

## Bølgeforplantning på lang- og mellombølge

Overingeniør Knut N. Stokke

621.371.029.51/.53

Interessen for lang- og mellombølgetransmisjon har øket sterkt de siste år. Etter en periode der korte bølgelengder eller høye frekvenser har dominert, er det nå blitt økende aktivitet for å undersøke de mulighetene lang- og mellombølge kan gi. Og enda lang- og mellombølgetransmisjon har vært kjent i lang tid, er det mange forhold som ikke er tilstrekkelig klarlagt innafor dette området.

Det som særlig har skjerpet interessen for lang- og mellombølge, er at det har blitt enighet om å holde en ny frekvenskonferanse for lang- og mellombølgekringing. Interferensforholdene er blitt så umulige at de fleste innser at det er nødvendig med en opprydning. Samtidig er det nødvendig å få revidert de metodene som brukes ved frekvensplanlegging og feltstyrkeberegning.

På lang- og mellombølge benyttes også jordbølge og jonosfærisk reflektert bølge. Her vil en ta forholdene for jordbølgen først. Som navnet sier, er jordbølgen bundet til jordoverflata, og er dermed avhengig av forholdene i jordoverflata. Det er først og fremst ledningsevneforholdene i jordoverflata som er av interesse, men dielektriske forhold er også svært viktige.

Ganske tidlig blei det utviklet feltstyrkeformler for disse frekvensområdene (Austin - Cohen), og dessuten har det blitt foretatt nøyaktige teoretiske analyser av bølgeforplantningen (Van der Pol og Bremmer). På grunnlag av Van der Pol's og Bremmer's analyser er det blitt laget feltstyrkekurver for forskjellige jordledningsevner  $\sigma$ .

På fig. 1 og 2 er gjengitt feltstyrkekurver for to ulike jordledningsevner  $\sigma$ .  $\sigma$  er her angitt i Siemens m ( $1 \text{ S/m} = 10^{11} \text{ e.m.u.}$ ). Kurvene er tatt fra CCIR Recommendation 368. (CCIR = Comité Consultatif International des Radiocommunications = Den internasjonale rådgivende radiokomiteé.)

Kurvene er referert til en kort unipol over ideell ledende jord. En slik unipol vil på grunn

av refleksjon fra jorda få en maksimal utstråling som omtrent tilsvarer det dobbelte av en Hertz dipol, og dermed blir feltstyrken fra unipolen over ideell ledende jord:

$$F = \frac{\sqrt{45P \cdot 2}}{D} = \frac{3\sqrt{10P}}{D}$$

der P er effekten og D er avstanden til senderstedet. Dessuten er det vanlig å referere kurvene til 1 kW sender, slik at en får:

$$F = \frac{3 \cdot 10^5}{D_{(\text{km})}} \text{ (}\mu\text{V/m)}$$

Kurvene for praktiske ledningsevner blir da liggende under denne teoretiske kurven.

På fig. 3 har en forsøkt å skissere hvordan bølgefronten er når en bølge går langs med jorda. Dersom jord var ideell ledende, ville bølgefronten blitt vertikal. Ved høye frekvenser blir tapsvinkelen eller tapskomponenten stor, og særlig da ved dårlige ledningsevner. Men ved låge frekvenser og god ledningsevne blir tapsvinkelen liten, og bølgefronten, i alle fall opp til de høgdene som er aktuelle, vil innstille seg på en skråvinkel som akkurat tilsvarer tapene. Da kan en si at bølgen går med tilpasning til jordoverflata. Ved låge frekvenser, VLF og LF, og over sjø kan en derfor få små tap slik at bølgen kan rekke fram over store avstander.

På mellombølge er det vanskelig å få bølgefronten til å innstille seg på en fast vinkel opp til en rimelig høgd fordi tapene er så store.

### Karakteristiske ledningsevner for LF/MF

(Høgfrekvent ledningsevne er til dels avhengig av frekvensen.)

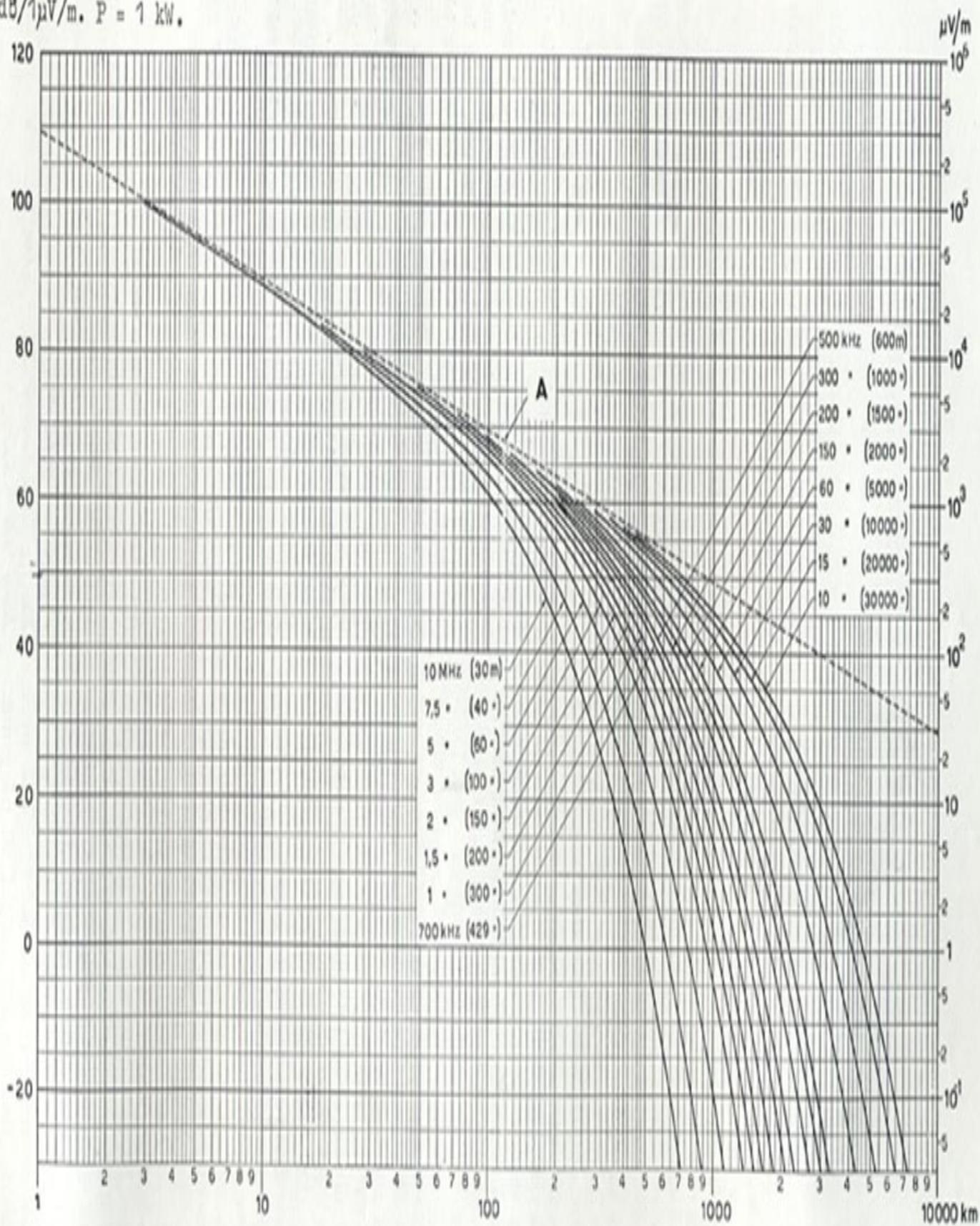
Sjøvatn: 4 S/m

Ferskvatn:  $3 \cdot 10^{-3}$  S/m

Fuktig jord (myr):  $10^{-2}$  S/m

Jord:  $10^{-3}$  S/m

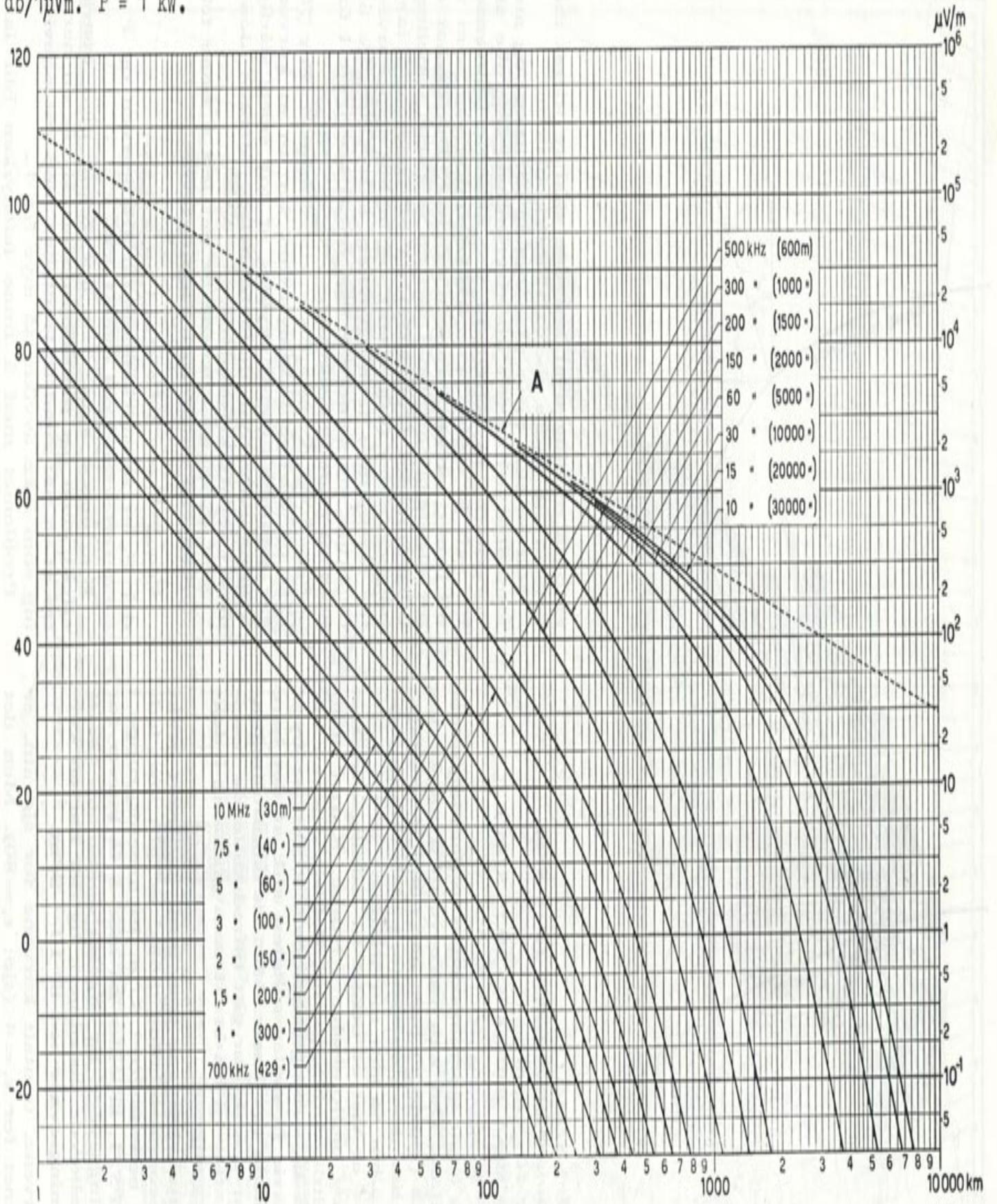
dB/1 $\mu$ V/m. P = 1 kW.



Jordbølgens forplantningskurver;  $S_j$ ,  $\sigma=4$  mho/m,  $\epsilon=80$ . A: Invers afstandskurve.

Fig. 1 Feltstyrkekurver for 10 kHz til 10 MHz.  $\sigma=4$  S/m

dB/ $\mu$ Vm. P = 1 kW.



Jordbølgens forplantningskurver; Jord,  $\sigma=10^{-3}$ mho/m,  $\epsilon=4$ . A: Invers avstandskurve.

Fig. 2 Feltstyrkekurver for 10 kHz til 10 MHz.  $\sigma=10^{-3}$  S/m

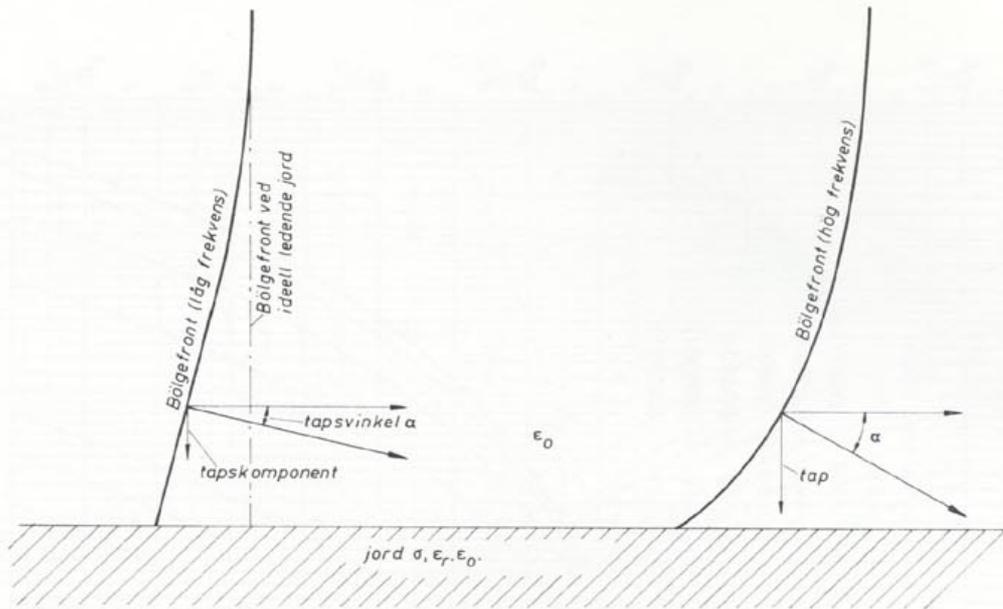


Fig. 3 Bølgefront for to frekvenser

Grus:  $3 \cdot 10^{-4}$  S/m

Gneis (gammelt grunnfjell):  $10^{-4}$  S/m

Tørr isbre:  $10^{-5}$  S/m

(Tørr is og snø i Antarktis:  $10^{-6}$  S/m!)

Tabellen angir størrelsesorden av ledningsevner i jordoverflata. Det kan være verdt å merke seg at ferskvatn (innsjøer) bare har middels ledningsevne. Det har dessuten vist seg at forurensningsgraden ikke har så stor innvirkning.

På fig. 4 er vist et utkast til ledningsevnekart for lang- og mellombølge i Norge. Kartet angir gjennomsnittlig ledningsevne, det vil si at en har tatt hensyn til terrengforholdene. Kartet er bygd på forholdsvis få måleresultater, slik at det bare gir tilnærmede resultater. Men de kontrollmålingene en har utført, har gitt tilfredsstillende resultater, og kartet vil bli brukt som grunnlag i dekningsplanleggingen.

De feltstyrkekurvene som hittil har vært brukt (CCIR Recommendation 368), er gitt for ledningsevner ned til  $10^{-3}$  S/m. Ei arbeidsgruppe i CCIR, IWP5/1, arbeider nå med å få kurver for andre ledningsevner. Et engelsk dokument, CCIR 5/152, er allerede distribuert, og der har en kurver for ledningsevner ned til  $10^{-5}$  S/m.

Alle kurvene, unntatt kurvene for sjøvatn, er blitt bereknet for  $\epsilon_r=4$  (sjø:  $\epsilon_r=80$ ). Men det

er også meningen at kurvene skal revideres med hensyn til andre dielektrisitetskonstanter.

Når en skal drive planlegging for lang- og mellombølge, så er det uhensiktsmessig å bruke alle kurvene og ta hensyn til alle aktuelle frekvenser. En veit jo heller ikke hvilke frekvenser som vil bli brukt før konferansen er over. Derfor har en for planleggingsformål tatt en frekvens i mellombølgeområdet (700 kHz) og en frekvens i langbølgeområdet (200 kHz), og tegnet opp kurvene for forskjellige ledningsevner. Disse kurvene blir da brukt, og seinere er det lett å korrigere i forhold til endelig frekvens.

Fig. 5 og 6 viser disse kurveskarene. For 700 kHz og dårlige ledningsevner ser en at kurvene går sammen. Dette skyldes at for svært dårlige ledningsevner vil dielektrisitetskonstanten dominere i feltstyrkeformlene.

Ved hjelp av kurvene er det lett å finne feltstyrken ved en bestemt ledningsevne:

$$F_{(dB)} = F_{1(dB)} + P_{(dB)}$$

der  $F_1$  er feltstyrken en får fra kurven og  $P$  er sendereffekten i dB over 1 kW.

I grunnen skulle en her rekne med utstrålt effekt, men for planleggingsformål går en her ut fra at en har rundstråleantenne med antennevinnings som ikke avviker så mye fra 1.

Problemet med å finne feltstyrken blir langt



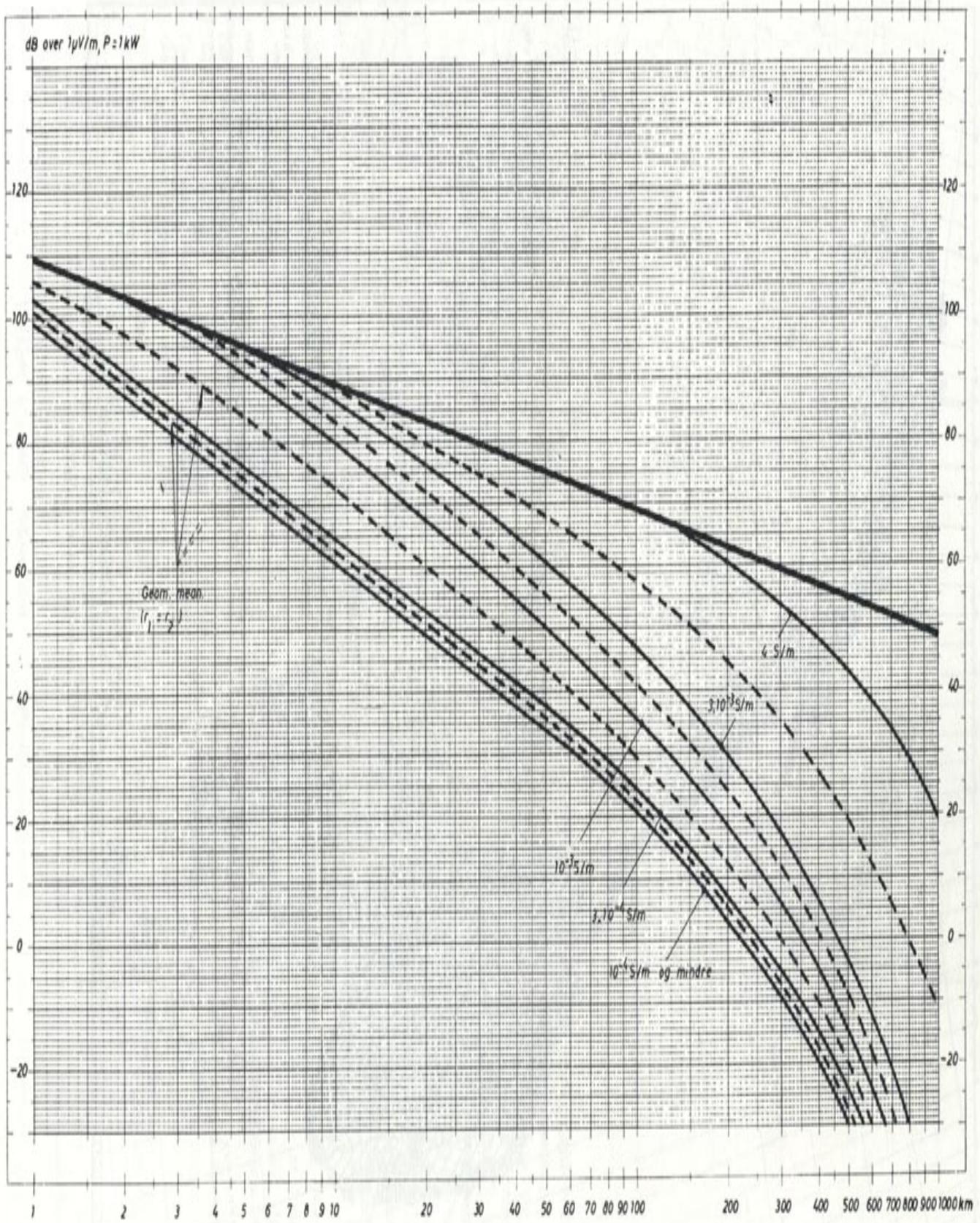


Fig. 5 Feltstyrkekurver for 700 kHz

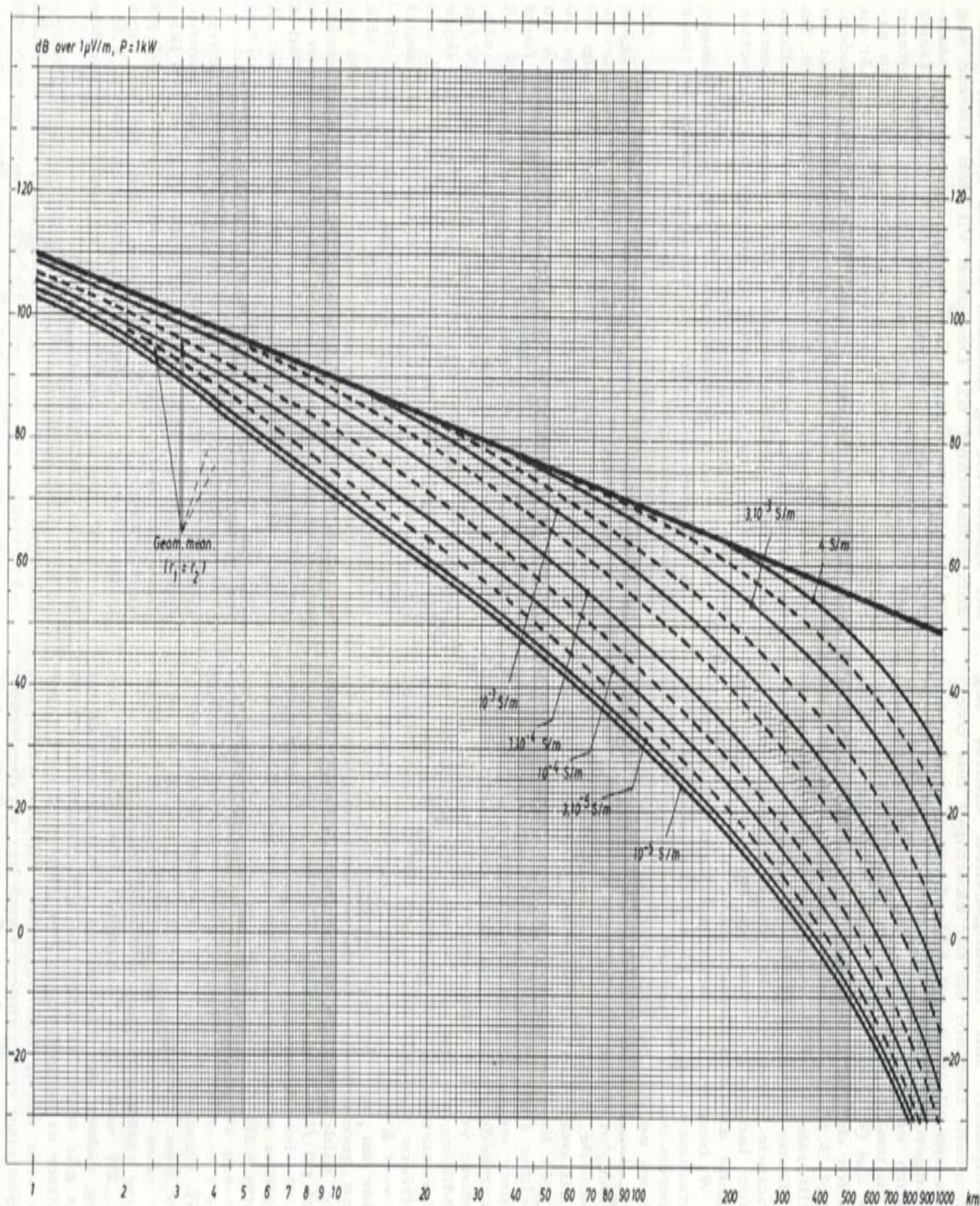


Fig. 6 Feltstyrkekurver for 200 kHz

mer komplisert når ledningsevnen endrer seg langs traséen. Dersom en for eksempel har overgang fra sjø til land, vil bølgefronten endre seg i overgangen, og en får varierende tapsvinkel.

Dersom en har 50 km sjø og 70 km land, kunne en tenke seg at en fulgte sjøkurven så lenge det var sjø (4 S/m), men deretter måtte en følge kurven for den ledningsevnen en har på land, for eksempel  $3 \cdot 10^{-4}$  S/m. Det vil si, en måtte da parallellforskyve landkurven opp til der sjøtraséen sluttet. Dette er angitt på *fig. 7* og kalles Eckersley's metode. Denne metoden gir brukbare resultater for langbølge, men for mellombølge blir resultatene altfor optimistiske.

*Fig. 8* berører et annet problem. Etter resiprositetssatsen skulle en få samme feltstyrke ved mottakeren om en byttet om sender og mottaker.

Dersom en går 50 km over sjø (4 S/m) og 70 km over land ( $3 \cdot 10^{-4}$  S/m), så vil en få 57 dB over  $1 \mu\text{V/m}$  fra en sender på 1 kW etter Eckersley's metode, men en vil etter Eckersley's metode få 27 dB over  $1 \mu\text{V/m}$  når en går den motsatte vegen. Nå kan en vel ikke si at resiprositetssatsen gjelder fullt ut fordi en har alt andre feltproblemer omkring senderstedet enn en har på mottakerstedet, men en vil få et godt inntrykk av forholdene ved å bruke resiprositetssatsen.

G. Millington har vist at med en overgang og visse forutsetninger, så vil feltstyrken bli lik den geometriske middelveiden for de to resultatene en får ved å bruke Eckersley's metode begge veger. Når en har desibelinnndeling for feltstyrken, blir den geometriske middelveiden lik den aritmetiske middelveiden av desibelverdiene. I eksemplet på *fig. 8* får en da 42 dB.

*Fig. 9* viser hvordan feltstyrkekurven blir etter Millingtons metode for 50 km sjø og videre land med  $\sigma = 3 \cdot 10^{-4}$  S/m. Der ser en at kurven vil nærme seg en kurve som er parallell med landkurven i avstanden  $m$  (middelveidiavstanden ved 50 km). Dessuten ser en at når sjø- og landstrekning er like store (her 50 km), vil en få en feltstyrke som direkte er middelveiden mellom land- og sjøkurven (her ved 100 km).

*Fig. 10* viser hva resultatet blir for 50 km land og videre sjø. Da ser en at feltstyrken stiger når en går over fra land til sjø (recovery-effekten). Etter at bølgefronten har gått med stor tapsvinkel over dårlig ledningsevne, vil den rette seg opp igjen etter overgangen. Også her vil den resulterende kurven gå gjennom middelveidipunktet

for sjøkurven og landkurven ved 100 km (middelveidiavstand  $n$ ). Dessuten vil den nærme seg en kurve som er parallell med sjøkurven i avstanden  $m$  (middelveidiavstanden ved 50 km). Dette at Millingtonkurvene går gjennom et bestemt punkt og nærmer seg en asymptote, kan lette arbeidet med å tegne opp resulterende kurve når en har flere overganger i ledningsevne langs traséen.

*Fig. 11* er et eksempel på dette. Der tegner en opp resultatet for en overgang i ledningsevne. Så tegner en opp resultatet for overgangen mellom de to neste ledningsevnene, men her må en parallellforskyve resultantkurven slik at den fortsetter der den forrige sluttet, osv.

Nå har en i praksis ikke så skarpe overganger i ledningsevnen, slik at kurven burde ha mer jamne overganger.

Millingtons metode gir, som angitt på *fig. 10*, en forklaring på at feltstyrken tar seg opp igjen etter overgang fra dårlig til god ledningsevne (recovery-effekten). En kan dessuten ved hjelp av Millingtons metode (og enda mer ved hjelp av Eckersley's metode) vise hvor viktig det er å ha god «start» for bølgen. På *fig. 12* har en først tenkt seg en senderstasjon som er plassert på kysten, og en får da en bestemt feltstyrke f. eks. 150 km inne på land (her ca 15 dB over  $1 \mu\text{V/m}$  for 1 kW sender). Så vil en prøve hva som skjer dersom en legger til en sjøstrekning, det vil si, om en flytter stasjonen utover i sjøen, for eksempel til øyer. Her er det likegyldig om en har sjøstrekning og så 150 km land, eller omvendt, slik at en får tilsvarende kurve som på *fig. 10*. Da ser en at feltstyrken 150 km inne på land stiger raskt, og den når sitt maksimum når totalavstanden er ca 250 km (her ca 25 dB over  $1 \mu\text{V/m}$ ). Ved å legge til en sjøstrekning på ca 100 km får en samme virkning som om en økte sender-effekten 10 ganger!

I praksis har en som nevnt ikke så skarpe overganger, men virkningen vil bli den samme ved jamne overganger. Eksemplet viser at det ikke bare er viktig å ha gode ledningsevneforhold på stasjonsstedet (godt jordnett), men det er også svært viktig å ha god ledningsevne de første kilometrene, og da særlig når en vil dekke et område som har dårlig ledningsevne.

Samtidig som en har hjelpemidler til å beregne feltstyrke, har en også muligheter for å anslå rekkevidde. En har gått ut fra  $1 \text{ mV/m}$  (60 dB over  $1 \mu\text{V/m}$ ) som dekningsgrense for langbølge,

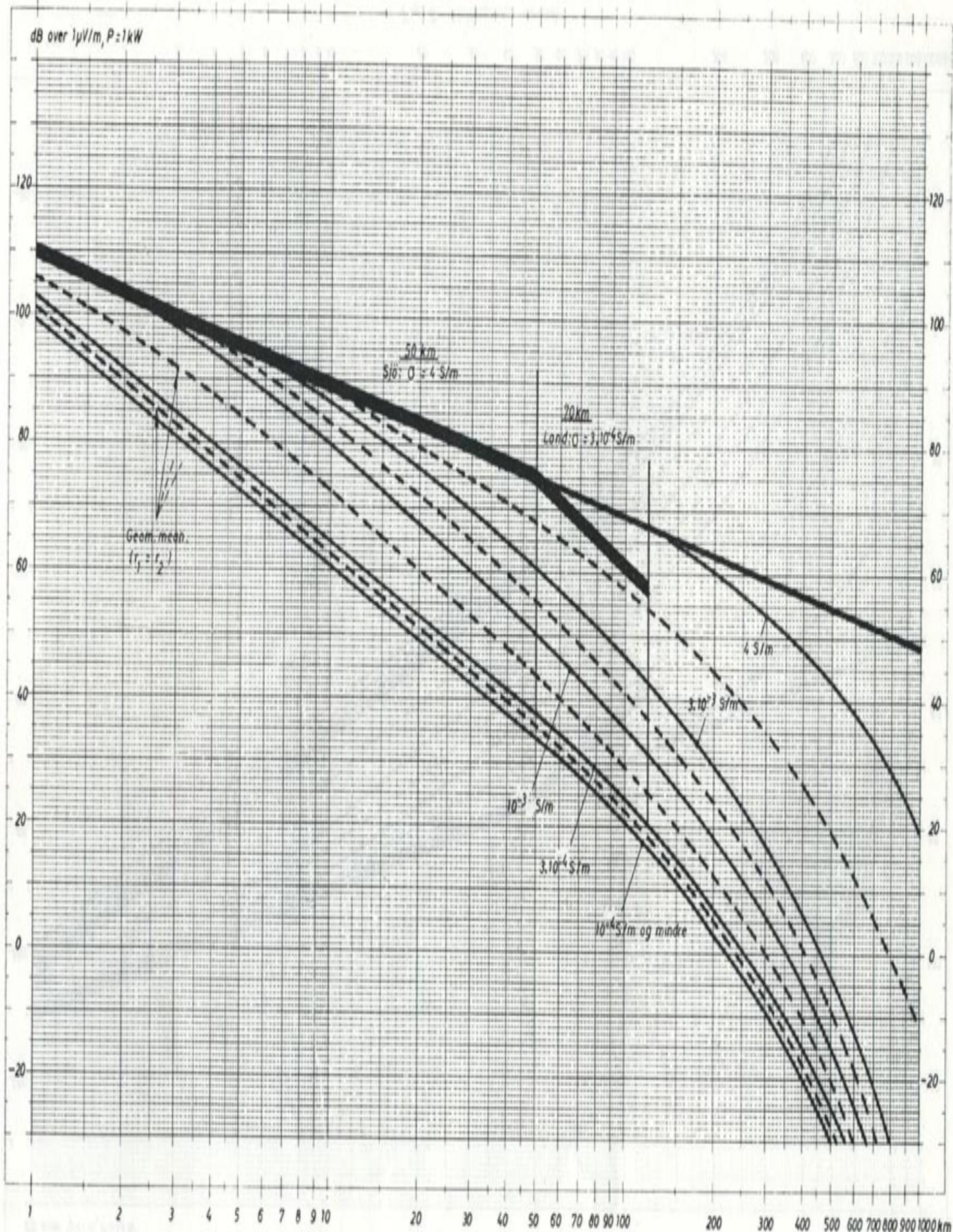


Fig. 7 Eckersley's metode

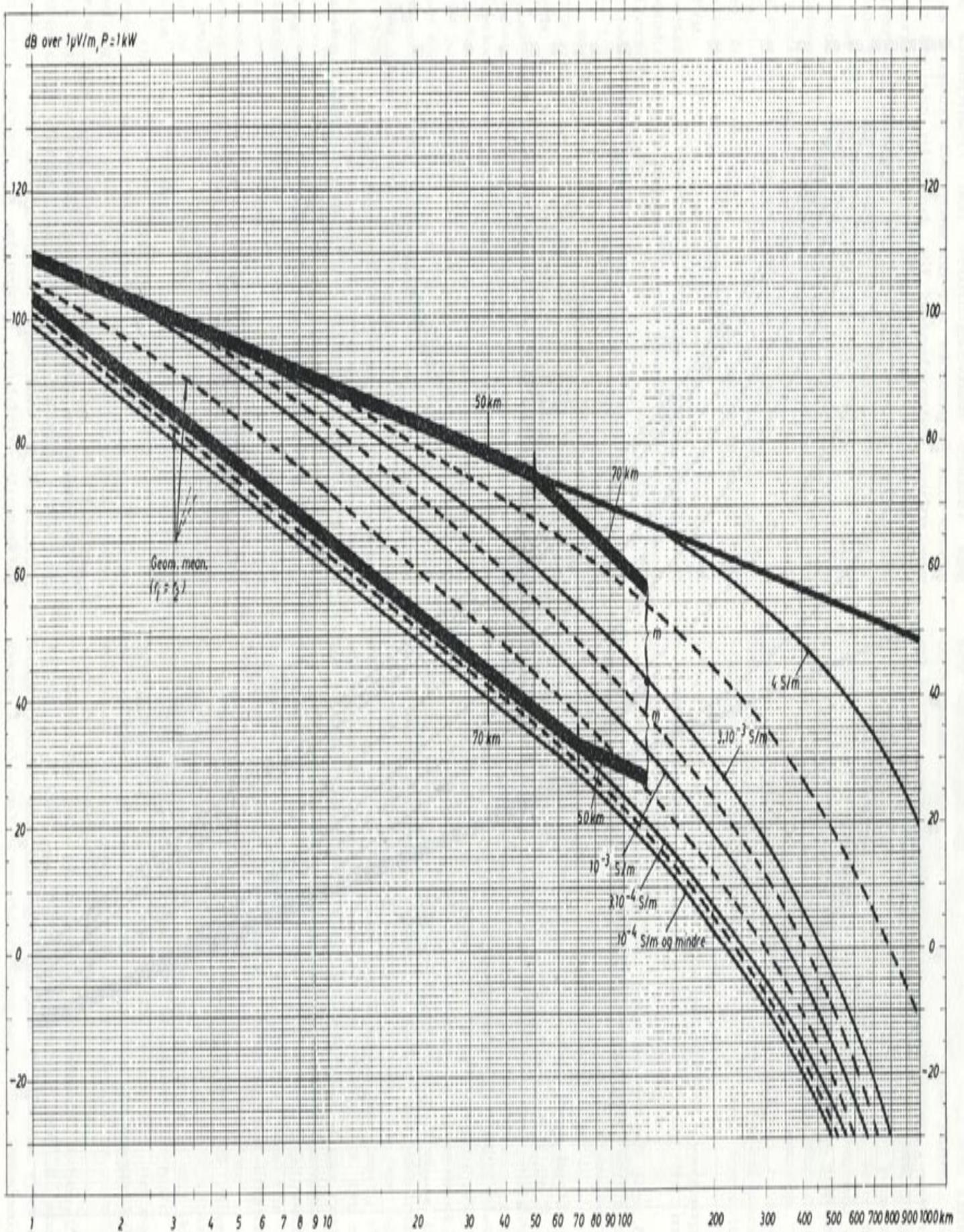


Fig. 8 Millingtons metode

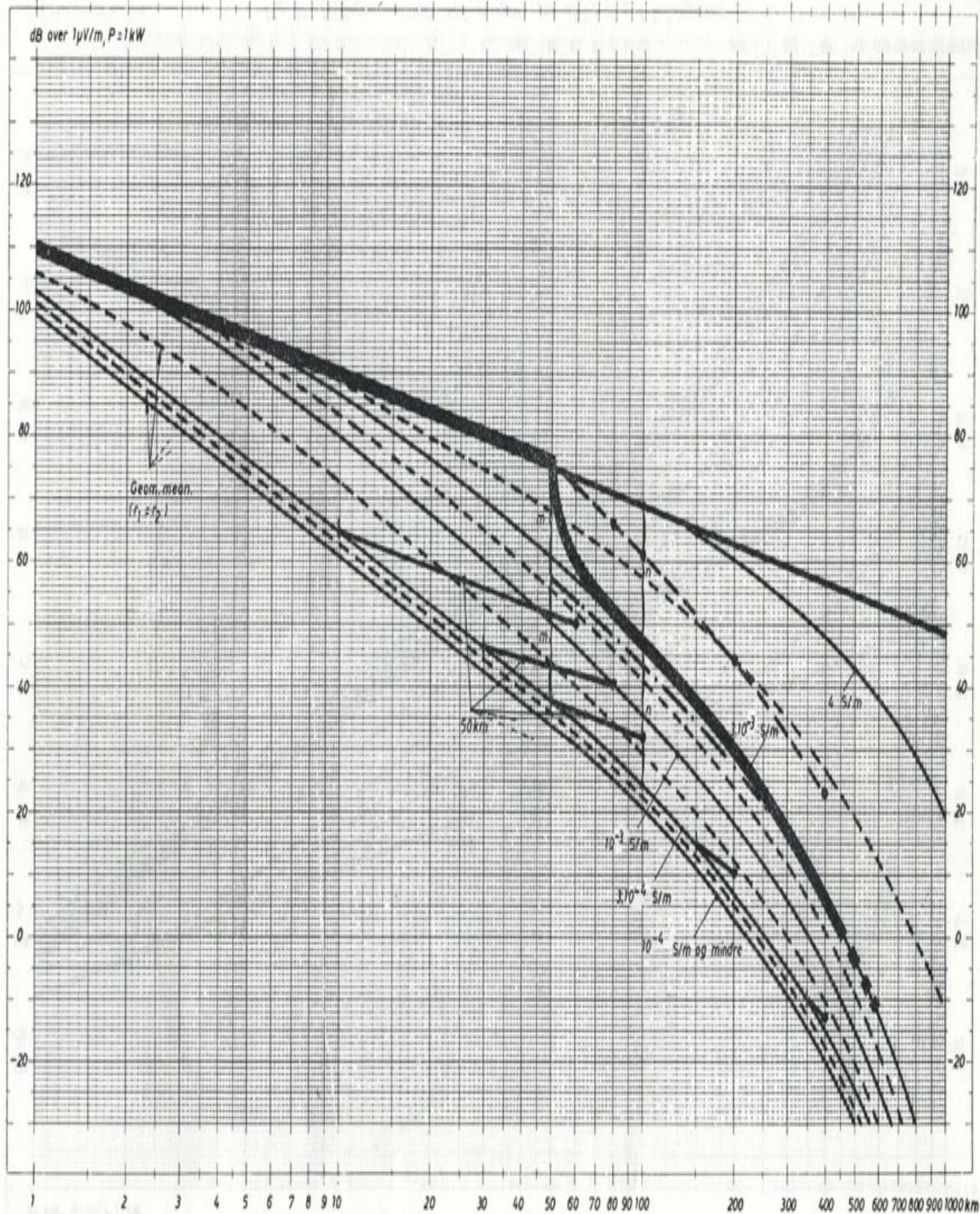


Fig. 9 Millingtons metode ved overgang fra god til dårlig ledningsevne

dB over 1 $\mu$ V/m, P=1kW

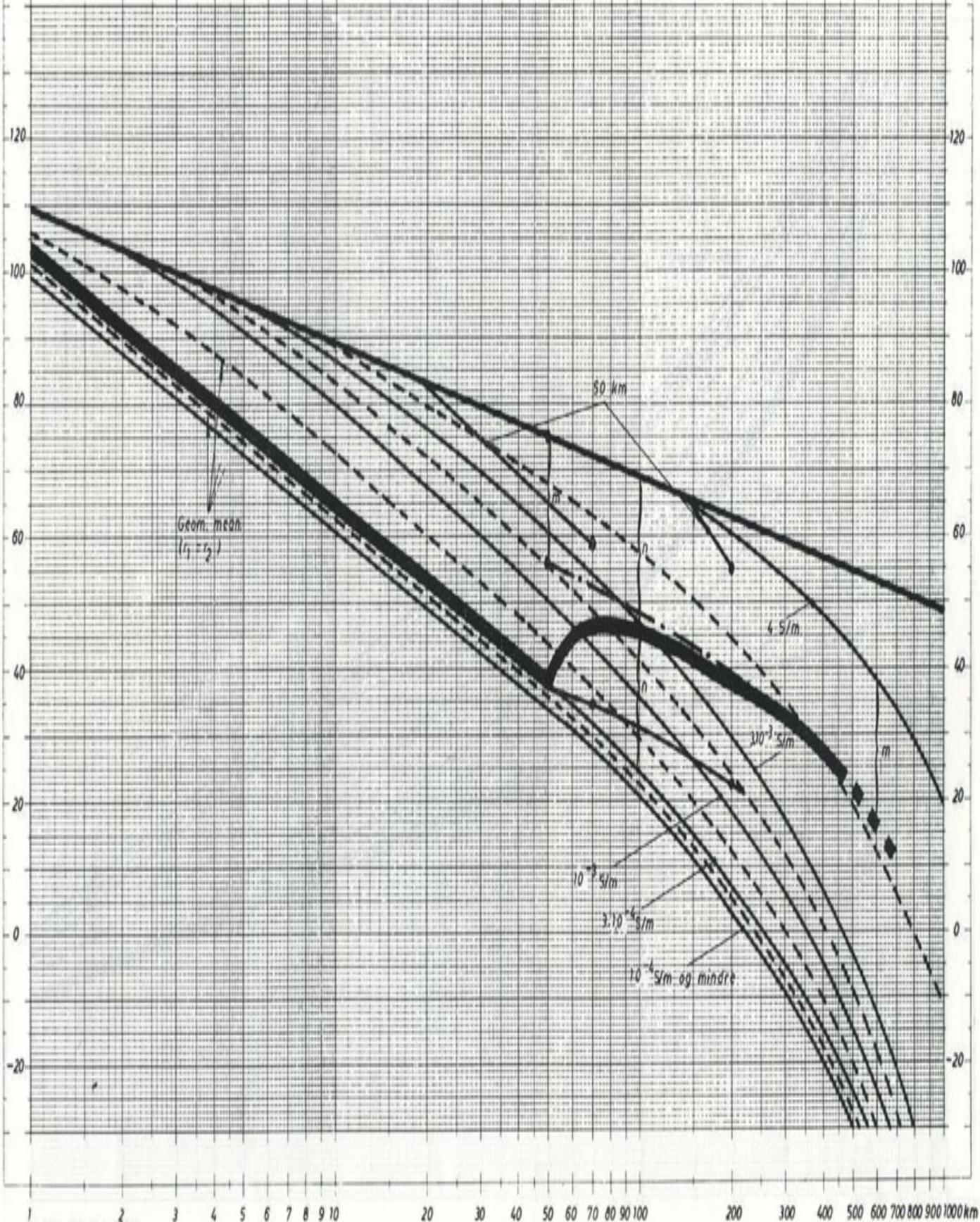


Fig. 10 Millingtons metode ved overgang fra dårlig til god ledningsevne

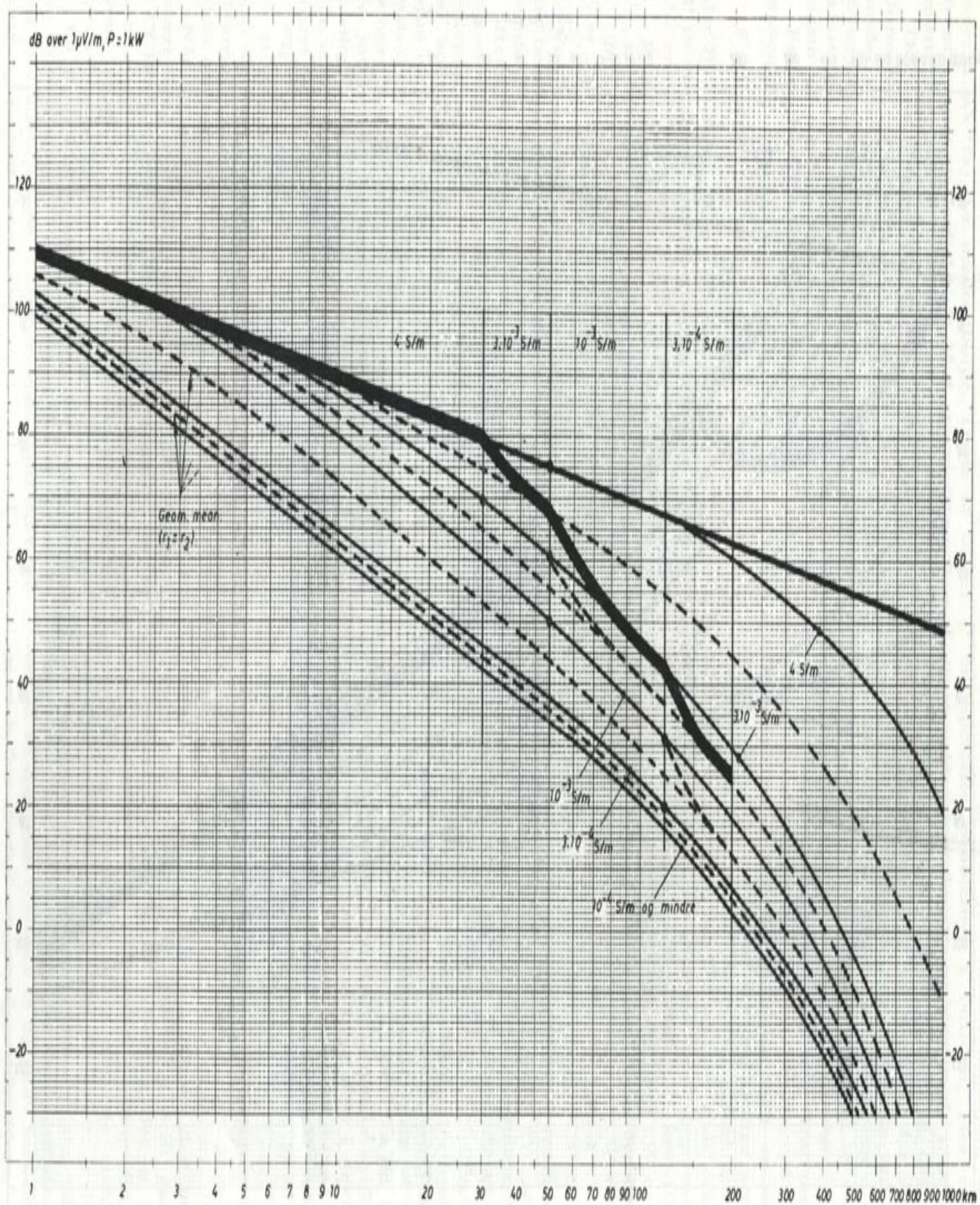


Fig. 11 Resulterende kurve ved flere overganger

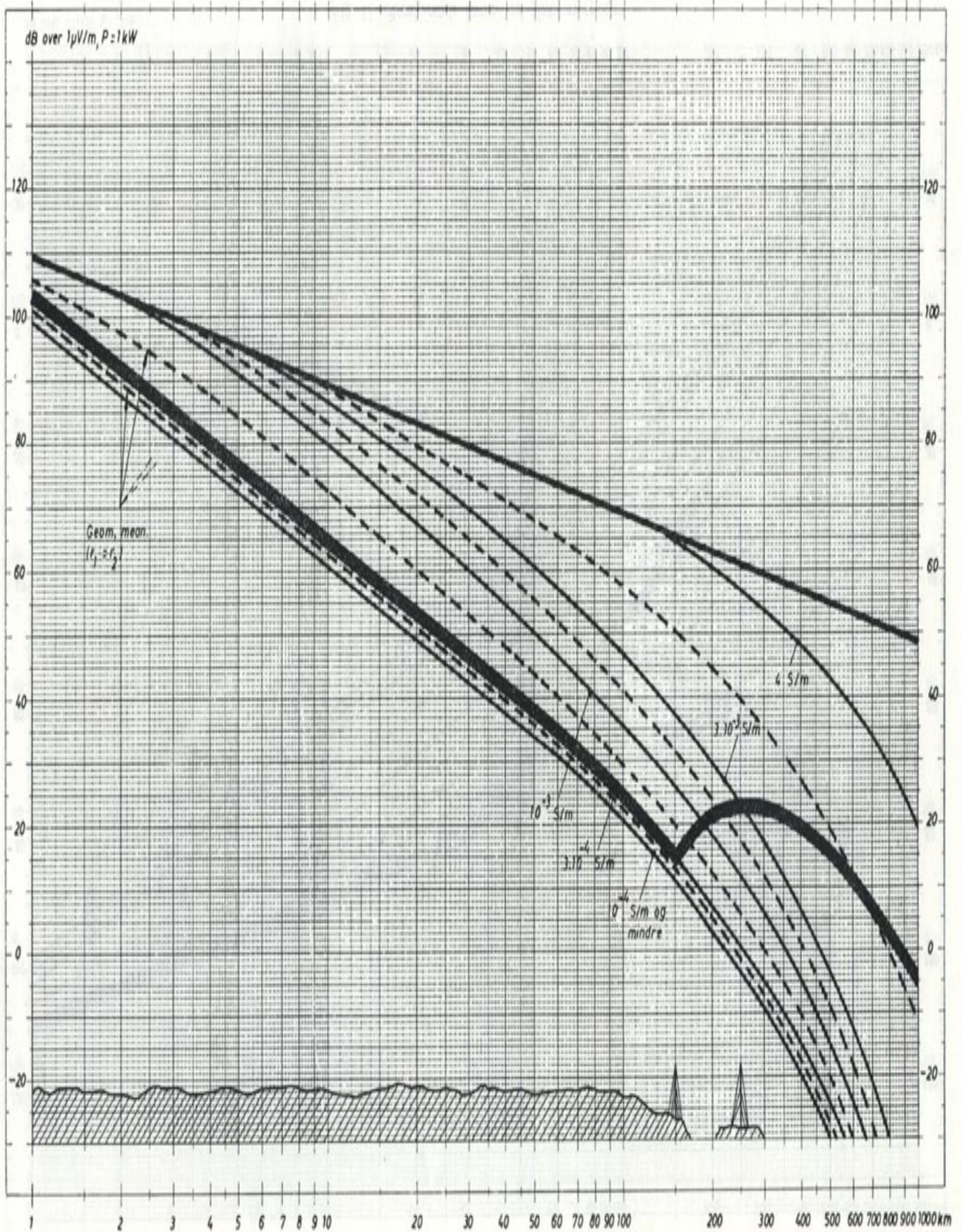


Fig. 12 Recovery-effekten

mens en kan klare seg med 0,7 mV/m (57 dB over 1  $\mu$ V/m) for mellombølge. Dette er under forutsetning av forholdsvis lågt støynivå og bra mottakerutstyr.

Det som er behandlet til nå, gjelder jordbølgen. Jonosfærisk bølgeforplantning på LF/MF er nå under studium i mange land, og grunnlaget for feltstyrkeberegningen kan ikke sies å være helt klart. En har brukt CCIR Report 264, og de viktigste kurvene er gjengitt på *fig. 13* til *16*.

Feltstyrken kan en etter Report 264 få av formelen:

$$F = F_1 + P + \Delta_I + \Delta_H - 0,02 S$$

der  $F_1$  er feltstyrken i dB (av *fig. 13*),

$P$  er senderstasjonens effekt i dB over 1 kW,

$\Delta_I$  er korreksjon for magnetisk dip for midtpunktet på traséen (av *fig. 14* og *15*),

$\Delta_H$  er korreksjon for tidsavviket fra midnatt (av *fig. 16*),

$S$  er solflekketallet.

Ved hjelp av kurvene og solflekketallet kan en da berekne feltstyrke og anslå rekkevidde for en sender.

Rekkevidden omkring midnatt er ganske enkel å komme fram til, men noe verre blir det omkring soloppgang og solnedgang. Omkring soloppgang og solnedgang vil rekkevidden bli en kombinasjon av jordbølgedekning og dekning via jonosfæren, og en kan få ganske store variasjoner i dekningen østover og vestover. Nærdekning skyldes jo jordbølgen også om natten, og i overgangen mellom jordbølgedekning og jonosfæredekning får en et fading-område, men dette området er svært vanskelig å berekne.

*Fig. 16*, som behandler tidsavvik fra midnatt, er et resultat av at solbelyst jonosfære (D-laget) gir så stor absorpsjon for disse frekvensene. Transmisjon via jonosfæren er derfor forholdsvis svak om dagen.

Når en skal se på jonosfæretransmisjon over svært store avstander, så har en en del resultater i CCIR Report 431. De feltstyrkene en da får, er som oftest for små til å gi nyttig dekning, og kurvene i Report 431 brukes for det meste til interferensberegninger.

På *fig. 17* er gjengitt kurver for mellombølge og store avstander. Der ser en at det er forholdsvis stor forskjell på transmisjonen i øst-vest-retning og i nord-sør-retning.

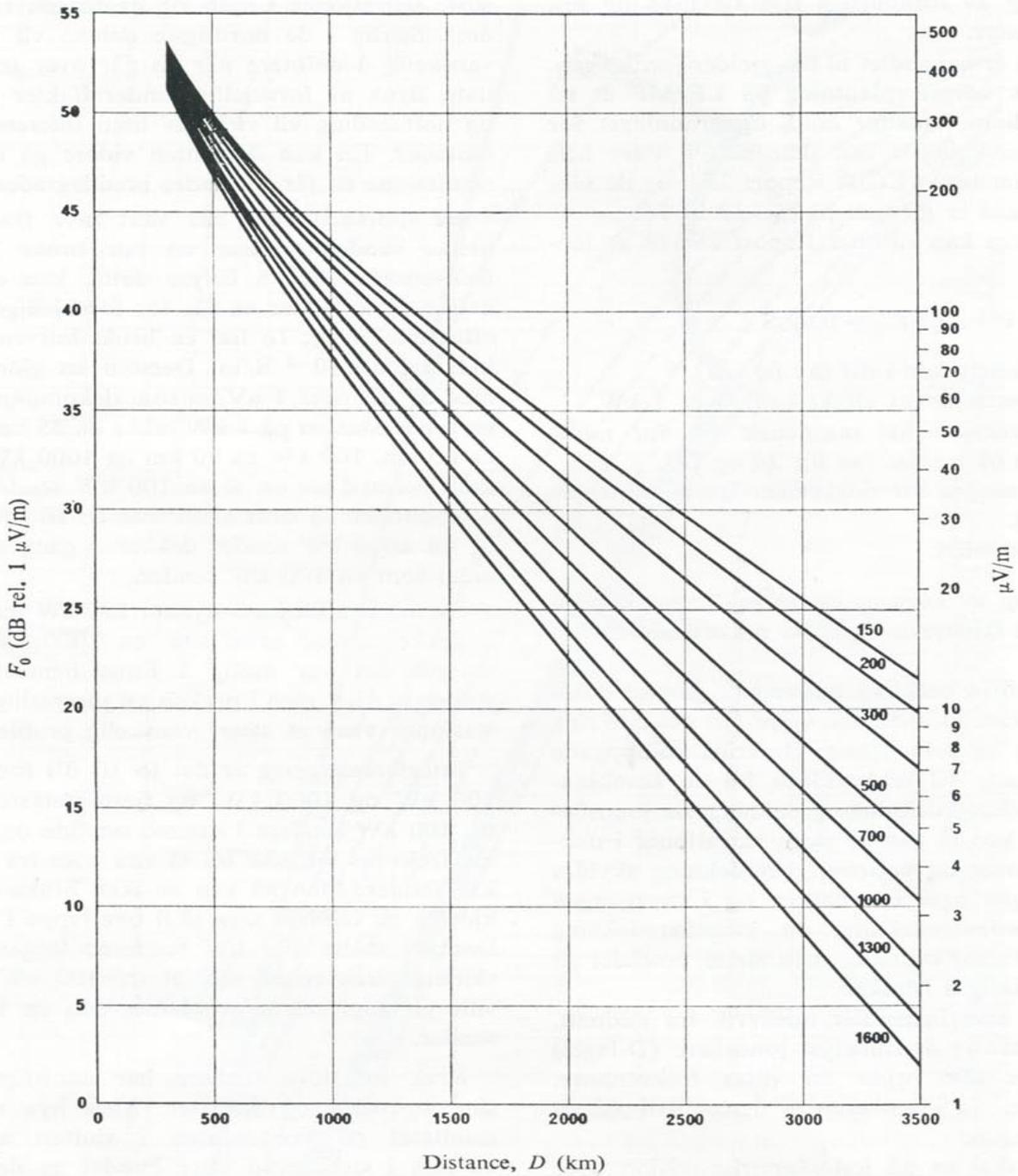
Når det gjelder jonosfæretransmisjon, så har en spesielle problemer i Norden. Her er det store variasjoner i natt- og daglengde i løpet av året. Særlig i de nordligste delene vil det være vanskelig å definere når en går over fra dag til natt. Bruk av forskjellige sendereffekter ved dag- og nattsending vil være av liten interesse i slike områder. En kan ikke uten videre gå ut fra de resultatene en får fra andre breddegrader.

Et spørsmål som har vært mye framme, er hvilke senderstørrelser en bør bruke på disse frekvensene. For å belyse dette, kan en se på hvilke rekkevidder en får for forskjellige sender-effekter. På *fig. 18* har en brukt kurven for 700 kHz og  $\sigma = 10^{-3}$  S/m. Dersom en gjør rekning med 57 dB over 1  $\mu$ V/m som dekningsgrense, vil en senderstasjon på 1 kW rekke ca 35 km, 10 kW ca 60 km, 100 kW ca 90 km og 1000 kW ca 140 km. Dermed ser en at en 100 kW sender dekker over dobbelt så stort areal som en 10 kW sender, og en 1000 kW sender dekker 3 ganger så stort areal som en 100 kW sender.

En måtte altså ha 3 stykker 100 kW sendere for å dekke samme areal som en 1000 kW sender dersom det var mulig å finne hensiktsmessige stasjonssteder, men i praksis vil plassering av flere stasjoner være et svært vanskelig problem.

Interferensmessig er det jo 10 dB forskjell på 100 kW og 1000 kW, og fjerninterferensen fra tre 100 kW sendere i samme område og på samme frekvens vil ikke bli så stor som fra en 1000 kW sender. Men nå kan en ikke bruke synkronkjøring av sendere som skal overlapse i dekning. Dermed måtte 100 kW senderne legges på forskjellige frekvenser, slik at tre 100 kW sendere ville gi langt større problemer enn en 1000 kW sender.

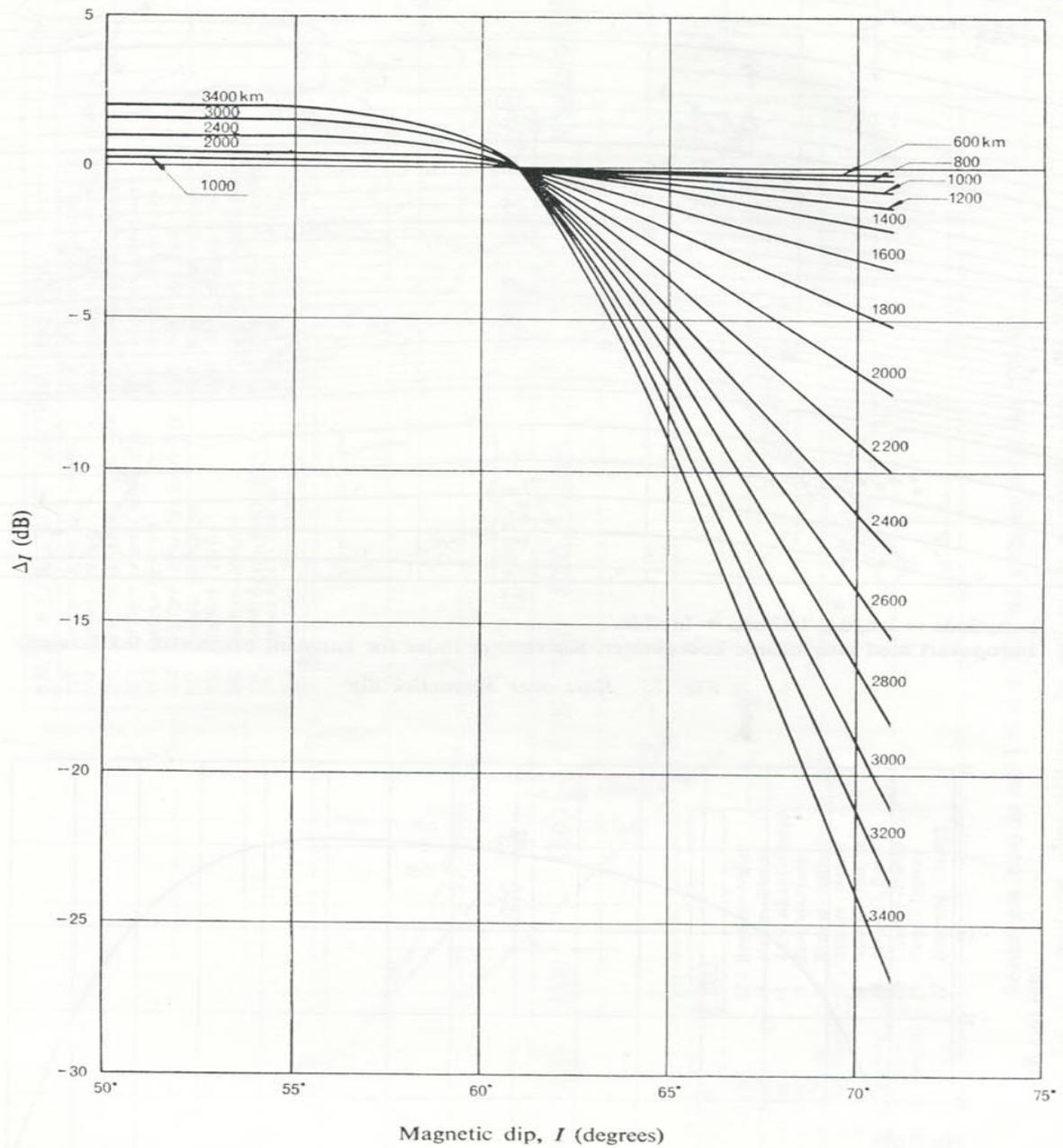
Bruk av store sendere har naturligvis både sine bakdeler og fordeler. Men hva som blir resultatet på konferansen i slutten av 1974, vil nok i sterk grad være bundet av den utviklingen som har foregått. Det er i drift ganske mange sendere på 1–1,5 MW, og det er flere 2 MW sendere i drift eller under bygging. En kan knapt gjøre rekning med at allerede etablerte sendere kan reduseres, og det er vel lite trolig at de som ennå ikke har bygd store sendere, vil avfinne seg med mindre sendere for framtida. Og det er et spørsmål om ikke få og store sendere vil gi et bedre resultat enn mange småsendere.



Avstand,  $D$  (km).

Basiskurver til bruk ved bestemmelse av årlig middelværdi av feltstyrken  $F_0$  for frekvensene (kHz) angitt på kurvene.

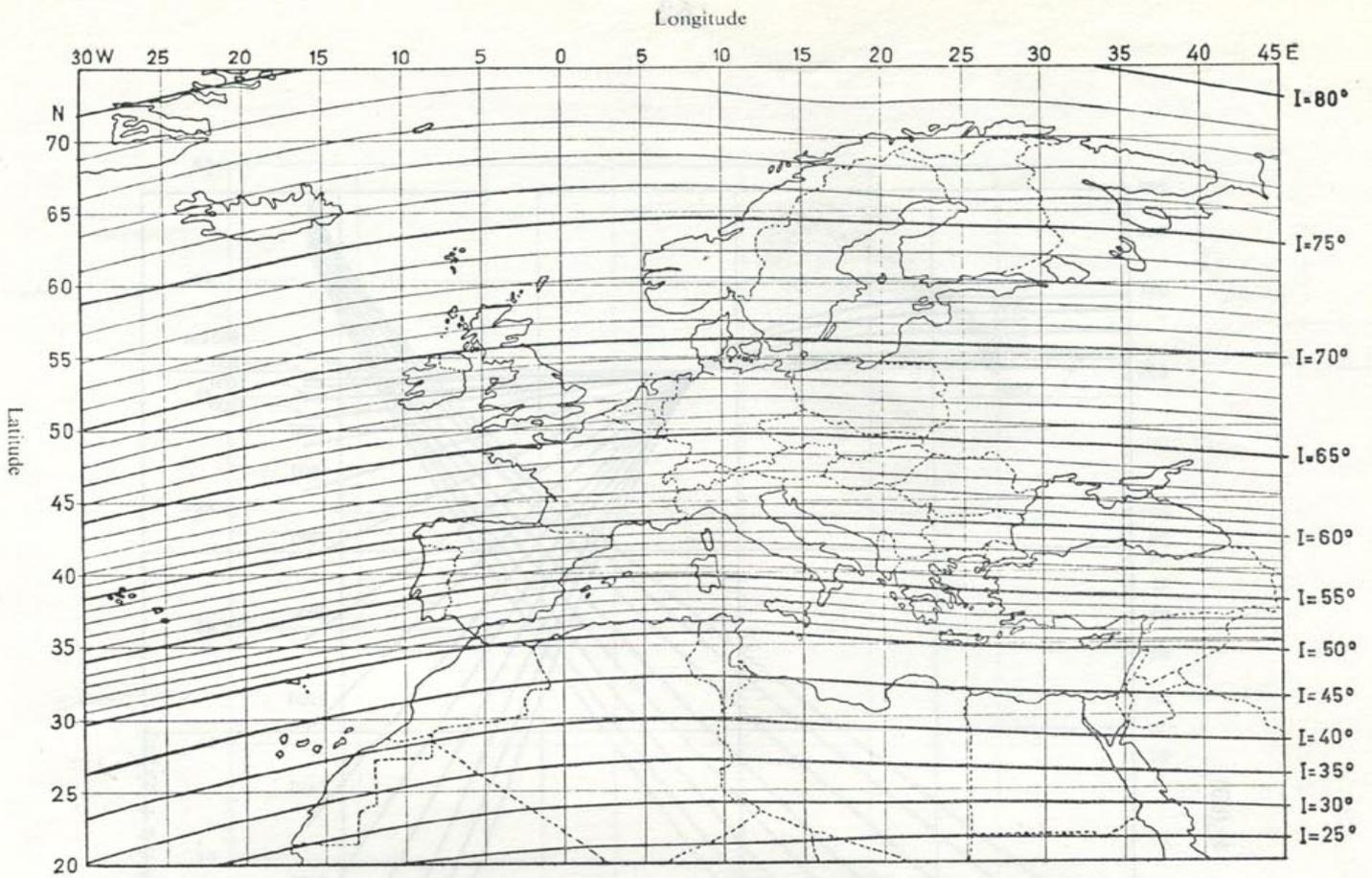
Fig. 13 Feltstyrkekurve for jonofærisk bølgeforplantning



Magnetfeltets inklinasjon,  $I$  (grader).

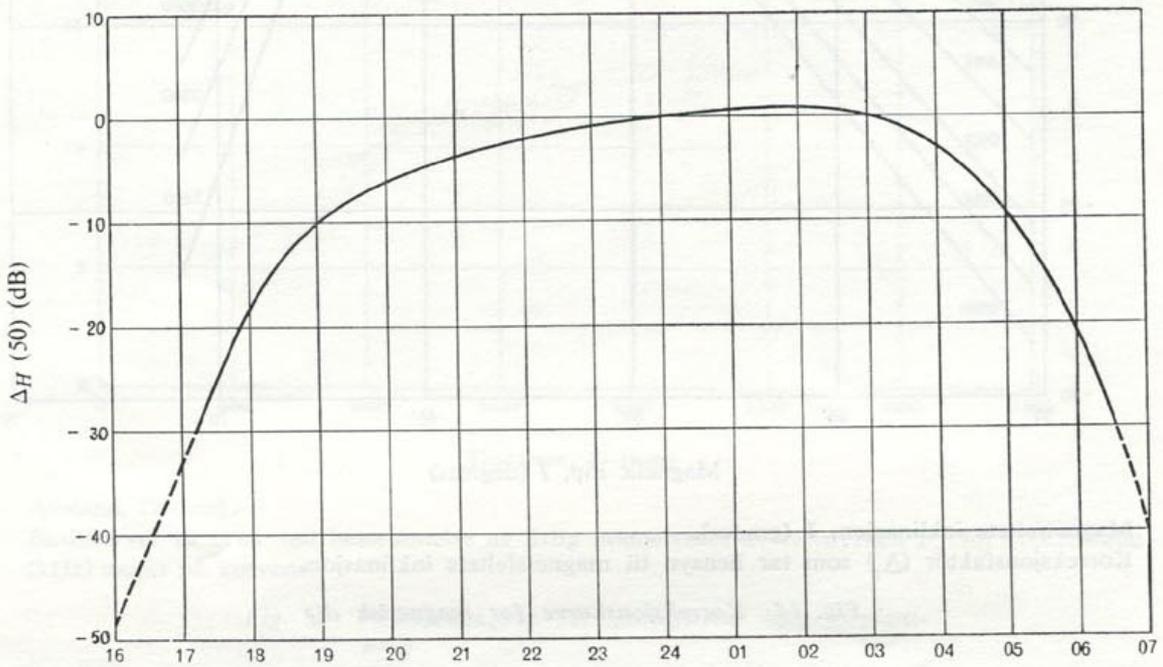
Korreksjonsfaktor ( $\Delta I$ ) som tar hensyn til magnetsfeltets inklinasjon.

Fig. 14 Korreksjonskurve for magnetisk dip



Longtitude = lengde, latitude = bredde.  
 Europakart med rettinklede koordinater. Kurvene er linjer for konstant magnetisk inklinasjon.

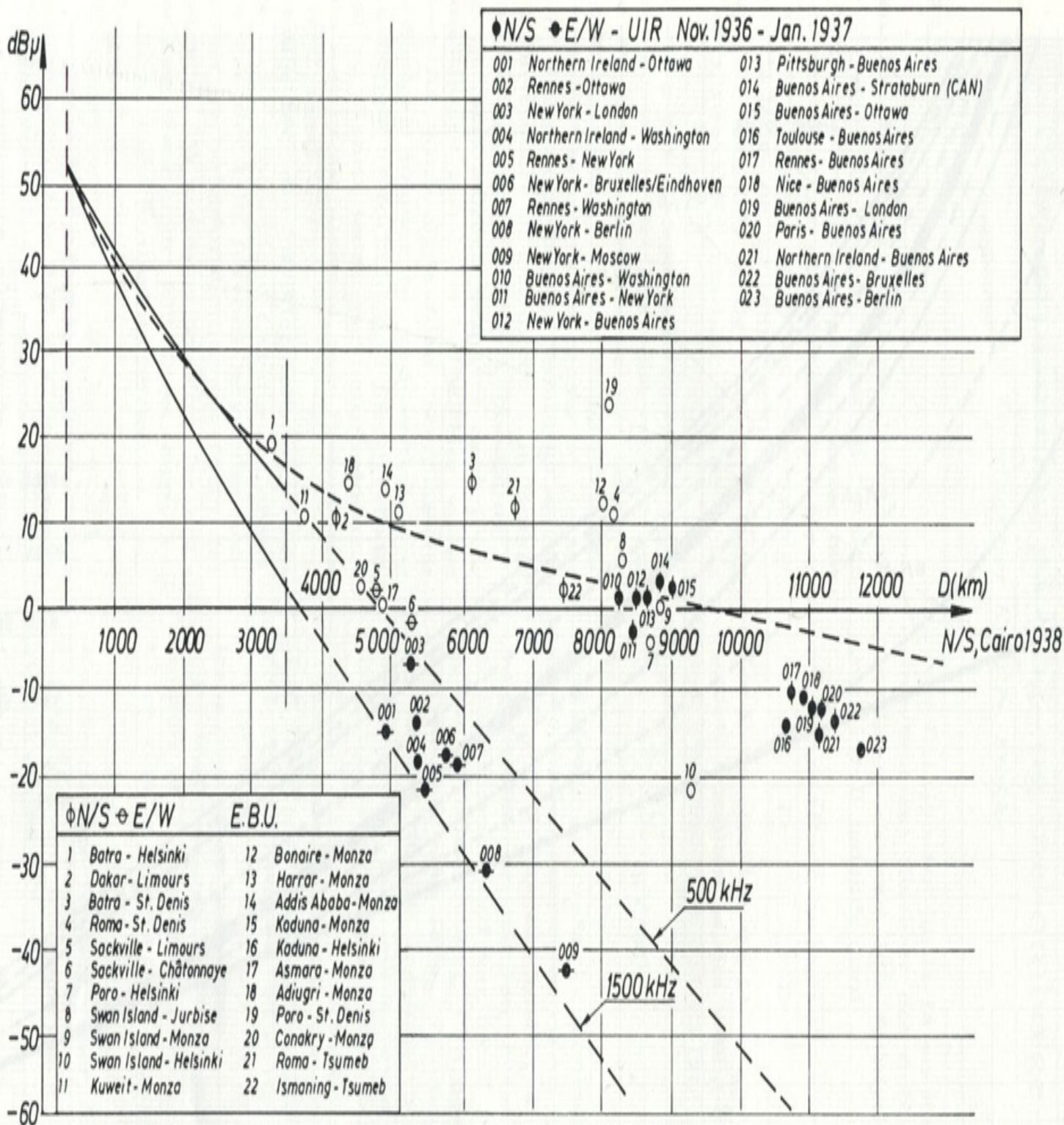
Fig. 15 Kart over magnetisk dip



Time at the mid-point of the path (H)

Tidspunkt ved midtpunktet av forplantningsveien.  
 Korreksjonsfaktor  $\Delta_H(50)$  som tar hensyn til tidspunktet ved midtpunktet av forplantningsveien.

Fig. 16 Korreksjonskurve for tidsavvik fra midnatt



Rombølgens feltstyrke mål i bånd 6 (MF) ved avstander større enn 3000 km.

Fig. 17 Ionosfærisk bølgeforplantning for mellombølge på avstander større enn 3000 km

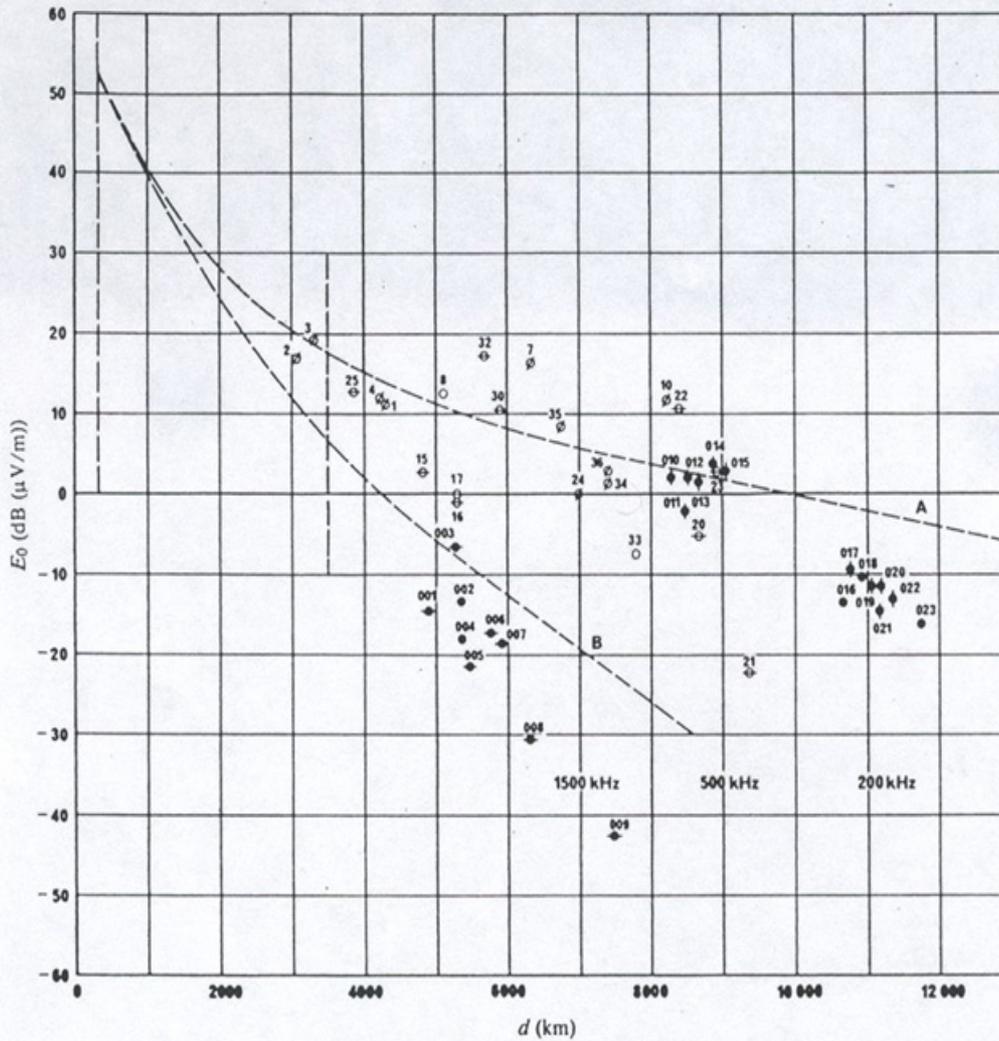


FIGURE 8 - Sky-wave field strengths measured at distances greater than 3000 km

A: N-S, Cairo 1938  
 B: E-W, Cairo

● N/S	◊ E/W	U.E.R.
1		21 Swan Island-Helsinki
2		22 Swan Island-Jurbise
3		23 Swan Island-Monza
4		24 Fort de France-Jurbise
7		25 Kuwait-Monza
8		30 Masirah-Limours
10		32 Masirah-Leucate
15		33 Bangkok-Helsinki
16		34 Ismaning-Tsumeb
17		36 Allouis-Tsumeb
20		

◆ N/S	◊ E/W	U.I.R.	Nov. 1936-Jan. 1937
001		Northern Ireland-Ottawa	013 Pittsburgh-Buenos Aires
002		Rennes-Ottawa	014 Buenos Aires-Strathburn (CAN)
003		New York-London	015 Buenos Aires-Ottawa
004		Northern Ireland-Washington	016 Toulouse-Buenos Aires
005		Rennes-New York	017 Rennes-Buenos Aires
006		New York-Brussels Eindhoven	018 Nice-Buenos Aires
007		Rennes-Washington	019 Buenos Aires-London
008		New York-Berlin	020 Paris-Buenos Aires
009		New York-Moscow	021 Northern Ireland-Buenos Aires
010		Buenos Aires-Washington	022 Buenos Aires-Brussels
011		Buenos Aires-New York	023 Buenos Aires-Berlin
012		New York-Buenos Aires	

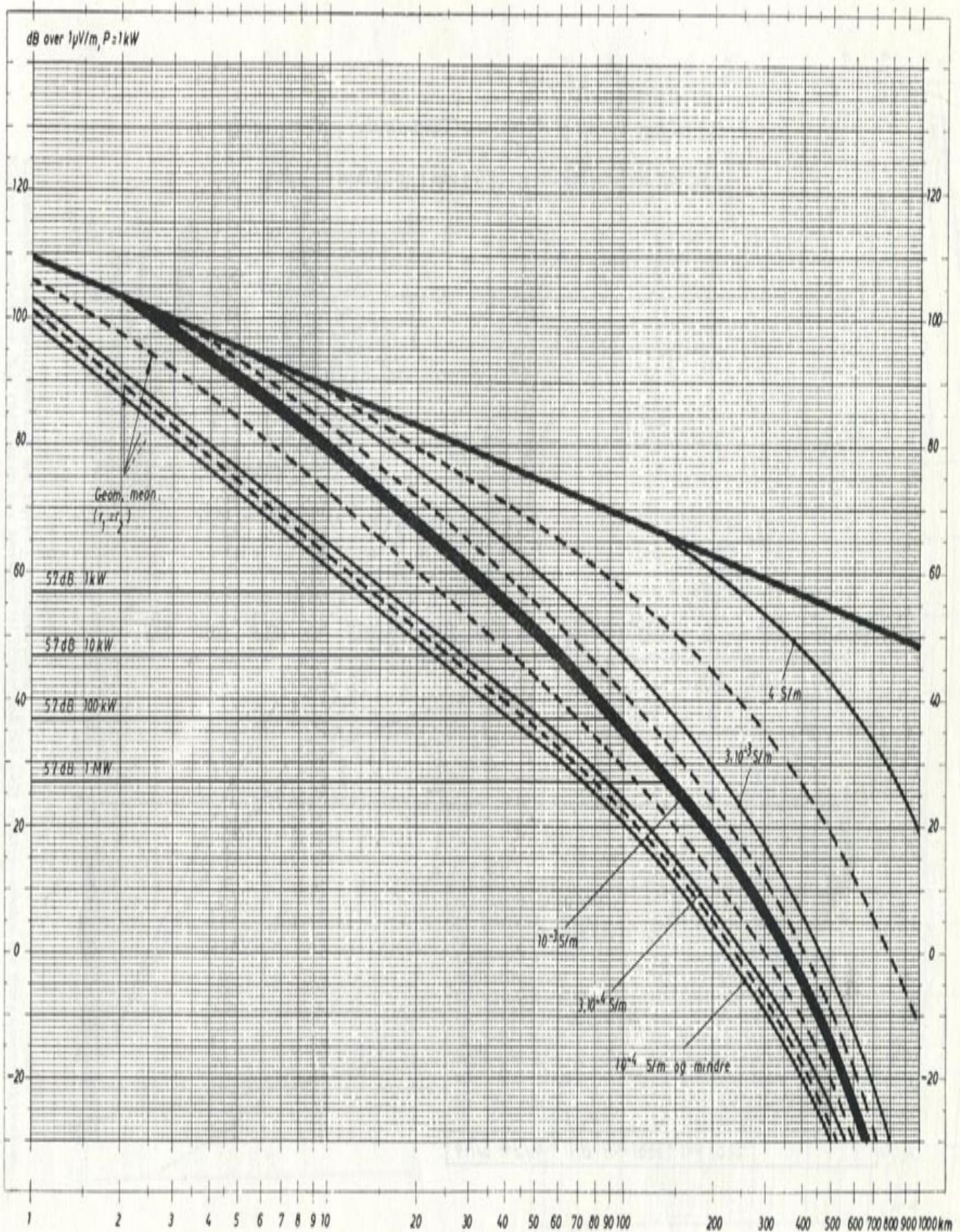
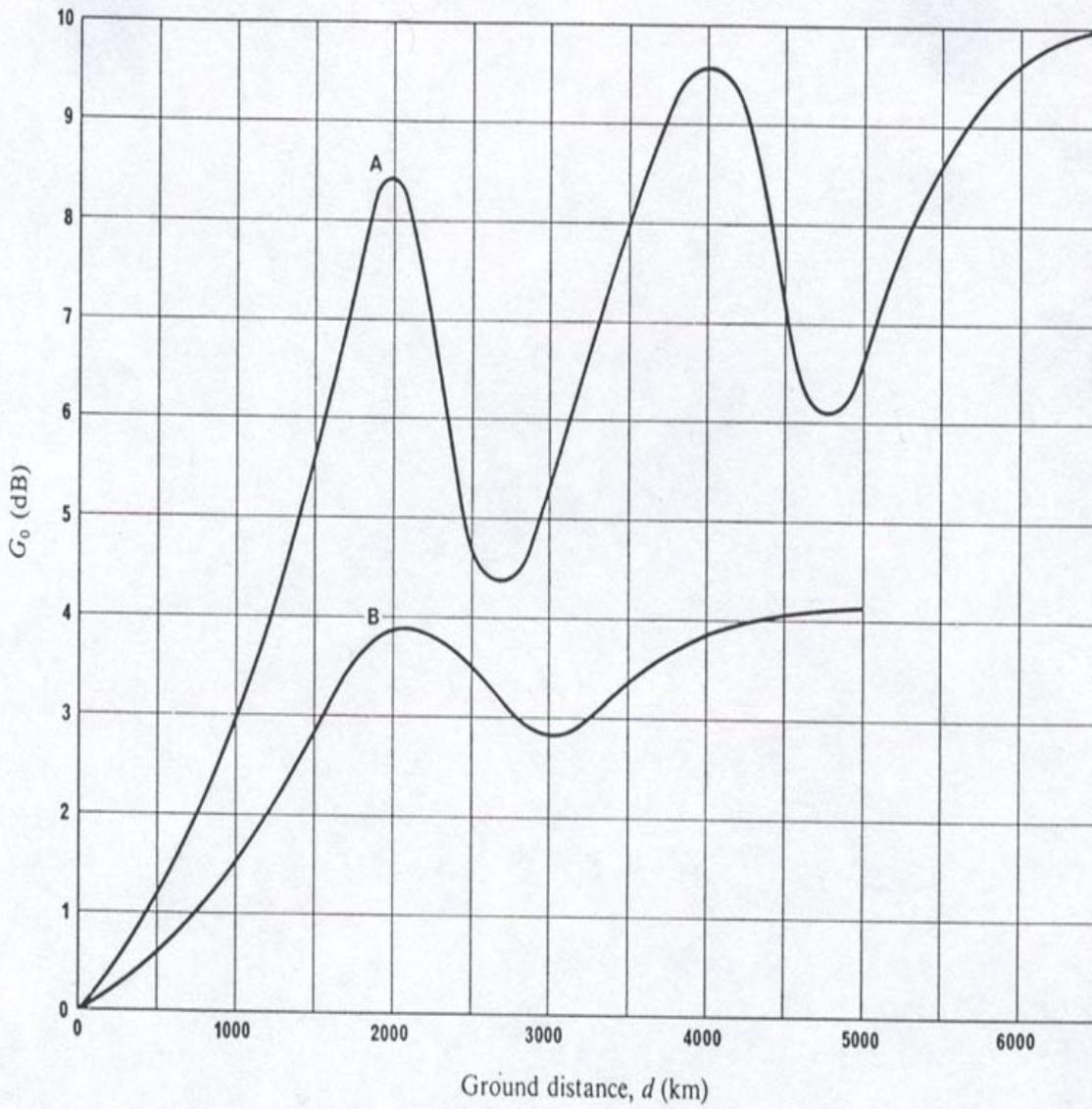


Fig. 18 Rekkevidde ved forskjellige sender effekter

# Annex 2

FIGURE 2  
Sea gain ( $G_0$ ) for a single terminal on the coast



A: MF band

B: LF band

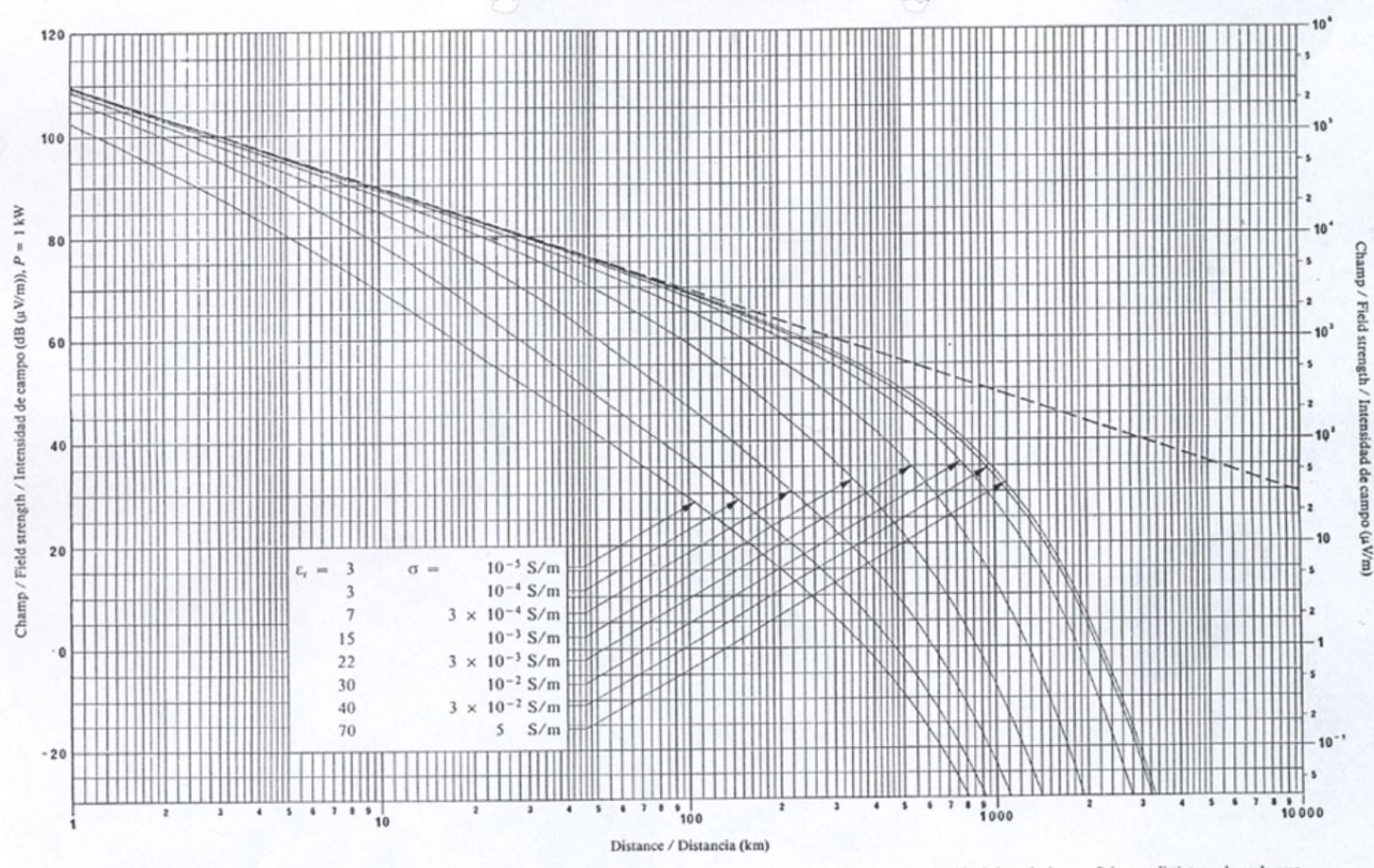
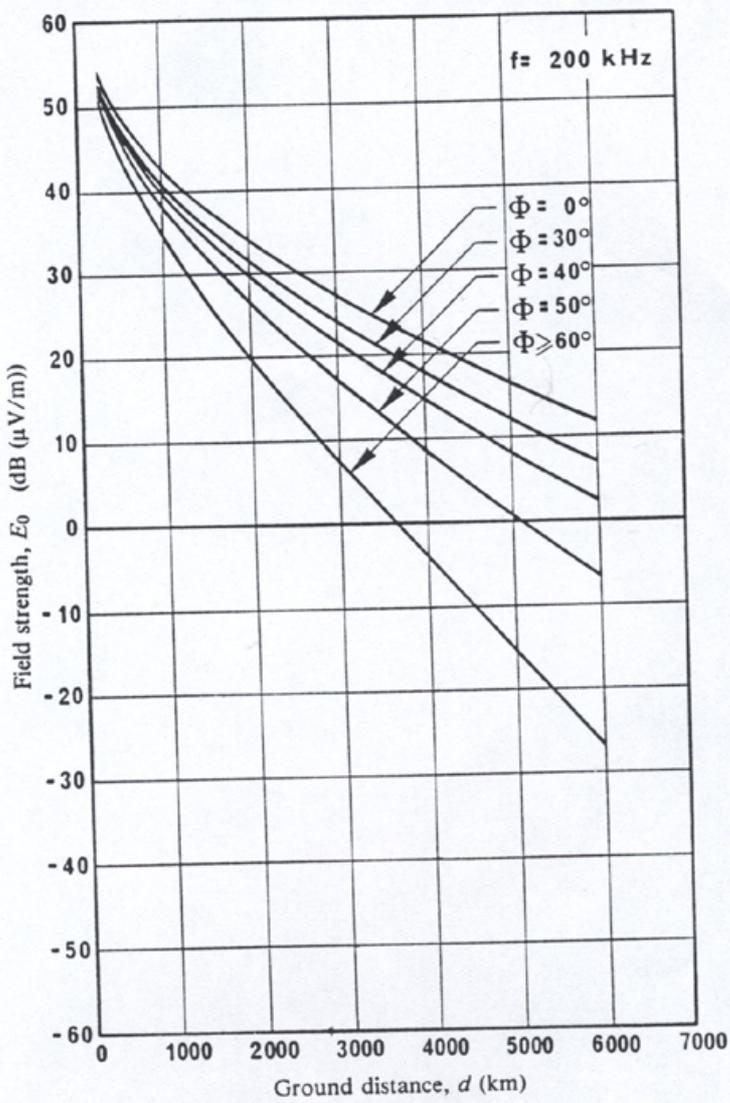


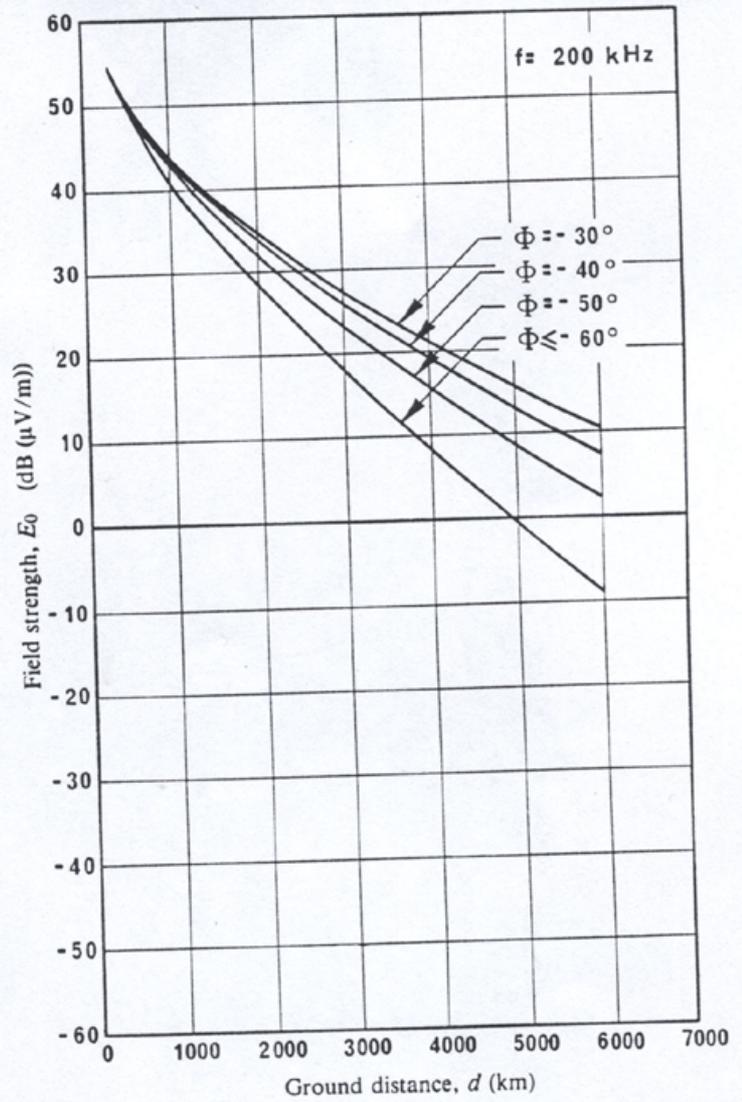
FIG. 11 - Propagation de l'onde de sol pour différentes valeurs de  $\sigma$  et  $\epsilon_r$  / Ground-wave propagation for different values of  $\sigma$  and  $\epsilon_r$  / Propagación de la onda de superficie para distintos valores de  $\sigma$  y  $\epsilon_r$

FIGURE 5

Curves showing  $E_0$  for 200 kHz, when  $G_S$ ,  $L_p$  and  $R$  are all zero, for constant geomagnetic latitudes



(a) Northern hemisphere  
( $\Phi$  positive)



(b) Southern hemisphere  
( $\Phi$  negative)