

SIKUKI

## UNDERVANDSSTØJ FRA SPRÆNGNING

ADRESSE COWI A/S  
Vestre Stationsvej 7  
5000 Odense C

TLF +45 56 40 00 00

FAX +45 56 40 99 99

WWW cowi.dk

FAGNOTAT – UNDERVANDSAKUSTIK VED SPRÆNGNINGSPROGRAM TIL  
KONSTRUKTION AF PLANLAGT TRAWLERTERMINAL I NUUK HAVN.

### INDHOLD

1	Resume	2
2	Konklusion – høregrupper og påvirkningsområder	3
3	Indledning	6
4	Høregrupper og støjkræterier	6
5	Metodebeskrivelse	8
5.1	Sonar-ligningen	8
5.2	Støjkilden fra sprængning	9
5.3	Oceanografi og havbund	13
5.4	Modellering af lydudbredelsen	19
5.5	Støjdæmpning	22
6	Resultater	22
7	Afsluttende kommentarer	22
8	Litteratur	23

PROJEKTNR.

A246375

DOKUMENTNR.

A246375-VVM-03

VERSION

2.0

UDGIVELSESDATO

2024-04-05

BESKRIVELSE

Notat

UDARBEJDET

RSLN/FMSZ

KONTROLLERET

MNLR

GODKENDT

BOLN

## 1 Resumé

Dette arbejdsnotat beskriver og vurderer udbredelsen af støj fra undervands-sprængninger i Nuuk Havn til de omkringliggende havområder.

Arbejdsnotatet indgår i grundlaget for vurdering af støjpåvirkningen for forskellige grupper af havpattedyr, som foretages i VVM-vurderingen for en planlagt udvidelse af Nuuk havn. *HAVNEUDVIDELSE NUUK TRAWLERTERMINAL. Vurdering af virkninger på miljøet (VVM) (COWI, 2024).*

Der planlægges nyanlæg af en trawlerterminal i Nuuk Havn, ved Fyrø, syd for den eksisterende Containerterminal. Trawlerterminalen planlægges placeret umiddelbart syd for Containerterminalen, sådan at kajen videreføres 300 m mod syd.

Anlægget kræver undervandssprængninger til udformning af en revne i havbunden, hvori der opstilles en kajkant af spuns.

Sprængninger under vand medfører en støjpåvirkning af omgivelserne, der kan påvirke dyrelivet, særligt havpattedyr og fisk. Dyrs hørelse er generelt frekvensafhængig. Man inddeler havpattedyr i såkaldte "høregrupper" ud fra deres høreegenskaber. Hver høregruppe har sin egen frekvensvægtnings-kurve samt grænseværdier for henholdsvis permanent (PTS) og midlertidig høreskade (TTS). De relevante høregrupper i dette studie er:

- > Low Frequency cetaceans (LF), eksempelvis pukkelhvaler
- > High Frequency cetaceans (HF), eksempelvis kaskelotter
- > Very High Frequency cetaceans (VHF), eksempelvis marsvin
- > Phocid Carnivore in Water (PCW), eksempelvis ringsæler

Udbredelsen af undervandsstøj sker både gennem vandet og havbunden, og afhænger af både vanddybde (batymetri), havbundens materialeegenskaber og oceanografiske forhold. Flere af disse egenskaber er stærkt frekvensafhængige. Derfor er der modelleret støjudbredelse for et frekvensområde, der svarer til de høregrupper, der er relevante for området.

Resultatet ses i Tabel 2-1 og på Figur 2-1 til Figur 2-4, der viser påvirkningsområde for de forskellige høregrupper af havpattedyr og fisk. Figurerne viser de områder indenfor hvilke grænseværdierne for den pågældende høregruppe er overskredet, dvs. påvirkningsområdet for arter af høregruppen. Tabellen angiver talværdier for den største radius af påvirkningsområdet, regnet som afstanden mellem sprængningen og grænsen for påvirkningsområdet.

Det er disse påvirkningsområder, der herefter indgår i VVM'ens vurdering af mulige påvirkninger af bestande af dyr fra de forskellige høregrupper. I denne vurdering indgår forekomsten af de forskellige arter i området. Desuden indgår der en række procedurer i forbindelse med udførelsen af sprængningerne, der samlet skal nedbringe påvirkningen af disse dyrearter.

Den anvendte metode er følgende:

Selve sprængningsprogrammet er beskrevet i arbejdsnotatet *Nuuk Havneudvidelse. Trawlerterminal. Program for undervandsprængninger* (COWI, 2024a): Der skal sprænges en 300 meter lang og 4-5,5 meter dyb (under havbundens niveau) revne i havbunden. Det vil kræve op til 70 undervands-sprængninger af sprængfelter med op til 28 sprænghuller. Der antages maksimalt én sprængning i døgnet. Programmet beskriver anvendt sprængstof, mængder og andre tekniske oplysninger, herunder anvendelse af en række afværgeforanstaltninger, bl.a. etablering af dobbelt boblegardin omkring sprængfeltet, når sprængningen udføres.

Den undervandsakustiske kildestyrke beregnes på baggrund af de tekniske data fra sprængningsprogrammet, sammenholdt med tidligere tilsvarende sprængning i samme område og samme materiale, samt litteratur og databaser.

Udbredelsen af undervandsstøjen er dernæst modelleret med softwaren dBSea. I modellen indgår, foruden kildestyrken, det omkringliggende havområdes dybdeforhold, havbundens opbygning og dens akustiske egenskaber, samt havvandets akustiske egenskaber. Den beregnede støjdbredelse sammenholdes med frekvensvægtning og akustiske kriterier for de relevante havpattedyrs høregrupper samt fisk. I modellerings-tilgangen er generelt anvendt en konservativ tilgang.

Derved beregnes afstande og retninger for de forskellige støjniveauer, og der kan på søkortet indtegnes grænselinjer for de forskellige påvirkningsområder svarende til hver høregruppe.

## 2 Konklusion – høregrupper og påvirkningsområder

I dette afsnit er beregningsresultaterne præsenteret baseret på undervandsstøjen fra sprængning af et sprængningsfelt med 28 borehuller á 20 kg Eurodyn 3000. Der er antaget et velfungerende dobbelt boblegardin som støjdemping. Resultaterne er baseret på de akustiske parametre SEL og Peak lydtrykniveau, og er evalueret ud fra høreskadekriterier for havpattedyr samt skadeskriterier for fisk (se afsnit 4).

I det følgende angiver PTS (Permanent Threshold Shift) permanent høreskade, mens TTS (Temporary Threshold Shift) angiver midlertidig høreskade.

Det ses af tabellen og figurene i dette afsnit at de største påvirkningsområder forekommer for høreskade for LF-høregruppen, med en radius på op til 1400 m for midlertidig høreskade (TTS). Dette skyldes, at lydenergien i det modellerede scenarie med sprænghuller og boblegardiner er kraftigst i den lavfrekvente del af spektret. Det er derfor LF-høregruppen ("Low Frequency cetaceans"), hvis hørelse er mest udsat for denne støjkilde.

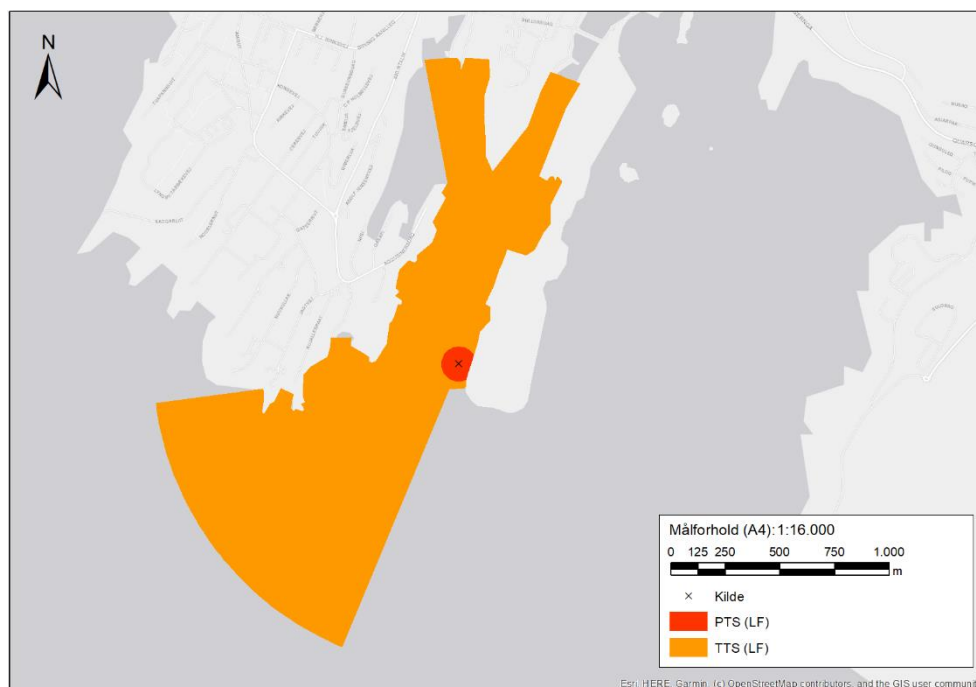
De øvrige havpattedyrs-høregrupper (HF, VHF og PCW) har derimod væsentligt mindre følsom hørelse i det lavfrekvente område. Disse høregrupper har derfor relativt små påvirkningsområder, med radius på 1-80 m jfr. Tabel 2-1. Det vurderes at beregningsmodellen kun i et vist omfang medtager akustiske

nærfeltsfænomener tæt på støjkilden. Derfor bør alle påvirkningsafstande kortere end ca. 50 m ud fra en konservativ tilgang i praksis tolkes som 50 m.

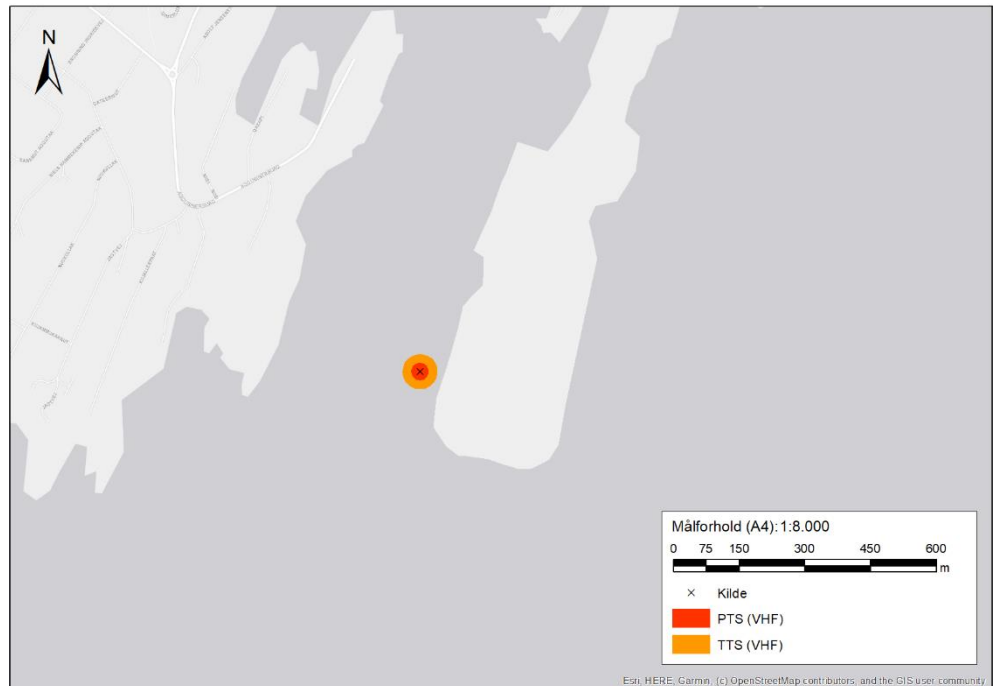
Tabel 2-1. Beregnet maksimal påvirkningsafstand for sprængning til trawlerterminal.

Høregruppe	Høreskade-kriterie	
	PTS	TTS
Low Frequency cetaceans (LF)	80 m	1400 m
High Frequency cetaceans (HF)	<1 m	<1 m
Very High Frequency cetaceans (VHF)	<20 m	40 m
Phocid Carnivores in Water (PCW)	<20 m	60 m
Fisk	440 m	N/A

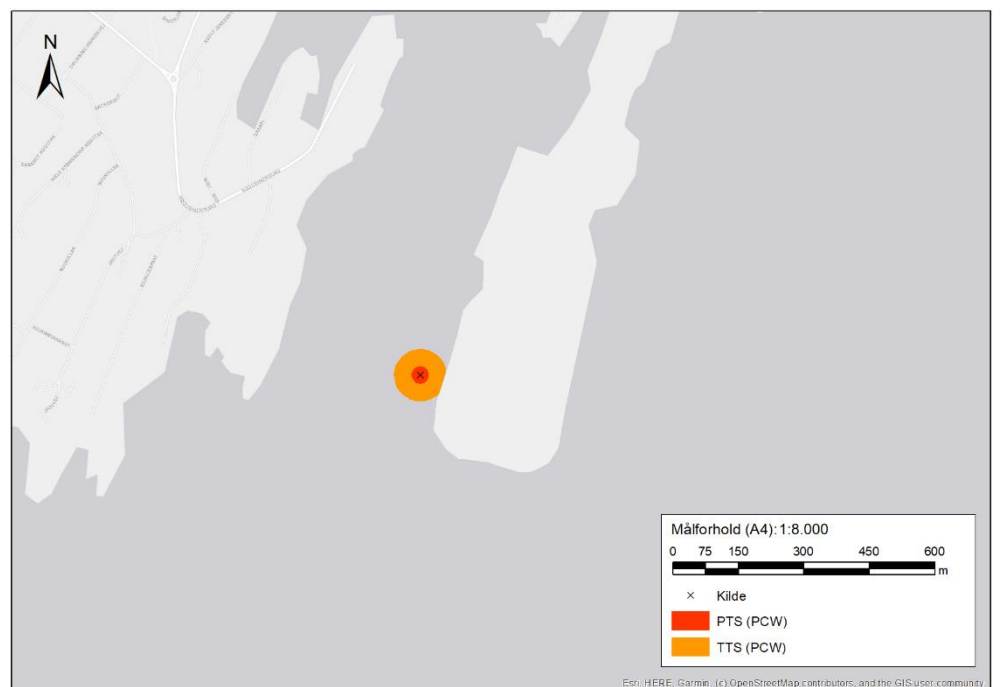
De følgende figurer er baseret på beregninger i 24 radielle transekter ud fra støjkilden. Som en konservativ tilgang er påvirkningsafstanden fra den mest kritiske transekt indtegnet med samme radius for de øvrige transekter.



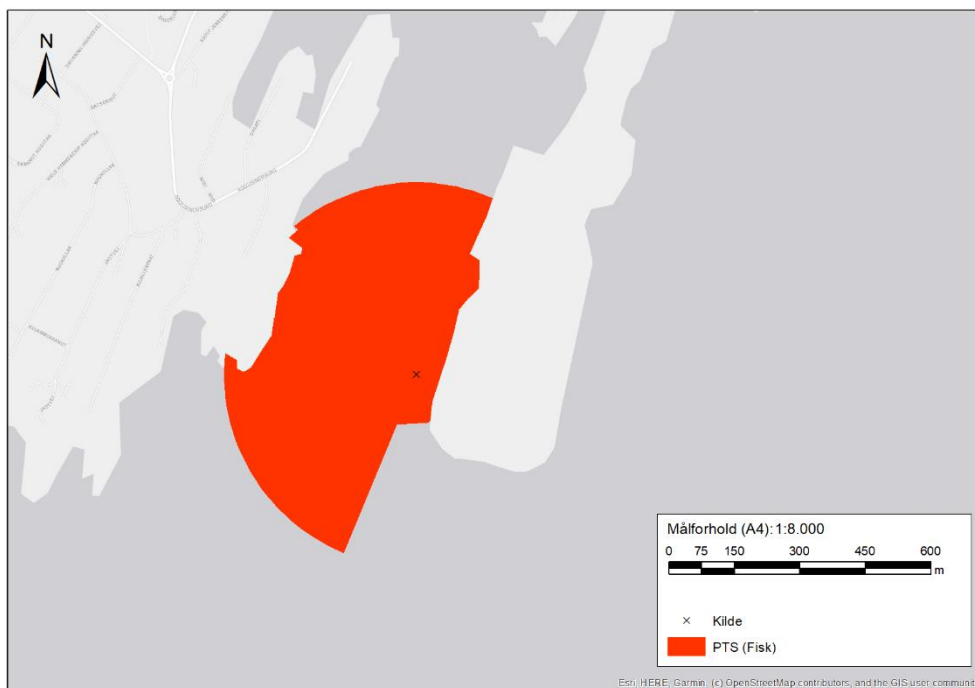
Figur 2-1. Undervandsstøj fra sprængning af 28 borehuller. Dæmpning fra boblegardin medregnet. Påvirkningsområder er indtegnet for hhv. PTS og TTS for LF-høregruppen.



Figur 2-2. Undervandsstøj fra sprængning af 28 borehuller. Dæmpning fra boblegardin medregnet. Påvirkningsområder er indtegnet for hhv. PTS og TTS for VHF-høregruppen.



Figur 2-3. Undervandsstøj fra sprængning af 28 borehuller. Dæmpning fra boblegardin medregnet. Påvirkningsområder er indtegnet for hhv. PTS og TTS for PCW-høregruppen.



Figur 2-4. Undervandsstøj fra sprængning af 28 borehuller. Dæmpning fra boblegardin medregnet. Påvirkningsområde er indtegnet for det SEL-baserede skadekriterie for fisk. Det tilsvarende område for Peak-kriteriet har ca. 40 m kortere radius og er ikke vist.

### 3 Indledning

I forbindelse med opførelsen af en Trawlerterminal i Nuuk Havn planlægges bortsprængning af klippe i havbunden.

Sprængning forårsager kraftig undervandsstøj, som er potentielt skadelig for det marine dyreliv. Til brug i en VVM-redegørelse skal støjen undersøges.

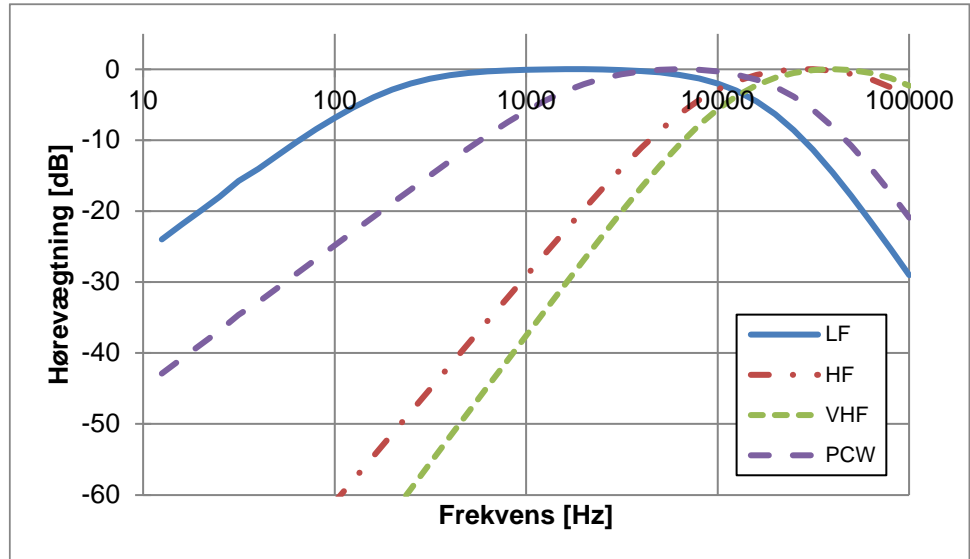
I dette notat præsenteres støjen ved hjælp af numerisk modellering, på baggrund af:

- > Akustiske kildestyrker baseret på det estimerede sprængningsprogram (COWI 2024)
- > Modellering af lydudbredelsen på baggrund af lokale oceanografiske og geoakustiske forhold
- > Sammenligning med aktuelle videnskabelige kriterier for lydpåvirkningen af havpattedyr og fisk

### 4 Høregrupper og støjkræterier

I akustisk sammenhæng inddeles havpattedyr i høregrupper (engelsk "auditor groups") efter deres høreegenskaber. Rapporten (Southall et al. 2019) dækker således alle verdens havpattedyr, og definerer henholdsvis

frekvensvægtningsskurver og høreskade-grænseværdier for hver høregruppe. Denne rapport er grundlaget for den danske Guideline for undervandsstøj fra opførelsen af havvindmøller (Energistyrelsen 2023). Den tilsvarende guideline i USA (Bureau of Ocean Energy Management (BOEM) 2023) henviser ligeledes til samme grundlag for arter uden for amerikansk jurisdiktion.



Figur 4-1. Frekvensvægtning for projektets høregrupper.

Frekvensvægtningsskurverne for de relevante høregrupper er vist i Figur 4-1, hvor det fremgår at LF er den høregruppe, der har lettest ved at høre den lavfrekvente del af støjspektret. Ligeledes har VHF-gruppen den bedste hørelse i det høje kHz-område af spektret.

Høreskade-grænseværdierne for havpattedyr fremgår i Tabel 4-1. Her betyder PTS Permanent Threshold Shift, det vil sige permanent høreskade. TTS er Temporary Threshold Shift, som er midlertidig høreskade. Kriterierne er baseret på  $SEL_{cum,24h}$  [dB re  $1\mu Pa^2s$ ], som er den kumulative lydenergi SEL over en periode på 24 timer. Da der kun antages én sprængning pr. døgn, er værdien af  $SEL_{cum,24h}$  lig SEL for selve sprængnings-begivenheden. Som symbol for SEL bruges  $L_{E,p}$ .

Tabel 4-1. Grænseværdier for projektets høregrupper (Southall et al. 2019). Se teksten for dB-enheder i tabellen.

Høregruppe	Høreskade-kriterie		Arts-eksempler
	PTS	TTS	
Low Frequency cetacean (LF)	$L_{E,p}$ 183 dB	$L_{E,p}$ 168 dB	Pukkelhval
High Frequency cetaceans (HF)	$L_{E,p}$ 185 dB	$L_{E,p}$ 170 dB	Kaskelot
Very High Frequency cetaceans (VHF)	$L_{E,p}$ 155 dB	$L_{E,p}$ 140 dB	Marsvin
Phocid Carnivore in Water (PCW)	$L_{E,p}$ 185 dB	$L_{E,p}$ 170 dB	Ringsæl

For fisk bruges grænseværdier svarende til "Fishes, mass  $\geq 2$  g" jfr. (Bureau of Ocean Energy Management (BOEM) 2023) for Skade ("Injury"). Her gælder som parameter dels (uvægtet) SEL, dels (uvægtet) Peak SPL ( $L_{p,pk}$ ).

Tabel 4-2 Grænseværdier for fisk (Bureau of Ocean Energy Management (BOEM) 2023). dB-værdierne er uden frekvensvægtning, se teksten.

Dyregruppe	Skade-kriterie	
Fisk	$L_{E,p}$ 187 dB	$L_{p,pk}$ 206 dB

## 5 Metodebeskrivelse

Tilgangen i denne modelleringsopgave er baseret på den såkaldte Sonar-ligning, der knytter en akustisk kilde til et modtagepunkt ud fra et transmissions-led.

Den akustiske kildestyrke bestemmes ud fra sprængningsprogrammet beskrevet i (COWI 2024). Til bestemmelse af lydudbredelsen benyttes softwaren dBSea, der er et specifikt undervandsakustisk modelleringsværktøj. Til sidst sammenholdes de beregnede lydfelter med de relevante grænseværdier præsenteret i afsnit 4. Metodens trin beskrives nærmere nedenfor.

### 5.1 Sonar-ligningen

Undervandsstøj kan ofte betragtes ud fra den simpleste udformning af den såkaldte passive Sonar-ligning (Urlick 1983), se Figur 5-1:

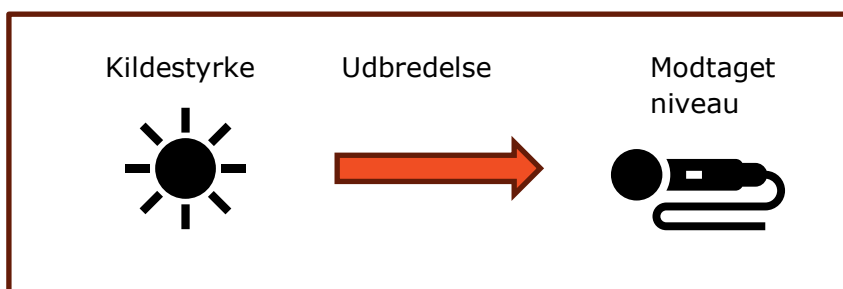
$$RL = SL - TL$$

*RL* "Received Level" er det modtagne støjniveau i en vis afstand fra kilden

*SL* "Source Level" er den akustiske kildestyrke

*TL* "Transmission Loss" er transmissionstab (udbredelses-tabet) mellem den akustiske kilde og modtagerpunktet.

Alle leddene i Sonar-ligningen er frekvensafhængige og kan repræsenteres ved flere forskellige parametre.



Figur 5-1. Skematisk oversigt over Sonar-ligningen.



I det følgende beskrives dette modellerings-studies implementering af leddene i Sonar-ligningen.

## 5.2 Støjkilden fra sprængning

### 5.2.1 Undervandsstøj fra sprængning

#### **Sprængladning i uendeligt medium**

Beskrivelsen her følger ganske kort (Cheong et al. 2020) samt (Weston 1960). Ved en sprængning i et uendeligt medium (dvs. uden reflekterende flader) danner den kemiske proces en chokbølge med meget høj trykamplitude, efterfulgt af en pulserende gasboble. Nær sprængningskilden udbreder chokbølgen sig med overlydshastighed, med en kompliceret ikke-lineær opførsel. Ved større afstande end 2-3 gange radius af en ækvivalent kugleflade, der omslutter sprængladningen, vil udbredelseshastigheden dale til lydshastigheden i det omgivende medie, f.eks. havvandet.

Gasboblen vokser indtil en maksimal størrelse, hvorefter den vil svinge i størrelse og generere trykbølger med skiftevis positiv og negativ amplitude, mens den løbende mister energi og til sidst dør hen.

Ifølge (Weston 1960) må der forventes ikke-lineære effekter ud til ca. 100 yards, dvs. ca. 90 m.

#### **Sprængladning i vandsøjlen, i virkelige omgivelser**

Siden 1940'erne er der foretaget talrige målebaserede studier af undervandsstøj fra sprængning, med sprængladningen placeret i vandsøjlen. Der er således opstillet flere semiempiriske udtryk i litteraturen, der knytter f.eks. peak-lydtrykket  $P_{pk}$  [Pa] til hhv. afstand og massen af sprængstof:

$$P_{pk} = K_p \left( \frac{r}{W^{1/3}} \right)^\alpha$$

Her er  $r$  [m] afstanden fra kilden,  $W$  [kg] er sprængladningens TNT-ækvivalente masse.  $K_p$  og  $\alpha$  er henholdsvis chok- og tryk-koefficienter, der er fremkommet ved kurvefit til måledata. Litteraturen har derfor flere forskellige værdier af disse, da de til dels afhænger af den lokale lydudbredelse på målestedet. For andre sprængstoffer end TNT skaleres  $W$  med en faktor baseret på sprængningsenergi-tætheden i forhold til TNTs, der er på 4148 kJ/ kg

I litteraturen findes flere prædiktionsformler baseret på det ovennævnte format, og hvor konstanterne er bestemt empiriske, f.eks. (Arons 1954). Disse udtryk angiver som regel totalværdier, og har derfor begrænset anvendelse ved evalueringer i forhold til havpattedyr, hvor frekvensspektret indgår. Det er desuden væsentligt at afstandsafhængigheden er baseret på udbredelsesforholdene for det pågældende datasæt, som kan være meget anderledes på en anden lokation med anden batymetri og havbundsegenskaber.

I denne opgave tages i stedet udgangspunkt i Sonar-ligningen, se afsnit 5.1. Udbredelsestabet TL modelleres med en detaljeret numerisk model beskrevet i afsnit 5.4. Kildestyrkespektret for en sprængladning i vandsøjlen kan modelleres ud fra sprængningsmaterialets ækvivalente TNT-masse samt dybdeplaceringen af ladningen. Dette gøres ved et sæt af diagrammer i (Urlick 1983), der i (Hannay and Zykov 2020) er omsat til SI-enheder. Disse diagrammer er opstillet på baggrund af empiriske data.

### 5.2.2 Sprængning i borehuller

En almindelig metode til bortsprængning af klippe under vandet er ved at anbringe ladningen i et borehul ("sprænghul") og tildække med en fordæmning af f.eks. knust klippe. Ved større områder anvendes et sæt af borehuller, og ladningerne forbindes til detonation med en indbydes tidsforsinkelse. Sekvensen af detonationer giver anledning til en salve.

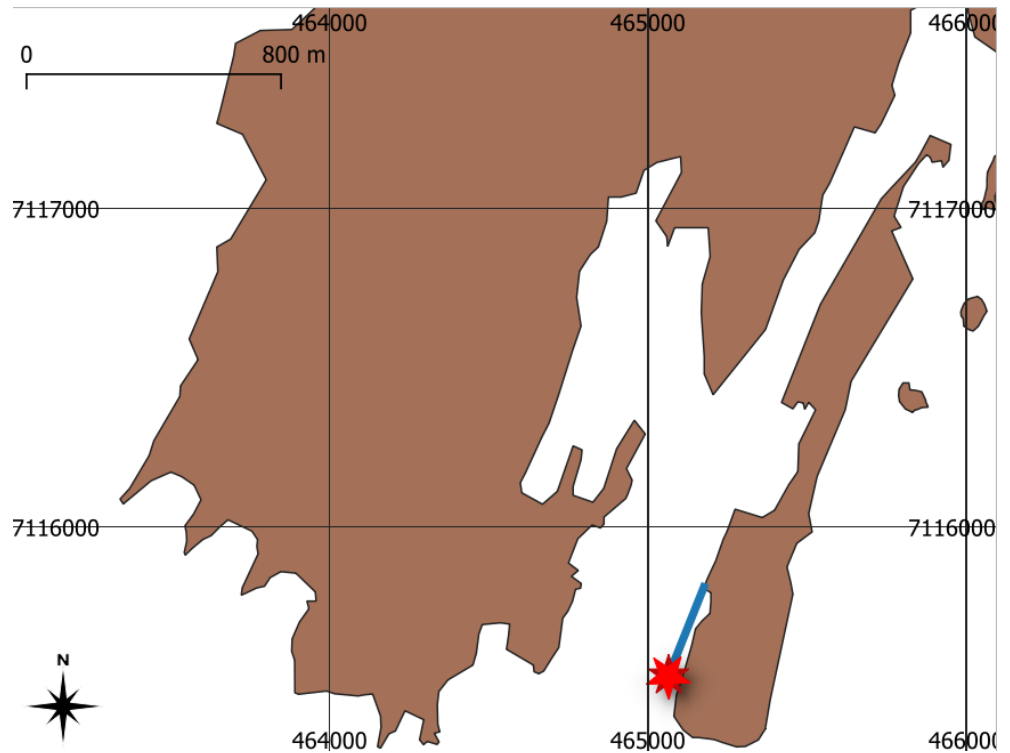
Lydbølgen fra en sprængladning i et borehul skal passere gennem, samt interagere med, klippematerialet. Når sprængningen således sker i klippen, observeres en kraftig dæmpning af støjen sammenlignet med en tilsvarende sprængladning i vandsøjlen. Dels afgives størstedelen af energien til nedbrydning af materialet, dels skal lydbølgen passere gennem havbunden og reflekteres i et vist omfang ved overgangen mellem havbund og vandsøjle. Størrelsen af disse effekter er afhængigt af de konkrete egenskaber for henholdsvis sprængladningen, havbundsmaterialet og vandsøjlen. Den samlede dæmpning vil derfor variere fra projekt til projekt. Et eksempel fra måle-litteraturen viser således en overordnet dæmpning på 26 dB (Tripathy og Shirke 2015).

Chokbølgen fra sprængningen udbreder sig ved meget høj hastighed (over 6.000 m/s for Eurodyn 2000 og 3000). Tidsforsinkelsen mellem detonatorerne gør, at de enkelte chokbølge-pulser ikke forstærker hinanden. Derfor er salvens Peak SPL relateret til ladningen i det enkelte borehul, og ikke den samlede mængde sprængstof i hele salven (Hempfen og Ruben 2005). Salvens lydenergi, kvantificeret som SEL, følger derimod summen af lydenergi fra alle detonationerne.

### 5.2.3 Model-scenarie

Det estimerede sprængningsprogram for Trawler-terminalen (COWI 2024) antager maksimalt én sprængning pr. døgn. Der sprænges et felt bestående af op til 28 borehuller med en indbyrdes afstand på typisk 1,5 m. Hvert hul har en sprængladning på maksimalt 20 kg Eurodyn 3000, og der antages en tidsforsinkelse på 25 ms mellem hver detonation. Sprængningen sker derfor som en "salve" med en varighed på ca. 0,9 s.

I Figur 5-2 er indtegnet linjen for den 300 m lange grøft, der skal sprænges. For de nordligste 200 m sker sprængningen med en bænkhøjde på 4 m, mens de sydligste 100 m har bænkhøjde 5,5 m. Placeringen af støjekilden i den numeriske beregningsmodel til undervandsstøjen er markeret med en rød stjerne i figuren. I beregningsmodellen er kilden placeret 1 m over havbunden.



Figur 5-2 Overblik over Nuuk Havn. Placering af sprængningsgrøft (blå linje) og ækvivalent sprængladning (rød stjerne).

### 5.2.4 Estimering af kildestyrke fra sprængning

Som det fremgår af afsnit 5.2.1 findes der i litteraturen en del semiempirisk materiale til prædiktion af støjen fra en sprængladning i vandsøjlen. Ved sprængladninger i borehuller med fordæmning og evt. boblegardiner tilføjes et antal trin, hvis indflydelse på støjen hver især er afhængig af lokale forhold og er vanskelige at bestemme modelleringsmæssigt. Dette bliver yderligere kompliceret af behovet for at bestemme den frekvensafhængige indflydelse, når støjen i sidste ende skal relateres til havpattedyrs hørelse.

Til den konkrete opgave er der draget nytte af det faktum, at det estimerede sprængningsprogram har stor lighed med Rambølls prøvesprængning fra Containerterminal-projektet som rapporteret i støjmålerapporten (Kristensen og Maxon 2015). Her er rapporteret to prøvesprængninger baseret på borehuller med 20 kg Eurodyn 2000 i hvert hul. Prøvesprængning nummer to havde 28 borehuller med indbyrdes tidsforsinkelse 25 ms og svarer bedst til det estimerede program for Trawlerterminalen. Sprængning og undervandsstøjmålingen for prøvesprængning nummer to blev udført 27. november 2015, med et aktivt dobbelt boblegardin (se afsnit 5.5).

I støjmålerapporten er angivet en SEL på 168 dB (uvægtet) i ca. 800 m afstand fra sprængningen. Der er ligeledes angivet et 1/3-oktavspektrum, dog som parameteren "LZFM<sub>ax</sub>". Dette er et uvægtet ("LZ") maksimal-niveau med tidsvægtning Fast ("F"). Som en god tilnærmelse antages spektralformen for denne parameter at svare nogenlunde til SEL-parameteren. Måleafstanden antages at være tilstrækkelig stor til at støjdbredelsen kan beskrives med almindelig

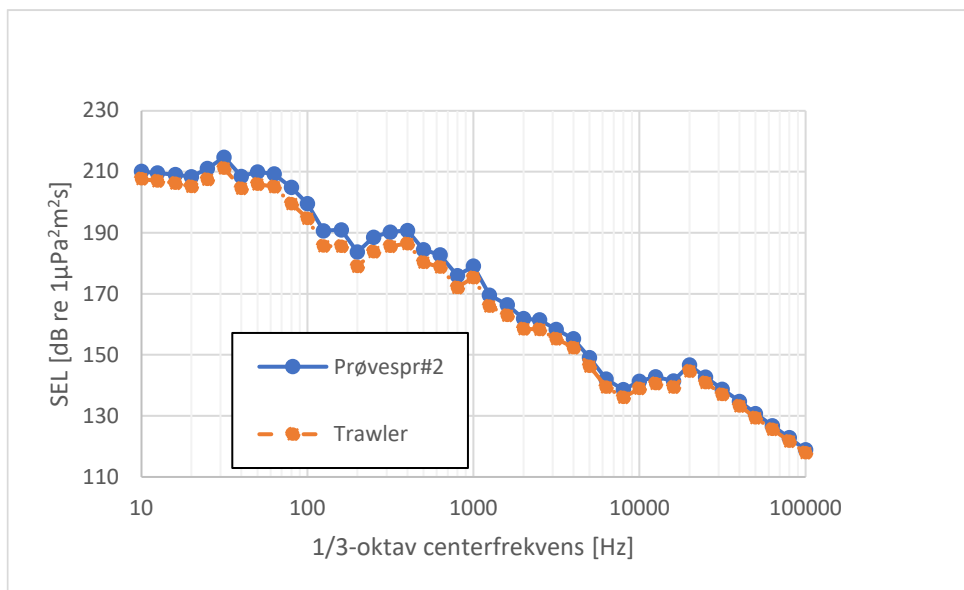
lineær akustik, ud fra betragtningerne i afsnit 5.2.1, og man derfor kan udlede en ækvivalent kildestyrke.

Der tages udgangspunkt i denne prøvesprængning, da den bl.a. inkluderer indflydelsen af de lokale forhold for:

- > Ladning placeret i borehuller
- > Refleksioner fra omgivende kaj-vægge
- > Dobbelt boblegardin

Lydhastighedsprofilen for måledagen er ikke oplyst, men er fundet i databasen (se afsnit 5.3.3) for 18. november 2015 og vurderes til at være meget lig lydha-stighedsprofilen, der er antaget i den aktuelle modellering. I relation til den rela-tivt korte måleafstand på ca. 800 m skønnes det at en evt. afvigelse af den fak-tiske lydhastighedsprofil har mindre end 1 dB indflydelse på lydudbredelsen.

På baggrund af oplysningerne i målerapporten om hydrofonbøje og spræng-ningskildens placering er lydudbredelsen for prøvesprængningen bestemt med dBSea. Med udgangspunkt i Sonar-ligningen (se afsnit 5.1) er den ækvivalente kildestyrke SL for prøvesprængningen derfor bestemt ved at kombinere de rap-porterede støjmåledata med lydudbredelsen. Denne kildestyrke er vist som den blå kurve i Figur 5-3, og har totalniveau 220 dB re  $1\mu\text{Pa}^2\text{m}^2\text{s}$ .



Figur 5-3. Kildestyrke-estimer for Prøvesprængning nr. 2 (blå) samt korrigeret til Trawler-terminal-sprængningsprogrammet (stiplet orange). Vist som  $L_{s,E}$  [dB re  $1\mu\text{Pa}^2\text{m}^2\text{s}$ ].

Ved hjælp af diagrammerne i (Urick 1983, se også afsnit 5.2.1) er den spektrale forskel bestemt mellem:

- > Eurodyn 2000-sprængmateriale fra prøvesprængningen vs. Eurodyn 3000 ved Trawlerterminalen
- > Ladningens dybdeplacering for henholdsvis prøvesprængningen (ca. 8 m vand) vs. Trawlerterminalen (ca. 18 m vand).

Forskellene i sprængmateriale giver kun anledning til ca. én dB kraftigere totalniveau for Trawlerterminal-kilden. Forskellene i hydrostatisk tryk giver en spektral korrektion, hvor Trawlerterminal-kilden reduceres med ca. 1-5 dB per 1/3-oktavbånd, som det ses af den stiplede orange kurve i Figur 5-3. Ud fra totalniveau forventes kildestyrken ved Trawlerterminal-kilden at være ca. 4 dB lavere end prøvesprængningens kildestyrke.

Ud fra en konservativ tilgang er det valgt at benytte den ækvivalente kildestyrke fra prøvesprængningen uden de ovennævnte korrektioner.

### 5.3 Oceanografi og havbund

I relation til prædiktion af undervandsstøj undersøger (Farcas et al. 2016) betydningen af en række parametre. Det fremgår at i særdeleshed havdybden og havbundens materialeegenskaber er af stor betydning.

Interaktionen mellem den fremadskridende lydbølge og havbunden er den primære kilde til tab, set over afstande. I løbet af udbredelsen reflekteres lydbølgen mellem havoverfladen og havbunden. Interaktionen med havoverfladen er i praksis stort set tabsfri, mens hvert "bottom hit" ved havbunden medfører et stort tab. Ved udbredelse på dybt vand er der, set over afstand, mindre interaktion mellem lydbølgen og havbunden, end ved lavt vand. I dette studie er der derfor som et konservativt valg prioriteret scenarier med relativt dybt vand.

#### 5.3.1 Tidevand og batymetri

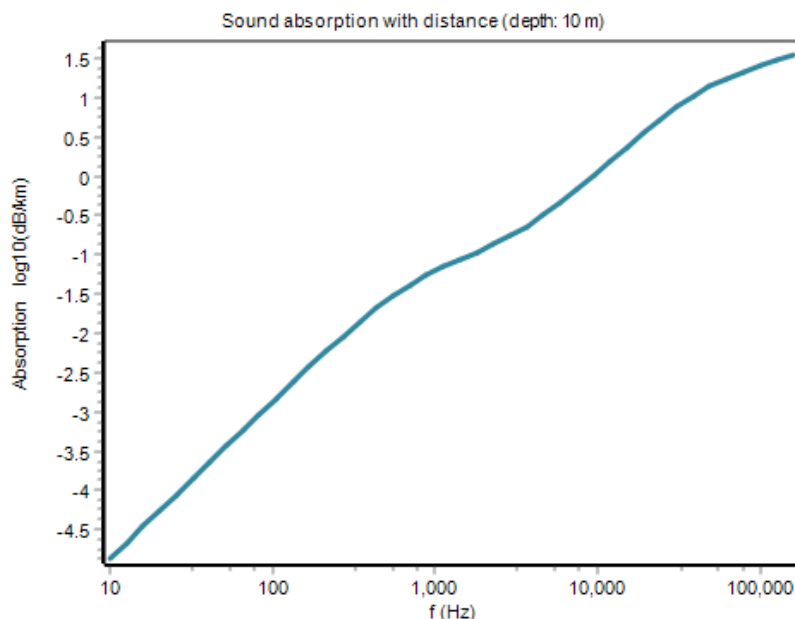
I Anlægsprogrammet (COWI 2023) er angivet tidevandsforhold ved Nuuk med reference til år 2000.

Batymetrien, dvs. dybdeforholdene, til den undervandsakustiske model er genereret ud fra digitale søkort i softwaren MIKE C-MAP (DHI 2024). Disse er samlet i irregulære net, hvor den horisontale opløsning (dvs. punktafstanden) i havnebassinerne er i størrelsesordenen 25-35 m. Uden for bassinerne er opløsningen ca. 85-95 m.

I det senere afsnit om havbunden er batymetrien vist i Figur 5-8.

#### 5.3.2 Volumen-absorption i vandsøjlen

Ved passage gennem havvandet mister lydbølgen energi på grund af en række fysiske fænomener. Disse er relateret til viskositet og de kemiske elementer i havvandet (Jensen et al. 2011). Denne såkaldte volumen-absorption af lyden er en ikke-lineær funktion af frekvens, og afhænger primært af vandets temperatur, salinitet og surhedsgrad. Overordnet stiger absorptionen med frekvens, og har først praktisk betydning ved frekvenser i kHz-området.



Figur 5-4. Havvandets akustiske volumen-absorption vist som  $\log_{10}(\text{dB/km})$  versus frekvens i Hz.

Den anvendte modellerings-software i dette studie repræsenterer volumen-absorption på baggrund af semiempiriske formler fra (Ainslie og McColm 1998). Figur 5-4 viser det anvendte absorptionsspektrum. Ved 10 kHz er absorptionen ca. 1 dB/km, hvilket i figurens logaritmiske akse har værdien 0.

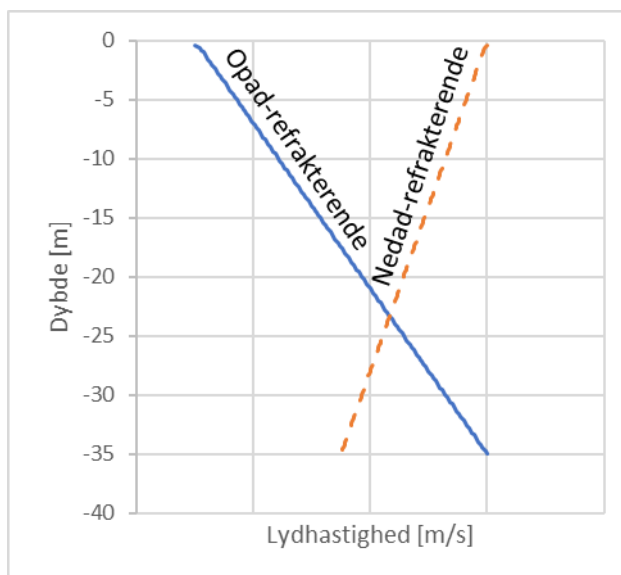
### 5.3.3 Lydhastighedsprofiler

#### Akustisk indvirkning

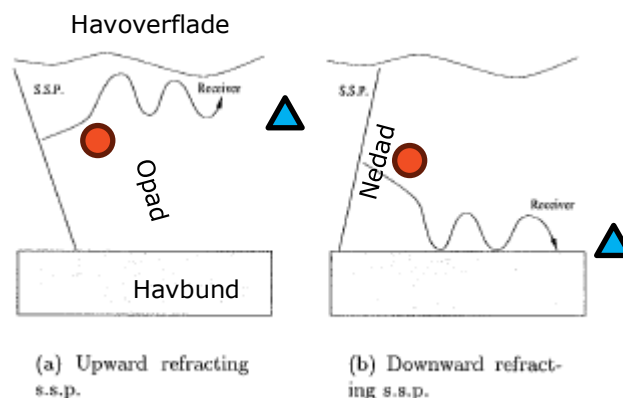
Variationen af lydhastigheden  $c$  [m/s] med vanddybden  $D$  [m] omtales ofte som en lydhastighedsprofil. Ifølge (Farcas et al. 2016) influerer lydhastighedsprofilen på lydets udbredelse ud fra primært to mekanismer:

- > Hældningen ("gradienten") af profilen forårsager **refraktion**, dvs. "bøjning" af lydbølgens udbredelsesretning. Et par særligt relevante tilfælde er vist i Figur 5-5:
  - > **Opad-refrakterende profiler:** Lydhastighedsprofiler med en overordnet hældning, hvor lydhastigheden er lavest nær havoverfladen. Lyd-udbredelsen vil overordnet tendere til at "bøje" op mod havoverfladen. Ved almindeligt forekommende bølgehøjder er der ganske små (eller ingen) akustiske tab ved lydets interaktion med havoverfladen. Dermed vil denne type profiler medføre relativt lav udbredelsesdæmpning, set over afstand.
  - > **Nedad-refrakterende profiler:** Lydhastighedsprofiler med en overordnet hældning, hvor lydhastigheden er lavest nær havbunden. Disse profiler vil overordnet lede lyden ned mod havbunden. Lydbølgen mister en relativt stor mængde energi for hver gang den interagerer med havbunden. Dermed fører nedad-refrakterende profiler overordnet til høje udbredelsesdæmpninger set over afstand.

Mere komplekse lydhastighedsprofiler opstår ved f.eks. springlag. I disse situationer vil dele af profilerne svare til de overordnede tilfælde.



Figur 5-5. Generiske eksempler på lydhastighedsprofiler.



Figur 5-6. Generiske "ray traces" (strålegangs-diagrammer) for opad- og nedad-refrakterende lydhastighedsprofiler. Bearbejdet efter (Lützen, 1998). De røde cirkler er lydkilden, og de blå trekanter er modtagere.

- > **Akustisk kobling** med havbunden: For havbund med akustiske egenskaber, der er tæt på havvandets, vil der opstå en høj grad af akustisk energioverførsel fra vandsøjlen og ned i havbunden. I praksis vil dette registreres som et akustisk tab til havbunden. I denne situation vil der være høje udbredelsestab set over afstand. Alternativt vil havbund med mere kontrasterende egenskaber reflektere en større mængde lydenergi tilbage til vandet, og derfor medføre lavere udbredelsestab set over afstand.

De mest betydende egenskaber for denne kobling er den karakteristiske akustiske impedans  $\rho \cdot c$  (massefylde gange lydhastighed) af henholdsvis vandet og det øverste havbundslag.

På baggrund af de ovenstående fænomener er der valgt en konservativ tilgang til det aktuelle studie. Dermed er der givet prioritet til en lydhastighedsprofil med de følgende egenskaber:

- > Opad-refrakterende, for at opnå minimal interaktion med den tabsgivende havbund
- > Generelle lydhastigheds-værdier fjernt fra de 1600 m/s af den aktuelle havbunds øverste lag. Dette vil maksimere tilbage-reflektionen af lyd til vandsøjlen og minimere tabet til havbunden.

Disse egenskaber vil udgøre en lydudbredelse med konservativt, lavt tab over afstand.

#### Anvendt lydhastighedsprofil fra empiriske data

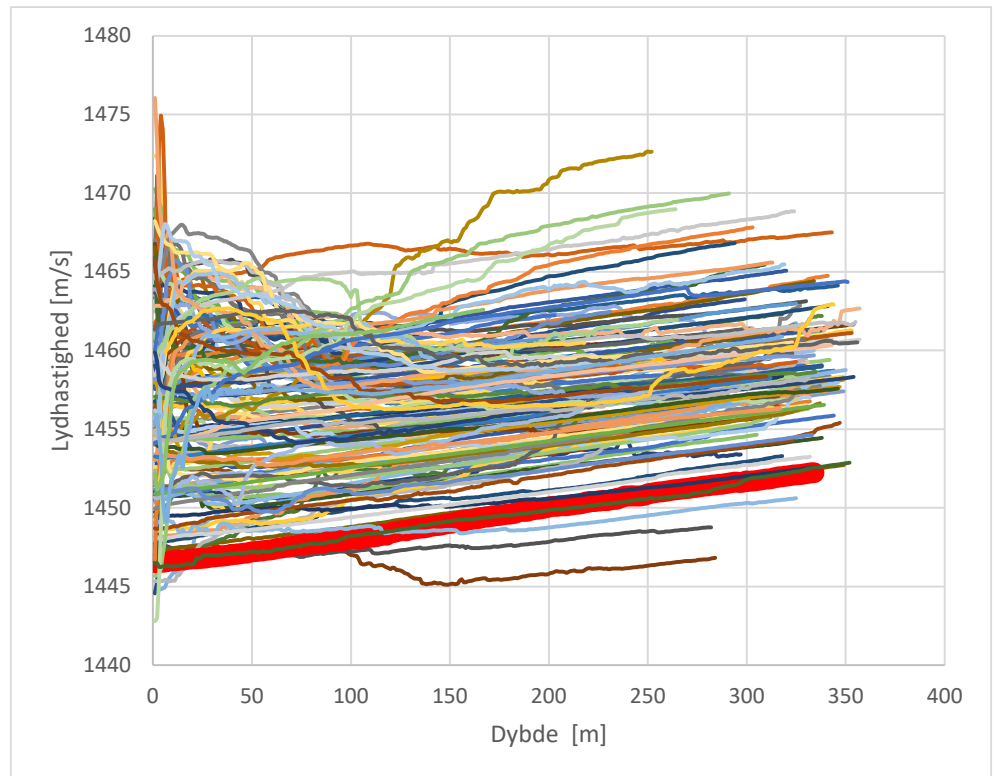
Lydhastigheden i vandsøjlen kan bestemmes ud fra måling af temperatur  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] og salinitet  $S$  [ppt] ud fra (Medwin 1975):

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.010T)(S - 35) + 0.016D$$

Til den aktuelle opgave blev data fra Greenland Ecosystem Monitoring (GEM) programme MarineBasis-Nuuk tilvejebragt af Greenland Institute of Natural Resources, Nuuk (Institute of Natural Resources).

Over 200 profil-målinger fra området omkring Nuuk for perioden 2005 til 2023 blev undersøgt. Profilerne for det relevante interval april-september er vist i Figur 5-7. På baggrund af kriterierne nævnt i det forrige afsnit er profilen med fed rød streg i figuren valgt til studiet. Det ses at den er opad-refrakterende, samt har en lav lydhastighed i forhold til de øvrige profiler.





Figur 5-7. Lydhastighedsprofiler fra 2005-2023 (Institute of Natural Resources). Den røde profil er anvendt til modelleringen.

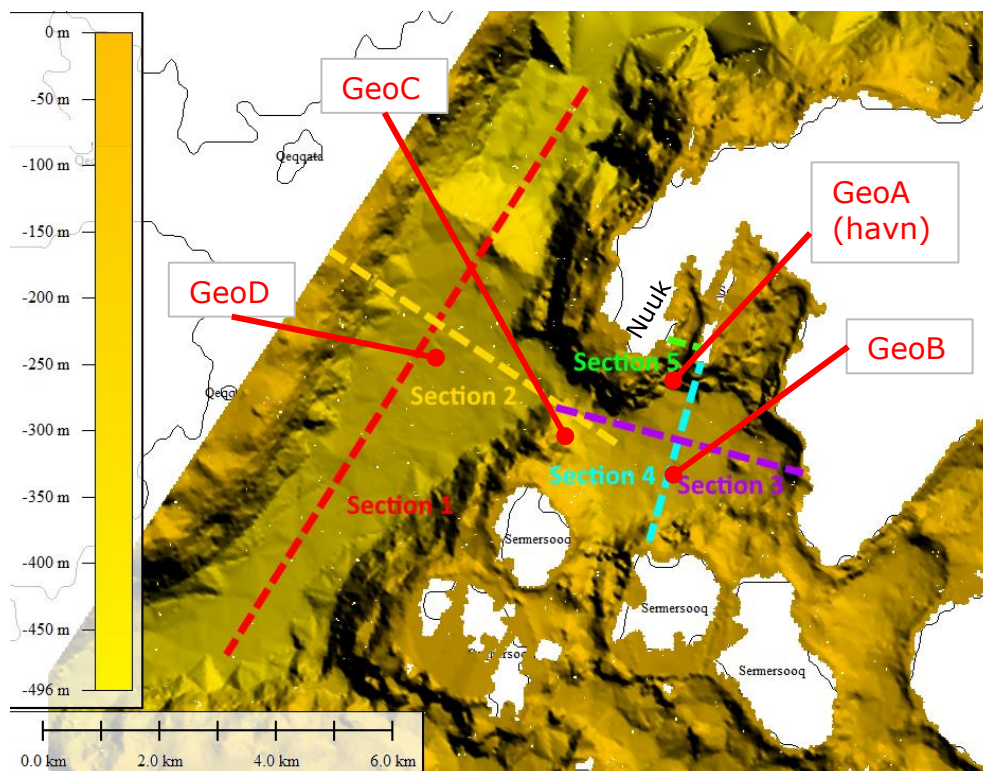
### 5.3.4 Geoakustik

Havbundens akustiske egenskaber ("geoakustik") har meget stor betydning for lydudbredelsen på vanddybder op til nogle hundrede meter. Samspillet er meget komplekst, og det er ikke muligt at opstille simple skalerings-regler ud fra havbundens lagdeling og geoakustik. Lydudbredelse i havet sker således både i vandsøjlen og gennem havbunden, og f.eks. dybereliggende kontrasterende lag kan føre til delvis refleksion tilbage til vandsøjlen. Det er derfor væsentligt at opstille en kvalificeret geoakustisk model for havbunden.

De geoakustiske egenskaber af havbunden er vurderet ud fra COWIs geologers opstilling af profiler i havområdet omkring Nuuk. Tolkningen af profilerne er baseret på geomorfologisk analyse af de topografiske og batymetriske kort. Tolkningen er desuden baseret på studier af sedimenter fra steder med sammenlignelige forhold.

Som det ses i overblikskortet i Figur 5-8 er havbunden vurderet langs 5 forskellige transekter, Section 1-5, hvoraf Section 5 er på tværs af havnens indsejling. De detaljerede profiler for hver transekt er vedlagt i Bilag B.

På basis af de geologiske profiler er der opstillet 4 forskellige geoakustiske profiler for havbunden, GeoA-D. I den anvendte beregningsmodel er disse knyttet til punkterne angivet i Figur 5-8. I områderne mellem disse punkter anvender modellen en interpolation mellem de nærmeste profiler. Lagdelingen for profilerne fremgår af Tabel 5-1. De geoakustiske egenskaber er vurderet ud fra Tabel 1.3 i (Jensen et al. 2011) for lignende materialer.



Figur 5-8. Overblik over batymetri samt geologiske undersøgelsesprofiler Section 1-5. GeoA-D angiver havbunds-positionerne anvendt i modelleringen. Batymetri-data fra MIKE C-MAP (DHI 2024).

Tabel 5-1. Lagfordelingen for hver geoakustiske profil.  $D$  [m] er dybden under havbunden.

Materiale	GeoA	GeoB	GeoC	GeoD
	D [m]	D [m]	D [m]	D [m]
Toplag	0-4	0-20	0-10	0-25
Midterlag	4-5	20-40	10-15	25-100
Grundfjeld	>5	>40	>15	>100

Tabel 5-2. Geoakustiske profiler. For kompressionsbølgeudbredelse er  $c_p$  [m/s] lyd hastigheden, og  $\alpha_p$  [dB/ $\lambda$ ] er dæmpningen.

Materiale	Massefylde	Kompressionsbølge	
	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [m/s]	$\alpha_p$ [dB/ $\lambda$ ]
Top-lag	1800	1600	0.20
Midterlag	1900	1650	0.30
Grundfjeld	2700	5250	0.10

Det fremgår, at det dybeste lag er klippe med en høj kompressionsbølgehastighed. I modsætning til de to øverst liggende lag er dette materiale elastisk, og understøtter lydudbredelse både som kompressionsbølger og shear-bølger. I princippet burde klippelaget modelleres med begge bølgeformer, da en (mindre) del af lydenergien vil konverteres til shear-bølger. Denne konvertering vil fremstå som et ekstra tab af akustisk energi over afstand. Imidlertid fremgår det af profilerne, at grundfjeldet overvejende er dækket af sedimenter. Det er derfor valgt som en konservativ tilgang kun at medtage kompressionsbølgeegenskaberne i lydudbredelsesmodellen, jfr.

Tabel 5-2.

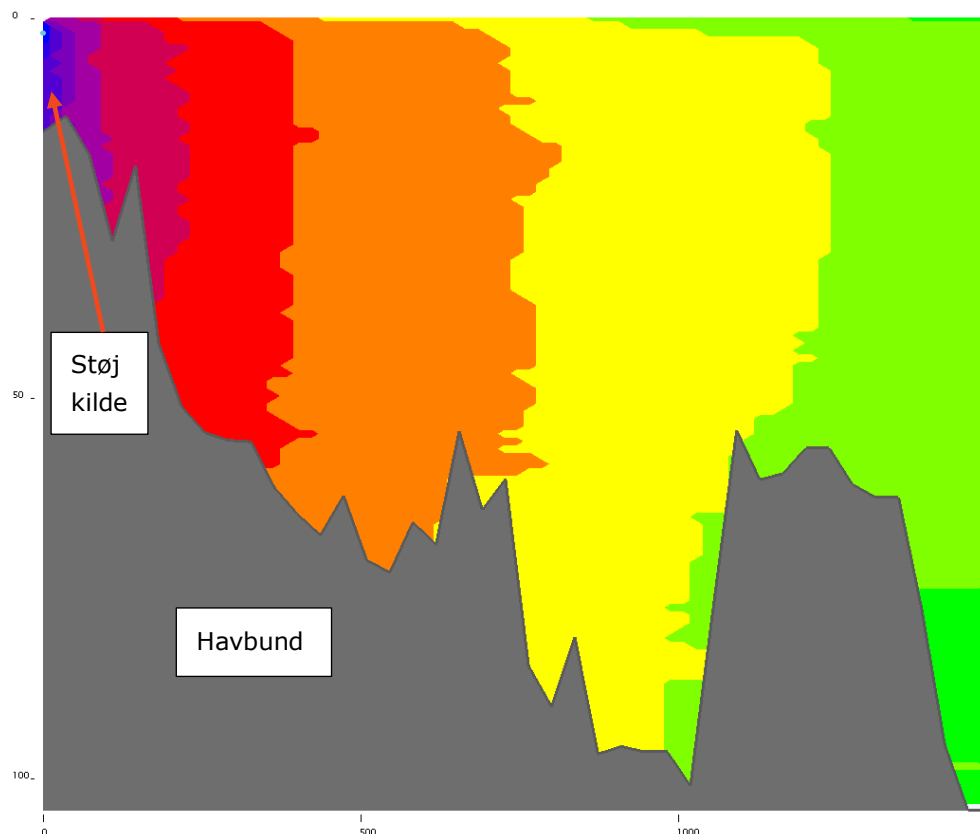
### 5.3.5 Akustiske tab ved havoverfladen

Ved lydudbredelse over afstand opstår tab, når lydbølgen interagerer med havoverfladen. Dette tab stiger med bølgehøjde og er overordnet proportionalt med frekvensen, og har som udgangspunkt først betydning i kHz-området og ved større afstande (Urick 1983). Ud fra en konservativ tilgang er dette tab ikke medregnet i den aktuelle modellering.

## 5.4 Modellering af lydudbredelsen

Til udbredelsesmodelleringen benyttes det kommercielle software dBSea ver. 2.3.4 (Marshall Day Acoustics 2024). Dette værktøj indeholder et udvalg af forskellige numeriske algoritmer specifikt for udbredelsen af undervandsstøj.

Ud fra 3D batymetri-data for området modellerer dBSea lydudbredelsen i et udvalgt antal 2D-transekter ud fra de angivne støjkluder. Figur 5-9 viser eksempel for en beregnet transekt. For enkeltheds skyld er havbunden vist som én farve, på trods af at en væsentlig del af modellens lydudbredelse beregnes i havbunden. Lydfeltet er forholdsvist komplekst, og det er for eksempel ikke entydigt ved hvilken dybde, det maksimale støjniveau forekommer. Da man desuden ikke kan være sikker på, i hvilken dybde havpattedyrene befinder sig, er det almindelig praksis at repræsentere en transekts beregningsresultater som **"Max-Over-depth"** (Energistyrelsen 2023). Dette er en konservativ tolkning af lydfeltet.



Figur 5-9. Eksempel på 2D-transekt. Vandret akse er afstanden fra støj-kilden. Lodret akse er dybden under havoverfladen. Farverne angiver støjniveauet, hvor grøn er lavest og blå er højest.

Softwaren benyttes her til beregninger af SEL i 1/3-oktaver baseret på:

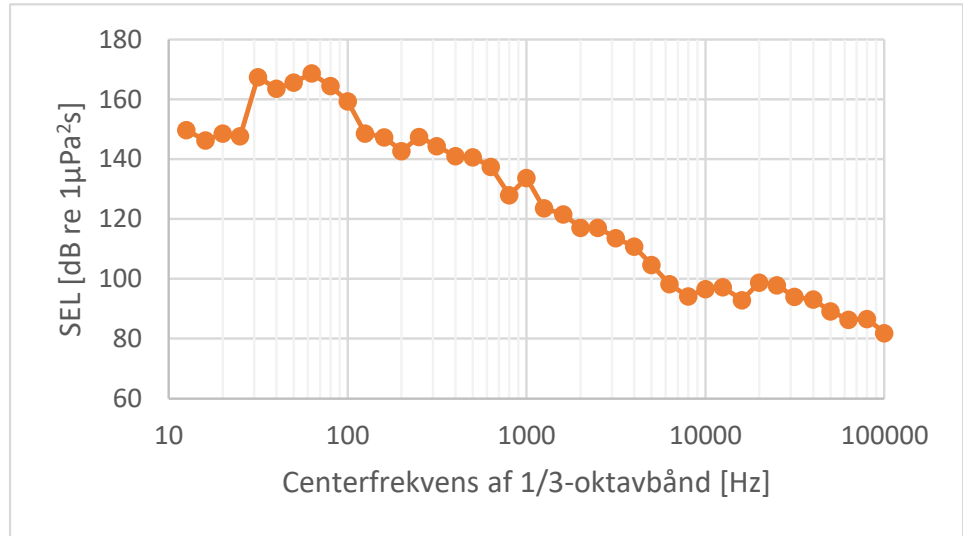
- > Brugerangivet kildespektrum
- > Batymetri
- > Havbunds-lagdeling og geoakustik
- > Oceanografi

I den aktuelle opgave kombineres to algoritmer ud fra frekvensområdet:

- > 12,5 Hz til 1 kHz: Parabolic Equation med 5 Padé Terms
- > 1,25 kHz til 100 kHz: Ray Tracing

Der regnes i et net af beregningspunkter med vandret opløsning 20 m og lodret opløsning 1 m.

I Figur 5-10 er vist et eksempel på det resulterende SEL-spektrum i en position svarende til måle-bøjen anvendt i (Kristensen og Maxon 2015) med koordinaterne Easting 464555, Northing 7115262 (UTM 22N). Dette er ca. 560 m fra sprængningskilden. Totalniveauet er 175 dB re  $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ . Det ses at hovedparten af energien forekommer i det lavfrekvente område 31,5 til 100 Hz.



Figur 5-10. Beregnet støjspektrum i modtagepunkt ca. 560 m fra sprængningen. Dybde 15 m. Spektret er vist som uvægtet SEL [dB re 1μPa²s].

#### 5.4.1 Estimering af Peak lydtrykniveauer

Den grundlæggende akustiske parameter i beregningssoftwaren er SEL, som beregnes direkte. I et lydsignal er det maksimale Peak lydtryksniveau  $L_{p,pk}$  [dB re 1μPa] et øjebliksniveau, som er meget følsomt for hurtige fluktuationer i udbredelsesmediet (f.eks. bølger), og for detaljerne i den højfrequente del af lyd-spektret. Denne parameter er vanskelig at modellere direkte, og man benytter i stedet ofte en empirisk bestemt relation mellem SEL og  $L_{p,pk}$ , se f.eks. (Lippert et al. 2015).

I den aktuelle modelleringsopgave benyttes erfaringerne fra prøvesprængning nr. 2 (Kristensen og Maxon 2015), hvor der ved måling i 800 m afstand blev observeret:

$$L_{p,pk} = L_{E,p} + 18 \text{ dB}$$

Her er  $L_{E,p}$  [dB re 1μPa²s] det uvægtede SEL totalniveau.

## 5.5 Støjdæmpning

Boblegardiner er en almindeligt brugt, effektiv metode til dæmpning af undervandsstøj fra sprængning. I sprængningsprogrammet (COWI 2024) er gennemgået de akustiske principper bag boblegardinens virkemåde. Der er ligeledes opstillet anbefalinger til at opnå et velfungerende boblegardin.

I den aktuelle modellering er der taget udgangspunkt i Rambølls prøvesprængning, der blev foretaget med et dobbelt boblegardin udført af entreprenøren (Kristensen og Maxon 2015). Af rapporten fremgår:

- > De anvendte boblegardiner, hver 50 m lange, blev fremstillet af 40 mm PE100, PN10 rør med huller.
- > Hver slange blev tilført 138 l/s luft, hvilket svarer til 8,3 m<sup>3</sup>/minut
- > Den indbyrdes afstand mellem de to gardiner var ca. 10 m
- > Ud fra foto i rapporten vurderes det inderste gardin til at være placeret ca. 10 m fra sprængningskilden

Det må forventes at støjdæmpningen kan optimeres ved at følge anvisningerne for boblegardiner i (COWI 2024).

## 6 Resultater

Resultaterne af beregningerne er samlet i afsnit 2.

## 7 Afsluttende kommentarer

Med udgangspunkt i det estimerede sprængningsprogram for Trawlerterminalen (COWI 2024) og detaljerede oplysninger om lokale havbunds- og oceanografi-forhold, er den forventede støjbelastning beregnet ved én daglig sprængning. Den akustiske kildestyrke er udledt på baggrund af faktiske fjernfeltmålinger i prøvesprængning nr. 2 fra (Kristensen og Maxon 2015) ved hjælp af den aktuelle lydudbredelsesmodel. Således inkluderer beregningerne den faktisk opnåede dæmpning af det dobbelte boblegardin fra sidstnævnte målerapport.

Beregningerne tager som nævnt udgangspunkt i sprængningsprogrammet, og det forventes at f.eks. lavere antal borehuller pr. sprængfelt eller et sprængningsmateriale med mindre TNT-ækvivalens vil føre til lavere støj end hvad der er beregnet her.

## 8 Litteratur

Ainslie MA, McColm JG (1998) A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water. *J Acoust Soc Am* 103:1671–1672.

<https://doi.org/10.1121/1.421258>

Arons AB (1954) Underwater Explosion Shock Wave Parameters at Large Distances from the Charge. *J Acoust Soc Am* 26:343–346.

<https://doi.org/10.1121/1.1907339>

Bureau of Ocean Energy Management (BOEM) (2023) Nationwide Recommendations for Impact Pile Driving Sound Exposure Modeling and Sound Field Measurement for Offshore Wind Construction and Operations Plans. Sterling

Cheong, S.-H., Wang, L., Lepper, P., & Robinson, S. (2020). *Characterisation of Acoustics Fields Generated by UXO Removal - Phase 2*.

COWI (2023) Havneudvidelse på Qeqertaq Avelleq. Anlægsprogram

COWI (2024) Nuuk Havneudvidelse. Trawlerterminal. Program for undervandssprængninger

dBSea (2024) Validation of the model. In: Website.

<https://www.dbsea.co.uk/validation/> . Tilgået 16 mar 2024

DHI (2024) MIKE C-MAP. Available from:

<https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-c-map>

Energistyrelsen (2023) Guideline for underwater noise - Installation of impact or vibratory driven piles. Copenhagen

Farcas, A., Thompson, P. M., & Merchant, N. D. (2016). Underwater noise modelling for environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 57, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.11.012>

Hannay DE, Zykov M (2022) Underwater Acoustic Modeling of Detonations of Unexploded Ordnance (UXO) for Orsted Wind Farm Construction, US East Coast

Hempen GL, Ruben HJ (2005) Underwater blast pressures from confined rock removal shots The Kill Van Kull deepening project. In: Proceedings of the Thirty-first Annual Conference on Explosives and Blasting Technique. International Society of Explosive Engineers, Orlando (FL), pp 91–100

Institute of Natural Resources Greenland Ecosystem Monitoring (GEM).

[www.data.g-e-m.dk](http://www.data.g-e-m.dk) . Tilgået 13 Feb 2024

Jensen FB, Kuperman WA, Porter MB, Schmidt H (2011) Computational Ocean Acoustics, 2nd edn. Springer New York, New York, NY

Kristensen PP, Maxon CM (2015) Ny containerterminal Nuuk - Måling af undervandsstøj ved prøvesprængning. Copenhagen

Lippert, T., Galindo-Romero, M., Gavrilov, A. N., & von Estorff, O. (2015). Empirical estimation of peak pressure level from sound exposure level. Part II: Offshore impact pile driving noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(3), EL287–EL292. <https://doi.org/10.1121/1.4929742>

Lützen R (1998) Acoustic communication with an unmanned submarine. Master of Science Thesis, Technical University of Denmark

Mashall Day Acoustics (2024) dBSea. <https://www.dbsea.co.uk/> . Tilgået 16 mar 2024

Nauta MR (2012) Refleksionsseismisk undersøgelse ved Ny Atlanthavn, Nuuk 2012. Asiaq Rapport 2012-13.

Southall BL, Finneran JJ, Reichmuth C, et al (2019) Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects. *Aquat Mamm* 45:125–232. <https://doi.org/10.1578/AM.45.2.2019.125>

Tripathy GR, Shirke RR (2015) Underwater Drilling and Blasting for Hard Rock Dredging in Indian Ports - A Case Study. *Aquat Procedia* 4:248–255. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.034>

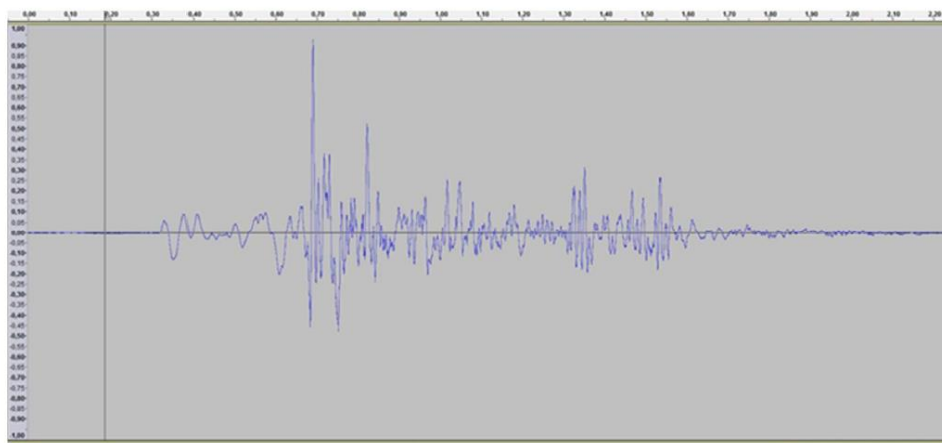
Urick, R. J. (1983). *Principles of Underwater Sound* (Third). Peninsula Publishing.

Weston, D. (1960). Underwater explosions as acoustic sources. *Proceedings of the Physical Society*, 76, 233–249.



## Bilag A Akustisk terminologi

Lyd beskrives generelt som trykfluktuationer [Pa] omkring det statiske tryk, og kan angives enten i som tidsserier (tryk som funktion af tid) eller frekvensspektre (en lydparameter som funktion af frekvens [Hz]). I Figur 8-1 er således vist en tidsserie af lydtrykket (her plottet med enheden V, der er proportional med lydtrykket i Pa). Det ses at parameteren over tid (vandret akse) svinger omkring en gennemsnitsværdi (det hydrostatiske tryk, der defineres som trykfluktuationen 0 Pa), og at der forekommer både positive og negative værdier af lydtrykket.



Figur 12. Prøvesprængning nr. 2 - Tidssignal for prøvesprængningen. Enheder: x-akse = sekunder; y-akse = volt.

Figur 8-1. Eksempel på lyd vist som tidsserie (Kristensen og Maxon 2015).

I støjmæssig sammenhæng er 1/3-oktavspektre meget benyttet, da det giver et praktisk overblik af lydenergiens fordeling i forskellige frekvensområder. For en letforståelig beskrivelse af undervandsakustik og den tilhørende signalanalyse anbefales websiten [www.dosits.org](http://www.dosits.org).

Generelt betegner "niveau" (engelsk "level") en akustisk størrelse angivet som decibel, dB.

De akustiske parametre er i nyere tid defineret i de internationale standarder ISO 18405 og 18406. I dansk sammenhæng kan man desuden referere til Guidelinen for undervandsstøj (Energistyrelsen 2023).

I det følgende introduceres nogle af de grundlæggende parametre, mens læseren i øvrigt henvises til de ovennævnte litteratur-kilder.

### Lydtrykniveau $L_p$

Lydtrykniveauet er decibel-niveauet for lydtrykket  $p$  [Pa], bestemt som:

$$L_p = 20 \cdot \log_{10} \frac{p}{p_0}$$

Her er  $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$  referenceværdien for lydtryk i vand.

### Peak lydtrykniveau $L_{p,pk}$

For en observeret tidsperiode  $T$  [s] er Peak-lydtrykniveauet  $L_p$  dB-værdien af det maksimale lydtryk (positivt eller negativt) i løbet af perioden.

### Sound Exposure Level $L_{E,p}$

For et kortvarigt akustisk signal med en varighed  $T=t_2-t_1$  [s] som f.eks. en sprængning er Sound Exposure  $E_{p,T}$  [ $\text{Pa}^2\text{s}$ ] et udtryk for signalets lydenergi. Sound Exposure er defineret ud fra det kvadrerede lydtryk  $p$  [Pa]:

$$E_{p,T} = \int_{t_1}^{t_2} p(t)^2 dt$$

Herefter defineres Sound Exposure Level som:

$$L_{E,p} = 10 \cdot \log_{10} \frac{E_{p,T}}{E_0} \text{ [dB]}$$

Her er referenceværdien  $E_0=1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ .

### Kildestyrke $L_{S,E}$

For impulsiv støj, som f.eks. sprængning, er kildestyrken  $L_{S,E}$  [dB re  $1\mu\text{Pa}^2\text{m}^2\text{s}$ ] defineret som det tidsintegrerede, kvadrerede lydtryk i en afstand af 1 m fra en hypotetisk punktkilde placeret i et (hypotetisk) uendeligt og uniformt tabsfrit medium, og som har samme Sound Exposure Level som den sande kilde. I litteraturen angives denne parameter nogle gange i praksis som kildestyrken "Source Level" eller "SL" med referenceværdien  $1 \mu\text{Pa}^2\text{s}@1\text{m}$ .

Den detaljerede definition er givet i terminologistandarden ISO 18405.

### Udbredelsestab, Transmission Loss og Propagation Loss

"TL" betegner det generelle transmissionstab, som er en niveaureduktion mellem to specificerede positioner  $r_1$  og  $r_2$  [m] i et undervandsakustisk felt. Her er  $r_{1,2}$  den radielle afstand til støjekilden.

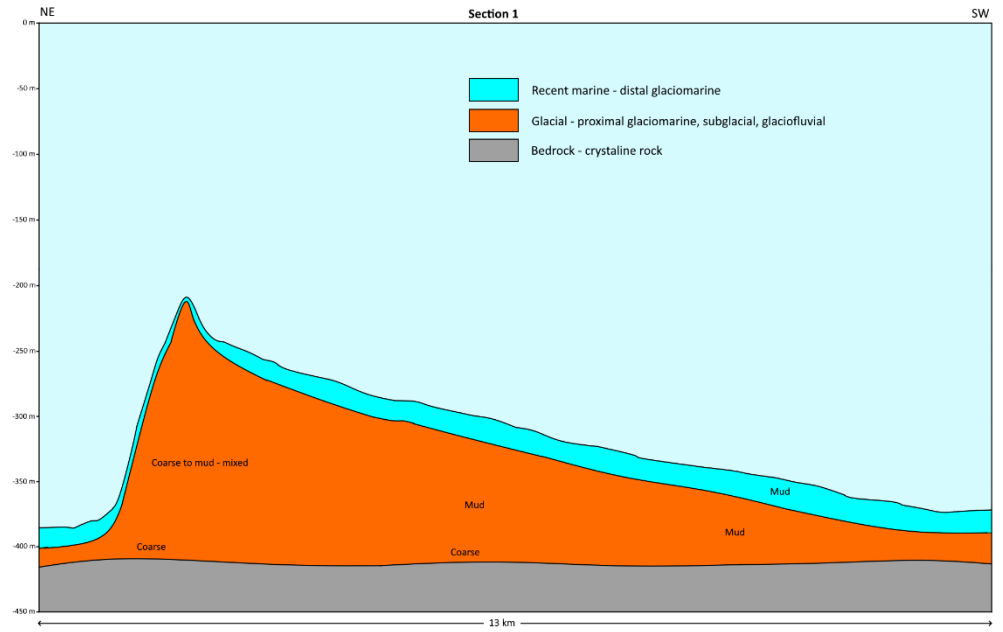
$$TL = L(r_1) - L(r_2) \text{ [dB]}$$

Som regel antages  $r_2 > r_1$ .

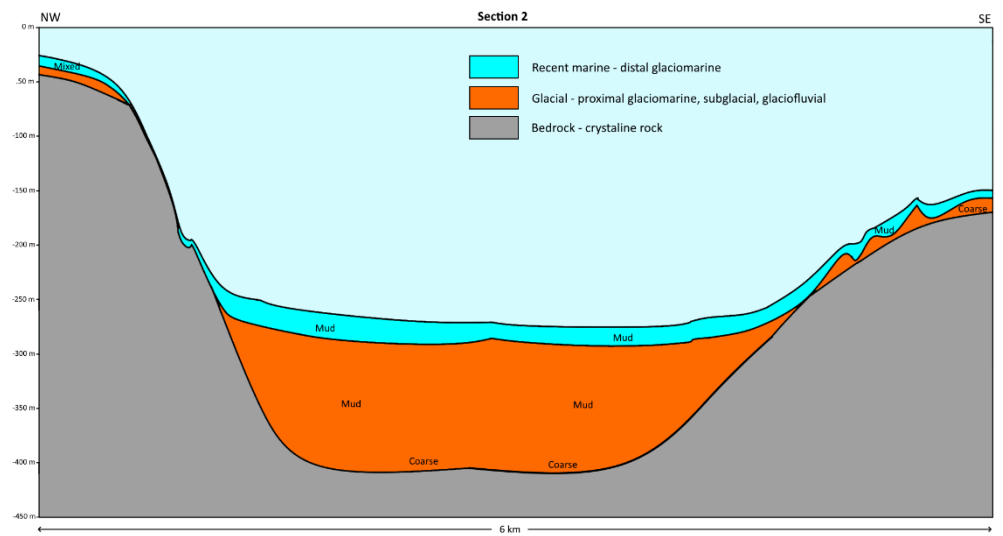
Når  $r_1$  referer til 1 m fra kilden er der specifikt tale om udbredelsestab mellem kildestyrken og en modtageposition  $r_2$ . Her bruges ofte betegnelsen "Propagation Loss", "PL", som for SEL-parameteren er:

$$PL_{E,p} = L_{S,E} - L_{E,p}(r) \text{ [dB]}$$

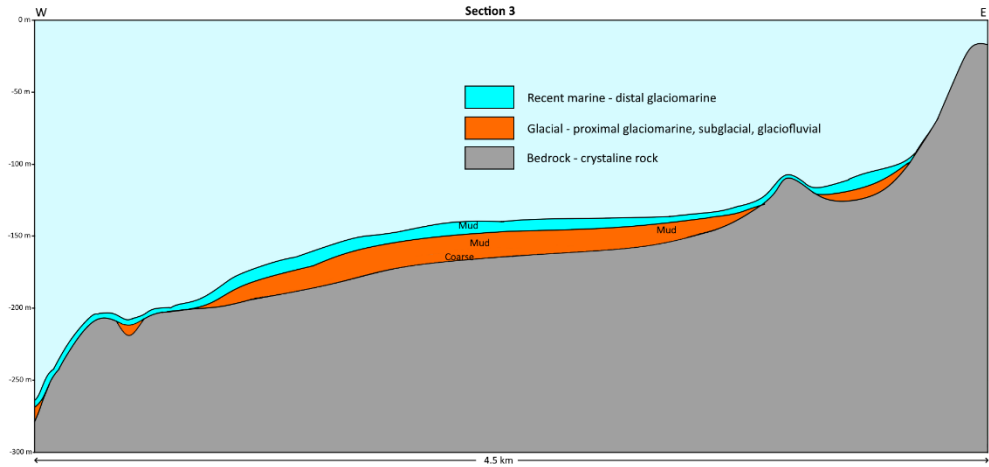
## Bilag B Geologiske profiler



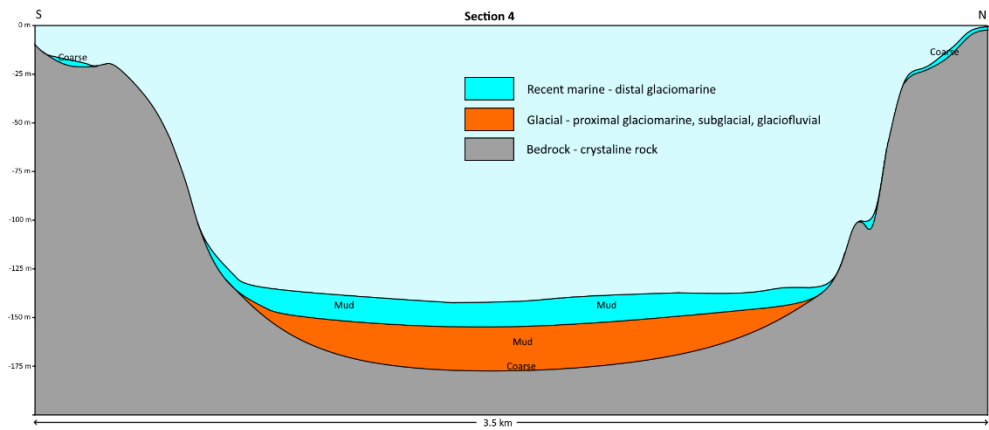
Figur 8-2. Geologisk profil langs Section 1.



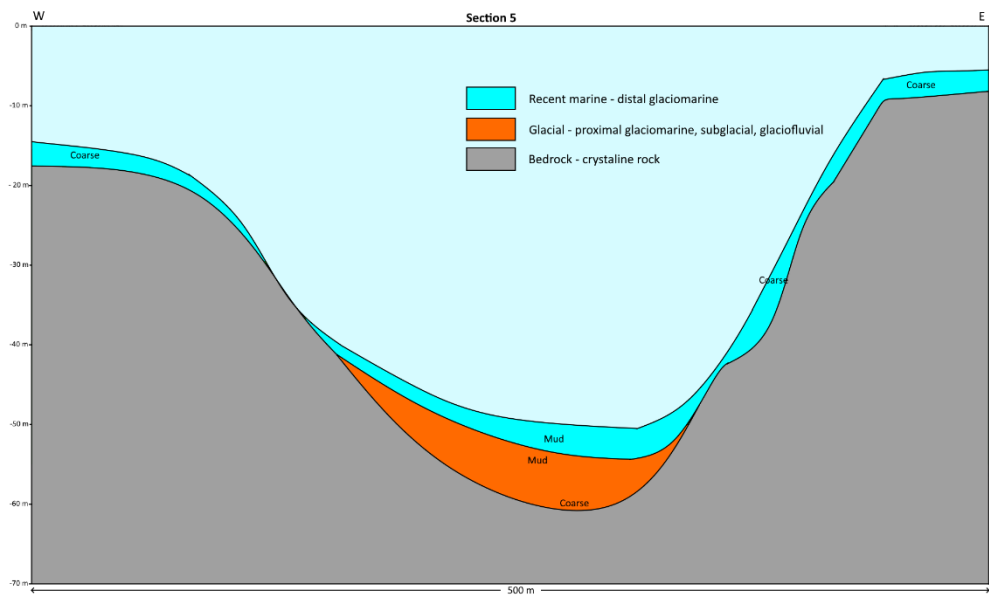
Figur 8-3. Geologisk profil langs Section 2.



Figur 8-4. Geologisk profil langs Section 3.



Figur 8-5. Geologisk profil langs Section 4.



Figur 8-6. Geologisk profil langs Section 5 (havneindsejlingen).