

**SINTEF IKT**

Postadresse: 7465 Trondheim  
Besøksadresse: O S Bragstads plass 2C  
7034 Trondheim  
Telefon: 73 59 30 00  
Telefaks: 73 59 10 39

Foretaksregisteret: NO 948 007 029 MVA

# SINTEF RAPPORT

TITTEL

## Utbredelse av seismisk skytestøy i havet

FORFATTER(E)

Jens M. Hovem

OPPDRAGSGIVER(E)

Oljedirektoratet (OD)

RAPPORTNR.	GRADERING	OPPDRAGSGIVERS REF.	
	Åpen	Øystein Dretvik	
GRADER. DENNE SIDE	ISBN	PROSJEKTNR.	ANTALL SIDER OG BILAG
		90E308.01	14
ELEKTRONISK ARKIVKODE		PROSJEKTLEDER (NAVN, SIGN.)	VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.)
		Jens Martin Hovem	
ARKIVKODE	DATO	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.)	
	2008-12-16	Odd Kr.Pettersen	

**SAMMENDRAG**

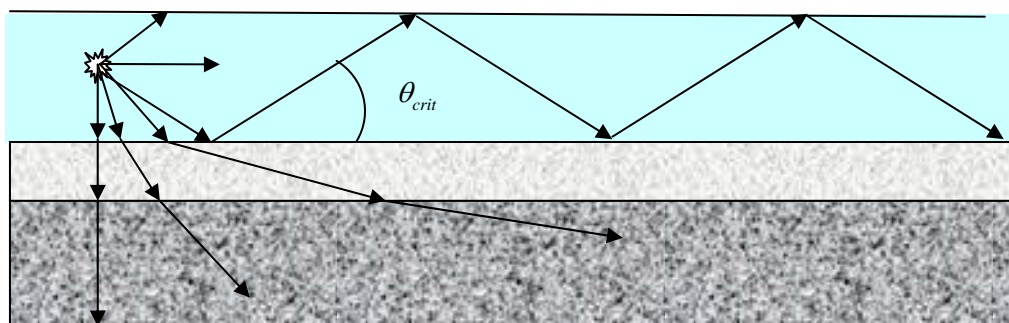
Denne rapporten omhandler de fysiske prosesser som kan ha innvirkning på utbredelse av akustisk støy fra seismiske kilder i vannlaget. Beregninger av lydutbredelse under forskjellige forhold blir presenter og diskutert, og det vises hvordan de fysiske egenskapene til vannlaget og havbunnen påvirker støyens nivå, frekvens og tidsstruktur. Resultatene er fremkommet ved bruk av en akustisk propagasjonsmodell, PlaneRay, som tar hensyn til lyd hastighetens variasjon i vannlaget, bunntopografien og havbunnens geofysiske egenskaper. Foreløpig mangler en tilstrekkelig god beskrivelse eller modell av seismiske kilder og kildegrupper med hensyn på nivå og retningsegenskaper ved høyere frekvenser. Slik informasjon kan bygges inn i modellen når den foreligger. Studien viser at støyen i vannlaget består av to hovedkomponenter: (1) Direkte lyd fra kilden og kildens speilbilde i havoverflaten, og (2) lyd som er reflektert flere ganger mellom bunn og overflate. Den første komponenten avtar i amplitude med avstanden i kvadrat ( $r^2$ ), og på lange avstander med avstanden i 4. potens ( $r^4$ ). Den andre komponenten vil, på store avstander, bli totalreflektert i bunn og overflate og lyd amplituden avtar proporsjonalt med avstanden,  $r^1$ . Resultatet er at transmisjonstapet for avstander kortere enn 2 til 3 ganger vanddybden er gitt av  $20 \log(r)$  for deretter på lengre avstander å gå over til  $10 \log(r)$ . Modellen beregner tidsforløpet av et mottatt seismisk signal i vilkårlig avstand fra kilden og det vises at et typisk signal kan ha betydelig variasjon i amplitude og at tidsvarighet eller etterklangstiden kan bli opptil 1-2 sekunder på avstander over 10-20 km. Hva denne tidsstrukturen betyr for reaksjonsmønsteret til fisk og sjøpattedyr er ikke tidligere diskutert i den relevant litterature, men bør tas i betraktning i fremtidige studier.

STIKKORD	NORSK	ENGELSK
GRUPPE 1	Seismikk	Seimics
GRUPPE 2	Luftkanon	Airgun
EGENVALGTE	Støy	Noise
	Fisk og havpattedyr	Fish and marin mammals

## **INNHOLDSFORTEGNELSE**

<b>1</b>	<b>Situasjonsbeskrivelse.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Typer av tapsmekanismer .....</b>	<b>4</b>
2.1	Lydabsorpsjon i vannet .....	4
2.2	Geometriske tap .....	4
2.3	Refleksjonstapet i havbunnen .....	5
2.4	Refleksjon fra overflaten, "Loyd mirror" effekten .....	7
2.5	Oseanografiske forhold og lyd hastighetsprofilens betydning.....	8
<b>3</b>	<b>Modellering av tids- og frekvensforløp .....</b>	<b>10</b>
3.1	Homogen bunn.....	10
3.2	Lagdelt bunn med sediment lag og elastisk undergrunn.....	12
3.2.1	Lydtbredelse under vinterforhold i Barentshavet.....	12
<b>4</b>	<b>Sammendrag og konklusjoner .....</b>	<b>14</b>

## 1 Situasjonsbeskrivelse



Figur 1. Grafisk bilde av horisontal lydutbredelse i vannlaget over en lagdelt havbunn

Figur 1 viser er enkel prinsippskisse av hvordan lyd forplanter seg i havet. En kilde (luftkanoner) sender ut lyd i alle retninger som vist med piler i figuren. Noe av lyden går mer eller mindre rett ned, men en betydelig del av lydenergien går også ut i andre retninger nærmere horisontalplanet. Lyd reflekteres i havbunnen og i de dypere lagene med amplitude gitt av refleksjonskoeffisient for grenseflaten mellom vannet og den lagdelte bunnen. For lyd som treffer bunnen med tilnærmet loddrett innfall er refleksjonskoeffisienten liten, og mye av lyden går ned i bunnen. Lyd som treffer bunnen med en vinkel som er mindre enn den kritiske vinkelen ( $\theta_{crit}$  i figuren) vil derimot totalreflekteres tilbake til vannlaget. Dette betyr at vannlaget, avgrenset av havoverflaten og bunnen, danner en bølgeleder hvor lydenergien forplanter seg med mye mindre demping enn lydfeltet fra en kilde i fritt rom. Denne rapporten er i hovedsak rettet mot å beskrive vannlaget som bølgeleder med transmisjonsegenskaper gitt av havbunnens geologi og hvordan lyd hastigheten variere med dybde og posisjon.

Lydkilde som brukes i seismikk består gjerne flere luftkanoner satt sammen i rekker og linjer med mellomrom størrelsesorden fra 2 til 10 meter. Hensikten med denne konstruksjonen er å fokusere lydenergien ned i bunnen, og å redusere de såkalte boblepulsene slik at den seismiske pulsen blir veldefinert og skarp. For de lave seismiske frekvenser brukt i seismiske undersøkelser virker dette bra, men for høyere frekvenser kan energien bli rettet mot andre retninger og til vannlaget. Seismikk industrien har arbeidet mye med konstruksjon og modellering og målinger på luftkanoner og kilderekker. Det meste av dette arbeidet gjelder for lave seismiske frekvenser, 150 Hz, og det kan stilles spørsmål om slike målinger er gyldige ved høyere frekvenser

## 2 Typer av tapsmekanismer

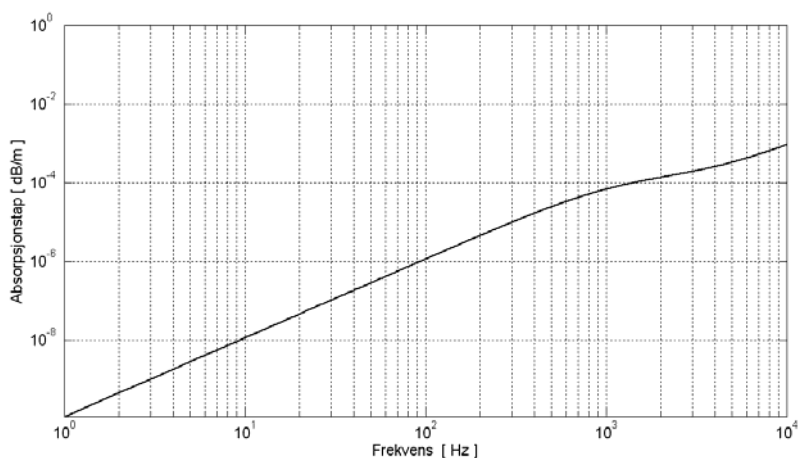
Transmisjons for lyden som forplantes i vannlaget kan deles opp i tre deler,

- (1) Absorpsjonstap
- (2) Geometrisk tap som er avhengig av vanddybde bunntopografi og lyd hastigheten som funksjon av avstand og dybde.
- (3) Refleksjonstap ved havoverflate og bunn.

I det følgende diskuteres de ulike faktorene hver for seg.

### 2.1 Lydabsorpsjon i vannet

Lydabsorpsjon i havet skyldes viskositet og relaksasjons fenomener som gjør at noe av lydenergien konverteres til varme og som fører til at lyden svekkes. Absorpsjonen er avhengig av vannets temperatur, saltholdighet og lydsignalets frekvens. Figur 2 viser absorpsjonen, i dB per meter, beregnet etter en standard formel, for 3,5 % saltholdighet og 10° vanntemperatur. Figuren viser at for seismiske frekvenser under 1000 Hz, spiller absorpsjonen i vannet svært liten rolle, men for høyere frekvenser og for lydutbredelse på lange avstander bør absorpsjonstapet tas med i beregningene.



Figur 2. Absorpsjonstap i sjøvann som funksjon av frekvens beregnet for 3,5 % saltholdighet og 10° vanntemperatur.

### 2.2 Geometriske tap

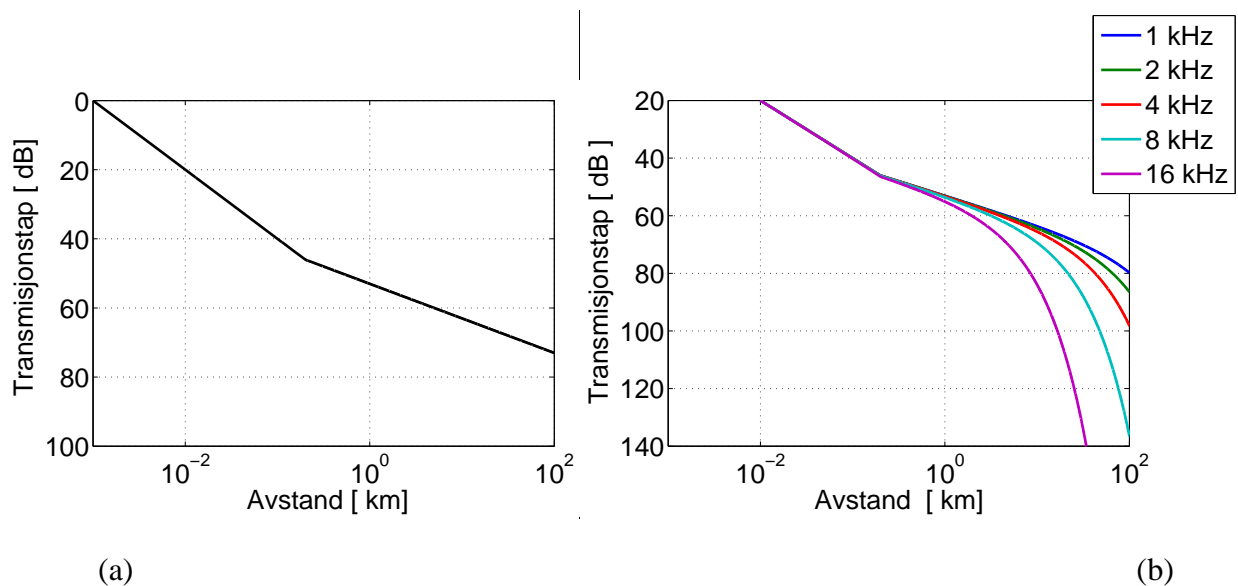
Som antydnet i Figur 1 vil en del av lydenergien treffer bunnen med en vinkel mindre (nærmere horisontalplanet) enn den kritiske vinkelen. For slike vinkler er det totalrefleksjon, slik at lyden reflekteres tilbake til vannet og ikke trenger inn i bunnen.

For lydutbredelse i vannlaget og transmisjonstapet betyr dette at nærmest kilden er det sfærisk lydutbredelse hvor lydtrykket avtar med kvadratet av avstanden fra kilden. På lengre avstander, det vil si avstander med lydbaner som treffer bunnen med vinkel mindre enn kritisk vinkel, er det sylindrisk spredning hvor lydtrykket avtar lineært med avstanden fra kilden.

En enkel modell for transmisjons tapet er derfor satt sammen av et sfærisk spredningstap på  $20\log(r)$  nærmest lydkilden, og et sylindrisk spredningstap på  $10\log(r)$  for lengre avstander. Dette kan uttrykkes ved likingen

$$\begin{aligned} TL &= 20\log(r), & r \leq r_0, \\ TL &= 10\log(r/r_0) + 20\log(r_0), & r \geq r_0 \end{aligned} \quad (1)$$

Horisontalavstanden fra kilde til mottaker er  $r$ , og  $r_0$  er avstanden til overgangsområdet mellom sfærisk og sylindrisk lydutbredelse. En rimelig verdi for  $r_0$  er 3-4 ganger vannedybden. Figur 3(a) viser transmisjonstapet beregnet etter Liking 1 for vannedybden 200 meter og  $r_0$  lik vannedybden. Figur 3(b) viser transmisjonstapet for noen valgte frekvenser og som funksjon av avstanden mellom sender og mottaker når en har tatt med både absorpsjonstapet [Figur 2], og det geometriske tapet [likning 1].



Figur 3. Transmisjons tap som funksjon av avstanden  
 (a) Beregnet etter Liking 1 og med  $r_0=200$ m.  
 (b) Med geometriske tap [Likning 1 og Figur 3] og absorpsjonstapet [Figur 2].

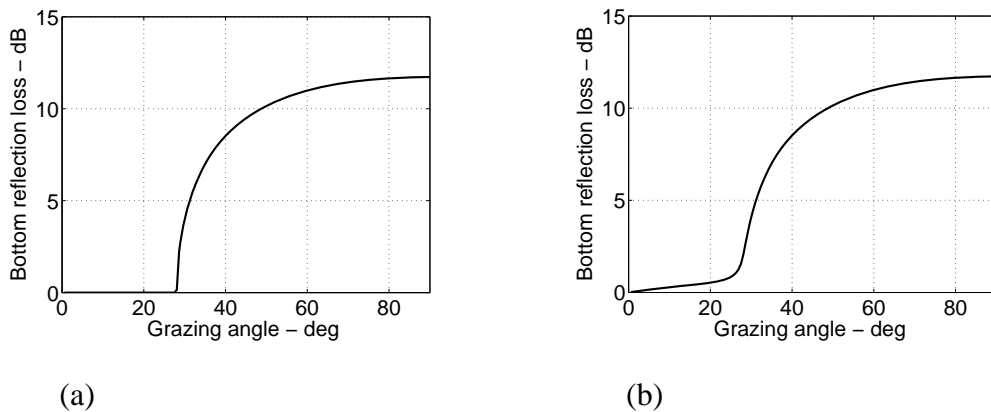
### 2.3 Refleksjonstapet i havbunnen

Refleksjonskoeffisienten i havbunnen med de underliggende lag har meget stor betydning for lydutbredelsen i vannlaget. Vi tar et eksempel hvor havbunnen er homogen med lydshastighet  $c_1 = 1700$  m/s og tetthet  $\rho_1 = 1500$  kg/m<sup>3</sup>. Disse verdiene kan være typiske for en sandbunn eller bunn med relative løse sedimenter. De tilsvarende parametrene for vannet er  $c_0 = 1500$  m/s og  $\rho_0 = 1000$  kg/m<sup>3</sup>. Den kritiske vinkelen  $\theta_{crit}$  er gitt ved

$$\theta_{crit} = \cos^{-1}\left(\frac{c_0}{c_1}\right). \quad (2)$$

Med de valgte verdiene gir dette en kritisk vinkel på ca 28°.

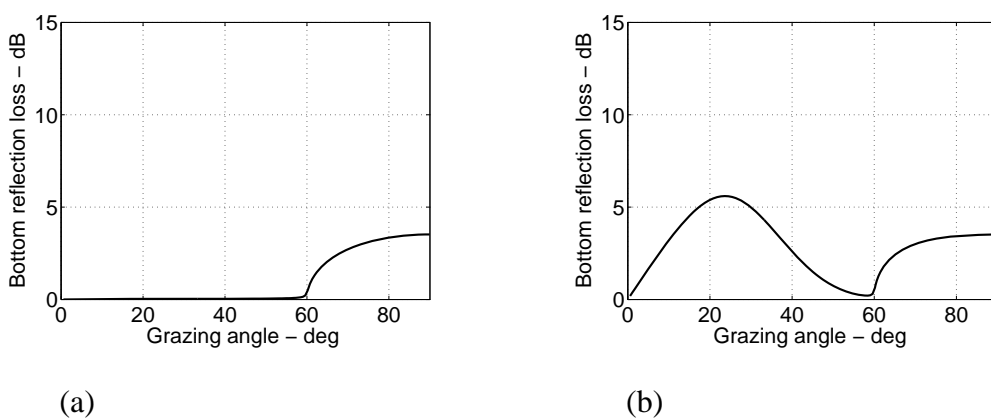
Figur 4 viser refleksjonstapet i dB som funksjon av streifvinkelen. I figuren til venstre er bunnmaterialet uten absorpsjonstap, til høyre vises refleksjonstapet når bunnen har et absorpsjonstap tilsvarende 0,5 dB per bølgelengde. I det tapsfrie tilfellet, Figur 4a, er refleksjonstapet lik null for alle vinkler under den kritiske vinkelen på 28°. Absorpsjonen i bunnen gir et bidrag til refleksjonstapet, også for vinkler under den kritiske vinkelen. Dette bidraget er relativt lite, men kan ha stor betydning fordi antall refleksjoner er stort ut til lange avstander.



Figur 4. Refleksjonstap (dB) i havbunnen som funksjon av vinkelen med horisontalplanet til den innfallede lydbølgen. Beregnet uten absorpsjonstap i bunnen (a) og med absorpsjonstap på 0,5 dB/bølgelengde (b).

For harde bunntyper med konsoliderte bergarter, såkalte elastiske materialer, vil lydkilden også generere skjærbølger i bunnen slik at en del lydenergien konverteres til skjærbølgeenergi. Denne konverteringen kan medføre betydelig øking av refleksjonstapet med tilsvarende svekkelse av lydnivået i vannlaget.

Figur 5 (a) viser et eksempel hvor havbunnen er homogen med lyd hastigheten  $c_1 = 3000$  m/s og tettheten  $\rho_1 = 2500$  kg/m<sup>3</sup>. Dette gir en kritisk vinkel på 60°, og for mindre vinkler enn denne er refleksjonstapet ganske lite. Figur 5 (b) viser refleksjonstapet når skjærbølge hastigheten i bunnen  $c_s = 750$  m/s, de øvrige parametrene er de samme. Dette resultatet viser at konvertering av lydenergi i vannet til skjærbølgeenergi i havbunnen resulterer i betydelig refleksjonstap også for små vinkler.



Figur 5. Refleksjonstap (dB) for en hard havbunn som funksjon av vinkelen med horisontalplanet til den innfallede lydbølgen. Beregnet uten skjærbølge konvertering i bunnen (a) og med skjærbølgekonvertering (b).

Når bunnen er homogen, det vil si ikke lagdelt, er refleksjonstapet uavhengig av frekvensen, men med lagdeling i undergrunnen er refleksjonstapet frekvensavhengig. Det neste eksemplet tar for seg en lagdelt havbunn med et 10 m tykt sedimentlag over en hard bergart med uendelig utstrekning i dybde. Sedimentlaget har en lydshastighet på 1700 m/s og tetthet på 1500 kg/m<sup>3</sup>. Berget har lydshastighet 3000 m/s, skjærbølgehastigheten er 750 m/s og tettheten er 2500 kg/m<sup>3</sup>. Beregningene er gjort både med og uten konvertering til skjærbølger, og Figur 6 viser resultatene. I dette tilfellet er det to kritiske vinkler gitt ved

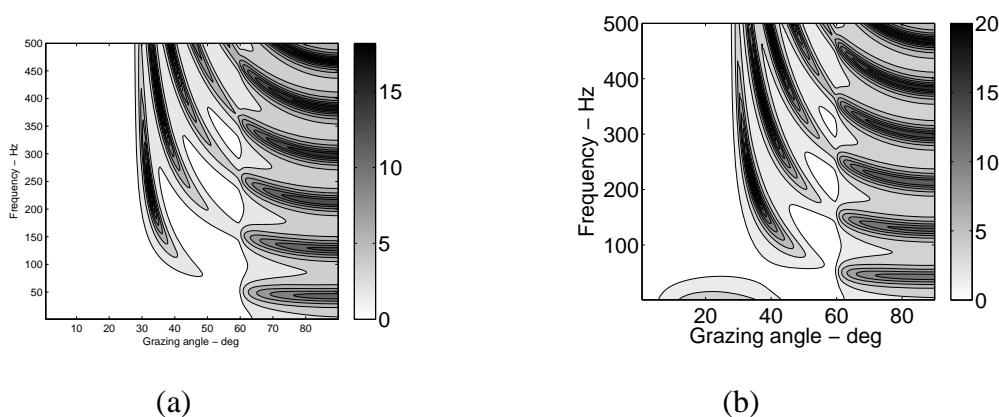
$$\theta_{crit\_1} = \cos^{-1} \left( \frac{c_0}{c_1} \right) , \quad (3)$$

$$\theta_{crit\_2} = \cos^{-1} \left( \frac{c_0}{c_2} \right) .$$

Med de valgte verdiene gir dette 28° og 60°. Med en skjærbølgehastighet i bunnen høyere enn lydshastigheten i vannet ville det vært en tredje kritiske vinkel gitt av skjærhastigheten  $c_s$  og vannhastigheten  $c_0$ .

Figur 6 viser at lagdelingen i bunnen gjør at refleksjonstapet blir avhengig av frekvensen. Ved høye frekvenser er tapet gitt av egenskapene til det øvre sedimentlaget, og er svært lavt for vinkler under den første kritiske vinkelen på 28°.

For lave frekvenser, når sedimentlagets tykkelse er mye mindre enn den akustiske bølgelengden, har sedimentlaget ingen eller liten betydning og refleksjons tapet er lite for frekvenser under den andre kritiske vinkelen på 60°. Refleksjonstapet ved frekvenser under 50 Hz i Figur 6b skyldes skjærbølgekonvertering.

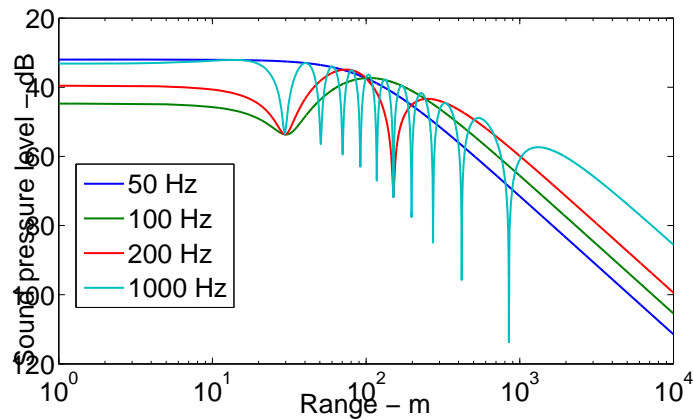


Figur 6. Refleksjonstap (dB) for en hard havbunn som funksjon av vinkelen med horisontalplanet til den innfallede lydbølgen. Beregnet uten skjærbølgekonvertering i bunnen (a) og med skjærbølgekonvertering (b).

## 2.4 Refleksjon fra overflaten, ”Loyd mirror” effekten

Seismiske luftkanoner blir gjerne avfyrt nær havoverflaten slik at det reflekterte signalet ankommer like etter det direkte signalet fra kilden. Refleksjonskoeffisienten i havoverflaten er nær  $-1$  slik at det reflekterte signalet har motsatt polaritet i forhold til det direkte signalet. Det direkte signalet og det reflekterte signalet danner derfor til sammen en akustisk dipol. (Et eksempel på dette er vist i Figur 11.

Figur 7 viser transmisjonstapet for en kilde 8 m under overflaten. Bidragene fra de to pulsene vil for noen avstander adderes konstruktivt og for andre avstander negativt. Transmisjons tapet vil derfor variere med avstanden og frekvensen som Figur 7 viser. For svært lange avstander interferer det direkte og det reflekterte signalet fra overflaten destruktivt og fører til at transmisjonstapet øker med med avstanden etter  $40\log(r)$ , det vil si dobbelt så hurtig som for sfærisk spredning. I akustisk litteratur kalles dette for "Loyd mirror" effekten.



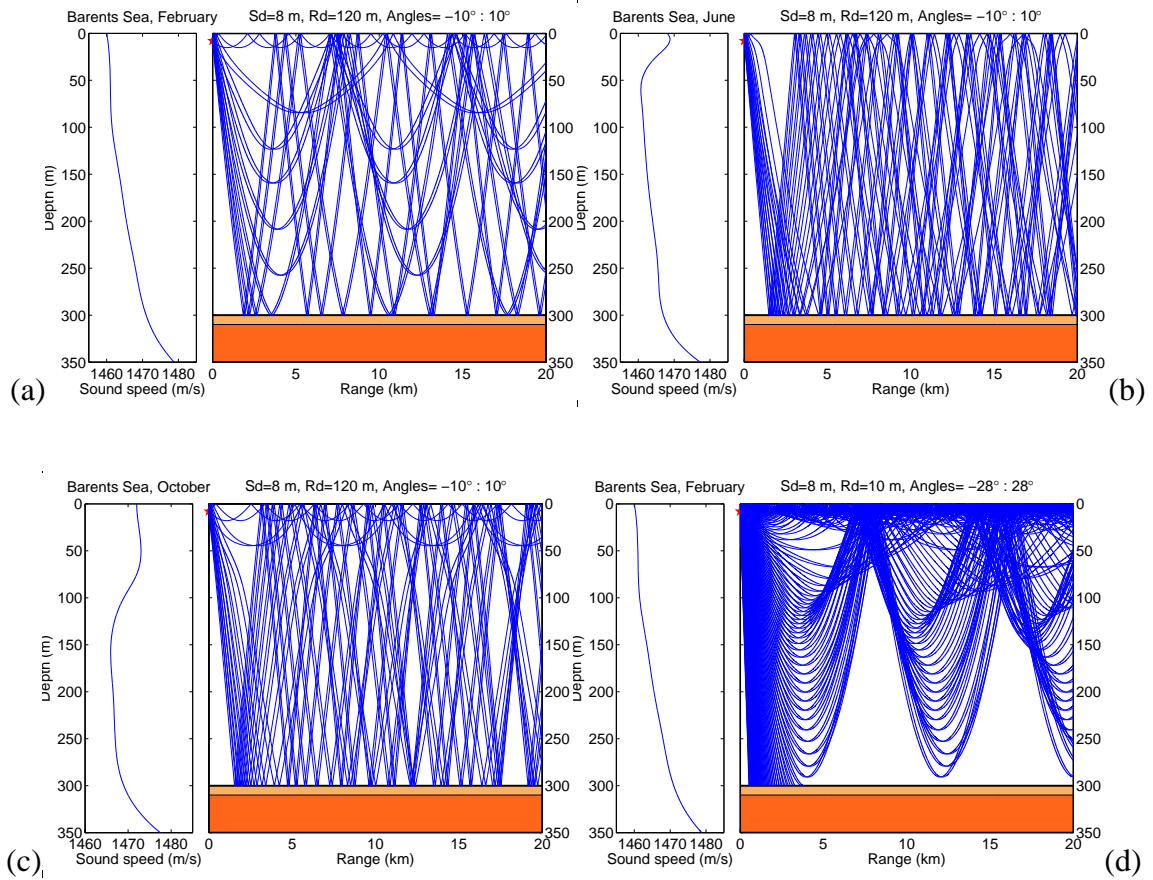
Figur 7. Refleksjonstap som følge av speilende refleksjon i havoverflaten, "Loyd mirror" effekten.

## 2.5 Oseanografiske forhold og lyd hastighetsprofilens betydning

Lyd hastigheten i sjøvann avhenger av vannets temperatur, saltholdighet og det omgivende trykket og dermed gitt av dybden. Temperaturen og saltholdigheten varierer med de oseanografiske forhold og lyd hastigheten vil kunne variere betydelig over tid. For et gitt geografisk område er det likevel mulig å trekke ut typiske tilfeller for de forskjellige årstidene. Figur 8 viser eksempler på lyd baner beregnet med lyd hastighetsprofiler målt i Barentshavet i månedene februar, juni og oktober. Disse profilene er typiske for havområdene fra Norskehavet og nordover for henholdsvis vinter, sommer og høst.

Figur 8 a, b og c viser lyd baner fra en kilde i dybde 8 m, og med utgangsvinkler fra  $-10^\circ$  til  $+10^\circ$ . Profilen for februar måned er en typisk vinterprofil og har økende lyd hastighet over fra overflate til bunn. Dette gir markant lyd kanaleffekt i nær havoverflaten og i denne kanalen er det svært gode transmisjonsforhold. En mer detaljert lyd baneberegning er vist i Figur 8d.



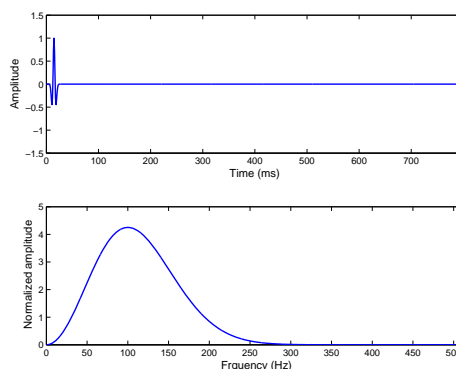


Figur 8. Lydbaner for forskjellige sesonger i Barentshavet beregnet for utgangsvinkler fra  $-10^\circ$  til  $10^\circ$  og kildedyp på 8 m.

### 3 Modellering av tids- og frekvensforløp

De foregående avsnitt har presentert de ulike faktorene som påvirker transmisjonsforholdene hver for seg. Dette avsnittet viser eksempler på akustisk modelleringer hvor alle de nevnte faktorene er tatt med. Modelleringene er gjort med programpakken PlaneRay og viser noen av de muligheter som moderne akustisk modeller har for å prediktere utbredelse av akustiske signaler i sjøen.

De følgende eksempler presenterer både transmisjonstap som funksjon av avstand og frekvens og tidsresponsen mottatt på forskjellige avstander fra kilden. Ved beregning av tidsresponsene har en antatt en omidireksjonal kilde med dyp 8 m som sender ut en kort ”Ricker” puls på 100 Hz. Figur 9 viser tidsforløp og frekvensspekteret til kildepulsen brukt i simuleringene



Figur 9. ”Ricker” puls, tidsforløp og frekvensspektrum

#### 3.1 Homogen bunn

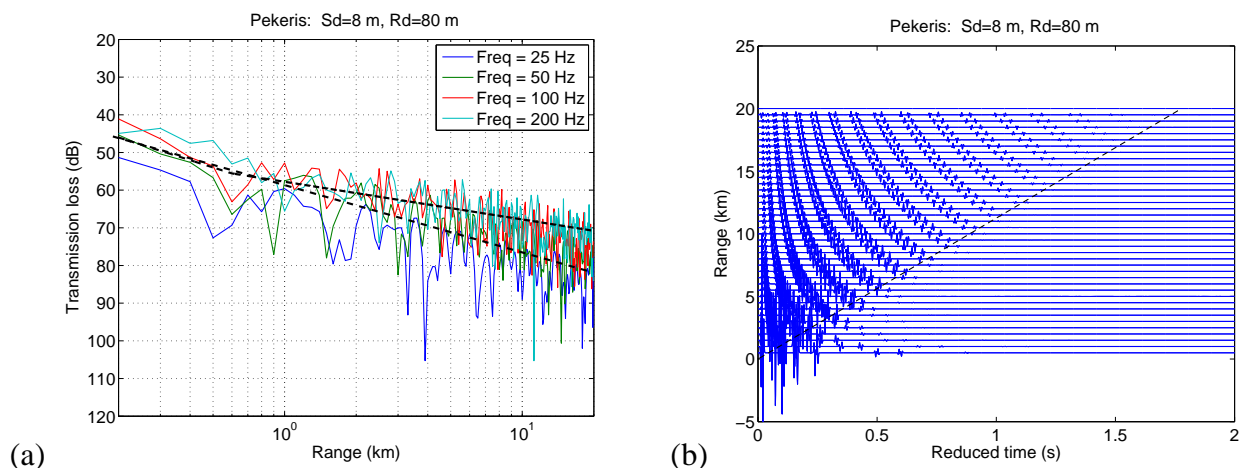
I de første eksemplene er vanndybden konstant lik 300 m og bunnen er homogen (ikke lagdelt). Lydhastigheten i bunnen er 1700 m/s, tettheten  $1500 \text{ kg/m}^3$  og absorpsjonen 0,5 dB per meter. Den kritiske vinkelen er  $28^\circ$  og refleksjonstapet er vist i Figur 5.

Figur 10a viser transmisjonstapet mellom kilden og en mottaker med dybde 80 m som funksjon av avstanden for noen utvalgte frekvenser. De to sorte og stiplede linjene viser sfærisk transmisjonstap og transmisjonstapet beregnet med Likning (1). For de høyere frekvensene passer transmisjonstapet godt med Likning (1), men for lave frekvenser, for eksempel 25 Hz, er transmisjonstapet mye høyere på grunn av Loyd mirror effekten.

Figur 10b viser lydsignalene mottatt på en dybde av 80 meter og i avstander opptil 20 km. Signalene er plottet som funksjon av redusert tid, det betyr at tiden fram til den første direkte ankomsten trukket fra. Dette er eksempel på flervegs transmisjon, det vil si at lyd mottas via mange forskjellige baner mellom kilde og mottaker. Figuren viser at antallet av bunn/overflate reflekterte signaler øker med avstanden. Den stiplede linjen viser likningen for den kritiske vinkelen. Alle kombinasjoner av tid og avstand over denne linjen svarer til lydbaner som treffer bunnen med vinkler under enn den kritiske vinkelen og som derfor totalreflekteres. Punkter under den stiplede linjen har vinkler over den kritiske vinkelen og vil derfor reduseres kraftig ved hver bunnrefleksjon. Alle transmisjonsbaner med bunnvinkel mindre enn den kritiske vinkelen totalreflekteres og gir et lydfelt som avtar proporsjonelt med avstanden. Den direkte lyden fra kilde faller med avstanden i kvadrat. Dette betyr at på lange avstander vil lyden som utbres via refleksjoner i bunn- og overflate dominere over den direkte lyden fra kilden. Vi ser også at et mottatt signal ikke bare består av en enkelt puls, men av et helt pulstog. Varigheten av pulstog kalles etterklangstiden er gitt av den kritiske vinkelen ved

$$T_{etterklang} = \frac{r}{c_0} \left( \frac{1}{\cos \theta_{krit}} - 1 \right) \quad (4)$$

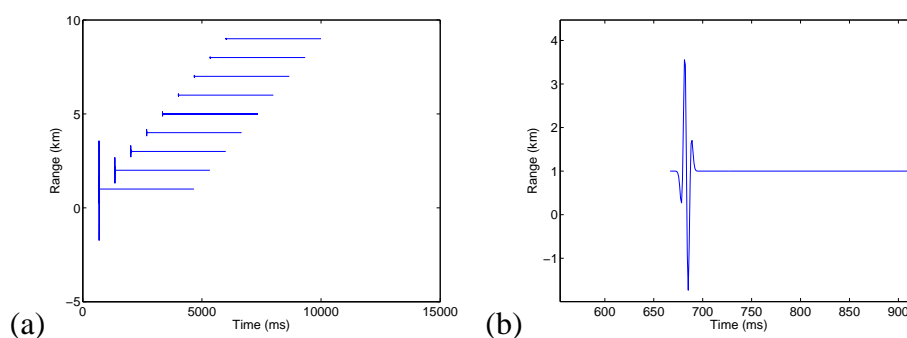
Den kritiske vinklene er gitt ved likning (2), avstanden er  $r$  og  $c_0$  er den nominelle eller gjennomsnittelig lydshastigheten i vannet. For eksempel gir likning(4) at på 3000 m avstand og en med en kritisk vinkel på  $28^\circ$  så er etterklangstiden 265 ms, på 20 km er den 1.7 sekunder.



Figur 10. Lydutbredelse fra en kilde på 8 m dyp over en homogen sedimentær havbunn.

(a) Transmisjonstap (dB) som funksjon av avstanden beregnet for frekvensen 25, 50 100 og 200 Hz. Stiplet linje viser transmisjonstapet gitt ved likning (1) med  $r_0=600$  m (øverst) og for sfærisk spredning  $[20 \log(r)]$   
 (b) Mottatte signaler som funksjon av redusert tid for avstander inntil 20 km. Stiplet linje viser begrensningen i lengde gitt av den kritiske vinkelen.

Figur 11 viser detaljer fra Figur 10 hvor vi bare har tatt med de to første ankomstene, den direkte ankomst og den første via overflaten.



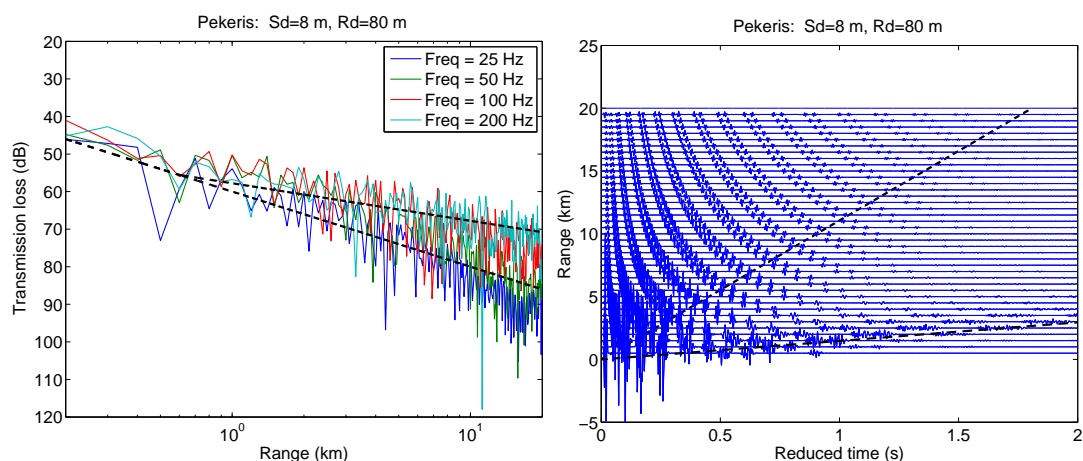
Figur 11. (a) Direkte signal og signal reflektert i overflaten som funksjon av reell tid og avstand. (b) Forstørret versjon av signalet mottatt på 1 km.

Figur 11a viser at begge reduseres i amplitude proporsjonalt med kvadratet av avstanden, det vil si med  $40 \log(r)$ . Figur 11b viser en forstørret versjon av signalet på 1 km. Det direkte og det reflekterte signalet, med motsatt polaritet, kombinerer til en bipolar puls. Begge observasjonene er i overensstemmelse med det som er som kjent i seismikken.

### 3.2 Lagdelt bunn med sediment lag og elastisk undergrunn

Dette avsnittet presenterer resultater for en lagdelt havbunn med et 10 m tykt sedimentlag over en homogen bergart. Parametrene for sedimentlaget er  $c_{p1}=1700$  m/s,  $\rho_1=1500$  kg/m<sup>3</sup> og undergrunnen har  $c_{p2}=3000$  m/s,  $c_{s2}=750$  m/s og  $\rho_2=2500$  kg/m<sup>3</sup>. Absorpsjonen for skjærbølgen er satt til 0.25dB per meter, de to trykkbølgene har 0,5 dB per bølgelengde. Disse verdiene gir det samme refleksjonstapet som er vist i Figur 6. De to kritiske vinklene er gitt ved Likning (3) og har verdiene 28° og 60°.

Figur 12a viser resultatene med et transmisjonstap som tilnærmet er gitt av Likning (1) og hvor tidsresponsene i Figur 12b viser betydningen av de to kritiske vinklene. Etterklangstiden er ca 1 sekund ved 10 km avstand.



(a)

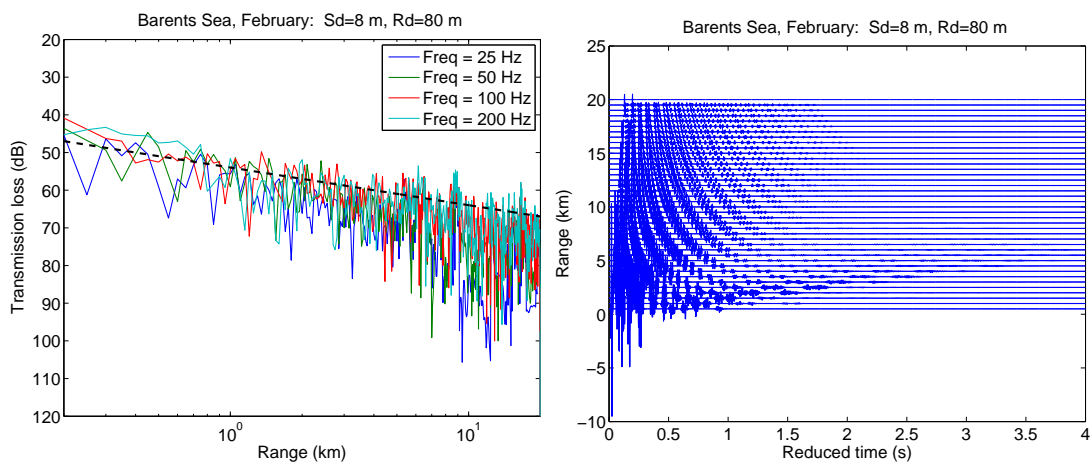
(b)

Figur 12. Lydtubredelse fra en kilde på 8 m dyp over en lagdelt havbunn med et 10 m tykt sedimentlag i over en konsolidert berg art.

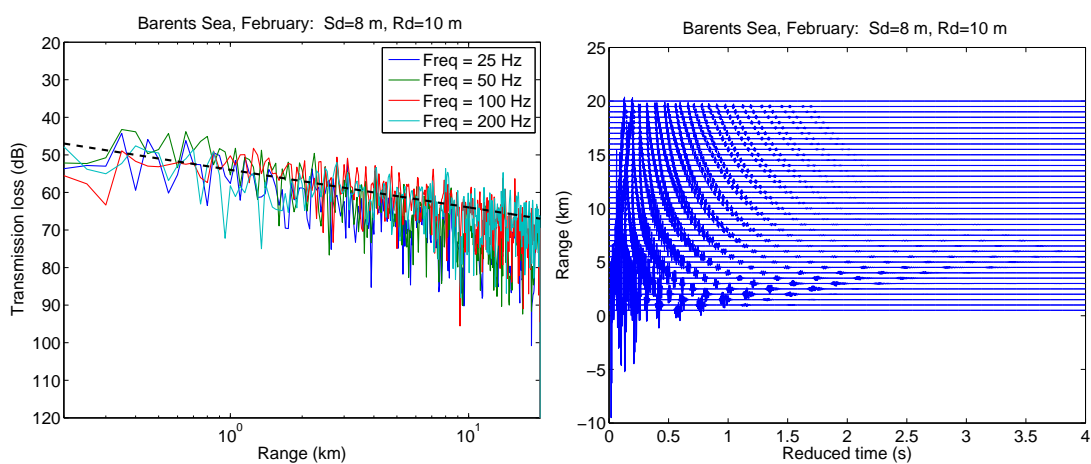
- (a) Transmisjonstap (dB) som funksjon av avstanden beregnet for frekvensen 25, 50 100 og 200 Hz. Stiplet linje viser transmisjonstapet gitt ved likning (1) med  $r_0=600$  m (øverst) og for sfærisk spredning  $[20 \log(r)]$   
 (b) Mottatte signaler som funksjon av redusert tid for avstander inntil 20 km. Stiplet linjer viser begrensningene i lengde gitt av de kritiske vinklene.

### 3.3 Lydtubredelse under vinterforhold i Barentshavet

I dette eksemplet benyttes lydhastighetsprofilen fra februar måned i Barentshavet og den samme lagdelte havbunnen som benyttet for bergning av Figur 12. Kildedypet er 8 meter og lydfeltet beregnes for en mottaker på 80 meter (Figur 13) og på 10 m (Figur 14). Forskjellen mellom disse resultatene er ganske små og heller ikke særlig forskjellig fra resultatene i Figur 12 som har samme bunn, men med konstant lydhastighet.



Figur 13. Transmisjonstap og tidsresponser for Barentshavet i februar måned.  
Kildedyp 8 m, mottakerdyp 80 m.



Figur 14. Transmisjonstap og tidsresponser for Barentshavet i februar måned.  
Kildedyp 8 m, mottakerdyp 80 m.

## 4 Sammendrag og konklusjoner

Denne rapporten har demonstrert at det er mulig å modellere lydfeltet fra en luftkanon ut til en vilkårlig posisjon i dybde og avstand i vannlaget. Modellen som er brukt, PlaneRay, tar hensyn til lyd hastighetens variasjon i vannlaget, bunntopografien og havbunnens geofysiske egenskaper. En del aktuelle eksempler viser i prinsippet hvordan de fysiske egenskapene til vannlaget og havbunnen påvirker støyens nivå, frekvens og tidsstruktur. Foreløpig mangler en tilstrekkelig god beskrivelse eller modell av seismiske kilder og kildegrupper med hensyn på nivå og direktivitet ved høyere frekvenser. Slik informasjon kan bygges inn i modellen når den foreligger.

Studien viser at støyen i vannlaget består av to hovedkomponenter: (1) Direkte lyd fra kilden og kildens speilbilde i havoverflaten, og (2) lyd som er reflektert flere ganger mellom bunn og overflate. Den første komponenten avtar i amplitude med avstanden i kvadrat ( $r^2$ ), og på lange avstander med avstanden i 4. potens ( $r^4$ ). Den andre komponenten vil, på store avstander, bli totalreflektert i bunn og overflate og lyd amplituden avtar proporsjonalt med avstanden,  $r^1$ . Resultatet er at transmisjonstapet for avstander kortere enn 2 til 3 ganger vanddybden er gitt av  $20 \log(r)$  for deretter på lengre avstander å gå over til  $10 \log(r)$ . I tillegg kommer absorpsjonstapet som har betydning for lydnivået ved lange avstander og for de høyere frekvenskomponentene.

Modellen beregner tidsforløpet av et mottatt seismisk signal i vilkårlig avstand fra kilden og det vises at et typisk signal kan ha betydelig variasjon i amplitude og at tidsvarighet eller etterklangstiden kan bli opptil 1-2 sekunder på avstander over 10-20 km. Hva denne tidsstrukturen betyr for reaksjonsmønsteret til fisk og sjøpattedyr er ikke tidligere diskutert i den relevant litterature, men bør tas i betraktning i fremtidige studier.

Innen for tidsrammen for dette prosjektet har det ikke vært anledning til å sammenlikne de stimulerte og modellerte resultatene med virkelige signaler mottatt i sjøen. Ved en mulig fortsettelse prosjektet bør dette gjøres, enten ved bruk av publiserte resultater hvis de finnes eller ved å gjennomføre nye feltmålinger. Dette kan for eksempel gjøres ved å utstyre et assisterende skip med hydrofoner og opptaksutstyr for registrering av seismiske støypulser i vannlaget på forskjellige avstander fra luftkanoner og kanongrupper i forbindelse med en vanlig marin seismisk undersøkelse.

### Referanser

Hovem, Jens M. "PlaneRay: An acoustic underwater propagation model based on ray tracing and plane wave reflection coefficients" Invited paper at the 8th International Conference on Theoretical and Computational Acoustics ICTCA 2007, Heraklion, Crete, GREECE, 2-5 July 2007

Hovem, J. M., PlaneRay: An acoustic underwater propagation model based on ray tracing and plane-wave reflection coefficients. Forsvarets forskningsinstitutt/ Norwegian Defence Research Establishment FFI- rapport 08/00610, March 2008.

Hovem, Jens M. *Marine Acoustics. The Physics of Sound in Underwater Environments*. Text book to be published with Applied Research Laboratories, the University of Texas at Austin and Peninsula Publishing Los Altos, Ca, USA (2009)

Smedsrud, M., and Tollefsen, D., "Test of PlaneRay propagation model for selected low-frequency scenarios" Forsvarets forskningsinstitutt/ Norwegian Defence Research Establishment FFI notat 2007/00921, March 2007.