

DELTA – a part of FORCE Technology
Venlighedsvej 4
2970 Hørsholm
Telefon: +45 72 19 40 00
reflab@delta.dk
www.referencelaboratoriet.dk

17. november 2017
ERT/BP/ilk
J. nr.: RL 16/117
Sagsnr.: 117-30201

Teknisk Notat

PE-beregninger af cylindrisk lydudbredelse

Udført for **Miljøstyrelsen**
Haraldsgade 53
2100 København Ø

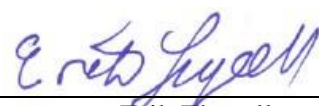
Indholdsfortegnelse

1. Indledning	3
2. Korrektion for multiple korrektioner. Principper for udarbejdelse af simpel model	3
3. Forudsætninger for PE-beregninger	6
4. Test af simpel metode med PE-beregningerne	7
5. Forslag til simpel metode til bestemmelse af korrektion for multiple refleksioner	8
5.1 Modeleksempler.....	10
6. Overensstemmelse med metoden til bestemmelse af virkningen af multiple refleksioner i Nord2000	12
7. Referencer	12

Referencelaboratoriet, 17. november 2017



Birger Plovsing



Erik Thysell

1. Indledning

Referencelaboratoriet har for Miljøstyrelsen udarbejdet et forslag til en simpel korrektion til beregningsmetoden i den eksisterende vindmøllebekendtgørelse, så metoden kan tage hensyn til virkningen af multiple refleksioner ved udbredelse over vand. Der forventes en metode, hvor korrektionen på simpel vis stiger med afstanden over en tærskelafstand i stil med den svenske metode, men hvor vigtige fysiske variable, som kan tænkes at påvirke både størrelsen af korrektionen og tærskelafstanden, indgår. Der er udført et antal PE-beregninger, som har dannet grundlag for udarbejdelse af metoden.

Den primære opgave har været at udarbejde den simple metode. Miljøstyrelsen har også ønsket vurderet, om dataene, som er fremskaffet ved hjælp af PE-beregningerne, kan anvendes til at validere og eventuelt justere metoden til beregning af bidraget fra multiple refleksioner i Nord2000.

Afsnit 2 indeholder en beskrivelse af principperne for udarbejdelse af den simple model.

Afsnit 3 indeholder en kortfattet beskrivelse af de udførte PE-beregninger.

Afsnit 4 viser et eksempel på en test af modellen.

Afsnit 5 indeholder en beskrivelse af forslaget til den simple model.

Afsnit 6 indeholder en vurdering af, hvilke muligheder der er for at bruge erfaringerne fra dette arbejde til at justere Nord2000.

2. Korrektion for multiple korrektioner. Principper for udarbejdelse af simpel model

I den svenske model starter korrektionen for multiple refleksioner (cylindrisk udbredelse) i tærskelafstanden 1 km og stiger herfra med 3 dB pr. fordobling af afstanden. Herved bliver korrektionen 10 dB i afstanden 10 km. En gennemgang af grundlaget for modellen viser, at den er baseret på målinger beskrevet i KTH-rapport af Mathieu Boué [1]. Målingerne er udført for en udbredelsesafstand på ca. 10 km, kildehøjde 30 m og ved frekvenserne 80, 200 og 400 Hz og viser ca. 10 dB højere lydtrykniveau end forventet ved sfærisk lydudbredelse uden hensyntagen til virkningen af multiple refleksioner. I rapporten fremgår det ikke direkte, hvad gennemsnitsvindhastigheden for målingerne har været, men på basis af en andelsmæssig fordeling på vindklasser skønnes det, at middelvindhastigheden må have været af størrelsesorden 5-6 m/s. Det ser ud til, at fastlæggelse af tærskelafstanden i den svenske model (1 km) ikke er baseret på måle- eller beregningsdata (f.eks. fra PE), men alene ved ekstrapolation baseret på hypotesen om en korrektion på 3 dB pr. fordobling af afstanden. Denne hypotese er en ofte brugt, men ikke nødvendigvis præcis antagelse.

Med henblik på udarbejdelse af en prædikteringsmodel for bidraget fra multiple refleksioner har betydningen af tre variable været undersøgt ved hjælp af PE-beregninger: kildehøjden, vindhastigheden og frekvensen. Beregningerne har vist, at kildehøjden og vindhastigheden har en betydende indflydelse på modellen, mens frekvensen derimod har en begrænset indflydelse.

Arbejdshypotesen har været, at modellen kan baseres på en simpel korrektion ΔL for virkningen af multiple refleksioner som funktion af udbredelsesafstanden d som vist i Formel (1) for referenceværdierne kildehøjde $h_{S,ref}$ og vindhastighed u_{ref} , når vindprofilen er en logaritmisk profil.

$$\Delta L(d) = F(d) \quad (1)$$

Korrektionen for andre kildehøjder h_S og vindhastigheder u bestemmes så ved parallelforskydning af funktionen $\Delta L(d)$ langs en logaritmisk d -akse. Transformationen af d til dette formål bestemmes med to skaleringsfaktorer k_h og k_u som vist i Formel (2).

$$\Delta L(d, h_S, u) = F(k_h k_u d) \quad (2)$$

Skaleringsfaktorerne beregnes som vist i Formel (3) og (4).

$$k_h = \frac{h_{S,ref}}{h_S} \quad (3)$$

$$k_u = \sqrt{\frac{u}{u_{ref}}} \quad (4)$$

Fremgangsmåden er baseret på antagelsen om, at det totale antal stråler i udbredelsen alene bestemmer korrektionen, og at det totale antal stråler N kan bestemmes som vist i Formel (5). h_{max} er den største værdi af kildehøjden og modtagerhøjden og vil for vindmøller være bestemt af h_S . A er koefficienten i den logaritmiske vindprofil og derfor proportional med vindhastigheden u , mens C er lydhastigheden ved jorden, som i praksis kan betragtes som en konstant. Baggrunden for Formel (5) er beskrevet af M. Ögren i [2] og er baseret på baseret på en ide af E. M. Salomons beskrevet i [3]. Formel (5) er også anvendt i Nord2000-metoden [4].

$$N = \frac{4d}{h_{max}} \sqrt{\frac{A}{2\pi C}} \quad (5)$$

Hvis modelhypotesen er korrekt, vil det derfor være tilstrækkeligt at bestemme funktionen $\Delta L(d)$ for $h_{S,ref}$ og u_{ref} , men det vil være nødvendigt ved bestemmelsen at sikre bedst mulig overensstemmelse med PE-resultaterne i hele det ønskede variationsområde for kildehøjde og vindhastighed. Ved hjælp af PE-beregninger er tærskelafstanden for multiple korrektionen derfor bestemt for 12 relevante kombinationer af vindhastighed og kildehøjde ($u = 6$ og 8 m/s, $h_S = 10, 20, 30, 50, 70, 100$ m), og de fundne tærskelafstande er omregnet til referenceværdierne $u_{ref} = 6$ m/s og $h_{S,ref} = 30$ m ved hjælp af skaleringsfaktorerne i Formel (3) og (4). Middelværdien er herefter bestemt til 2000 m.

På grund den svenske måling skal korrektionen stige fra 0 dB i tærskelafstanden til 10 dB i 10 km afstand i hvert fald for frekvenser op til 400 Hz, som er det frekvensområde, der indgår i den svenske måling. Dette ville være opfyldt ved en logaritmisk sammenhæng på 4,3 dB pr. afstandsfordobling. På basis af erfaringerne fra Nord2000-arbejdet virker det dog mere rimeligt at bruge en to-segment approksimation med 3 dB pr. afstandsfordobling til en korrektion på 4 dB (knæpunkt ved 2,512 gange tærskelafstanden) og 6 dB pr. afstandsfordobling efter knæpunktet.

Det har været forsøgt at bestemme knæpunktet mellem 3 og 6 dB segmentet ud fra PE-regninger, men det har vist sig svært, blandt andet fordi virkningen af multiple refleksioner er svær at skelne fra den almindelige virkning af interferens på terrænvirkningen. Ved høje frekvenser ser det ud til, at en et-segment model med 3 dB pr. afstandsfordobling vil være en bedre approksimation. Ved lave frekvenser ser PE-resultaterne ikke meget anderledes ud end ved høje frekvenser, men her lægges der mere vægt på den svenske måling, hvilket taler for at bruge to-segment modellen. Den svenske måling stemmer i øvrigt overens med beregninger med den analytiske, kohærente lavfrekvensmodel anvendt i Nord2000 [4].

På denne baggrund er der valgt at udarbejde en lavfrekvensmodel (under 400 Hz) baseret på to-segment modellen og en højfrekvensmodel (over 800 Hz) baseret på et-segment modellen. I det mellemliggende frekvensområde bruges en glidende overgang mellem de to modeller. Referencefunktionen ΔL er baseret på tærskelværdien $d_0 = 2000$ m og et knæpunkt i to-segment, som er $d_1 = 2,512 d_0$. Høj- og lavfrekvensmodellen er kun forskellig i afstande over d_1 . Matematisk beregnes korrektionen ΔL for referenceværdierne af kildehøjde og vindhastighed som angivet i Formel (6) og (7).

$$\Delta L(d) = \begin{cases} 0 & \text{for } d \leq d_0 \\ 10 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) & \text{for } d_0 < d < d_1 \\ N \log\left(\frac{d}{d_1}\right) + 4 & \text{for } d_1 \leq d \end{cases} \quad (6)$$

hvor N beregnes som vist i Formel (7) dels for det lave frekvensområde (under 400 Hz), dels for det høje frekvensområde (over 800 Hz) og for overgangsområdet mellem 400 og 800 Hz.

$$N = \begin{cases} 20 & \text{for } f \leq 400 \\ 10 & \text{for } f \geq 800 \\ 20 - 10 \frac{\log(f/400)}{\log(2)} & \text{for } 400 < f < 800 \end{cases} \quad (7)$$

Det endelige forslag er vist i afsnit 5 og er en omskrivning af de ovenfor viste formler.

3. Forudsætninger for PE-beregninger

PE (parabolic equation) beregningerne er udført med software, der beregner lydudbredelse i henhold til beskrivelsen af "Green's function parabolic equation" (GFPE) i [5]. Der er benyttet de i artiklen beskrevne metodeforbedringer. Softwaren er kontrolleret med testeksemplarer fra [5] og [6].

Der er udført beregninger for alle 1/3-oktavbånd i frekvensområdet 10-4000 Hz. For hvert 1/3-oktavbånd er der udført beregninger for et antal diskrete frekvenser. Resultatet af disse er midlet på energibasis indenfor hvert 1/3-oktavbånd. Antallet af frekvenser var valgt til det mindste af

- antallet af heltalsværdier for frekvensen mellem nedre og øvre grænsefrekvens for det pågældende 1/3-oktavbånd og
- centerfrekvensen -20 – centerfrekvensen +20, i alt 41 stk.

Beregningerne udførtes med følgende parametre:

- Vandret afstand mellem kilde og modtagere: 0-10 km.
- Kildehøjder: 10, 20, 30, 50, 70 og 100 m
- Modtagerhøjde: 1,5 m
- Vindhastighed i højden 10 m i retningen fra kilde til modtagere: 1,2,3,4, 6, 8 og 10 m/s
- Temperatur (konstant med højden): 15° C
- Terrænoverfladens ruhedslængde: 0.001 m
- Terrænoverfladens impedans: uendelig (svarende til en flad vandoverflade).

4. Test af simpel metode med PE-beregningerne

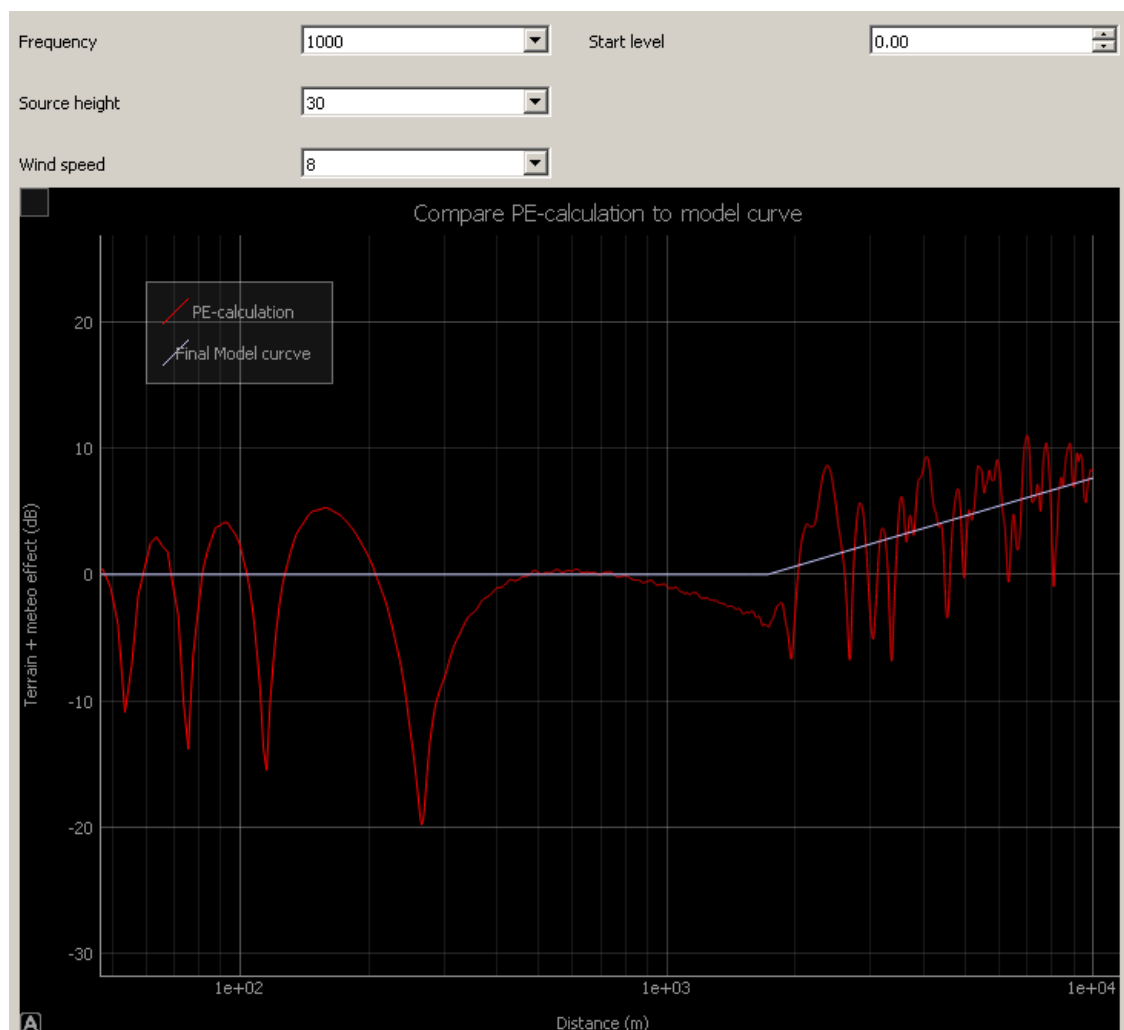
For at kunne teste virkemåden af den simple model er modellen lagt ind i det software, der bruges til at vise resultaterne af PE-beregningerne. For hver 1/3-oktavfrekvens, kildehøjde og vindhastighed kan softwaren vise lydtrykniveauet i modtagerpositionen relativt til frit felt (terrænvirkningen) som funktion af udbredelsesafstanden.

Figur 1 viser et eksempel på dette for frekvens = 1000 Hz, kildehøjde = 30 m og vindhastighed = 8 m/s. Den røde kurve i figuren viser terrænvirkningen. I afstande under ca. 1700 m ser man det karakteristiske mønster i terrænvirkningen, der opstår, når det direkte lydfelt ved modtageren interfererer med det reflekterede lydfelt, inden multiple refleksioner begynder at forekomme. Længs afstandsaksen forekommer der maksima på op til ca. 6 dB (svarende til en trykfordobling) og minima på typisk -10 til -20 dB (svarende til tæt på fuldstændig udfasning). Placeringen af minima og maksima bestemmes af kilde-modtager-geometrien, frekvensen og refraktionen bestemt af vindhastigheden. Af figuren kan man også se, at interferensmønstret ændrer sig over ca. 1700 m, hvilket skyldes, at de multiple refleksioner dukker op. Man bemærker også en generel tendens til, at terrænvirkningen begynder at stige med afstanden, selv om der stadig er fluktuationer i terrænvirkningen. På grund af de ekstra refleksioner bliver variationerne i niveau ”hurtigere” med afstanden.

Det generelle indtryk er, at den afstand (kaldet tærskelafstanden ovenfor), hvor de multiple refleksioner dukker op, bestemmes ud fra PE-beregningerne uden større problemer. Derimod er det på basis af PE-beregningerne vanskeligere at afgøre, hvor meget det ekstra bidrag til terrænvirkningen fra de multiple refleksioner ud over terrænvirkningen fra den første terrænrefleksion præcist stiger med afstanden over tærskelafstanden, da det der ses i figuren, er den kombinerede virkning af den første refleksion og de øvrige refleksioner. Den endelige beslutning, om hvor stor stigningen i terrænvirkningen med afstanden skal være i den simple metode, er derfor ikke alene baseret på PE-beregningerne udført for et større antal frekvenser, kildehøjder og vindhastigheder, men er også påvirket af anden information som teoretiske overvejelser og i høj grad af erfaringerne fra de svenske målinger.

Den hvide kurve i Figur 1, som viser korrektionen beregnet med den simple metode, kan manuelt justeres vertikalt i figuren for hver PE-beregning, så værdien 0 på passende vis svarer til terrænvirkningen i området under afstanden, hvor de multiple refleksioner dukker op. På denne måde kan metodens virkemåde undersøges for hver kombination af frekvens, kildehøjde og vindhastighed.

Fremgangsmåden er anvendt både under udarbejdelsen af modellen og ved endelig test af den simple metode.



Figur 1
Eksempel på sammenligning mellem PE-beregning (rød streg) og model-kurve (hvid streg), ved 1000 Hz, kildehøjde = 30 m og vindhastighed = 8 m/s.

5. Forslag til simpel metode til bestemmelse af korrektion for multiple refleksioner

Definition af variable:

d : afstand (m)

h_s : kildehøjde (m) svarende til vindmøllens navhøjde

u : vindhastighedskomponent (m/s)

f : centerfrekvens af 1/3-oktavbånd fra 10 Hz til 10 kHz

Først beregnes tærskelafstanden for en given vindhastighed u og kildehøjde h_s som vist i Formel (8).

$$d_0 = 2000 \frac{h_s}{30} \sqrt{\frac{6}{u}} \quad (8)$$

På basis af d_0 beregnes den normerede afstand d' som vist i formel (9).

$$d' = \frac{d}{d_0} \quad (9)$$

Herefter beregnes korrektionen for multiple refleksioner $\Delta L(d)$ ud fra den normerede afstand d' som vist i Formel (10).

$$\Delta L(d) = \begin{cases} 0 & \text{for } d' \leq 1 \\ 10 \log(d') & \text{for } 1 < d' < 2,512 \\ N \log\left(\frac{d'}{2,512}\right) + 4 & \text{for } 2,512 \leq d' \end{cases} \quad (10)$$

hvor N beregnes som vist i Formel (11).

$$N = \begin{cases} 20 & \text{for } f \leq 400 \\ 10 & \text{for } f \geq 800 \\ 20 - 10 \frac{\log(f/400)}{\log 2} & \text{for } 400 < f < 800 \end{cases} \quad (11)$$

Korrektionen $\Delta L(d)$ givet af formlerne (8), (9), (10) og (11) er illustreret under afsnit 5.1.

Det ovenfor beskrevne forslag til en simpel metode til korrektion for multiple terrænrefleksioner er optimeret til bedst mulig nøjagtighed for vindhastighederne 6 og 8 m/s relevante for vindmøllebekendtgørelsen og for vindmøllenavhøjder (kildehøjder) mellem 30 og 100 m. Modellen forventes dog at kunne anvendes med god nøjagtighed for vindhastigheder fra 1 m/s op til i hvert fald 10-15 m/s (nøjagtigheden er ikke undersøgt over 10 m/s). Modellen forventes desuden at kunne anvendes for kildehøjder på mindst 10 m (nøjagtigheden er ikke undersøgt for kildehøjder over 100 m, men forventes alligevel at være acceptabel betydeligt over 100 m).

Hvis man ønsker at beregne d_0 for vindhastighederne 6 og 8 m/s kan man forenkle formel (8) til hhv. formel (12) og (13).

$$d_0 = 2000 \frac{h_s}{30}, \text{ for } u = 6 \text{ m/s} \quad (12)$$

$$d_0 = 1732 \frac{h_s}{30}, \text{ for } u = 8 \text{ m/s} \quad (13)$$

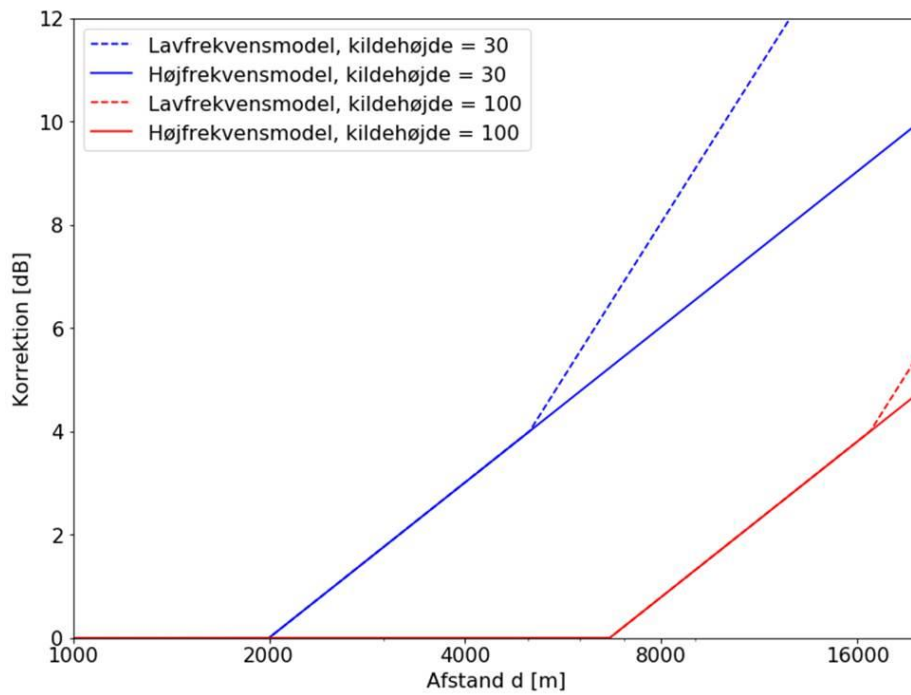
5.1 Modeleksempler

Der er udvalgt nogle situationer for at illustrere, hvilken effekt modellen medfører på det beregnede støjniveau. Disse er vist i Tabel 1. Der er vist eksempel med vindhastighed 6 og 8 m/s og en kildehøjde på 30 og 100 m. Der er vist tærskelafstand, d_0 , og afstande til knæpunktet, $2,512 * d_0$. Herudover vises korrektionen for henholdsvis lavfrekvens og højfrekvens i afstanden 10 km. Dette er også illustreret i hhv. Figur 2 og Figur 3.

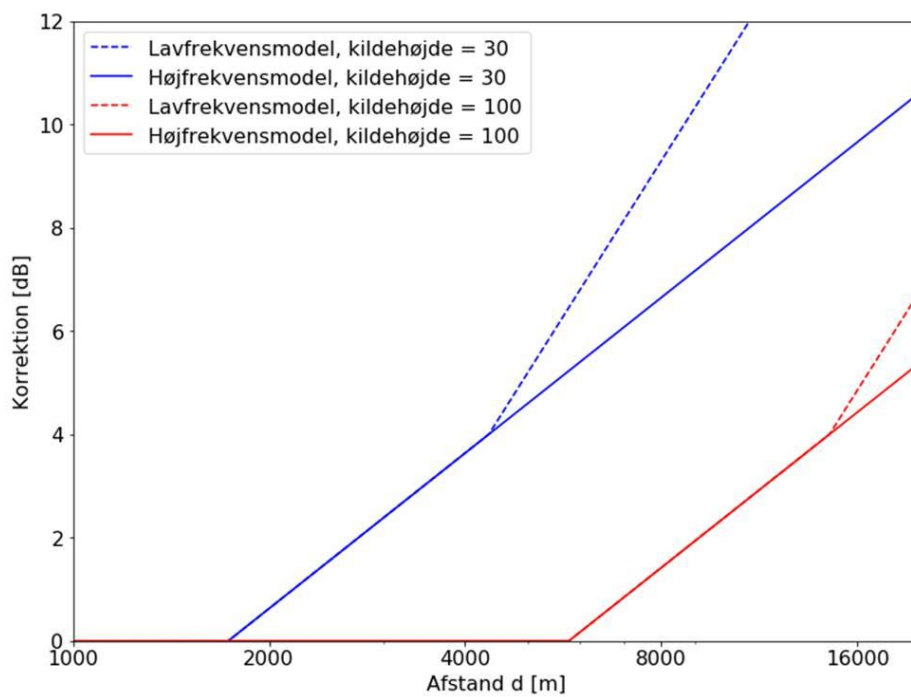
Eksempel	1	2	3	4
Vindhastighed [m/s]	6	6	8	8
Kildehøjde [m]	30	100	30	100
Tærskelafstanden [m]	2.000,0	6.666,7	1.732,1	5.773,5
Afstand til knæpunkt [m]	5.024,0	16.746,7	4.350,9	14.503,0
Lavfrekvenskorrektion @10km [dB]	10,0	1,8	11,2	2,4
Højfrekvenskorrektion @10km [dB]	7,0	1,8	7,6	2,4

Tabel 1

Eksempler der viser modellens afstand til de to knæpunkter samt korrektionen ved hhv. lav- og højfrekvens i en afstand af 10 km.



Figur 2
 Illustration af korrektionen ved vindhastigheden 6 m/s som funktion af afstanden til kilden.



Figur 3
 Illustration af korrektionen ved vindhastigheden 8 m/s som funktion af afstanden til kilden.

6. Overensstemmelse med metoden til bestemmelse af virkningen af multiple refleksioner i Nord2000

I oplægget til dette projekt er det af Miljøstyrelsen vurderet ønskeligt, efter at arbejdet med den simple metode er færdiggjort, at vurdere i hvilken grad erfaringerne fra udarbejdelsen stemmer overens med virkningen af multiple refleksioner beregnet med Nord2000, og hvis der er uoverensstemmelse mellem de to metoder at vurdere, hvilke muligheder der er for at bruge erfaringerne fra dette arbejde til at justere Nord2000.

Den simple metode til korrektion for multiple refleksioner viser ved lave frekvenser (under 400 Hz) god overensstemmelse med den kohærente lavfrekvensmodel i Nord2000. Den inkohærente højfrekvensmodel i Nord2000 giver derimod en betydelig lavere korrektion end den simple metode for høje frekvenser (over 800 Hz). Højfrekvensmetoderne har dog det tilfælles, at de begge giver en korrektion, som stiger 3 dB pr. afstandsfordobling i hele afstandsområdet. Det ser derfor ud til, at de to metoder kan bringes i overensstemmelse ved en simpel niveaujustering af højfrekvensmodellen i Nord2000.

Mulighederne for at bringe Nord2000 i overensstemmelse med den simple metode ser på denne baggrund lovende ud. En justering af Nord2000 kræver dog langt flere detaljerede PE-beregninger, end det har været muligt at udføre inden for dette projekt. Da Nord2000 er en generelt anvendelig lydudbredelsesmodel, vil det bl.a. være af stor vigtighed også at undersøge modellens nøjagtighed for kildehøjder i intervallet 0-10 m. Desuden bør der lægges mere arbejde i overgangen mellem lav- og højfrekvensmodellen i Nord2000, før der tages en endelig beslutning om justering af Nord2000.

7. Referencer

- [1] M. Boué: "LONG-RANGE SOUND PROPAGATION OVER THE SEA WITH APPLICATION TO WIND TURBINE NOISE", Final report for the Swedish Energy Agency project 21597-3, KTH 2007.
- [2] M. Ögren: "Multi reflected rays in a refracting atmosphere", Nord2000 progress report, SP Technical Note 1999-28, Borås 1999.
- [3] E. M. Salomons: "Downwind propagation of sound in an atmosphere with a realistic sound-speed profile: A semianalytical ray model", Journal of the Acoustical Society of America, 95 (5), 1994.
- [4] B. Plovsing: "Proposal for a Nordtest method: Nord2000 – Prediction of outdoor sound propagation", DELTA report AV 1106/07, Hørsholm 2007 (revised 2014).
- [5] Erik M. Salomons, "Improved Green's function parabolic equation method for atmospheric sound propagation", Journal of the Acoustical Society of America, 104, (100) 1998.
- [6] K. Attenborough et al., "Benchmark cases for outdoor sound propagation models," Journal of the Acoustical Society of America, 97, (173–191) 1995.