



VURDERING AF EFFEKTER AF UNDERVANDSSTØJ PÅ MARINE ORGANISMER

Del 1 - Målemetoder, enheder og hørelse hos marine organismer

Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 44

2014



AARHUS
UNIVERSITET

DCE - NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

[Tom side]

VURDERING AF EFFEKTER AF UNDERVANDSSTØJ PÅ MARINE ORGANISMER

Del 1 - Målemetoder, enheder og hørelse hos marine organismer

Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 44

2014

Jakob Tougaard

Aarhus Universitet, Institut for Bioscience



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 44
Titel:	Vurdering af effekter af undervandsstøj på marine organismer
Undertitel:	Del 1 - Målemetoder, enheder og hørelse hos marine organismer
Forfatter:	Jakob Tougaard
Institution:	Aarhus Universitet, Institut for Bioscience
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	http://dce.au.dk
Udgivelsesår:	December 2014
Redaktion afsluttet:	December 2014
Faglig kommentering:	Line Hermannsen
Finansiel støtte:	Energinet.dk
Bedes citeret:	Tougaard, J. 2014. Vurdering af effekter af undervandsstøj på marine organismer. Del 1 - Målemetoder, enheder og hørelse hos marine organismer. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 38 s. - Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 44. http://dce2.au.dk/pub/TR44.pdf
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Diskussionen af undervandsakustiske problemstillinger, navnlig når det drejer sig om effekter af undervandslyd på marine organismer, vanskeliggøres af manglen på standardiserede måle- og analysemetoder. I denne rapport er gennemgået en række af de væsentlige fokuspunkter, der er af betydning, hvad enten man selv skal måle eller analysere målinger af undervandsstøj, eller man skal vurdere andres arbejde. Sammenfattende gælder, at: a) måleudstyret skal være velegnet til opgaven; b) variationen i tid og rum skal dækkes ved hjælp af tilstrækkeligt mange og tilstrækkeligt lange målinger; c) standardiserede måleenheder bør anvendes i videst mulig udstrækning; og d) analyserne af målingerne skal være tilpasset de dyr, der er i fokus.
Emneord:	Undervandsstøj, måleudstyr, hørelse, havpattedyr, sæler, marsvin, fisk
Layout:	Anne van Acker
Illustrationer:	Jakob Tougaard
Foto forside:	Jakob Tougaard
ISBN:	978-87-7156-105-0
ISSN (elektronisk):	2244-999X
Sideantal:	38
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som http://dce2.au.dk/Pub/TR44.pdf

Indhold

Sammenfatning	5
English summary	7
1 Indledning	8
2 Grundlæggende undervandsakustik	9
2.1 Tryk og partikelbevægelse	9
2.2 Undervandsstøj	10
3 Måling af lydtryk	12
3.1 Anvendelser af måleudstyr	12
3.2 Karakterisering af lydfelter og lydkilder	14
3.3 Måling af partikelbevægelse	17
4 Karakterisering af undervandslyd	19
4.1 Lydtryk, intensitet og energi	19
4.2 Signalvarighed	22
4.3 Frekvensanalyse	23
4.4 Andre mål	25
5 Hørelse hos marine organismer	27
5.1 Havpattedyr	27
5.2 Fisk	29
5.3 Andre grupper	32
6 Nyttig litteratur	34
7 Referencer	35

[Tom side]

Sammenfatning

Diskussionen af undervandsakustiske problemstillinger, navnlig når det drejer sig om effekter af undervandslyd på marine organismer, vanskeliggøres af manglen på standardiserede måle- og analysemetoder. Resultater fra forskellige studier kan derfor ikke altid sammenlignes direkte, og generalisering af konklusioner er generelt endnu mere vanskelig. I denne rapport er gennemgået en række af de væsentlige fokuspunkter, der er af betydning, hvad enten man selv skal måle eller analysere målinger af undervandsstøj, eller man skal vurdere andres arbejde. Disse fokuspunkter opsummeres herunder.

Måleudstyret skal være velegnet

Måleudstyret skal tilpasses de lyde, man ønsker at optage, hvilket bl.a. indebærer, at følsomheden skal sikre et tilstrækkeligt godt signal-støjforhold, uden at udstyret overbelastes. Alle dele i målekæden, dvs. hydrofoner, forstærkere og optagesystem skal dække det relevante frekvensområde. Udstyret skal være kalibreret for at sikre sammenlignelighed med andres målinger.

Variationen skal dækkes tilstrækkeligt

Lyd, der varierer over tid, i særdeleshed baggrundsstøj, skal karakteriseres statistisk, dvs. med passende mål for median- eller middelværdier og tilsvarende passende mål for variationen (øvre og nedre fraktiler, standardafvigelser eller tilsvarende). Lydudbredelsen omkring en lydkilde skal ligeledes karakteriseres ud fra flere målinger i forskellige afstande og retninger med henblik på at karakterisere lydkildens retningsegenskaber (direktionalitet) og lydtransmissionsforholdene i det omgivende vand.

Selvsagt skal så mange relevante oplysninger vedrørende omstændighederne for målinger angives, ikke bare i relation til det anvendte udstyr, men også miljøparametre (vanddybder, vind- og bølgeforhold, målepositioner) og måleprotokoller angives for herved at øge mulighederne for at sammenligne med andre tilsvarende optagelser.

Standardiserede enheder bør anvendes

Der hersker stor forvirring omkring analysemetoder og især måleenheder i undervandsakustikken. Det er afgørende at følge anvisninger og *de facto* standarder i det omfang, disse findes. Særligt måleenheder udtrykt på dB-skalaen volder erfaringsmæssigt store problemer, og det kan *ikke* tages for givet, at selv *peer-reviewed* videnskabelig litteratur anvender måleenhederne korrekt eller i det mindste bare konsistent. Forskellige studier kan derfor kun sammenlignes med forsigtighed, og det kan være nødvendigt at anvende *worst-case* betragtninger i forhold til at gætte præcis hvilken måleenhed, forfatterne har anvendt. Forskellige måleenheder udtrykt på dB-skalaen kan under ingen omstændigheder sammenlignes, men på trods af dette ses det af og til, også i *peer-reviewed* litteratur, hvilket fører til meningsløse konklusioner.

Analysemetoder bør ligeledes i videst muligt omfang følge almindelig praksis og *de facto* standarder. I tilfælde hvor standardmetoder (som fx udregning af rms-gennemsnit eller 1/3-oktavanalyse) ikke skønnes at være fuldt dækkende i forhold til en konkret problemstilling, bør den nye analyse altid

suppleres med en standardanalyse for herved at sikre størst mulig sammenlignelighed med andre studier.

Analyser skal være tilpasset de dyr, der er i fokus

Analysemetoder skal være tilpasset de konkrete arter involveret og den konkrete problemstilling. Der bør skelnes mellem at karakterisere lyden så komplet som muligt ud fra en fysisk-akustisk betragtning og en bioakustisk karakterisering i forhold til en enkelt art eller en dyregruppe. I første tilfælde (fysisk-akustisk) skal så mange detaljer som muligt beskrives, mens der i det andet tilfælde (bioakustisk) bør foretages en analyse, der i videst muligt omfang tilstræber at beskrive lyden, som dyrene opfatter den og/eller på en måde, der bedst muligt beskriver påvirkningen på dyrene. Til brug for de bioakustiske analyser må man derfor i stort omfang skele til eksisterende viden om funktionen af høresystemerne hos de pågældende dyregrupper.

Målingerne skal som minimum dække enten det frekvensområde, som er relevant for de dyr, der er i fokus, eller hele frekvensområdet for den relevante lyd/støj. Tilsvarende skal det sikres, at måleudstyret er mindst lige så følsomt som dyrenes høreorganer, eller hvis dette ikke er tilfældet, så sikre en bevidsthed om dette i diskussionen af resultaterne. Måleudstyrets egenstøj er især vigtig at have for øje i de tilfælde, hvor man ønsker at konkludere, at en given lyd *ikke* er hørbar for et givent dyr, idet man må sikre sig, at det er dyrets hørelse, og ikke egenstøjen i udstyret, der er den begrænsende faktor.

English summary

Assessment and discussions of impact of underwater noise on aquatic organisms are greatly hampered by the general lack of standards in analysis methods and measuring units. This report summarises points of importance, whether one is measuring sound or evaluating the work of others.

Use of appropriate measuring instruments

Instruments must be appropriate for the sounds one wants to record and with sensitivity that maximizes the signal to noise ratio of the recordings. All parts of the recording chain must have sufficient bandwidth and be properly calibrated to ensure comparability with other measurements.

Sufficient coverage of variation

Sound, which is variable in time, in particular ambient noise, must be characterised by appropriate statistical measures, such as medians and percentiles or other measures of variation. Sound propagation around a sound source should likewise be characterised by multiple measurements in different directions and distances.

Additional information relevant for interpretation of measurements must be given. This includes not only the equipment used but also environmental parameters, measurement positions and measurement protocol.

Use of standards for units and analyses

Agreed and *de facto* standards, if existing, should be followed in analysis and when reporting results. Particular concern connects to the use of the dB-scale, where not even *peer-review* can be taken as a guarantee that usage is correct or at least consistent. Different studies can in many cases not be compared at all and other only with sufficient caution.

In cases where standard analysis methods, such as 1/3-octave spectra or rms-averages, are not considered fully appropriate for a specific application, the results from new analysis methods should always be accompanied with results from standard methods, to allow comparability with other studies.

Analyses adapted to focal animals

Methods for analysing impact must be adapted to the specific objectives. A distinction should be made between making a full characterization of a sound source from a physical/acoustical point of view and a bioacoustics assessment related to a particular species or species group. In the first instance as many features of the sound are to be included but in the latter the objective must be to describe the sound, to the best of abilities, with respect to how it is perceived and may affect the focal species.

Measurements should cover either the entire frequency range of the sound under analysis or the audible range for the focal animal. Likewise the sensitivity of instruments should be at least as large as the auditory system of the focal animal or, if this is not realised, to include this constraint in the discussion of results. Particular attention should be whether the self-noise of recording instruments is the limiting factor for conclusions on impact.

1 Indledning

Der er i disse år stigende opmærksomhed på undervandsstøj og det faktum at kraftig og/eller vedvarende støj i marine miljøer kan påvirke økosystemerne negativt (fx *Slabbekoorn et al. 2010; Clark et al. 2010*). Dette har bl.a. medført generel anerkendelse af, at undervandsstøj skal tages i betragtning ved konsekvensvurderinger af fx anlægsarbejder til havs og andre marine aktiviteter. Senest er undervandsstøj blevet inkluderet som en deskriptor for god miljøtilstand i EU-kommissionens havstrategidirektiv (*EU Kommissionen 2008*), hvorfor medlemslandene er i gang med basisbeskrivelser og fastlæggelse af kriterier for god miljøtilstand (*Tasker et al. 2010; Tougaard 2012*). Side-løbende med dette arbejde pågår også arbejde med fastlæggelse af tålegrænser for støjeksponering af marine organismer (*Southall et al. 2007*).

Vurdering af effekter af undervandsstøj på marine organismer er en tværdisciplinær øvelse, idet der kræves både teknisk indsigt i måling og beskrivelse af undervandslyd og biologisk indsigt i dyrenes hørelse samt effekter af støj. Denne rapport giver en grundlæggende beskrivelse af disse to fagområder, således at fagpersoner med ekspertise i kun den ene disciplin får bedre mulighed for at vurdere og anvende redskaber fra den anden disciplin i konkrete miljøkonsekvensvurderinger, og således at myndigheder og offentlighed kan opnå en tilsvarende baggrund for at forstå detaljerne i disse miljøkonsekvensvurderinger.

Effekter af undervandslyd på marine organismer er ikke gennemgået i denne rapport, der udgør første del af to. Anden del (*Tougaard 2014*) gennemgår de generelle anbefalinger fra *Southall et al. (2007)* og diskuterer tilpasninger af disse anbefalinger til relevante danske arter og forhold.

2 Grundlæggende undervandsakustik

Lyd er ikke en entydig størrelse og det er ofte vanskeligt at trække en skarp grænse mellem lyd og vibrationer og således også mellem hørelse og vibrationssans. I mange tilfælde vil hørelsen være direkte (ørerne reagerer på trykændringer eller partikelbevægelser i vandet), men kan også være indirekte, idet lydbølgerne kan inducere vibrationer i det underlag en organisme sidder på (bunden, vegetationen el.lign.). Disse vibrationer kan opfattes af andre sansorganer (ligevægtsorganer m.m.). Efter en streng definition er dette ikke hørelse, men i sammenhæng med diskussion af negative effekter af lyd på organismer er det mindre væsentligt, om lyden opfattes gennem det ene eller det andet sansesystem. I det følgende vil lyd alene omfatte trykbølger i vand eller luft¹ og afledt heraf henviser hørelse til omsætningen af disse trykbølger til nerveimpulser.

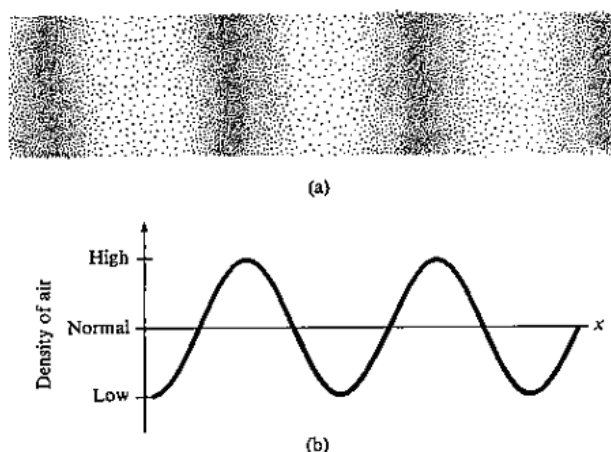
2.1 Tryk og partikelbevægelse

I et lydfelt er energien fordelt på to dele: partikelbevægelse og trykændringer. Luftens eller vandets molekyler bevæger sig frem og tilbage, hvorved der opstår en trykbølge, der bevæger sig væk fra lydkilden med lydets hastighed (figur 2.1). Luftmolekylerne bevæger sig ikke enkeltvist, men som samlede luftmasser (bulk flow), der betegnes akustiske partikler².

Når der er grund til at fremhæve delementerne af lydfeltet, skyldes det, at forskellige organismer i forskellig grad er følsomme over for de to komponenter. Pattedyrs ører er fx kun følsomme overfor trykændringerne, mens mange invertebrater kun er i stand til at registrere partikelbevægelsen. Fisk er følsomme for partikelbevægelsen og i forskellig grad for trykændringer (se senere).

Trykændringerne kan måles ret enkelt i luft med en mikrofon og i vand med en hydrofon, mens partikelbevægelsen er langt mere kompliceret at måle. I vand findes ingen generelt anvendelig målemetode (se afsnit 2.2).

Figur 2.1. Illustration af partikel-tætheden (a) i en lydbølge og de tilsvarende ændringer i trykket (b). Linjen mærket 'normal' svarer til gennemsnitstrykket (svarende til barometerstanden i luft og det omgivende tryk i vand).



¹ Dvs. trykbølger, hvor trykændringerne sker i samme retning som udbredelsesretningen (longitudinalbølger), som er den eneste form for trykbølge, der kan udbredes i luft og i væsker. I faste stoffer findes en række andre former for trykbølger, der ikke er relevante i denne sammenhæng.

² Disse 'partikler' er ikke virkelige, fysiske størrelser, men en matematisk abstraktion. Størrelsen af partiklerne, som er et mål for, hvor stor mængde af luft eller vand der bevæger sig samlet, er frekvensafhængig og er i samme størrelsesorden som bølgelængden af lyden.

Forskelle mellem lyd i luft og vand

Grundlæggende er der ikke forskel mellem den måde lyd opfører sig i luft og i vand, idet der i begge tilfælde er tale om longitudinale trykbølger. I praksis er der dog væsentlige forskelle, som man bør have for øje. De fleste forskelle mellem lyd i vand og luft skyldes den store forskel i massefylden³ af de to medier. Den større massefylde af vand betyder bl.a., at lyd hastigheden (c) er ca. 5 gange højere i vand end i luft (ca. 340 m/s mod ca. 1.500 m/s). Heraf følger, at bølgelængden (λ) ved den samme frekvens (f , svingninger per sekund) er ca. 5 gange større i vand end i luft givet ved sammenhængen $\lambda = \frac{c}{f}$.

Den store forskel i massefylde har desuden betydning for den måde lyd reflekteres på. Lyd reflekteres fra en overflade, såfremt der er en væsentlig forskel i massefylde mellem mediet (vand eller luft) og overfladen. For lyd i vand betyder det, at de kraftigste refleksioner kommer fra undersiden af vandoverfladen og fra luftbobler, der måtte være i vandet eller inde i dyr eller planter. Objekter, der har en større massefylde end vand (sten, havbund, metal osv.), vil også kunne reflektere lyden, hvorimod lyd passerer stort set uhindret gennem mange typer af biologisk væv, der har en massefylde meget tæt på vands.

En anden forskel, der hænger sammen med massefylden, er, at vand i modsætning til luft stort set ikke kan presses sammen. Det betyder, at en lyd med samme akustiske energi i hhv. luft og vand vil resultere i to helt forskellige forhold mellem partikelbevægelse og lydtryk. I vand vil selv en lille sammenpresning kræve et meget stort tryk og derfor vil der for den samme mængde energi opstå et langt højere lydtryk, men langt mindre partikelbevægelse, i forhold til i luft⁴. De forskellige egenskaber i de to medier har altså væsentlige konsekvenser for størrelsesordenen af lydtryk og intensitet, og man skal derfor, som udgangspunkt, undgå direkte sammenligning af lydtryk mellem luft og vand.

2.2 Undervandsstøj

Det er stort set umuligt at definere støj på en generel og entydig måde. I de fleste definitioner er støj noget uønsket i modsætning til et signal, som er en lyd man (dyr eller menneske) ønsker at opfatte. Problemet med en sådan definition er, at forskellige organismer har forskellig opfattelse af, hvad der er signal og hvad der er støj. Desuden kan et individ opfatte den samme lyd som støj i én sammenhæng og som signal i en anden (lyden af artsfæller kan være signal, hvis man søger en partner, men støj hvis man søger efter føde). I forbindelse med vurdering af negative effekter af støj er følgende definition brugbar og videre anvendt i denne rapport:

Støj: Lyd, der i den givne situation, for et givent individ, er uønsket, da den påvirker dyrets fysiologi eller adfærd negativt eller interfererer med dyrets muligheder for at opfatte andre lyde af betydning for dyret.

Man taler ofte også om **baggrundsstøj** for hvilken en almindelig udbredt definition er: Den del af støjbilledet der er tilbage, hvis man forestillede sig, at man kunne fjerne alle individuelt identificerbare lydkilder; populært sagt,

³ Mere præcist den specifikke akustiske impedans, ρc , som er produktet af lyd hastigheden og massefylden.

⁴ Udtrykt mere præcist: $p/u = \rho c$, hvor p er tryk og u er partikelhastighed. ρc for vand er $1.5 \cdot 10^6$ Pa s/m og for luft 416 Pa s/m, dvs. den samme akustiske energi resulterer i 3.600 gange så højt tryk i vand som i luft, med tilsvarende lavere partikelhastighed.

den 'susen', der er tilbage, når man har fjernet alle de dele, man kan høre hvad er (fx individuelle skibe, kald fra enkeltdyr osv.). Såfremt alle menneskelige bidrag kunne fjernes, taler man om den **naturlige baggrundsstøj**.

Når det kommer til at karakterisere støj i form af målinger eller modelleringer, så kan det være nyttigt at skelne mellem to begreber: lydbilledet og det akustiske miljø.

Lydbilledet (engelsk: 'soundscape'): det totale lydfelt målt i et bestemt punkt eller område.

Det akustiske miljø (engelsk: 'acoustic habitat'): den del af det totale støjbillede, der er relevant for en given organisme.

Lydbilledet er således den lyd, der kan måles med dertil indrettet måleudstyr og er en fysisk beskrivelse af lyden. Det akustiske miljø er den delmængde af lydbilledet, der er relevant for en given organisme, dvs. den del af lydbilledet som dyret kan høre og reagerer på. Når det er nyttigt at skelne mellem de to begreber, skyldes det, at man sagtens kan forestille sig to organismer, der lever det samme sted og dermed er udsat for det samme lydbillede, men alligevel lever i hver deres akustiske miljø. Det akustiske miljø for fx en sæl vil være helt domineret af tryk-delen af lydbilledet, mens det akustiske miljø for dens byttedyr, fladfisk, vil være helt domineret af den del af lydbilledet, der udgøres af partikelbevægelserne (se kapitel 5). De to arter lever side om side, men oplever helt forskellige akustiske miljøer og kan dermed også være helt forskelligt påvirket af den samme støj.

3 Måling af lydtryk

Når man måler og angiver undervandsstøj, må man holde tre forhold for øje:

1. Afspejler den enkelte måling den faktiske lyd i målepunktet?
2. Giver en måleserie, bestående af flere enkeltmålinger en repræsentativ beskrivelse af lydkilden og/eller lydfeltet omkring lydkilden?
3. Udtrykkes målingerne på en måde og med enheder, der gør det muligt at vurdere biologiske effekter af lyden?

Punkt 1 er i realiteten et spørgsmål om måleteknik. Punkt 2 er statistisk af natur og kræver viden om lydkilden og lydtransmissionsegenskaberne i miljøet. Punkt 3 forudsætter, at lyden kan kvantificeres på måder, der giver mening i forhold til marine organismers fysiologi, hørelse og adfærd over for akustiske stimuli. Punkt 1 og 2 gennemgås i det følgende, mens punkt 3 gennemgås i anden del af rapporten (*Tougaard 2014*).

Adskillige institutioner og organisationer (bl.a. International Organization for Standardization (ISO) og American National Standards Institute (ANSI)) har nedsat arbejdsgrupper og komitéer med det formål at fastsætte nationale og internationale standarder for måling og beskrivelse af undervandsstøj. Arbejdet har endnu ikke mundet ud i generelle standarder. Foreløbigt begrænser de sig til specialiserede områder såsom en ANSI-standard for måling af støj fra skibe (*Anon 2009*) og arbejde vedrørende støj fra havvindmøller i Nederlandene (*de Jong et al. 2010*) og Tyskland (*Müller & Zerbs 2011*).

3.1 Anvendelser af måleudstyr

Der er en del faldgruber og muligheder for fejl ved måling af undervandslyd. Selvom det ligger uden for formålet at gennemgå målemetoderne i detaljer her (der henvises til den tekniske litteratur), er det alligevel nyttigt at nævne de væsentligste faktorer, man skal tage højde for, ikke bare når man selv foretager målingerne, men i særdeleshed når man vurderer kvaliteten af andres arbejde.

Udgangspunktet for enhver måling er, at hydrofoner, forstærkere og optagesystemer (i dag hyppigst analog-til-digital-konvertere) skal være kalibrerede og have tilstrækkelig båndbredde og dynamik til at kunne registrere det faktiske lydtryk, der rammer hydrofonen.

Kalibrering

Kalibrering er et emne for sig og yderligere detaljer overlades til andre kilder (*Levin 1973; Urlick 1983; Au & Hastings 2008*). Det helt centrale i en kalibrering er naturligvis, at den tillader, at lydtryk kan udtrykkes i absolutte enheder (Pascal som funktion af tid, eller forskellige afledte enheder heraf). Den mest direkte kalibreringsmetode består i at optage lyden fra en kendt lydkilde med kendt lydtryk med præcis det måleudstyr, der senere skal anvendes på den ukendte lydkilde. Kalibrering af hydrofoner i vand er omstændigt og kræver adgang til en egnet måletank af tilstrækkeligt store dimensioner, og det nemmeste kan ofte være at betale sig fra det hos firmaer/institutioner som Reson, Brüel & Kjær eller National Physics Laboratory,

U.K. Alternativt findes standardlydkilder (pistonfoner) fra firmaer som Brüel & Kjær og G.R.A.S., der kan bruges til kalibrering af hydrofoner i luft, hvilket gør kalibreringen meget enkel. Ulempen ved pistonfonkalibrering er, at den foregår ved kun én frekvens (250 Hz) og således ikke kan erstatte en fuld kalibrering over hele det frekvensområde, der måles i.

Båndbredde

Båndbredden, det frekvensområde hvorover udstyret kan foretage målinger, må være tilpasset opgaven og skal altid angives ved målinger. Der er to tilgange til båndbredde: tilpasse den til lydkilden man skal måle på, eller tilpasse den efter hørelsen hos den/de organismer, der tænkes påvirket af lyden. I nogle sammenhænge er den ene tilgang at foretrække, i andre tilfælde den anden. Det væsentlige er naturligvis at forstå, hvad der i sidste ende begrænser de mulige konklusioner, der kan drages om lyden.

Den øvre frekvensbegrænsning er relativt ligetil, idet man må måle op til enten den øvre frekvensgrænse for, hvor der er signifikant energi i signalet, eller den øvre høregrænse for det/de dyr, det drejer sig om. Begrænser man målingen til lave frekvenser, fordi man ønsker at vurdere effekter på organismer med dårlig højfrekvenshørelse (som fx fisk), skal man være opmærksom på, at man derved kan afskære sig fra at anvende de samme optagelser til at vurdere effekter på dyr med bedre hørelse ved høje frekvenser. Af samme grund er det afgørende, at den øvre frekvensbegrænsning altid angives for optagelser, for derved at gøre det muligt for andre at vurdere brugbarheden af målingerne i andre sammenhænge.

Den nedre frekvensbegrænsning kan være mere vanskelig at håndtere, da det er teknisk vanskeligt at måle ved meget lave frekvenser. Normalt vil udstyr (hydrofoner og forstærkere) have en nedre begrænsning ved omkring 5-10 Hz, hvilket er tilstrækkeligt for vurdering af effekter på havpattedyr, men ikke nødvendigvis er tilstrækkeligt for fisk, hvis hørelse i realiteten ikke har nogen nedre frekvensgrænse (se kapitel 5 om hørelse). Lyd ved så lave frekvenser vil imidlertid under de fleste omstændigheder i de lavvandede danske farvande have uhyre vanskeligt ved at udbrede sig væk fra lydkilden (se afsnit 3.2 om transmissionstab) og medmindre man har behov for at måle og vurdere effekter meget tæt på lydkilden, vil den nedre frekvensbegrænsning ikke have nogen praktisk betydning.

Båndbredden for hele målekæden (hydrofon, forstærker og optageenhed) angives ofte som øvre og nedre -3 dB punkter, dvs. de frekvenser hvor følsomheden er reduceret med 3 dB i forhold til følsomheden i det bedste område. Andre angivelser ses også, fx -10 dB frekvenser. For digitale optagesystemer vil samplinghastigheden sætte en absolut grænse for båndbredden, idet frekvenser højere end det halve af samplingraten (Nyquistfrekvensen) ikke vil repræsenteres korrekt i digitaliseringen. En passende lavpasfiltrering (anti-aliasing filter) må altid anvendes til begrænsning af båndbredden, såfremt der findes energi i signalet over Nyquistfrekvensen.

Dynamikområde

Dynamikområdet beskriver den øvre og nedre begrænsning for målesystemets funktion i forhold til signalstyrke (amplitude). Dynamikområdet overes ofte som betydende faktor, men kan sætte alvorlige begrænsninger på mulighederne for at tolke målingerne og skal derfor også altid angives. Problemer kan opstå både i den øvre og nedre ende af dynamikområdet.

Hvis der optages signaler med en amplitude, der overstiger dynamikområdet, vil der opstå klipping (overstyring) af signalerne. Dette betyder naturligvis, at man ikke er i stand til at bestemme den nøjagtige amplitude af signalet, men kun kan angive en minimumsværdi (= klippingsniveauet). Værre er imidlertid, at klipping forårsager irreversible ændringer i frekvensspektrret, hvilket gør det umuligt at udtale sig om frekvensindholdet i et klippet signal. Klippingsniveauet bør derfor altid angives sammen med målinger, især når der er tale om målinger på kraftige, korte impulser.

Signaler med amplitude under den nedre grænse for dynamikområdet (udstyrets følsomhed) vil naturligvis slet ikke kunne registreres og derfor kunne passere ubemærket. Dette kan i mange tilfælde have afgørende betydning, da følsomheden af mange biologiske ører kan overstige følsomheden af målesystemerne, især hvis disse ikke er tilpasset måling af meget lave amplituder. Herved kan man i værste fald overse komponenter af lyden, som er af betydning for dyrene reaktioner på signalerne. Målinger bør altid ledsages af en angivelse af hele målesystemets egenstøj, som er den støj måleudstyret selv genererer og som sætter den nedre grænse for dynamikområdet.

Begrænsningen i det dynamiske område kan ligge i alle dele af målesystemet: hydrofon, forstærker eller optagesystem (A/D-konverter). Den øvre grænse sættes som oftest af A/D-konverterens øvre grænse for input eller spændingsforsyningen til forstærkeren. Ved måling på meget kraftige lyd-kilder må man begrænse følsomheden af udstyret ved at minimere forstærkningen og/eller vælge en hydrofon med meget lav følsomhed. Dette vil uundgåeligt have konsekvenser for den nedre dynamikgrænse. Den nedre dynamikbegrænsning sættes af egenstøjen i forstærkeren (i kombination med den pågældende hydrofon) eller af opløsningen af A/D-konverteren. A/D-konvertere har typisk en opløsning på mellem 8 og 24 bit, hvilket i teorien svarer til hhv. 48 dB og 144 dB (forskellen mellem laveste signalstyrke og højeste signalstyrke, der kan optages). I praksis er det dynamiske område mindre end det teoretiske, specielt for 16 og 24 bit systemer, ikke mindst fordi det også er vanskeligt at få forstærkere med tilsvarende dynamik.

Ved måling af undervandsstøj med følsomme hydrofoner og gode forstærkere vil man ofte opleve at baggrundsstøjen i havet er den nedre begrænsning, hvilket er en optimal situation, da denne begrænsning også vil være gældende for de dyr, der befinder sig i havet på det pågældende sted.

3.2 Karakterisering af lydfelter og lyd-kilder

En ting er at få en troværdig måling af lydtrykket i et enkelt punkt, en anden ting er, hvorvidt denne måling er repræsentativ for hele lydfeltet, og om den kan bruges til at karakterisere lyd-kilden generelt. Dette kræver som oftest, at en række målinger gennemføres i forskellig afstand til kilden, i forskellig vinkel til kilden og over en længere periode for at opsamle variation i lyd-udsendelsen/transmissionen over tid (som følger ændringer i miljøet, fx temperatur og salinitet). For at målinger på enkeltkilder skal kunne generaliseres og sammenlignes, er det nyttigt at normalisere værdierne, hvilket typisk gøres ved at tilbageregne lydtryk til en afstand af 1 m fra kilden (kildestyrke).

Transmissionstab og kildestyrke

Når man har en måling i en given afstand r fra lyd-kilden, er det nyttigt at normalisere lydtrykket til en standardafstand, typisk 1 m, for at kunne

sammenligne med andre målinger på andre kilder i andre afstande. I princippet er det simpelt via nedenstående relation:

$$RL = SL - TL \Leftrightarrow SL = RL + TL$$

hvor RL er det modtagne lydtryk (received level), SL er kildestyrken (source level) og TL er transmissionstabet (transmission loss) fra 1 meters afstand ud til afstand r.

Den væsentlige funktion af kildestyrken er en normalisering af lydtryksværdier, således at målinger foretaget i forskellig afstand kan sammenlignes. I mange tilfælde, i særdeleshed når der er tale om lydskilder med en fysisk stor udbredelse (såsom et skib eller en kæde af luftkanoner), er det faktiske lydtryk 1 m fra kilden forskelligt fra den beregnede lydstyrke, hvilket skyldes nedennævnte nærfeltseffekter. Kildestyrken skal således betragtes som det lydtryk, der ville være 1 m fra lydkilden, såfremt lyden udstrålede fra et enkelt punkt⁵.

Det kritiske i beregning af kildestyrke består i at estimere transmissionstabet. Det kan enten beregnes teoretisk eller bestemmes ved hjælp af en empirisk model. I begge tilfælde forudsætter beregningerne, at man har foretaget en række målinger i passende stor afstand fra lydkilden, således at man er uden for det akustiske nærfelt.

Nærfeltet kan defineres på flere måder, men fælles for alle er, at nærfeltet er karakteriseret ved, at der ikke er en simpel sammenhæng mellem ændring af afstanden til lydkilden og ændring i det målte lydtryk. Dette skyldes primært to faktorer: bidraget fra partikelbevægelsen og den fysiske størrelse af lydkilden og dette giver ophav til to forskellige typer af nærfelter: det hydroakustiske nærfelt og Fresnell-nærfeltet.

Det hydroakustiske nærfelt

Tæt på en lydkilde kan partikelbevægelsen dominere over lydtrykskomponenten, samtidigt med at der ikke er nogen simpel sammenhæng mellem afstand til lydkilden og forholdet mellem lydtryk og partikelbevægelse. Det betyder, at man ikke ud fra målinger i forskellig afstand fra lydkilden på simpel vis kan estimere transmissionstabet på og dermed beregne kildestyrken i 1 meters afstand. Hvor langt væk fra lydkilden det hydroakustiske nærfelt strækker sig afhænger primært af lydets bølgelængde, men også af lydkildens geometri. Som tommelfingerregel vil man forvente at kunne se nærfeltseffekter i afstande på under et par bølgelængder fra lydkilden. For et stort fragtskib på åbent hav, hvor hovedparten af energien findes ved meget lave frekvenser (1-100 Hz), vil nærfeltet således kunne strække sig flere hundrede meter fra skibet. For en ekkolodssvinger ved 100 kHz vil det hydroakustiske nærfelt imidlertid være meget begrænset og strække sig få cm fra svingeren.

Fresnell-nærfeltet

Fresnell-nærfeltet, er et nærfelt som opstår på grund af lydkildens fysiske udstrækning. Når man kommer tilstrækkeligt tæt på en lydkilde, kan den ikke længere betragtes som et punkt, og lyden fra de forskellige dele af lyd-

⁵ Man ser her vanskelighederne med store lydkilder såsom et 30 m langt skib. Her findes ikke ét enkelt punkt, hvor lyden udsendes og dermed heller ikke noget entydigt defineret punkt, der med rimelighed kan siges at være 1 m fra lydkilden.

kilden vil ankomme til målehydrofonen med små eller større tidsforskelle, der vil give sig udslag i komplicerede interferensmønstre. Disse nærfeltseffekter er uden praktisk betydning for lyde med bølgelængder betydeligt større end lydkildens fysiske udstrækning, men bliver mere udtalte ved stigende frekvens, hvor man kan forvente at finde effekter ud i afstande adskillige gange størrelsen på lydkilden. Denne effekt er særligt udtalt for meget store lydkilder, som fx en kæde af seismiske luftkanoner, der kan have en længde på adskillige hundrede meter og derfor også et Fresnell-nærfelt, der strækker sig ud i tilsvarende stor afstand.

Modeller for transmissionstab

Den simpleste model for transmissionstab er såkaldt sfærisk spredning. Hvis lydkilden er i et homogent medium (med konstant lydhastighed) og i stor afstand fra reflekterende overflader, så vil lydenergien udbrede sig som en kugleskal med stadig stigende diameter og dermed overflade. I tilgift hertil vil en smule af den akustiske energi løbende omdannes til varme (kaldet absorption). Transmissionstabet fra afstanden r_0 til r er således givet ved:

$$TL = 20 \log \left(\frac{r}{r_0} \right) + \alpha(r, f)$$

hvor r_0 er referenceafstanden (1 m såfremt man regner ud fra kildestyrken) og α er den frekvensafhængige absorption. Ved mindre afstande og ved lave frekvenser er absorptionen reelt uden betydning, men for større afstande og især for frekvenser over 10 kHz kan absorptionen antage en betragtelig størrelse. Se *Urick 1983* og *Ainslie & McColm 1998* for empiriske formler til bestemmelse af absorptionen.

En anden simpel model for transmissionstab er den såkaldte cylindriske spredning, hvor det antages, at lyden reflekteres fuldstændigt fra undersiden af havoverfladen og fra havbunden, og dermed udbreder sig som den krumme overflade på en cylinder af samme højde som vanddybden. Herved fås:

$$TL = 10 \log \left(\frac{r}{r_0} \right) + \alpha(r, f)$$

I praksis er begge modeller grove forsimplinger og har dermed begrænset generel anvendelighed. Det største problem er antagelsen om en konstant lydhastighed ned gennem vandsøjlen. Det er med sikkerhed ikke tilfældet på dybere vand, da det højere tryk med stigende dybde i sig selv påvirker lydhastigheden. Tilstedeværelsen af thermo- eller halokliner (henholdvis temperatur- og saltspringlag) i vandsøjlen gør blot problemet endnu større. I disse tilfælde vil det være nødvendigt at anvende mere sofistikerede modeller for lydtransmission, som dog ikke kommer nærmere ind på her. Se fx *Urick 1983* og *Kuperman & Lynch 2004*.

Direktionalitet

De færreste lydkilder er fuldstændigt symmetriske i deres lydudsendelse, dvs. lydtrykket i forskellig retning fra lydkilden er ikke det samme selvom afstanden er konstant. Det gør det nødvendigt at karakterisere denne direktionalitet som led i beskrivelsen af lydkilden. For store lydkilder (fx skibe)

på lavt vand vil det i mange tilfælde være tilstrækkeligt at beskrive direktionaltiteten i det horisontale plan, hvorimod det også er nødvendigt at have den vertikale direktionaltitet med på dybt vand og for mindre lydkilder (fx et ekkolod). Direktionaltiteten for ekkolod, sonar og andre lydkilder med en smal hovedstråle (uden megen energi udenfor strålen) kan opgives som den vinkel fra centralaksen, hvor lydtrykket er faldet 3 dB i forhold til maksimum. For andre lydkilder må direktionaltiteten angives ved hjælp af et cirkulært (polært) plot, hvor lydtrykket beskrives i alle retninger fra kilden.

3.3 Måling af partikelbevægelse

Der findes ingen generelt anvendelig metode til måling af partikelbevægelse i vand, men der findes flere metoder med begrænset anvendelighed afhængigt af de konkrete omstændigheder.

Beregning ud fra lydtryk

Under fritfelt-betingelser, dvs. langt fra reflekterende overflader og i stor afstand fra lydkilden⁶, er forholdet mellem partikelhastighed og lydtryk konstant og en måling af lydtrykket kan således omregnes til partikelhastighed:

$$\frac{p}{|u|} = \rho c \Leftrightarrow |u| = \frac{p}{\rho c}$$

hvor p er lydtrykket, u er partikelhastigheden, ρ er vands massefylde og c er lyd hastigheden. Denne metode er enkel, men giver kun et delvist billede af partikelbevægelsen, idet partikelbevægelsen reelt er en tredimensionel vektor, dvs. den har en retning. Lydtrykket derimod er en skalar uden retningsinformation og formelen ovenfor giver derfor alene størrelsen på partikelhastigheden ($|u|$) og ikke retningen.

Måling af trykgradient

Lydintensiteten (I , målt i W/m^2) i et lydfelt er givet ved produktet af lydtrykket p og partikelhastigheden u :

$$I = pu$$

Intensiteten kan imidlertid også beregnes ud fra lydtrykket alene under fritfeltsbetingelser (langt fra reflekterende overflader) og uden for det akustiske nærfelt:

$$I = \frac{p^2}{\rho c}$$

hvor ρ er vands massefylde og c er lyd hastigheden. Måler man nu lydtrykket i to forskellige afstande fra lydkilden, kan man kombinere de to sammenhænge og herved beregne:

$$u = -\frac{1}{\rho \cdot \Delta r} \int (p_1 - p_2) dt$$

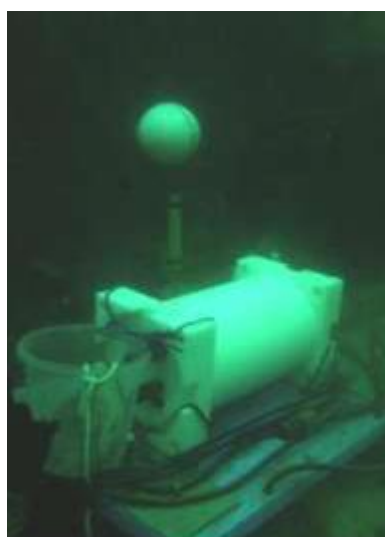
⁶ 'Stor' skal forstås i relation til både lydets bølgelængde og den fysiske størrelse af lydkilden.

(Christensen-Dalsgaard et al. 1990). Den praktiske udførelse af målingerne er vanskelig. For det første afhænger nøjagtigheden i målingen af afstanden mellem hydrofonerne, og den optimale afstand er afhængig af bølgelængden, hvorved man må måle flere gange eller anvende mange hydrofoner, hvis man skal dække et bredt frekvensområde. For det andet bør man måle trykgradienten langs alle tre akser (x , y og z) for at få en fuldstændig beskrivelse af den tredimensionelle vektor, hvilket ligeledes øger antallet af hydrofoner og/eller målinger.

Direkte måling af partikelacceleration

Partikelbevægelsen kan måles direkte ved hjælp af specielt byggede sensorer, primært baseret på triaksiale accelerometre (Sigray & Andersson 2011). Denne metode er robust og pålidelig til målinger inden for den båndbredde udstyret er beregnet til, men der findes endnu ikke kommercielt tilgængelige systemer. Eksisterende systemer er desuden ret store og derfor kun egnet til brug i laboratorier eller til udlægning på havbunden (figur 3.1).

Figur 3.1. Triaksialt accelerometer med dataopsamlingsenhed anbragt på havbunden. Selve accelerometerenheden findes i den hvide kugle, der har samme massefylde som det omgivende vand og dermed svæver neutralt i vandet. Kuglens diameter er 20 cm. Fra Sigray & Andersson 2011.



Indirekte måling af partikelhastighed

Den sidste metode til måling af partikelbevægelse er particle imaging velocimetry (PIV). Et PIV-system udregner partikelbevægelsen ud fra to eller flere billeder optaget meget kort tid efter hinanden. Hvis passende fysiske partikler er til stede i vandet, hvilket der ofte er helt naturligt i havvand, kan et PIV-system beregne partikelhastighederne for disse partikler ved at sammenligne billederne. Metoden er meget nøjagtig, men meget vanskelig at anvende uden for laboratoriet.

4 Karakterisering af undervandslyd

Signaler kan kvantificeres og beskrives på mange måder og ikke alle er lige relevante for biologiske problemstillinger. I det følgende gennemgås en række kvantitative mål og analysemetoder, der ofte anvendes i sammenhæng med vurdering af effekter af støj på dyr og mennesker. Der findes ingen standard-nomenklatur for undervandsakustik, så benævnelser kan afvige i andre fremstillinger, ligesom enhederne kan være anderledes, navnlig i ældre litteratur. De beskrevne størrelser involverer alle, på den ene eller anden måde, en beskrivelse af signalernes varighed, intensitet/energi og frekvensindhold, enten hver for sig eller i en kombination.

4.1 Lydtryk, intensitet og energi

I forbindelse med vurdering af effekter af støj på levende organismer kan man angive påvirkningen på forskellig måde, enten som lydtryk, energi eller i sjældne tilfælde intensitet. Da man i praksis måler lyden med en hydrofon, der måler lydtryk, er det bekvemt at starte med dette. Instantant lydtryk er den øjeblikkelige afvigelse fra det gennemsnitlige (omgivende) tryk (se figur 2.1) og måles i Pascal (Pa). En komplet måling af lydtryk består af en serie af lydtryksmålinger som funktion af tid. For et analogt signal af varighed T udtrykkes målingen som $p(t)$, $t = [0;T]$, for et digitalt signal som p_i , $i \in [1;N]$, svarende til N målinger (samples) i løbet af en periode på $T = N/sr$, hvor sr er samplingshastigheden i Hz. Lydtrykket, intensiteten (effekten) og energien i disse signaler kan udtrykkes på flere forskellige måder, hvoraf de væsentlige er angivet i tabel 4.1. Der er to måder at angive intensitet og energi på, enten med udgangspunkt i et referencelydtryk på $1 \mu\text{Pa}$ (for lyd i vand), eller refereret til hhv. $1 \text{ pW}/\text{m}^2$ og $1 \text{ pJ}/\text{m}^2$. Der er principielt ikke forskel på de to måder at angive niveauerne, men angivelsen afhænger af sammenhængen. Ofte anvendes notationen med referencelydtrykket $1 \mu\text{Pa}$ på grund af beregningsmæssige fordele, hvilket giver enhederne μPa^2 og $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ for hhv. intensitet og energi. Energi (L_E) refereret til $1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$ angives som SEL (sound exposure level) af Southall et al. 2007. Af hensyn til folk, der ikke er fortrolige med undervandsakustik, er det imidlertid stærkt anbefalelsesværdigt at bruge enhederne pW/m^2 og pJ/m^2 som reference, idet man herved klart angiver hvilken størrelse, der er tale om: hhv. Watt for intensitet og Joule for energi, samtidigt med at enheder, hvor Pascal optræder reserveres til lydtryk⁷.

dB-skalaen

Lydtryk og energi udtrykkes ofte ved hjælp af decibel (dB)-skalaen. Da tryk i vand og luft som nævnt ovenfor ikke kan sammenlignes, kan dB-værdier angivet for lyd i de to medier heller ikke sammenlignes. Angivelse af lydtryk i vand ved hjælp af dB-skalaen må derfor alene betragtes som en relativ angivelse af lydtrykket i forhold til den arbitrære reference $1 \mu\text{Pa}$ ⁸.

Meget korte og stereotype signaler, fx seismiske målepulser, karakteriseres oftest ved spids-lydtrykket (L_{peak}), eller spids-spids lydtrykket (L_{pp}). For længere signaler, hvor amplituden kan variere betragteligt gennem signalets varighed er et rms-gennemsnitsmål (L_{eq}) oftest mere informativt.

⁷ Forskellen mellem værdier refereret til $1 \mu\text{Pa}$ og hhv. $1 \text{ pW}/\text{m}^2$ eller $1 \text{ J}/\text{m}^2$ er 62 dB (se næste afsnit vedr. dB-skalaen).

⁸ I luft anvendes referencen $20 \mu\text{Pa}$, hvilket yderligere bidrager til vanskeligheder med sammenligning mellem de to medier.

Tabel 4.1. Forskellige mål til karakterisering af undervandslyd

	Analogt signal	Digitalt signal	Udtrykt i dB
Nul-til-spids lydtryk (Zero to peak pressure level)	$p_{peak} = \max(p(t))$	$p_{peak} = \max(p_i)$	$L_{peak} = 20 \log\left(\frac{p_{peak}}{p_0}\right)$ [dB re. 1 μPa (zero to peak)]
Spids-til-spids lydtryk (Peak-peak pressure level)	$p_{pp} = \max(p(t)) - \min(p(t))$	$p_{pp} = \max(p_i) - \min(p_i)$	$L_{pp} = 20 \log\left(\frac{p_{pp}}{p_0}\right)$ [dB re. 1 μPa (peak-peak)]
Ækvivalent kontinuerligt lydtryk (rms) (Equivalent continuous sound pressure level)	$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt}$	$p_{rms} = \sqrt{\frac{\sum p_i^2}{N}}$	$L_{eq} = 20 \log\left(\frac{p_{rms}}{p_0}\right)$ [dB re. 1 μPa (rms)]
Intensitet 1 (i frit felt) (Power)	$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho c}$	$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho c}$	$L_I = 10 \log\left(\frac{p_{rms}^2}{\rho c p_0^2}\right) = L_{eq} - 62 \text{dB}$ [dB re. 1 pW/m^2]
Intensitet 2 (Power)	$I = p_{rms}^2$	$I = p_{rms}^2$	$L_I = 10 \log\left(\frac{p_{rms}^2}{p_0^2}\right) = L_{eq}$ [dB re. 1 μPa^2]
Energi, lydeksponering 1 (frit felt) (Energy, sound exposure level)	$E = \frac{1}{\rho c} \int_0^T p(t)^2 dt$	$E = \frac{1}{\rho c} \sum_{i=1}^N p_i^2$	$L_E = 10 \log\left(\frac{E}{E_0}\right) = L_{eq} + 10 \log(T) - 62 \text{dB}$ [dB re. 1 pJ/m^2]
Energi, lydeksponering 2 (SEL sensu Southall et al. 2007)	$E = \int_0^T p(t)^2 dt$	$E = \sum_{i=1}^N p_i^2$	$L_E = 10 \log\left(\frac{E}{p_0^2}\right) = L_{eq} + 10 \log(T)$ [dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$]

For vedvarende lyd, såsom baggrundstøj, giver alene L_{eq} mening. Også intensitet og energi kan angives som dB, hhv. L_I og L_E . De forskellige mål er ikke alle anvendelige til alle typer signaler. Signaler kan opdeles på mange måder, herunder følges *Southall et al. 2007*.

Korte, transiente signaler

Omtalt som 'pulses' i *Southall et al. 2007*. Korte signaler med meget brat start, eller som består af kun meget få svingninger, er ikke velbeskrevet med rms-mål (*Madsen 2005*), idet den udregnede værdi for L_{eq} afhænger kritisk af den signalvarighed, T , der vælges. For disse signaler er totalenergien (L_E), nul-til-spids eller spids-til-spids værdier, klart at foretrække. Såfremt L_{eq} alligevel anvendes, er det afgørende samtidigt at angive hvilken signalvarighed (T) rms-gennemsnittet er udregnet over.

Længere, ikke-kontinuerlige signaler

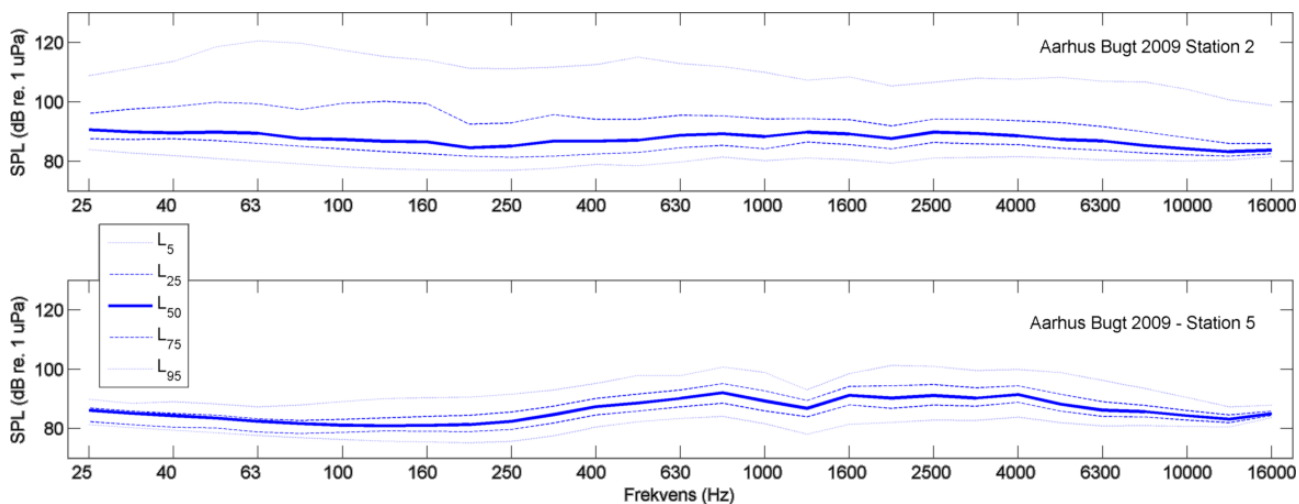
Omtalt som 'non-pulses' i *Southall et al. 2007*. Signaler uden meget brat start, men dog med identificerbare start- og stoptidspunkter. Disse kan beskrives med alle enheder angivet i *tabel 4.1*, men generelt er L_E at foretrække, alternativt L_{eq} udregnet over hele pulsens varighed. Angives L_{eq} skal også signalvarigheden angives, hvorved der kan omregnes til L_E . L_{peak} og L_{pp} kan også anvendes for disse signaler, men bør aldrig stå alene, da man for de fleste biologiske signalers vedkommende ikke på simpel måde kan omregne til L_{eq} og L_E .

Kontinuerlige signaler

Kontinuerlige (vedvarende) signaler er i denne sammenhæng defineret som signaler med en varighed flere størrelsesordner over vertebratørers tidskonstant (dvs. flere sekunder og derover). Signaler af så lang varighed er generelt dårligt beskrevet ved spids-niveauer, idet transmission gennem selv svagt reverberante omgivelser (dvs. med reflekterende overflader) har tendens til at inducere betydelig amplitudemodulering af signalet. Disse signaler karakteriseres bedst ved L_{eq} eller L_E . Reelt vedvarende signaler, som fx skibsstøj, kan ikke på nogen meningsfuld måde beskrives ved hjælp af L_E , og rms-målet L_{eq} er således den eneste mulighed. Integrationstiden for vertebratører ligger i omegnen af 100 ms (med en vis variation mellem arter og afhængig af frekvens), og det giver mening at bruge en tilsvarende tidskonstant for udregning af L_{eq} . For at være konsistent med praksis fra human audiologi anbefales en tidskonstant på 125 ms (kendt som 'RMS-fast' indstillingen på mange måleinstrumenter). Ud fra en serie af målinger på hver over 125 ms kan fordelingen af L_{eq} angives ved hjælp af percentiler:

- $L_5 = L_{eq}$ -niveau overskredet i 5 % af målingerne
- $L_{50} =$ median L_{eq} -niveau
- $L_{95} = L_{eq}$ -niveau overskredet i 95 % af målingerne

Andre percentiler kan angives, hvis det er formålstjenligt.



Figur 4.1. Eksempel på daglige værdier af L_5 , L_{25} , L_{50} , L_{75} og L_{95} udregnet for to positioner i Aarhus Bugt, den ene i sejlruten (øverst), den anden ca. 30 km syd for sejlruten (nederst).

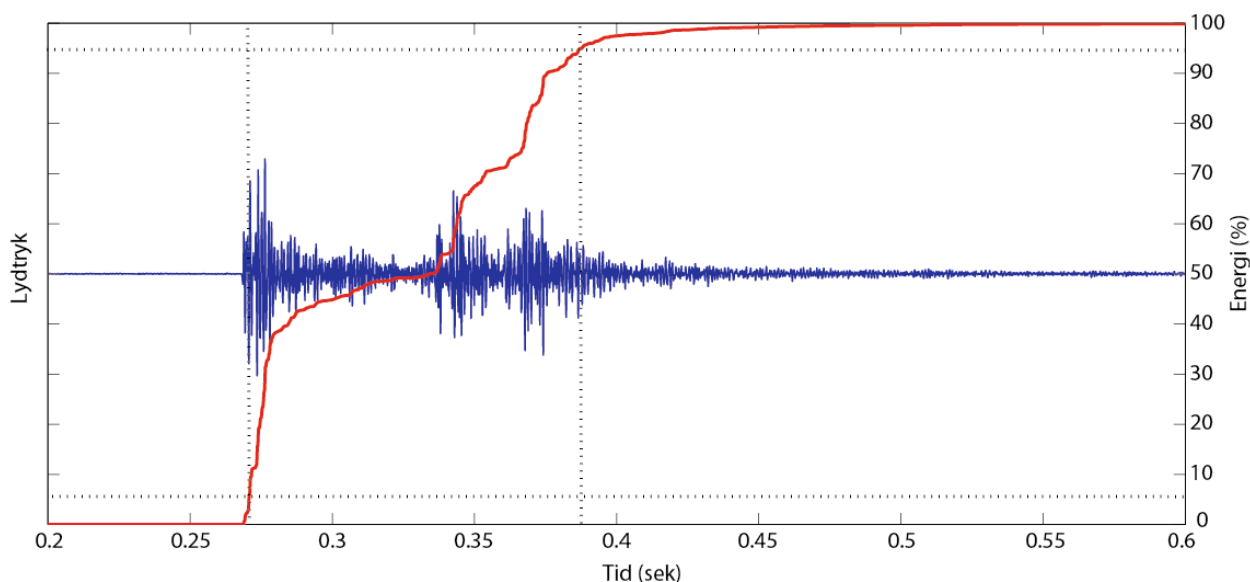
4.2 Signalvarighed

Signalvarigheden er en grundlæggende egenskab ved de fleste signaler, men på trods af dette kan varigheden være vanskelig at håndtere i praksis, fordi den kan være vanskelig at definere konsistent og måle entydigt. Dette er specielt tilfældet for signaler med dårligt signal-støjforhold. Problemerne opstår, fordi det kan være vanskeligt entydigt at bestemme, hvornår et signal starter, og hvornår det slutter, især hvis signalet langsomt vokser ud af baggrundsstøjen og forsvinder ned i støjen igen. Dette har ført til en lang række forskellige definitioner og metoder at måle varighed på. En definition, T_{90} (90 % energi-varigheden) har en række nyttige egenskaber og har fået stigende tilslutning i de senere år. Definitionen på T_{90} er varigheden af den periode, hvori 90 % af signalets energi befinder sig, målt fra den nederste 5 % percentil til den øverste 5 % percentil (Blackwell et al. 2004; Madsen 2005 og illustreret i figur 4.2). Andre definitioner af varigheden inkluderer -3 dB og -10 dB varighederne, hvor varigheden er målt som afstanden mellem de punkter, hvor signalets hyldekurve⁹ er hhv. 3 dB eller 10 dB under maksimalværdien¹⁰.

De fleste definitioner af signalvarighed fungerer godt for de fleste typer signaler ved gode signal-støjforhold, men hvis baggrundsstøjen (eller udstyrets egenstøj) er høj, vil T_{90} overestimere den faktiske varighed af signalet. Styrken ved T_{90} -målet er, at den måler varigheden af den del af signalet, der indeholder den væsentligste del af energien, hvilket i de fleste tilfælde også vil være den del af signalet, der er relevant for vurdering af effekter. Navnlig -3 dB varigheden, men til dels også -10 dB varigheden kan potentielt undervurdere varigheden (og dermed effekten) markant, såfremt der er tale om et signal, der starter meget brat, efterfulgt af en længere 'hale' med lavere amplitude, som kan indeholde betydelig energi (Madsen 2005).

⁹ Hyldekurven kan beskrives som den absolutte værdi af det analytiske signal (Pedersen, 1993) og er populært sagt en kurve, der betegner "omridset" af tidssignalet.

¹⁰ Det er heller ikke entydigt hvordan -3 dB og -10 dB punkterne findes. En accepteret metode består i at danne en hyldekurve for signalet; den absolutte værdi af det analytiske signal (Møhl et al. 1990), og finde hhv. -3 dB og -10 dB punkterne på denne kurve.



Figur 4.2. Eksempel på udregning af 90 % energi og tilhørende signalvarighed. Den kumulerede energi gennem signalet er vist med rødt. Varigheden (ca. 0,11 s) måles mellem de lodrette stiplede linjer, defineret ved hhv. 5 % og 95 % af energien.

4.3 Frekvensanalyse

Fordelingen af energi i lyd analyseres og udtrykkes oftest på to forskellige måder, enten som et Fourier (FFT¹¹)-spektrum eller som 1/3 oktav-spektrum. Et Fourier-spektrum, også kaldet tæthedsspektrum, angiver energien fordelt på frekvenser, normaliseret i 1 Hz brede frekvensbånd, og er velegnet til detaljeret beskrivelse af de enkelte delkomponenter i støjen. I modsætning hertil er 1/3 oktav-spektret, der angiver energien fordelt hen over en serie af delvist overlappende filtre, alle 1/3 oktav brede. En oktav svarer til en fordobling af frekvensen. 1/3 oktav-spektret vælges ofte for vurderinger af hørbarhed og effekter af støj på dyr, idet pattedyr- og fiskeørers funktion i disse sammenhænge kan beskrives godt med en sådan model af delvist overlappende filtre, der bliver bredere og bredere med højere frekvens.

FFT-spektrum

Smalbånds FFT-spektre er meget værdifulde til at identificere rentonekomponenter i et signal og eventuelle harmoniske strukturer. For FFT-spektre må det altid angives, hvor mange målepunkter der benyttes per analysevindue og om en vinduesvægtning har været anvendt. Såfremt signalstøjforholdet er godt, og hele signalet kan rummes inden for et analysevindue, skal en rektangulær vægtning anvendes. I alle andre tilfælde skal en vægtning anvendes, der sikrer at signalamplituden stiger gradvist fra analysevinduet start og falder gradvist mod analysevinduet slut. Som generelt anvendelig vægtning anbefales en Hann-vægtning. Hvis andre vægtninger anvendes, skal dette fremgå og valget begrundes.

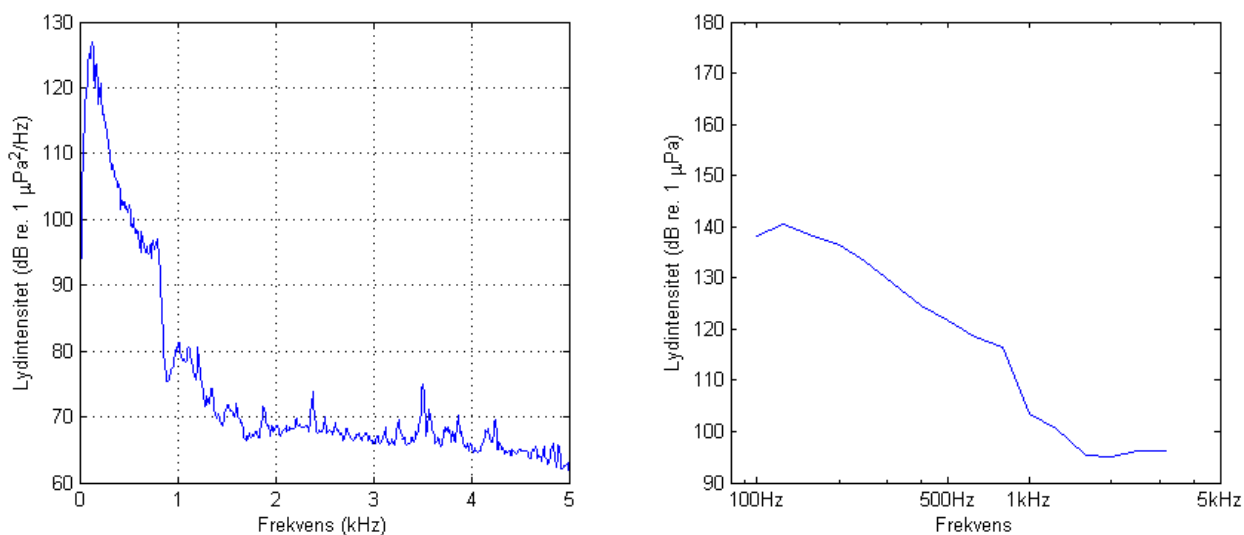
Såfremt signalets varighed overstiger analysevinduet længde, må der udregnes et gennemsnitsspektrum. Dette gennemsnit skal udregnes efter en anerkendt metode (fx Welch's metode (*Welch 1967*)), og metoden skal angives.

¹¹ FFT står for Fast Fourier Transform og er en konkret implementering af Fouriertransformeringen for digitale signaler.

Der er store begrænsninger i hvilke biologisk relevante konklusioner, man kan drage ud fra et FFT-spektrum. Først og fremmest er den konstante (og ofte meget smalle) båndbredde, en FFT-analyse opererer med, ikke i overensstemmelse med forståelse af, hvordan vertebratører fungerer som nævnt ovenfor. Vertebratører beskrives ofte som en serie af delvist overlappende filtre med stigende båndbredde med stigende centerfrekvens (forholdet mellem båndbredde og centerfrekvens, kaldet Q , er omtrent konstant, heraf navnet konstant- Q filterbank). Ved lave frekvenser er opløsningen af en FFT-analyse således ofte for lille i forhold til vertebratøret, mens den er for stor ved høje frekvenser, og FFT-spektre skal derfor tolkes med forsigtighed i biologiske sammenhænge. En højopløsnings-FFT vil ofte kunne isolere toppe ved høje frekvenser, der ligger tættere, end hvad et vertebratøre kan adskille, mens vertebratøret ofte vil kunne isolere frekvenskomponenter ved lave frekvenser, som ikke er synlige i FFT-spektret. Et problem relateret til at anvende FFT-spektre for støj er, at det er meget vanskeligt at bedømme støjens hørbarhed og evne til at overdøve andre lyde (maskering) relevante for dyr ud fra spektret. Vertebratøret er også i denne sammenhæng bedre beskrevet som en bank af filtre, hver ca. 1/3 oktav brede. Af samme grund anvendes 1/3 oktav-spektre ofte til analyse af støj i forbindelse med vurdering af effekter på dyrelivet.

Tredjedelsoktav-spektrum

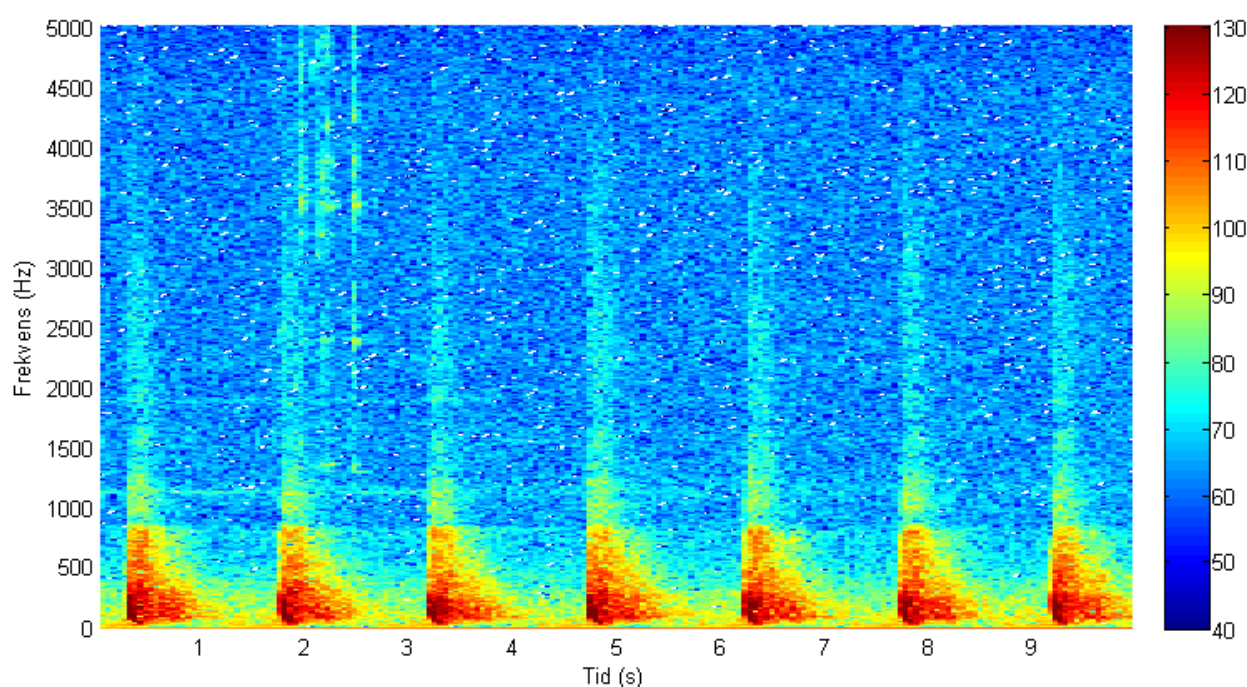
Tredjedels-oktavspektret er veletableret som analyseværktøj i human audiologi, og der findes fastsatte standarder for analyserne (fx ANSI; *Anonymous 2004*). Det har vist sig, at denne konstant Q -filterbank er en god model for hørelse, også for havpattedyr og fisk. ISO/ANSI-standarderne specificerer kun filtre for området 25 Hz til 20 kHz, men filtrene kan uden videre ekstrapoleres både opad og nedad i frekvens.



Figur 4.3. Eksempel på FFT-spektrum (venstre; FFT-længde 512 punkter, 50 % overlap, Hann-vindue, sampling rate 10.000 Hz) og tredjedelsoktav-spektrum (højre) af det samme signal. Bemærk forskel i frekvensakserne; lineær til venstre og logaritmisk til højre.

Spektrogram

I mange sammenhænge anvendes et spektrogram (sonogram) til illustration og/eller analyse af forskellige lyde. Spektrogrammet fremkommer ved en serie af korte FFT-analyser udregnet på overlappende vinduer hen gennem signalet. Denne fremgangsmåde tillader analyse af tids-frekvensstrukturen i signalet og kan være særdeles effektiv til at illustrere frekvensmodulerede signaler. Der er imidlertid særdeles mange muligheder for valg af parametre, når man fremstiller et spektrogram, som i høj grad afhænger af den computersoftware der anvendes. De valgte parametre kan bevirke, at visse egenskaber ved det analyserede signal fremhæves eller nedtones i spektrogrammet, hvilket er både en styrke og en svaghed ved analysemetoden. Det betyder naturligvis, at alle parametre altid skal angives, når et spektrogram anvendes, men også at der skal udvises stor forsigtighed med at aflæse signalegenskaber fra et spektrogram.



Figur 4.4. Eksempel på spektrogram. Samme signal som figur 4.3. FFT-længde 512 punkter, 50 % overlap, Hann-vindue. Farveskalaen angiver intensitet i dB re. $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$.

4.4 Andre mål

Kurtosis

Bredbandede signaler uden klar tids- eller frekvensstruktur er særligt vanskelige at kvantificere. Der er indikationer i retning af, at formen på amplitudefordelingen af disse signaler har betydning for, hvor generende og måske også hvor skadelige de er. Amplitudefordelingen kan nemt karakteriseres ved hjælp af størrelsen kurtosis, kendt fra statistik:

$$k = \frac{E(x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4}$$

hvor x_i er de enkelte samples (målepunkter i digitalt signal), \bar{x} er middelværdien og s er spredningen. For hvid støj¹² er $k = 3$. Større værdier af k indikerer, at støjen har flere skarpe og korte spidser i amplitudesignalet end hvid støj, dvs. der er flere ekstreme værdier end i den hvide støj. En værdi af k under 3 angiver, at amplituden varierer tættere omkring middelværdien end for hvid støj.

Akustisk impuls

Meget hurtige trykændringer, som fx i en chokbølge udløst af en undervandsekspllosion, kan have store skadelige effekter på biologisk væv, ikke bare på ørerne. For en chokbølge er det ikke så meget det absolutte tryk, der er af betydning, men formen på trykbølgen. Denne kan karakteriseres ved den akustiske impuls, som er tidsintegralet af den positive trykpuls (*Yelverton et al. 1973*).

¹² Støj, hvor intensiteten er konstant over alle frekvensbånd (1 Hz bånd).

5 Hørelse hos marine organismer

En lang række marine organismer kan opfatte lyd i vand via dertil specialiserede sanseorganer (ører). Disse kan opdeles i to typer: primært og sekundært tilpasset til vand. De primært tilpassede ører findes hos fisk og marine invertebrater, som er dyregrupper, der har tilbragt hele deres evolutionære historie i havet. De sekundært tilpassede findes hos havpattedyr og havfugle, hvis ører er udviklet til funktion i luft, hvorefter de sekundært er tilpasset til en funktion i vand (igen), efter at dyregrupperne er vendt tilbage til havet. Den formentlig største konsekvens af denne evolutionære historie er, at fugle- og pattedyrører i udtalt grad er følsomme for trykkomponenten af lydfeltet og i meget ringe grad er følsomme overfor partikelbevægelser.

5.1 Havpattedyr

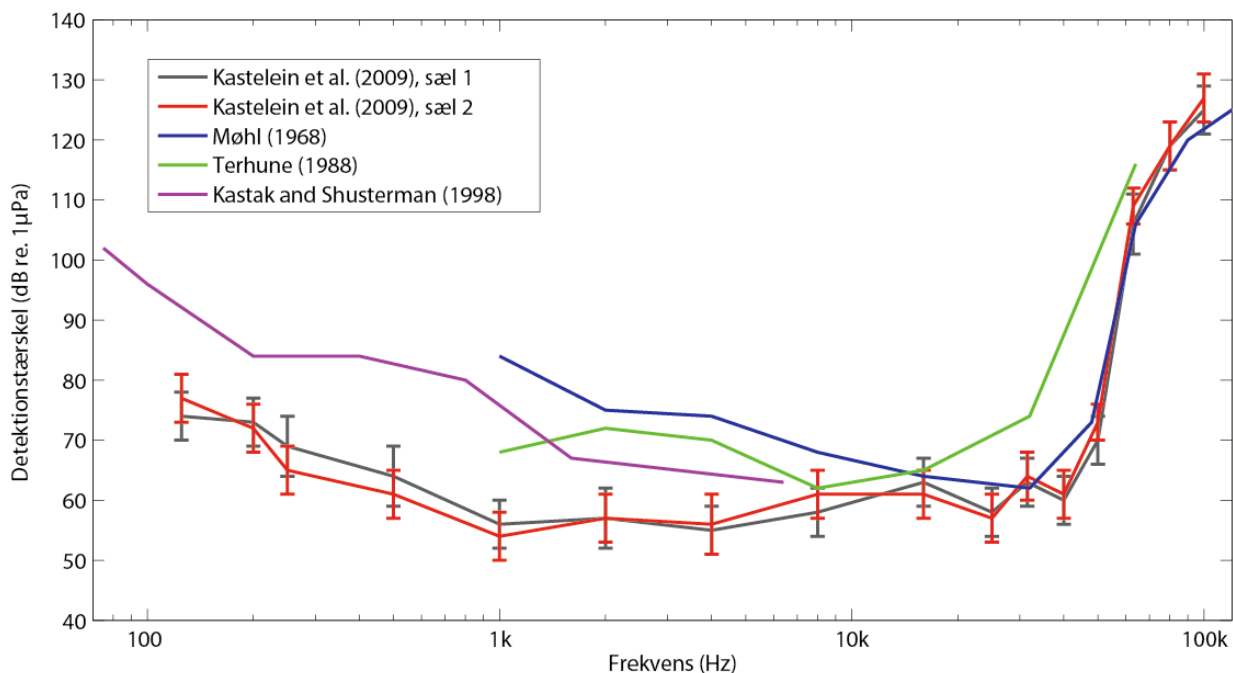
Havpattedyr, hvoraf de relevante grupper for Danmark er sæler og hvaler, har som nævnt alle ører, der er sekundært tilpasset livet i vand. Grundlæggende er opbygning og funktion af det indre øre identisk med det indre øre hos terrestriske pattedyr, hvorimod mellemøret og det ydre øre har undergået en lang række tilpasninger til funktionen i vand.

Sæler

Sælernes ører er dårligt beskrevet anatomisk, og det er uklart, hvordan lyden kommer fra vandet ind til mellemøret og det indre øre. Da øregangen lukkes under dykning og formentlig forbliver luftfyldt, er det ikke sandsynligt at lyden kommer den vej. Hos ægte sæler¹³ er et 'akustisk vindue' på siden af kraniet beskrevet (Møhl & Ronald 1975). Knoglen i dette område er mere porøs end resten af kraniet, og det er tænkeligt, at det danner overgang fra det omgivende vand til mellemøret. Mellemøret hos sæler er karakteristisk ved at indeholde store mængder blodfyldt (cavernøst) væv, hvis funktion formentlig er at udligne trykket i mellemøret under dykning, idet volumen af mellemøret kan reguleres ved at ændre blodtilførslen til det cavernøse væv (Møhl 1967; Stenfors et al. 2001).

Hørelsen er undersøgt hos en række arter af sæler, især hos gruppen af ægte sæler (familie Phocidae). Hørelsen er velundersøgt hos spættet sæl (*Phoca vitulina*), mens der intet vides om gråsæl (*Halichoerus gryphus*). Spættet sæl har en hørelse, der generelt er typisk for de andre arter af ægte sæler, man har undersøgt, og det er sandsynligt, at gråsæl ikke afviger meget fra det generelle billede. Figur 5.1 viser forskellige høretærskelkurver (audiogrammer), der er lavet på spættet sæl. Høretærskelkurven viser det laveste hørbare lydtryk som funktion af frekvens. Bedste hørelse er derfor den del af høretærskelkurven, der ligger lavest. Sælernes hørelse er kendetegnet ved et område med bedste følsomhed fra ca. 1 kHz til ca. 50 kHz med en meget skarp øvre grænse for følsomheden og en langsomt aftagende følsomhed ved lavere frekvenser. Den relativt store forskel der ses ved lave frekvenser mellem de forskellige studier skyldes sandsynligvis forskellige niveauer af maskering af baggrundsstøj. Studierne af Kastelein et al. 2009 er således lavet i en specialbygget tank med meget lav baggrundsstøj, under det niveau man kan forvente at finde naturligt i havet, selv i helt stille vejr.

¹³ Også kaldet øreløse sæler, da disse arter helt mangler et ydre øre.



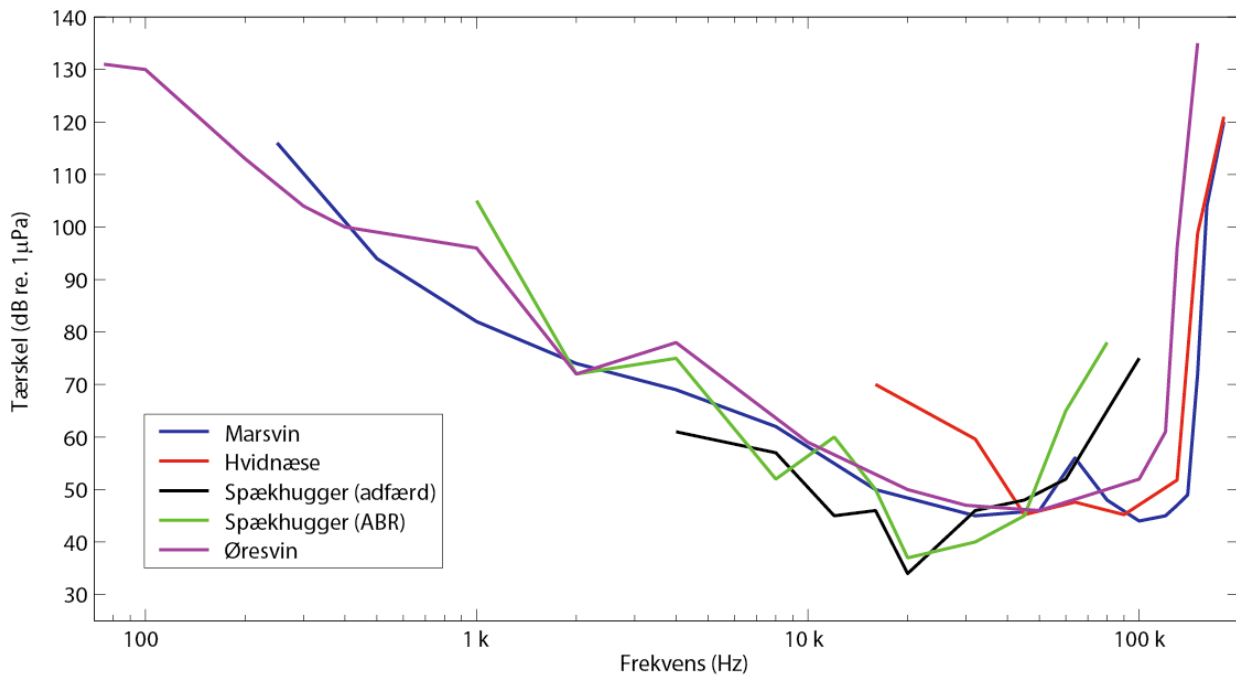
Figur 5.1. Høretærskelkurver for spættet sæl fra fire forskellige studier. Kilder: Møhl 1968; Terhune 1988; Kastak & Schusterman 1998; Kastelein et al. 2009.

Tandhvaler

Tandhvalernes hørelse er relativt velbeskrevet og forstået på det generelle plan. Anatomisk er tandhvalerne kendetegnet ved totalt fravær af et ydre øre, samt en sammenvokset og ikke-funktionel øregang. Lyden kommer i stedet fra det omgivende vand ind til mellemøret via en fedtfyldt kanal i underkæben (Norris 1964; Møhl et al. 1999; Cranford et al. 2008). Mellemøret er fuldstændigt tilpasset undervandshørelse (Hemilä et al. 1999) i modsætning til sæler, der også bruger hørelsen over vand. Høretærskelkurver er efterhånden fremstillet for en lang række arter af tandhvaler, hvoraf marsvin (*Phocoena phocoena*) er den mest relevante for Danmark, men også hvidnæse (*Lagenorhynchus albirostris*) er almindeligt forekommende i Nordsøen.

Audiogrammerne hos tandhvaler er kendetegnet ved meget høj følsomhed (lave tærskler) i for høje frekvenser, langt op i ultralydsområdet¹⁴ startende fra ca. 10 kHz til 100-160 kHz og med en meget skarp øvre grænse for hørelsen. Marsvin har den højeste øvre grænse, omkring 160 kHz. Under 10 kHz falder følsomheden jævnt og under ca. 1 kHz hører de fleste tandhvaler betydeligt dårligere end sæler.

¹⁴ Ultralyd er lyd med frekvenser over 20 kHz, som er den øvre høregrense for mennesker.



Figur 5.2. Høretærskelkurver for en række tandhvaler relevante for danske farvande. Kilder: Marsvin: *Kastelein et al. 2002* modificeret af *Kastelein et al. 2010*; hvidnæse: *Nachtigall et al. 2008*; spækhugger: *Szymanski et al. 1999* (målt med to forskellige metoder, adfærd og hjernestammeaudiometri (ABR), på samme dyr) og øresvin: *Johnson 1968*.

Bardehvaler

Der vides meget lidt om hørelsen hos bardehvaler (Mysticeti), hvoraf vågehval (*Balaenoptera acutorostrata*) er almindeligt forekommende i den danske del af Nordsøen. Det er velkendt, at bardehvaler kommunikerer ved hjælp af lyde ved meget lave frekvenser, og det er derfor almindeligt antaget, at de også har en hørelse, der er tilpasset til størst følsomhed i dette område. Dette støttes af mikroanatomiske studier af det indre øre hos bardehvaler, der dokumenterer en meget bred og fleksibel basilarmembran¹⁵, hvilket er, hvad man vil forvente som en tilpasning til meget lave frekvenser. Et konsensus-skøn på bardehvalernes høreområde er 7 Hz - 22 kHz (*Southall et al. 2007*), men man må forvente betydelige artsforskelle. Almindelig skalering af de mekaniske egenskaber relativt til størrelsen på dyrene og dermed deres indre øre tilsiger, at man vil forvente, at mindre arter – såsom vågehval – vil have relativt bedre hørelse ved højere frekvenser og relativt dårligere hørelse ved lavere frekvenser end de største arter såsom fin- og blåhval.

Ingen har foreløbigt turdet give noget bud på følsomheden af bardehvalers hørelse. Da den naturlige baggrundsstøj ved de meget lave frekvenser er relativt høj, er det ikke usandsynligt, at hørelsen hos bardehvalerne er begrænset af baggrundsstøjen i havet, snarere end følsomheden af deres egne ører.

5.2 Fisk

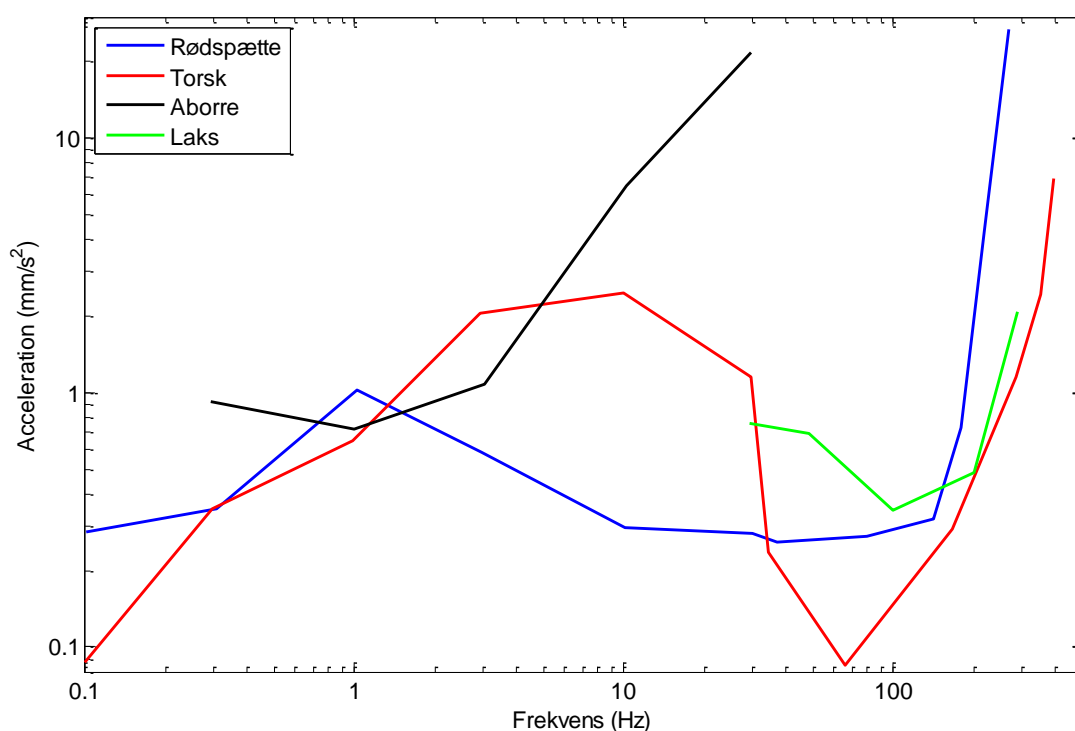
Fisk er en meget forskelligartet gruppe, når det kommer til hørelse, primært på grund af det meget store antal arter (> 20.000 arter globalt). Hørelsen er

¹⁵ Basilarmembranen findes i det indre øre og sættes i svingninger, når mellemøreknoglerne bevæger sig. Disse svingninger forplanter sig til hårcellerne, der ligger under basilarmembranen og er de sanseceller, der er ansvarlige for hørelsen.

studeret hos en lang række arter, og disse studier tegner et billede af meget store artsforskelle. Som minimum kan arterne inddeles i tre grupper: arter uden svømmeblære, arter med svømmeblære og ultralydsspecialister.

Arter uden svømmeblære

Arter uden svømmeblære er karakteriseret ved at være meget lidt følsomme over for trykkomponenten af lydfeltet, hvorimod de er meget følsomme over for partikelbevægelserne, der opfattes både med sidelinjesystemet¹⁶ og det indre øre. Det indre øre hos fisk fungerer som et accelerometer, hvor ørestenene, på grund af deres større massefylde, vil bevæge sig lidt ude af takt med resten af fisken og dermed vil de tilhørende sanseceller måle accelerationen af fisken. Dette betyder, at der reelt ikke er nogen nedre frekvensgrænse for ørets følsomhed, når det udtrykkes som acceleration (figur 5.3). Den øvre grænse ligger på nogle få hundrede Hz.



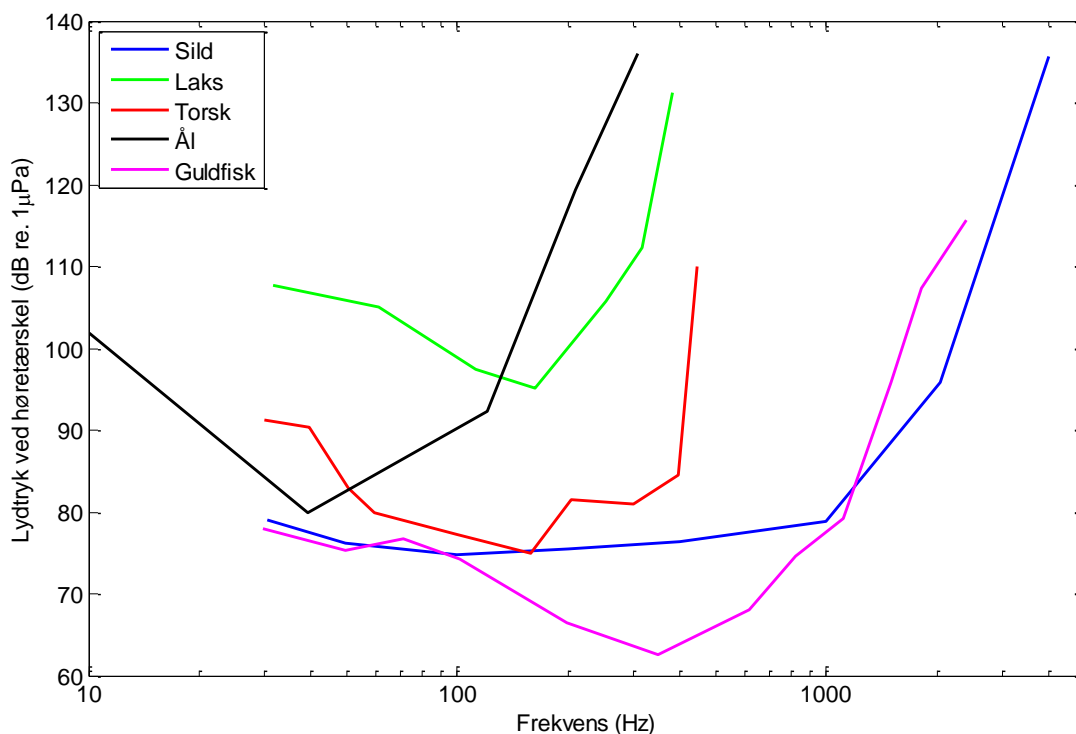
Figur 5.3. Høretærskelkurver for fisk udtrykt som partikelacceleration, ikke lydtryk (fra Andersson 2011).

Arter med svømmeblære

Arter med svømmeblære eller andre luftfyldte strukturer har i højere grad også følsomhed for trykkomponenten af lyden, men deres hørelse må betragtes som en blanding af både tryk og partikelbevægelse, hvilket giver dem unikke muligheder (i forhold til pattedyr) for at retningsbestemme lyd-kilder og måske endda afstandsbestemme dem. Følsomheden over for tryk-svingningerne i lydfeltet opstår, da disse kan bringe svømmeblæren (eller andre luftfyldte strukturer) i svingninger. Svømmeblærens svingninger giver dels ophav til en stor partikelbevægelse i nærfeltet af svømmeblæren,

¹⁶ Sidelinjesystemet er et system af sanseceller, der sidder i kanaler i huden på fisk, mest tydeligt langs siden af kroppen, men også rundt på hovedet. Sidelinjeorganet, som det også kaldes, er meget følsomt over for partikelbevægelse i vandet og kan opfatte bevægelser i vandet omkring fisken ud til en afstand af en kropslængde eller mere.

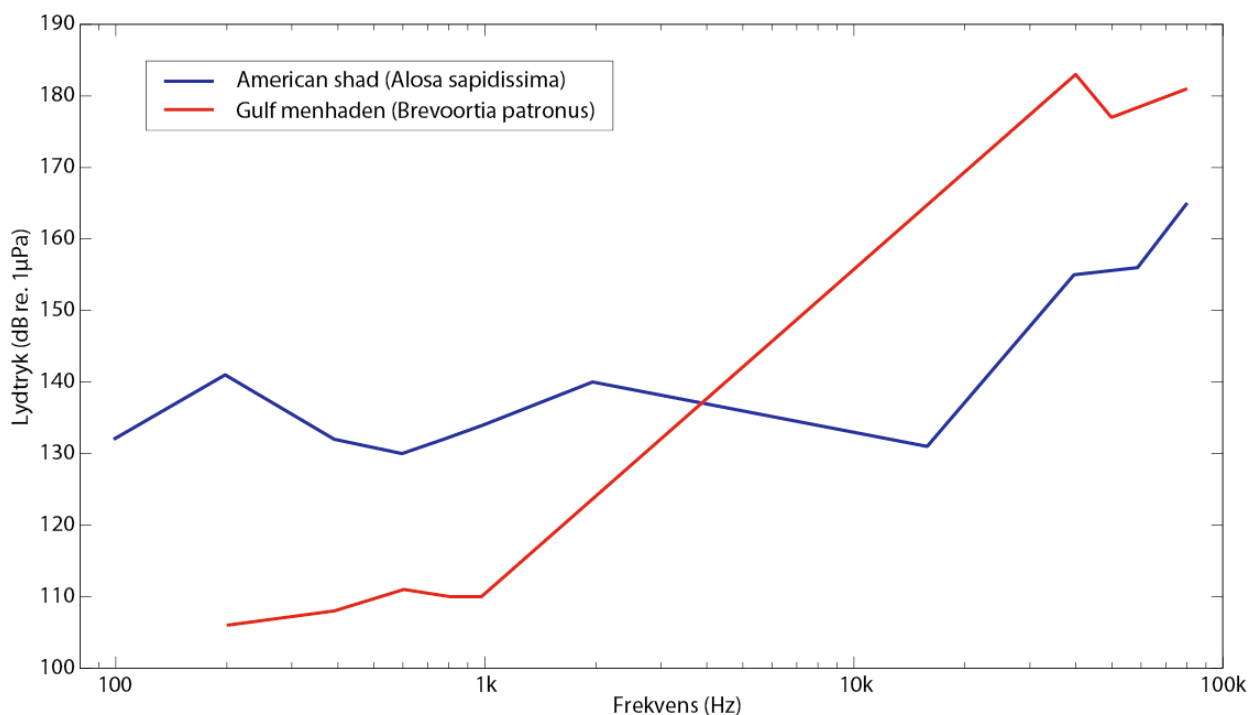
hvilket kan opfanges af det indre øre, dels kan de hos visse arter overføres til det indre øre via specialiserede anatomiske strukturer som fx de Weberske knogler hos karpfisk. Disse forhold gør, at fisk med svømmeblære generelt har en bedre hørelse end fisk uden svømmeblære, især ved højere frekvenser. Specialister som sild og guldfisk kan således høre op til et par kHz (figur 5.4).



Figur 5.4. Høretærskelkurver for fisk med svømmeblære (fra Andersson 2011). Y-aksen angiver lydtrykket ved tærsklen.

Ultralydsspecialister

Den tredje gruppe, ultralydsspecialisterne, der omfatter en række sildefisk (primært arter af stamsild), er kendetegnet ved evnen til at høre tandhvalers biosonar og reagere på den (Mann *et al.* 1998). Deres audiogrammer er kendetegnet ved at have brugbar følsomhed i ultralydsområdet over ca. 20 kHz (figur 5.5). Disse arter opfatter intens ultralyd ved hjælp af sidelinjesystemet (Wilson *et al.* 2009), omend den nærmere mekanisme er ukendt.



Figur 5.5. Audiogrammer for to amerikanske arter af stamsild med ultralydshørelse. Fra *Mann et al. 2001*. Y-aksen angiver lydtrykket ved tærskelen.

5.3 Andre grupper

Fugle

Der vides stort set intet om undervandshørelse hos dykkende fugle, og selv hørelse i luft er ikke beskrevet hos de relevante grupper (alkefugle, skarver og dykkænder). Det er derfor ikke klart, om de dykkende fugles hørelse er tilpasset til at fungere i vand, og hvad fuglene i givet fald bruger undervandshørelsen til. Baseret på viden fra terrestriske arter (ugler, duer, stære, kanariefugle m.fl.) antages det, at de dykkende fugles hørelse er begrænset til lavere frekvenser (under 10-15 kHz), men indtil resultater foreligger fra egentlige studier, vides intet om deres følsomhed.

Krybdyr

Der vides meget lidt om undervandshørelse hos marine krybdyr (havskildpadder, havslanger, havleguaner og saltvandskrokodiller). Ingen af grupperne er imidlertid relevante for Danmark.

Invertebrater

Det er kendt, at en del invertebrater, især krebsdyr, anvender lyd til forskellige formål og har veludviklet hørelse. Denne hørelse består formentlig i de fleste tilfælde af sansehår, der er følsomme over for partikelbevægelsen snarere end trykkomponenten. Der findes enkelte audiogrammer publiceret (*Popper et al. 2001*), men området er generelt dårligt undersøgt.

Plankton

Plankton, herunder pelagiske fiske- og invertebratlarver, har tiltrukket sig en vis opmærksomhed i forbindelse med effekter af bl.a. seismiske undersøgelser. Det er dog klart, at selvom de enkelte planktonorganismer kan tage skade af meget kraftig lyd, så er denne effekt i langt de fleste tilfælde så lokal, at den er uden populationsmæssig betydning. Der kendes ikke eksempler på lydcommunication hos planktoniske organismer, men det er vist, at larver af fisk og invertebrater, der som voksne individer lever på koralrev, bliver tiltrukket af støjen fra koralrevene i perioden op til tidspunktet for settling (*Vermeij et al. 2010; Radford et al. 2011*). Dette åbner muligheden for en væsentlig negativ effekt på settling-succes ved maskering af revstøjen på grund af skibsstøj. Om dette er en problemstilling, der er relevant for tempererede revorganismer er ukendt, men bør tages i betragtning.

6 Nyttig litteratur

Au, W.W.L. & Hastings, M.C. 2008: Principles of Marine Bioacoustics. Springer, New York.

- Gennemgang af undervandsakustiske principper, måleteknik og hørelse, lydproduktion og kommunikation hos havpattedyr og fisk.

Richardson, W.J., Greene, C.R., Malme, C.I. & Thomson, D.H. 1995: Marine mammals and noise. Academic Press, San Diego.

- Indledende kapitler med baggrundsinformation om hørelse m.m. hos havpattedyr.

Perrin, W.F., Würsig, B. & Thewissen, J.G.M. 2002: Encyclopedia of marine mammals. Academic Press, San Diego.

- Generelt opslagsværk. Korte oversigtsartikler om hørelse og lydproduktion hos en lang række havpattedyr.

Southall, B.L., Bowles, A.E., Ellison, W.T., Finneran, J., Gentry, R., Green, C.R., Kastak, C.R., Ketten, D.R., Miller, J.H., Nachtigall, P.E., Richardson, W.J., Thomas, J.A. & Tyack, P.L. 2007: Marine Mammal Noise Exposure Criteria. - Aquatic Mammals 33: 411-521.

- Appendix A indeholder definitioner af relevante måleenheder.

Urick, R.J. 1983: Principles of underwater sound, 3rd edition. McGraw-Hill, New York.

- Standardreference vedr. undervandsakustik, terminologi og definitioner.

7 Referencer

Ainslie, M.A. and McColm, J.G. 1998: A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water - Journal of the Acoustical Society of America 103: 1671-1672.

Andersson, M.H. 2011: Offshore wind farms - ecological effects of noise and habitat alteration on fish. Department of Zoology, Stockholm University, 48 pp.

Anon. 2009: Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships - Part 1: General requirements. Acoustical Society of America.

Anonymous 2004: ANSI S1.11-2004. Specification for octave-band and fractional-octave band analog and digital filters. Acoustical Society of America, New York.

Au, W.W.L. & Hastings, M.C. 2008: Principles of Marine Bioacoustics. Springer, New York.

Blackwell, S.B., Lawson, J.W., & Williams, M.T. 2004: Tolerance by ringed seals (*Phoca hispida*) to impact pipe-driving and construction sounds at an oil production island. - Journal of the Acoustical Society of America 115: 2346-2357.

Christensen-Dalsgaard, J., Breithaupt, T. & Elepfandt, A. 1990: Underwater hearing in the clawed frog, *Xenopus laevis*. - Naturwissenschaften 77: 135-137.

Clark, C.W., Ellison, W.T., Southall, B.L., Hatch, L., Van Parijs, S.M., Frankel, A., & Ponirakis, D. 2010: Acoustic masking in marine ecosystems as a function of anthropogenic sound sources. - IWC Scientific Committee SC-61 E10.

Cranford, T.W., Krysl, P. & Hildebrand, J.A. 2008: Acoustic pathways revealed: simulated sound transmission and reception in Cuvier's beaked whale (*Ziphius cavirostris*). - Bioinspiration & Biomimetics 3: 016001-016001.

de Jong, C.A.F., Ainslie, M.A. & Blacquièrè, G. 2010: Measuring underwater sound: towards measurement standards and noise descriptors. - TNO report TNO-DV 2009 C61. TNO.

EU Kommissionen 2008: Europa-parlamentet og Rådets direktiv 2008/56/EF af 17. juni 2008 om fastlæggelse af en ramme for Fællesskabets havmiljøpolitiske foranstaltninger (havstrategirammedirektivet).

Hemilä, S., Nummela, S. & Reuter, T. 1999: A model of the odontocete middle ear. - Hearing Research 133: 82-97.

Johnson, C.S. 1968: Masked Tonal Thresholds in the Bottlenosed Porpoise. - Journal of the Acoustical Society of America 44: 965-967.

- Kastak, D. & Schusterman, R.J. 1998: Low-frequency amphibious hearing in pinnipeds: Methods, measurements, noise, and ecology. - *Journal of the Acoustical Society of America* 103: 2216-2228.
- Kastelein, R. A., Bunskoek, P., Hagedoorn, M., Au, W.W.L. & Haan, D.d. 2002: Audiogram of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) measured with narrow-band frequency modulated signals. - *Journal of the Acoustical Society of America* 112: 334-344.
- Kastelein, R.A., Wensveen, P.J., Hoek, L., Verboom, W.C. & Terhune, J.M. 2009: Underwater detection of tonal signals between 0.125 and 100 kHz by harbor seals (*Phoca vitulina*). - *Journal of the Acoustical Society of America* 125: 1222-1229.
- Kastelein, R., Hoek, L., de Jong, C.A.F. & Wensveen, P. J. 2010: The effect of signal duration on the underwater detection thresholds of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) for single frequency-modulated tonal signals between 0.25 and 160 kHz. - *Journal of the Acoustical Society of America* 128: 3211-3222.
- Kuperman, W.A. & Lynch, J. 2004: Shallow-water acoustics. - *Physics Today* 57 (10) October: 55-61.
- Levin, P.A. 1973: Calibration of hydrophones - B&K, Technical Review 1973-1.
- Madsen, P.T. 2005: Marine mammals and noise: Problems with root mean square sound pressure levels for transients. - *Journal of the Acoustical Society of America* 117: 3952-3957.
- Mann, D.A., Lu, Z., Hastings, M.C. & Popper, A.N. 1998: Detection of ultrasonic tones and simulated dolphin echolocation clicks by a teleost fish, the American shad (*Alosa sapidissima*). - *Journal of the Acoustical Society of America* 104: 562-568.
- Mann, D.A., Higgs, D.M., Tavolga, W.N., Souza, M.J. & Popper, A.N. 2001: Ultrasound detection by clupeiform fishes. - *Journal of the Acoustical Society of America* 109: 3048-3054.
- Müller, A. & Zerbs, C. 2011: Offshore wind farms - Measurement instructions for waterborne sound measurements - Report no. M88 1067/5 to Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Müller-BBM, Hamburg.
- Møhl, B. 1967: Seal Ears. - *Science* 157: 99.
- Møhl, B. 1968: Auditory sensitivity of the common seal in air and water. - *Journal of Auditory Research* 8: 27-38.
- Møhl, B. & Ronald, K. 1975: The peripheral auditory system of the harp seal, *Pagophilus groenlandicus* (Erleben, 1777). - *Rapports et procès-verbaux des réunions, Conseil International pour l'Exploration de la Mer* 169: 516-523.
- Møhl, B., Surlykke, A. & Miller, L.A. 1990. High intensity narwhal clicks. - In: Thomas, J.A. & Kastelein, R.A., eds; *Sensory abilities of cetaceans: Laboratory and field evidence*. NATO ASI Series A: Life Sciences, Vol. 196. New York: Plenum Press, pp. 295-303.

- Møhl, B., Au, W.W.L., Pawloski, D.A. & Nachtigall, P.E. 1999: Dolphin hearing: Relative sensitivity as a function of point of application of a contact sound source in the jaw and head region. - *Journal of the Acoustical Society of America* 105: 3421-3424.
- Nachtigall, P.E., Mooney, T.A., Taylor, K.A., Miller, L.A., Rasmussen, M.H., Akamatsu, T., Teilmann, J., Linnenschmidt, M. & Vikingsson, G.A. 2008: Shipboard measurements of the hearing of the white-beaked dolphin *Lagenorhynchus albirostris*. - *The Journal of Experimental Biology* 211: 642-647.
- Norris, K.S. 1964: Some problems of echolocation in cetaceans. - In: Tavalga, W. (Ed.); *Marine Bio-Acoustics*. Pergamon Press, New York, pp. 316-336.
- Pedersen, S.B. 1993: *Signalanalyse I*. Danmarks Tekniske Universitet.
- Popper, A.N., Salmon, M. & Horch, K.W. 2001: Acoustic detection and communication by decapod crustaceans. - *Journal of Comparative Physiology A* 187: 83-89.
- Radford, C., Stanley, J., Simpson, S. & Jeffs, A. 2011: Juvenile coral reef fish use sound to locate habitats. - *Coral Reefs* 30: 295-305.
- Sigray, P. & Andersson, M.H. 2011: Particle motion measured at an operational wind turbine in relation to hearing sensitivity in fish. - *Journal of the Acoustical Society of America* 130: 200-207.
- Slabbekoorn, H., Bouton, N., van Opzeeland, I., Coers, A., ten Cate, C. & Popper, A.N. 2010: A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish. - *Trends in Ecology and Evolution* 25(7): 419-427.
- Southall, B.L., Bowles, A.E., Ellison, W.T., Finneran, J., Gentry, R., Green, C.R., Kastak, C.R., Ketten, D.R., Miller, J.H., Nachtigall, P.E., Richardson, W.J., Thomas, J.A. & Tyack, P.L. 2007: *Marine Mammal Noise Exposure Criteria*. - *Aquatic Mammals* 33: 411-521.
- Stenfors, L.-E., Sadé, J., Hellström, S. & Anniko, M. 2001: How can the hooded seal dive to a depth of 1000 m without rupturing its tympanic membrane? A morphological and functional study. - *Acta Oto-laryngologica* 121: 689-695.
- Szymanski, M.D., Bain, D.E., Kiehl, K., Pennington, S., Wong, S. & Henry, K.R. 1999: Killer whale (*Orcinus orca*) hearing: Auditory brainstem response and behavioral audiograms. - *Journal of the Acoustical Society of America* 106: 1134-1141.
- Tasker, M.L., Amundin, M., Andre, M., Hawkins, A., Lang, W., Merck, T., Scholik-Schlomer, A., Teilmann, J., Thomsen, F., Werner, S., Zakharia, M. 2010: *Marine Strategy Framework Directive, Task Group 11 report on Underwater Noise and other forms of Energy*. European Commission. - JRC Scientific and Technical Reports; No. EUR 24341 EN, 64 pp.
- Terhune, J.M. 1988: Detection thresholds of a harbor seal to repeated underwater high-frequency, short duration sinusoidal pulses. - *Canadian Journal of Zoology* 66: 1578-1582.

Tougaard, J. 2012. Undervandsstøj i danske farvande – status og problemstillinger i forhold til økosystemer. - Fagligt notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi. 29 s. <http://dce.au.dk/udgivelser/notater/2012/>.

Tougaard, J. 2014. Vurdering af effekter af undervandsstøj på marine organismer. Del 2 - Påvirkninger. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 50 s. - Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 45. <http://dce2.au.dk/pub/TR44.pdf>

Urick, R.J. 1983: Principles of underwater sound. McGraw-Hill, New York.

Vermeij, M.J.A., Marhaver, K.L., Huijbers, C.M., Nagelkerken, I. & Simpson, S.D. 2010: Coral Larvae Move toward Reef Sounds. - PLoS ONE 5(5): e10660.

Welch, P.D. 1967: The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. - IEEE Transactions on Audio Electroacoustics AU-15: 70-73.

Wilson, M., Montie, E.W., Mann, K.A. & Mann, D.A. 2009: Ultrasound detection in the Gulf menhaden requires gas-filled bullae and an intact lateral line. - The Journal of Experimental Biology 212: 3422-3427.

Yelverton, J.T., Richmond, D.R., Fletcher, E.R. & Jones, R.K. 1973: Safe distances from underwater explosions for mammals and birds. Lovelace Foundation for Medical Education and Research, Albuquerque, New Mexico.

VURDERING AF EFFEKTER AF UNDERVANDSSTØJ PÅ MARINE ORGANISMER

Del 1 - Målemetoder, enheder og hørelse hos marine organismer

Diskussionen af undervandsakustiske problemstillinger, navnlig når det drejer sig om effekter af undervandslyd på marine organismer, vanskeliggøres af manglen på standardiserede måle- og analysemetoder. I denne rapport er gennemgået en række af de væsentlige fokuspunkter, der er af betydning, hvad enten man selv skal måle eller analysere målinger af undervandsstøj, eller man skal vurdere andres arbejde. Sammenfattende gælder, at: a) måleudstyret skal være velegnet til opgaven; b) variationen i tid og rum skal dækkes ved hjælp af tilstrækkeligt mange og tilstrækkeligt lange målinger; c) standardiserede måleenheder bør anvendes i videst mulig udstrækning; og d) analyserne af målingerne skal være tilpasset de dyr, der er i fokus.