opdeles i flere regionale net og nogle frekvenser vil skulle bruges til lokalradio. Hvor mange landsdækkende net der kommer ud af det i den sidste ende, er svært at sige. Det bliver sikkert færre, end der kom ud af det i Nederlandene, men forhåbentlig med den bedre dækning.

9 Konklusion

9.1 Vedtagelsen af replanlægningen

I Danmark som i Nederlandene, er den private radiosektor ikke opstået på grund af politiske ønsker, men på trods af dem. I begge lande var udgangspunktet frekvensplaner, som var skabt til noget andet end det de reelt blev brugt til. Den første undtagelse i Danmark var salget af den 5. og 6. kanal, og dette salg viste så en stor interesse for at sende kommerciel radio på ledige FM-frekvenser.

Vedtagelsen af replanlægning i Danmark sker med henvisning til *hollandske principper*, herunder SFN og NSFN. Der er ikke lavet en tidsplan i forbindelse med vedtagelsen, hvilket gør hele projektet noget usikkert. Usikkerheden består i, om en replanlægning overhovedet vil være relevant på det tidspunkt, hvor den vil kunne komme i luften. Når en replanlægning vedtages nu, så må det være fordi man ønsker at give FM nogle flere leveår, end det ellers havde fået. Det kan være fornuftigt nok - FM-radio opfylder et behov hos lytterne i dag, og der er ikke nogen særlig grund til at tro, at dette behov skulle ændre sig så meget i fremtiden. Nye medier og behov vil givetvis vokse frem, men det er ikke ensbetydende med, at FM-radio ikke har en plads i dette medielandskab.

Dog virker det ikke som om der er tænkt over, at en forringelse af kvaliteten på FM-radio efter hollandske principper, sandsynligvis vil bidrage til, at brugen af FM-radio vil blive udfaset hurtigere, fordi lytterne foretrækker medier uden sus og skrat.

Derfor kunne branchen godt bruge en politisk tilkendegivelse som fx at "vi forventer, at der skal sendes FM-radio frem til 2020, og at 87.5-108 MHz i hvert fald ikke vil blive brugt til noget andet indtil da, og vi garanterer at DR vil fortsætte med udsendelser på FM indtil da". En sådan udmelding vil kunne bruges til at se om ambitionsniveauet mht. lyd kvalitet passer med den levetid man forestiller sig FM-radio skal have.

Vedtagelsen af replanlægningen, hvor der ikke er opsat en forventning om, hvornår de nye frekvenser kan komme i luften, og altså slet ikke hvor lang tid de nye net får, før de er forældede, virker derfor noget uigennemtænkt.

9.2 Praktiske forhold ved FM-net - særlige forhold ved (N)SFN

FM-radio består af et FM-moduleret signal med et frekvensssving på op til 75 kHz. Det signal, som FM-moduleres er i forvejen et multiplex af to lydkanaler, et RDS-signal og en 19 kHz pilot tone, hvis harmoniske bruges til demodulering af stereoinformation og RDS. Dette multiplex kaldes et MPX-signal.

SFN er et net bestående af flere sendere, som sender samme program på samme frekvens, og hvor senderens dækningsområder mødes, eller i hvert fald er placeret så tæt på hinanden, at de forstyrrer modtagelsen af hinandens signaler, hvis der ikke gøres noget særligt for at undgå det. NSFN er også et net bestående af flere sendere, som sender samme program, men ikke på samme frekvens. Senderne er dog placeret så tæt på hinanden, både geografisk og i frekvens (typisk kun med 100 kHz forskel), at de forstyrrer hinanden, med mindre der gøres noget særligt for at undgå det.

FM-radio er ikke tiltænkt som noget, der kan indgå i et SFN-net, og derfor vil indførelsen af (N)SFN give problemer i forhold til interferens af carrieren og af MPX-signalet. Hvis det lykkes

at synkronisere carrieren, så den oscillator som styrer dens frekvens bliver nøjagtig ens fra flere sendere, vil der stadig være problemer med mobile modtagere, som vil flytte sig igennem skiftende destruktiv og konstruktiv interferens. Dernæst er det relevant at beskæftige sig med synkronisering af MPX-signalet. Ideen her er, at selv om carrierne måske ikke er synkroniserede, så bør frekvenssvinget være det samme, uanset hvilken sender der lyttes til. Dermed vil FM-demodulationen måske gå lidt bedre, selv om der er flere interfererende carriere.

Synkronisering af carrier og MPX-signal med en præcision på omkring 1-2 μ s kan lade sig gøre, men er ikke let. Der er præsenteret en løsning som involverer GPS synkronisering og mulighed for at clocke samples ud gennem en D/A converter ved hjælp af GPS synkronisering.

9.3 Modeller til frekvensplanlægning - internationalt og hollandsk

The International Telecommunication Union, ITU har gennem årene udgivet en række standarder for prediktion af en feltstyrke på et givent sted, ud fra data om senderen og terrænet.

Prediktion af en feltstyrke med ITU 1546, består af en kombination af aflæsning af en kurve og beregning af indfaldsvinkel ved modtageren. Som udgangspunkt beregnes, at feltstyrken minimum har en vis værdi en vis procent af tiden med en bestemt stedsandsynlighed. Stedsandsynligheden er altid 50%, og tidssandsynligheden er normalt også 50%, med mindre der regnes på en uønsket sender, hvor man er interesseret i, at feltstyrken fra en sender overskrider en bestemt værdi fx max. 1 % af tiden. Både tidsprocenten og stedprocenten kan omregnes til andre værdier efter formler som er angivet i standarden.

ITU 1546 er ikke specielt beregnet til FM-radio, men til alt hvad der sendes mellem 30 MHz og 3 GHz.

For FM-radio findes så ITU 412, som beskæftiger sig med emner som er særlige for FM-radio. Det er hvor stor feltstyrken som minimum skal være, for at lydkvaliteten skal være god, og hvad man forstår ved god kvalitet. Desuden er det krav om hvor kraftige forstyrrende sendere må være, afhængig af forskellen i frekvens mellem den ønskede og uønskede sender. International frekvensplanlægning er stort set alt sammen lavet efter ITU 412.

De hollandske principper for replanlægning (TNO-II+ normen), er først og fremmest en nedsættelse af de beskyttelseskrav, som ITU 412 foreskriver, sammen med tilføjelse af beskyttelseskrav for (N)SFN, som ITU 412 ikke foreskriver. TNO-II+ normen nedsætter minimumskravet til feltstyrke og beskyttelsen mod interferens fra andre sendere. Den del af normen, som ikke vedrører (N)SFN, er baseret på en række forsøg, som TNO har foretaget. I Nederlandene har erfaringerne med NSFN været så dårlige, så man nu er ved at gå væk fra det, enten ved at lave NSFN-net om til SFN, eller ved at lave 200 kHz afstand.

9.4 De udførte forsøg

9.4.1 Laboratorieforsøg

De første forsøg var simple forsøg med to sendere, hvis signaler blev combinet sammen i et kabelnet. Formålet var at lytte og måle på resultatet af to sendere på samme frekvens eller med 100 kHz afstand.

Resultaterne for SFN viste, at ved anvendelse af sendere af god kvalitet, kunne forskellen i signalstyrke være så lille som 4 dB, uden at der kunne høres nogen form for forstyrrelse.

Forsøgene med NSFN gav nogenlunde samme resultat, bortset fra at forstyrrelserne lød lidt værre. Motivationen for at bruge NSFN skulle være, at forstyrrelserne var mindre generende end for SFN. Hvis NSFN er lige så slemt eller værre, så er det bedre at bruge SFN og spare de 100 kHz båndbredde.

Samtidigt er forsøgene lavet med en god modtager. Da oplevelsen af NSFN i høj grad vil afhænge af filtre i modtageren, er der grund til at antage, at det vil være betydeligt værre med en almindelig modtager.

Derfor, og på grund af erfaringerne fra Nederlandene, var dette det sidste forsøg, der blev lavet med NSFN. De efterfølgende forsøg har kun handlet om SFN.

9.4.2 Resultater af SFN-forsøg

Afhængig af hvilke positioner der blev målt mellem, har det vist sig, at indførelsen af SFN mellem to sendere ikke medfører problemer for modtagere, når signalstyrkeforskellen mellem senderne er større end 15 dB i de heldige tilfælde, og 25 dB i de mindre heldige, i et enkelt tilfælde dog op til 40 dB.

Tilsyneladende kræver flade landskaber, hvor FM-radio normalt har gode udbredelsesbetingelser, de største forskelle i signalstyrker.

Endelig tyder forsøgene med højere sendestyrker på, at lyd kvaliteten i et SFN-net ikke alene afhænger af om der er min. 15-25 dB's forskel på signalstyrken fra to SFN-sendere, men også på signalstyrken af den forstyrrende sender i sig selv, hvilket er noget overraskende.

Hvis lyd kvaliteten af to sendere måles hver for sig, hvorefter begge sendere indgår i et SFN-net, så vil lyd kvaliteten af SFN-nettet svare til lyd kvaliteten af den dårligste sender på en given position, hvis forskellen i signalstyrke fra senderne er mindre end ca. 25 dB. Denne funktion kan muligvis også hænge sammen med signalstyrken fra den svageste sender, og ikke kun af sendernes signalstyrkeforskel.

Forsøgene med at variere tidsforsinkelsen fra en af senderne, bekræftede at der bliver færre problemer med sus og skrat, hvis signalerne ankommer inden for de samme 1-2 μ s, i forhold til hvis der er ca. 5 μ s tidsforskel. Forskellene var dog små, og lyd kvaliteten var ikke tilfredsstillende, tidsforsinkelse eller ej.

Der er i alt blevet kørt 41 måleture mellem forskellige senderne, med forskellige kombinationer af effekter og tidsforsinkelse og steder. Det er ikke lykkedes at få et SFN-net til at lyde acceptabelt hele vejen mellem to SFN-sendere.

Forsøgene har vist, at det er muligt at flytte det område mellem to sendere, hvor lyd kvaliteten er dårlig, ved at variere på sendestyrkerne.

Nogle af de lydmæssige problemer kunne genkendes fra den statiske opstilling, når der blev sendt på samme frekvens med to sendere, hvis carriere ikke var synkroniserede. Derfor er der altså grund til at tro, at synkronisering af carrieren kunne hjælpe noget. Der kunne dog også høres mange andre problemer, som ikke var der med den statiske opstilling. Derfor er der også grund til at tro, synkronisering af carrier og MPX ikke gør det alene.

9.5 Forslag til en alternativ måde at replanlægge på

Der er lavet et forslag til en anden måde at lave replanlægning, hvor mulighederne for SFN udnyttes, og kombineres med dobbeltdækning med andre SFN-net. Således skulle det være muligt at lave et FM-net bestående af uendelig mange sendere, med anvendelse af 4 frekvenser. SFN kombineres med en massiv dobbeltdækning, så det altid vil være muligt for en radiomodtager at finde en sender, som ikke er forstyrret af andre sendere på samme frekvens.

Forslaget indfører to ændringer i forhold til ITU 412. Den vigtigste er, at en SFN-senders primære dækningsområde beskyttes med 20-25 dB fra interfererende sendere i samme SFN. Dernæst indføres at flere SFN-net som sender samme program (et frekvenssæt bestod af 4 SFN-net), placeres 200 kHz fra hinanden. Alt andet planlægges efter ITU 1546 og 412.

Forslaget tager udgangspunkt i en cellestruktur som den kendes fra opbygning af mobilnet, og er tænkt som noget der kan bygges på eksisterende mobilmaster til et forholdsvis beskeden beløb pr. position, og hvor dobbeltdækningen betyder, at hvis en enkelt sender er nede, så får det kun yderst begrænset betydning for dækningen.

Denne form for replanlægning minder dermed meget lidt om den hollandske model - det eneste fælles er at der anvendes SFN, men kombineret med andre frekvenser, der hvor der er SFN-problemer, hvad man ikke gør alle steder i Nederlandene. Desuden tillades så at SFN-net, som sender det samme, kan placeres 200 kHz fra hinanden.

9.6 Fremtidigt arbejde

9.6.1 Målinger

I forhold til fuldstændigt at kunne fastlægge en ny grænse for beskyttelsen af en SFN-senders dækningsområde fra interferens fra andre SFN-sendere, bør der laves en række ekstra målinger.

Der var ikke mulighed for at lave målinger i byer. Det er nok ikke sandsynligt at cellemodellen med 4 frekvenser vil fungere i en by, hvorfor byen sandsynligvis vil skulle have en noget kraftigere sender, men det bør undersøges.

Der var ikke mulighed for at synkronisere carrieren. Selv om en synkronisering sikkert vil gøre tingene bedre, bør det verificeres, om beskyttelsen kan komme ned på 6 dB, som påstået af Harris Corp [*Gould & Eu, 1999*]. Hvis det er tilfældet, vil det kun være nødvendigt at anvende tre SFN-net i en cellestruktur, og dermed kan der spares en frekvens.

Flere målinger med og uden synkronisering af carrieren bør laves med henblik på at finde ud af, om den beskyttelse en SFN-sender skal have i sit dækningsområde, kun er afhængig af feltstyrkeforskellen til den interfererende sender, eller om den også er afhængig af selve feltstyrken fra den interfererende sender.

Det vil også være godt med nogle ekstra målinger fra et andet sted, som kan bekræfte det noget overraskende resultat, om at lydkvaliteten af et SFN-net afgøres af lydkvaliteten fra den dårligste sender.

Da cellemodellen giver mulighed for at justere feltstyrken op og ned for hele SFN-nettet, uden at det får andre konsekvenser, er det dog noget som evt. vil kunne justeres når et SFN-net sættes i luften.

Inden der evt. arbejdes videre med planerne om at etablere SFN-net som foreslået, er det vigtigt at få undersøgt, om en RDS radio vil kunne skifte til en bedre sender under de betingelser, som sådan et net vil give. Som omtalt i afsnit 7.6.2 (s. 73), var noget af støjen ikke lige til at måle. Hvis en modtager ikke kan måle, at der er et problem med det signal den modtager, vil den sandsynligvis ikke skifte til en bedre sender. Derfor vil der være behov for at lave et forsøg med en del bilradioer, for at se i hvor høj grad de er i stand til at finde den bedste frekvens. Det er vigtigt, at der anvendes et bredt udsnit af de bilradioer der findes, i modsætning til bare at finde "en gennemsnitsradio". Det der skal undersøges, er først og fremmest deres implementering af AF-funktionen, og i mindre grad hvordan de lyder. En evaluering af lydkvaliteten, vil dog være en hjælp til at bestemme den optimale feltstyrke i SFN-nettene.

9.6.2 Beregninger

Som nævnt, er cellemodellen beregnet uden terrændatabase, og bare ved hjælp af ITU's kurver. Om det er muligt at lave et FM-net ved at sammensætte det af 4 SFN-net, vil skulle regnes igennem ved hjælp af et rigtigt frekvensplanlægningsprogram, med det rigtige terræn og med anvendelse af de eksisterende mastepositioner.

10 Referencer

10.1 Litteratur

Andersen, 1986

Jørn Andersen: "Ny frekvensplan for FM-radiofoni. Planlægningsarbejdet", fra *Teleteknik* nr. 1 1996.

Binnenmarsch et al., 2000

L.W. Binnenmarsch, G.J. Bruntink, W.H. Fieten, S.G. Hamelink, R.J. van der Hoeven, H.C. Milius: "Herindeling van de FM-band 2001. Een efficiënte zerobase herindeling naar moderne maatstaven", Broadcast Partners & Nozema, 2000 (Sprog: NL).
Broadcast Partners og Nozema er nederlandske FM-net operatører.

Cook & Liff, 1968

A.B. Cook & A.A. Liff: "Frequency Modulation Recievers", Prentice Hall Inc, 1968.

ETS 300 384

ETSI European Telecommunications Standards Institute: "European Telecommunication Standard ETS 300 384: Radio Broadcasting Systems; Very High Frequency (VHF), frequency modulated, sound broadcasting transmitters", 1995, www.etsi.org

ITU 370

The ITU Radiocommunication Assembly: "Recommendation ITU-R P.370-7: VHF and UHF Propagation curves for the frequency range from 30 MHz to 1000 MHz."
The International Telecommunication Union, 1995, www.itu.int

ITU 412

The ITU Radiocommunication Assembly: "Recommendation ITU-R BS.412-9: Planning standards for terrestrial FM sound broadcasting at VHF"
The International Telecommunication Union, 1998, www.itu.int

ITU 1546

The ITU Radiocommunication Assembly: "Recommendation ITU-R P.1546-1: Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz"
The International Telecommunication Union, 2003, www.itu.int

ITU Final Acts, 1984

"Final Acts of the Regional Administrative Radio Conference for the Planning of VHF Sound Broadcasting (Region 1 and part of Region 3)", The International Telecommunication Union, 1984, www.itu.int

KPMG 2003

KPMG Consulting for Kulturministeriet: "Konsulentundersøgelse vedrørende replanlægning af frekvensanvendelsen i FM-båndet i Holland". 13. januar 2003. Kan hentes fra Kulturministriets hjemmeside, www.kum.dk

Mediepolitisk Aftale, 2002

"Mediepolitisk aftale for 2002-2006, 3. juni 2002", kan hentes fra Kulturministriets hjemmeside, www.kum.dk

Mediepolitisk Aftale tillæg 2005

"Tillægsaftale nr. 4 til medieaftalen for 2002-2006 om replanlægning af frekvensanvendelsen på FM-båndet mv.". Kan hentes fra Kulturministriets hjemmeside, www.kum.dk

Gould & Eu, 1999

Bill Gould & Jai Eu: "Using Synchronized Transmitters for Extended Coverage in FM Broadcasting", Harris Broadcast Communications, www.broadcast.harris.com 1999. Harris Corporation.

Laverghetta, 1991

Thomas S. Laverghetta: "Analog Communications for Technology", Saunders College Publishing, 1991. ISBN 0-03-029403-7

Lee, 1982

William C. Y. Lee: "Mobile Communications Engineering", McGraw-Hill, 1982. ISBN 0-07-037039-7

Petersen, 1992

G. M. Petersen (Tele Danmark Mobil A/S): "Path Loss Measurement at 160 MHz for Horizontally Polarized Transmission and Vertical Reception Antenna", fra: *Nordic Radio Symposium, Aalborg 1992 Proceedings NRS 92* (C. Christensen, ed.), AUC.

Poulsen, 2001

Torben Poulsen: "Psykoakustiske Målemetoder", Akustisk Teknologi, Ørsted DTU, Note nr. 3108, 2001 ver. 3.3.

Pozar, 2001

David M. Pozar: "Microwave and RF Design of Wireless System", John Wiley & Sons, inc., 2001. ISBN 0-471-32282-2

Radionyt.com

www.radionyt.com Dansk internetsite med nyheder om radio. Stig Hartvig, medl. af DR's bestyrelse m.m. er redaktør. Henvisninger her til er angivet med artikelnumre, så fx artikel 6748 kan findes på: <http://radionyt.com/artikel/default.asp?id=6748>

Rohde et. al., 1997

Ulrich L. Rohde, Jerry Whitaker and T.T.N. Bucher: "Communications Receivers, 2nd. ed.", McGraw-Hill, 1997, ISBN 0-07-053608-2

Sautter, 2004

Christian Sautter: "Multipattern Antenna Systems in the "Zero-Base-Project" ", Kathrein Werke KG. Slides fra en præsentation på LS Summit 2004, LS Telcom AG, www.lstelcom.com

10.2 Links til omtalte firmaer og produkter

Dette er en liste over firmaer, hvis produkter omtales i rapporten, men uden at der er lavet en litteraturhenviisning - det er produktet der er brugt eller omtalt, ikke nødvendigvis noget litteratur om det.

Aerial O.y. (FI), www.aerial.fi

Arcodan (DK - opkøbt og nu en del af Scientific Atlanta, www.saeurope.com

Audemat-Aztec (FR), www.audemat-aztec.com

Aztec, se Audemat-Aztec

Bedea (DE), www.bedea.com

Borch Teknik (DK), www.borchteknik.dk

Broadcast Partners (NL), www.broadcastpartners.nl

Broadcast Service Danmark, www.bsd.dk

Crown Broadcast (US), www.crownbroadcast.com

D.B. Elettronica s.n.c (IT), www.db-elettronica.com

Kathrein Werke KG (DE), www.kathrein.de

LS Telcom (DE), www.lstelcom.com

Nozema Services N.V. (NL), www.nozemaservices.com

NTL broadcast (UK), www.ntlbroadcast.com

Proflin (NL), www.proflin.nl

R.V.R. Elettronica (IT), www.rvr.it

Telefunken Sendersysteme Berlin (DE), www.telefunken-sendersysteme.de

TNO og TNO-FEL (NL), www.tno.nl