



VURDERING AF EFFEKTER AF UNDERVANDSSTØJ PÅ MARINE ORGANISMER

Del 2 - Påvirkninger

Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 45

2014



AARHUS
UNIVERSITET

DCE - NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

[Tom side]

VURDERING AF EFFEKTER AF UNDERVANDSSTØJ PÅ MARINE ORGANISMER

Del 2 - Påvirkninger

Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 45

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. 45
Titel:	Vurdering af effekter af undervandsstøj på marine organismer
Undertitel:	Del 2 - Påvirkninger
Forfatter:	Jakob Tougaard
Institution:	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 og Lonnie Mikkelsen, Institut for Bioscience, Aarhus Universitet
Kvalitetssikring, DCE:	Vibeke Vestergaard Nielsen
Finansiel støtte:	Energinet.dk
Bedes citeret:	Tougaard, J. 2014. Vurdering af effekter af undervandsstøj på marine organismer. Del 2 – Påvirkninger. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 51 s. - Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 45 http://dce2.au.dk/pub/TR45.pdf
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Der er stigende opmærksomhed på effekter af undervandsstøj på organismer i marine miljøer. Der er således stigende krav til vurdering og overvågning af undervandsstøj i forbindelse med menneskelige aktiviteter på havet. På baggrund af amerikanske anbefalinger fra 2007 og den yderligere viden, der er fremkommet siden, fremsættes en række anbefalinger vedrørende danske forhold. Anbefalingerne vedrører fastsættelse af grænser for lydpåvirkning, der kan medføre midlertidigt og permanent høretab og påvirkning af sæler og marsvins adfærd. For begge typer af påvirkninger anbefales det for marsvin, at lydtryk vægtes efter deres hørbarhed, dvs. de dele af frekvensspektret, hvor marsvin hører godt, skal tillægges større vægt i vurderingen af negative effekter end de dele, hvor marsvins hørelse er dårligere. For øvrige arter af havpattedyr, havfugle og fisk er datagrundlaget ikke omfattende nok til at give egentlige anbefalinger.
Emneord:	Undervandsstøj, havpattedyr, fisk, fugle, midlertidig hørenedsættelse, TTS, adfærdspåvirkning
Layout:	Anne van Acker
Illustrationer:	Jakob Tougaard
Foto forside:	Jonas Teilmann
ISBN:	978-87-7156-106-7
ISSN (elektronisk):	2244-999X
Sideantal:	51
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som http://dce2.au.dk/pub/TR45.pdf

Indhold

Sammenfatning	5
Summary	8
1 Introduktion	10
1.1 Typer af påvirkning	10
2 Anbefalingerne fra Southhall et al. (2007)	12
2.1 Inddeling af arter	12
2.2 Hørbarhed (M-vægtning)	14
2.3 Kriterier for fysisk skade/høretab	15
3 Begrænsninger i Southhall et al. (2007)	22
3.1 Potentielle støjefakter, der ikke omtales	22
3.2 Hørbarhed som forudsætning for effekt	22
3.3 Skalering af adfærdsreaktioner	23
3.4 Maskering	23
3.5 Frekvensvægtning baseret på hørbarhed (M-vægtning)	24
3.6 Brug af repræsentative arter	26
4 Anbefalinger for danske arter	27
4.1 Havpattedyr	27
4.2 Øvrige arter	38
5 Effekter af opmålingsudstyr	40
5.1 Ekkolod under 180 kHz	40
5.2 Ekkolod over 180 kHz	40
5.3 Sonar over 180 kHz	40
5.4 Sonar under 180 kHz	40
5.5 Sparkere og boomere	40
5.6 Luftkanoner (airguns)	41
6 Referencer	44

[Tom side]

Sammenfatning

Det er velkendt fra mennesker, at støjpåvirkninger kan have negative effekter af forskellig grad. Der er ligeledes stigende opmærksomhed på effekter af undervandsstøj på organismer i marine miljøer, ikke mindst den menneskeskabte støj. Der er således stigende krav til vurdering og overvågning af undervandsstøj i forbindelse med menneskelige aktiviteter på havet. Et meget væsentligt skridt i retning af en egentlig regulering af området kom i 2007 med udgivelsen fra *Southall et al. (2007)*, der består af en gennemgang af den relevante litteratur, og hvori forfatterne vovede at komme med et første bud på tålegrænser (exposure criteria), dvs. grænseværdier, der ikke skal overskrides, såfremt nærmere definerede påvirkninger på havpattedyrene søges undgået. Et væsentligt element at have for øje ved læsning af *Southall et al. (2007)* er dokumentets baggrund i amerikansk lovgivning og forvaltning, og deraf følgende tilretning af diskussionen til amerikanske forhold. En gennemgang af anbefalingerne med danske forhold for øje er derfor på sin plads.

Anbefalingerne fra *Southall et al. (2007)* og deres begrænsninger

Southall et al. (2007) vedrører alene havpattedyr og har fokus på to typer af negative effekter: høreskader og adfærdsændringer forårsaget af støj. Da det ikke er praktisk muligt at dække alle arter af havpattedyr, alene fordi datagrundlaget er koncentreret på meget få arter, så inddeler *Southall et al. (2007)* havpattedyrene i fire funktionelle grupper: 'Lavfrekvens-hvaler' (bardehvalerne), 'Mellemfrekvens-hvaler', (de fleste tandhvaler), 'Højfrekvens-hvaler' (marsvin m.fl.) og 'Sæler og søløver' og diskuterer kriterier for hver enkelt gruppe. Det er imidlertid væsentligt at holde sig klart, at datagrundlaget for anbefalingerne er stærkt begrænset. I al væsentlighed stammer informationerne om høreskader i *Southall et al. (2007)* alene fra øresvin, hvidhval, spættet sæl og Californisk søløve og adfærdsreaktioner er ligeledes begrænset til meget få arter. En væsentlig konsekvens af inddelingen af arterne i fire funktionelle grupper baseret på deres hørelse er anbefalingen om anvendelse af en gruppespecifik frekvensvægtning ved vurdering af effekter af undervandslyd på de fire grupper, såkaldt M-vægtning.

Som kriterium for fysisk skade af undervandslyd anvender *Southall et al. (2007)* midlertidig hørenedsættelse (TTS) ud fra en antagelse af, at høreorganerne er de mest følsomme fysiologiske systemer hos havpattedyrene. Baseret på laboratorieforsøg (på øresvin, hvidhval og spættet sæl) opsættes tærskler for eksponering, der leder til TTS, udtrykt både som lydtryk og som akkumuleret energi (SEL, sound exposure level/lydeksponeringsniveau).

For adfærdsreaktioner på lyd opstilles en skala 0-10 med sværhedsgraden af reaktionerne på lyd, og litteraturen gennemgås i lyset af denne skala, men det lykkedes ikke *Southall et al. (2007)* at udlede egentlige tærskler for adfærdsreaktioner.

Forfatterne til sammenfatningen i *Southall et al. (2007)* fortjener stor ros for at stikke hovederne frem og faktisk komme med forslag til konkrete kriterier og dermed åbne for muligheden for den kritik, der altid vil opstå af forsøg på generaliseringer baseret på sparsomt datamateriale. De største begrænsninger i brugbarheden af konklusionerne vedrører: 1) effekter af undervandsstøj, der ikke omtales (maskering, fysiologiske effekter m.m.); 2) anta-

gelsen om hørbarhed som forudsætning for effekt (effekter, der ikke involverer øret, kan optræde ved ikke-hørbare niveauer af fx infralyd); 3) skaleringen af adfærdseffekter, der er baseret på umiddelbar sværhedsgrad af reaktionen og ikke langtidskonsekvenser for dyrene; 4) frekvensvægtningen (M-vægtning) er ikke baseret på eksperimentelt grundlag; og 5) det meget begrænsede antal arter, der antages at være repræsentative for havpattedyr som helhed.

Anbefalinger for danske arter

På baggrund af *Southall et al. (2007)* og den yderligere viden, der er fremkommet siden 2007, fremsættes en række anbefalinger vedrørende danske arter af havpattedyr. Det er i første omgang arterne marsvin, spættet sæl og gråsæl, men også arter som hvidnæse og vågehval samt mere uregelmæssigt forekommende arter.

For spættet sæl foreligger to studier (*Kastak et al., 2005; Kastelein et al., 2012a*) med direkte målinger af hørenedsættelse (TTS) og ud fra disse kan uddrages, at tærsklen for TTS for lavfrekvent støj ligger i området 169-182 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ (lydeksponeringsniveau). Spættet sæl antages almindeligvis for at være adfærdsmæssigt tolerant over for undervandsstøj, men meget få faktiske studier er til rådighed.

Der er stort set ingen viden om effekter på gråsæler, så indtil andet foreligger, må data fra spættet sæl anvendes.

Siden 2007 er fremkommet en række studier vedrørende både TTS og adfærdsreaktioner hos marsvin over for undervandsstøj (*Kastelein et al., 2012b; Kastelein et al., 2013b; Lucke et al., 2009; Popov et al., 2011*). Sammenstilles disse resultater ses det, at det lydtryk, nødvendigt for at udløse TTS hos marsvin, afhænger af frekvensindholdet i støjen (højere lydtryk nødvendige ved lave frekvenser), hvilket afspejler, at marsvins høreelse er bedst ved høje frekvenser, over 10 kHz. Udtrykt som lydeksponeringsniveau (energi) er tærsklen for TTS udløst af et 1 s rentonesignal, således 105 dB over tærskelen for rentonen.

I lighed hermed kan en række adfærdsstudier på marsvin udsat for forskellige lyde (pælerammingsstøj, sælskræmmere og pingere; *Culik et al., 2001; Carlström et al., 2009; Olesiuk et al., 2002; Johnston, 2002; Brandt et al., 2011, 2012, 2013; Tougaard et al., 2009, 2012; Thompson et al., 2010 og Dähne et al., 2013*) sammenfattes, og et tilsvarende billede af frekvensafhængighed fremkommer. Her er tærskelen for negativ phonotaxi (flugt fra lyden) udtrykt som lydtryk, vægtet med pattedyrørets integrationstid (125 ms) ca. 55 dB over høretærskelen.

Der er meget dårligt datagrundlag for vurdering af effekter af undervandsstøj på hvidnæse. Indtil bedre data måtte fremkomme, kan resultater fra en række studier af TTS hos øresvin formentlig anvendes. Disse studier har vist tærskler for TTS i et bredt interval, fra ca. 190-210 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$, afhængigt af stimulusfrekvens og varighed af stimulus. Det er således tydeligt, at øresvin (og måske hvidnæse) er langt mindre følsom over for TTS end marsvin.

Der findes stort set intet datagrundlag vedrørende adfærdsreaktioner hos hvidnæse over for undervandsstøj.

Ligeledes findes der ikke tilstrækkelig viden vedrørende vågehvaler til at kunne angive konkrete anbefalinger. På samme vis forholder det sig for fisk, dykkende havfugle, krebsdyr og plankton.

Summary

It is well known from humans that noise can have negative effects of various kinds. Likewise, there is increasing attention to the fact that underwater noise can affect marine organisms negatively and there are increasing requirements for assessment and monitoring of underwater noise generated by anthropogenic (man-made) activities at sea. A significant step towards actual regulation of this field was the review made by *Southall et al. (2007)*, which works through the relevant literature for marine mammals and makes the first proposal for exposure criteria for marine mammals. As the origin of the review was to a high degree prompted by a demand from US legislation, it seems appropriate to review the recommendations with specific Danish conditions in mind.

Recommendations of *Southall et al. (2007)* and their limitations

Two types of effects of underwater noise were treated by *Southall et al. (2007)*: injury and behavioural changes. To be able to generalise conclusions, the marine mammals were divided into four functional groups, based on differences in hearing abilities: 'Low frequency cetaceans' (baleen whales), 'Medium frequency cetaceans', (most odontocetes), 'High frequency cetaceans' (porpoises and others) and 'Pinnipeds'. A major consequence of this division is the derivation of group-specific frequency weighting functions (M-weighting) for assessment of underwater noise.

As criterion for injury the temporary threshold shift (TTS) is adopted by *Southall et al. (2007)*, based on an assumption that the hearing organs are the most acoustically sensitive physiological system in the marine mammals. Based on laboratory data from bottlenose dolphin, beluga, harbour seal and California sea lion, this leads to derivation of TTS-thresholds, expressed both as pressure and accumulated energy (SEL, sound exposure level).

Behavioural reactions are scored on a response severity scale 0-10 and the literature is reviewed in the light of this scale, however, without derivation of consistent thresholds for reactions.

The authors of *Southall et al. (2007)* deserve credit for proposing actual criteria and thus opening the discussion, even if based on limited data material. The major limitations in the conclusions relate to effects of noise which are not covered (among others masking and physiological effects); audibility as a prerequisite for effects; scaling of behavioural reactions with immediate severity of the response and not the long-term consequences for the animals; frequency weighting (M-weighting) not being based on experimental evidence and the limited number of species taken to be representative for marine mammals at large.

Recommendations for Danish species

Based on *Southall et al. (2007)* and the additional data obtained since 2007, a number of recommendations can be put forward relevant for Danish species of marine mammals.

Two important studies on TTS in harbour seals are available (*Kastak et al., 2005*; *Kastelein et al., 2012a*). Due to lack of data for grey seals, these data are also taken to be valid for this species. The threshold for eliciting TTS by low

frequency noise is found to be in the range 169-182 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ (sound exposure level). Seals are considered robust when it comes to disturbance of behaviour by sound, but very few actual studies are available.

Since 2007 results of several new studies on TTS in porpoises have become available (*Kastelein et al., 2012b; Kastelein et al., 2013b; Lucke et al., 2009; Popov et al., 2011*). Taken together these results indicate that the sound level required to induce TTS in porpoises is frequency dependent, roughly paralleling the shape of the audiogram. Expressed as sound exposure level, the threshold for TTS for a 1 s pure tone signal is 105 dB above the detection threshold.

Analogous to this, are the results of a range of studies on behavioural reactions towards pile driving noise, pingers and seal scarers (*Culik et al., 2001; Carlström et al., 2009; Olesiuk et al., 2002; Johnston, 2002; Brandt et al., 2011, 2012, 2013, Tougaard et al., 2009, 2012; Thompson et al., 2010 and Dähne et al., 2013*), which also display frequency dependence paralleling the shape of the audiogram. The threshold for negative phonotaxis, expressed as sound pressure and weighted with the integration time of the mammalian ear (125 ms) is roughly 55 dB above the detection threshold.

Very few data are available for assessment of impact on other species relevant for Danish waters, primarily white-beaked dolphin and minke whale. Until further data are available, TTS thresholds from bottlenose dolphins are the best available data. These studies have shown TTS induced at sound exposure levels in the range 190-210 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$, depending on stimulus frequency and duration. No firm data is available to base recommendations regarding behavioural reactions for both species. Likewise, the lack of data prevents any conclusions regarding effects on diving birds, fish and invertebrates.

1 Introduktion

Det er velkendt fra mennesker, at støj kan være skadelig. Kraftig støj i kort tid eller lavere støj gennem lang tid kan forårsage høreskader, og selv lavere niveauer af støj over kort tid kan give en række fysiologiske reaktioner. Det har givet sig udslag i en gennemgribende regulering af hvilke støjniveauer, mennesker må udsættes for i deres arbejde (arbejds miljølovgivningen) og i deres bolig (EU's støjdirektiv, byggereglementet). Når det kommer til effekten af støj på dyr, herunder marine organismer, er viden langt mere begrænset. Det skyldes mange faktorer, men faktum er, at der i stigende grad er kommet opmærksomhed på støj som en sandsynlig negativ påvirkning også af biologiske systemer. Hermed er et behov for regulering af området opstået, som igen har skabt et behov for at kunne opstille mere eller mindre faste grænser for hvilke påvirkninger, der er acceptable, og hvilke der ikke er.

Af flere grunde har den største opmærksomhed i sammenhæng med undervandsstøj samlet sig om havpattedyrene, og selvom den nuværende viden er begrænset, er det fortsat den gruppe, hvor der vides mest om mulige støjefekter. Det har resulteret i et hav af rapporter (se bl.a. *National Research Council, 2003, 2005; Nowacek et al., 2007; Tyack, 2009*) og senest er undervandsstøj blevet inkluderet i EU-Kommissionens havstrategidirektiv, som en deskriptor af betydning for vurdering af god miljøtilstand i havmiljøet (*EU-Kommissionen, 2008*). Første skridt videre i form af egentlige anbefalinger kom med udgivelsen fra *Southall et al. (2007)*, der består af en gennemgang af den relevante litteratur, og hvori forfatterne vovede at komme med et første bud på tålegrænser (exposure criteria), dvs. grænseværdier, der ikke skal overskrides, såfremt nærmere definerede påvirkninger på havpattedyrene søges undgået. Disse anbefalinger vil blive gennemgået nedenfor, efterfulgt af en diskussion af mangler og kritiske antagelser bag tålegrænserne, munnende ud i en gennemgang af den tilgængelige viden relevant for danske marine organismer, dog igen med hovedvægt på havpattedyrene.

Et væsentligt element at have for øje ved læsning af *Southall et al. (2007)* er dokumentets baggrund i amerikansk lovgivning og forvaltning, og deraf følgende tilretning af diskussionen til amerikanske forhold. Anbefalingerne kan derfor kun forstås i den rette sammenhæng, som hovedsageligt er de amerikanske fredningsbestemmelser for havpattedyr (den såkaldte Marine Mammal Protection Act), der har hovedfokus på regulering af fysisk skade og forstyrrelse (harassment) af enkeltindivider. Anbefalingerne passer derfor ikke umiddelbart ind i en dansk og europæisk tradition, hvor der især er fokus på påvirkningers effekt på bestandsniveau (hvilket ses meget tydeligt i både EU's habitatdirektiv og havstrategidirektiv).

1.1 Typer af påvirkning

Effekter af støj kan inddeles på forskellig vis. Siden *Richardson et al. (1995)* har det været almindeligt at omtale fire påvirkningszoner: hørbarhed, adfærdsreaktioner, maskering (overdøvning af andre lyde) og fysiologiske skader (høretab og i ekstreme tilfælde fysiologiske skader eller død). Hertil bør tilføjes to yderligere kategorier: fysiologiske effekter på fx kredsløb og hormonniveauer og ikke-auditoriske effekter, dvs. effekter af lyd, der ikke har med hørelse at gøre. Da forskellige dyregrupper har forskellig hørelse og sandsynligvis også forskellig følsomhed for støj, er udbredelsen af zonerne

ikke bare specifikke for den enkelte lydkilde, men også for arter eller artsgrupper.

Hørbarhed - I sig selv ikke en effekt og derfor siger størrelsen af den hørbare zone i sig selv ikke noget om påvirkningen. I mangel af bedre kan den dog bruges som et første og øvre estimat for påvirkningszonen, idet hørbarhed antages at være forudsætningen for de øvrige påvirkninger (med undtagelse af ikke-auditoriske påvirkninger, se senere).

Maskering - Den zone, hvori en given støjpåvirkning kan gøre det vanskeligere for et dyr at opfatte andre, for dyret, væsentlige lyde, såsom lyde fra artsfæller, byttedyr og rovdyr. Udstrækningen af maskeringszonen kan være meget stor og i teorien række ud over hørbarhedszonen.

Adfærdsændring - Den zone, hvori en given støjpåvirkning giver anledning til ændring af dyrets adfærd (flugt, afbrydelse af anden aktivitet, nysgerrighed osv.). Zonen er vanskelig at anvende i praksis, da reaktion på en lyd i sig selv ikke siger noget om, hvilken effekt forstyrrelsen har. Ikke desto mindre, nok den mest betydningsfulde zone set i populationssammenhænge. Selvom der ofte er tale om små påvirkninger, sker disse over potentielt meget store områder og er dermed fordelt på mange individer.

Fysiologiske effekter - Den zone, hvor dyrenes fysiologi er påvirket (fx forhøjede stresshormon-niveauer) uden at det i sig selv giver anledning til nogen ændring af adfærd. Zonen er vanskelig at måle og vanskelig at bestemme betydningen af.

Fysisk skade - Den zone, hvori dyrene lider direkte fysisk overlast på grund af lyden. På nær de mest ekstreme lydkilder (eksplosioner og seismiske luftkanoner), vil der i de fleste tilfælde være tale om skader alene på det indre øre (midlertidig eller permanent hørenedsættelse, benævnt hhv. TTS og PTS).

Ikke-auditoriske effekter - Hos mennesker er der beskrevet en række ikke-auditoriske effekter af kraftig infralyd, dvs. effekter som fx skyldes påvirkning af ligevægtsorganerne snarere end hørelsen. Betydningen af sådanne effekter for marine organismer er helt ukendt.

2 anbefalingerne fra Southhall et al. (2007)

Sammenfatningen præsenteret af *Southall et al. (2007)* er den første og hidtil eneste samlede fremstilling af kriterier for vurdering af undervandsstøj for havpattedyr. Anbefalingerne er opstået på baggrund af behov for retningslinjer i den amerikanske forvaltning af havpattedyr og forstyrrelser af disse og skal derfor læses med de briller. Det betyder, at udgangspunktet for sammenfatning og anbefalinger har været amerikansk lovgivning, herunder navnlig den såkaldte Marine Mammal Protection Act (MMPA). MMPA er i væsentlig udstrækning fokuseret på regulering af negative påvirkninger på enkeltindivider. Dette betyder, at det som udgangspunkt er uønsket og i mange tilfælde direkte forbudt at påføre havpattedyr skader og forstyrre deres naturlige adfærd. Dette leder naturligt til to separate problemstillinger, der da også behandles selvstændigt i *Southall et al. (2007)*: 1) Hvad udgør en skade på et havpattedyr og 2) hvad udgør en forstyrrelse af naturlig adfærd? Selvom andre effekter af støj nævnes, så betyder dette fokus, at de øvrige effekter, som er nævnt ovenfor, ikke behandles af *Southall et al. (2007)*.

I sammenfatningen opdeles lyde i tre typer, der behandles selvstændigt. Disse typer af lyde er: enkeltpulser (*single pulses*), gentagne pulser (*multiple pulses*) og signaler, der ikke er pulser (*non-pulses*). Definitionen af en puls sensu *Southall et al. (2007)* er ikke fuldstændig klar, og der er signaler med karakteristika af både puls og ikke-pulsnatur. Væsentlige egenskaber ved pulser er: 1) kort varighed, målt i forhold til ørets tidsopløsning (i størrelsesordenen 100 ms) og 2) stor båndbredde (energien spredt ud over mange frekvenser). Et rentonesignal, uanset hvor kort det er, vil falde i kategorien ikke-puls på grund af den smalle båndbredde. Eksempler på lyde inddelt i typer er givet i *tabel 1*.

Tabel 1. Eksempler på lyde, inddelt i de tre kategorier som *Southall et al. (2007)* opererer med.

Type	Biologiske lyde	Menneskeskabte lyde
Enkeltpuls	Lyde fra pistolreje	Ekspllosion
Gentagne pulser	Ekkolokaliseringslyde fra tandhvaler	Ekkolod Seismiske kilder (luftkanoner, boomers, sparkers etc.) Pæleramning
Ikke-pulser	Fiskelyd Bardehvalkald Delfinfløjt	Visse typer sonar Skibsstøj Visse typer pingere Undervandstelefon

2.1 Inddeling af arter

Det er praktisk umuligt at definere selvstændige tålegrænser for alle arter af havpattedyr, ikke blot fordi der er mange arter, men også fordi det er umuligt at forestille sig, at eksperimentelle data nogensinde vil være tilgængelige for alle arter. Det er derfor nødvendigt at inddele arterne i et passende antal grupper. Baseret på det forholdsvis lave antal arter, hvor høreskader og/eller adfærdsreaktioner er blevet studeret, inddeler *Southall et al. (2007)* havpattedyrene i fire grupper: 'LF-hvaler', 'MF-hvaler', 'HF-hvaler' og 'Sæler og søløver'. (*tabel 2*).

2.1.1 Hvaler med bedste hørelse i det lavfrekvente område (LF-hvaler)

Til denne gruppe regnes alle bardehvaler. Der findes kun indirekte information om deres hørelse, hvilket gør det til en problematisk gruppe. Alle arterne kommunikerer med lyd i det meget lavfrekvente område (fra 10 Hz til nogle få kHz), og det må antages, at deres bedste hørelse også findes i dette område. Anatomi og biofysik af det indre øre (primært bredden og stivheden af basilarmembranen¹) hos disse arter er i overensstemmelse med følsomhed for ekstremt lave frekvenser. Høretærskler (audiogrammer) og bredde af kritiske bånd er imidlertid ikke tilgængelige, og der findes ingen mål for TTS (se nedenfor). Tålegrænserne for denne gruppe må derfor i bedste fald betragtes som kvalificerede gæt.

2.1.2 Hvaler med bedste hørelse i det mellemste frekvensområde (MF-hvaler)

Denne gruppe indeholder hovedparten af tandhvalerne: alle større arter af delfiner (inkl. grind og spækhugger), alle næbhvaler, hvidhval, narhval og kaskelot. Der findes et antal audiogrammer for en række arter, op til og med spækhugger (*Orcinus orca*) som den største. Desuden findes et stort antal målinger af en lang række egenskaber for hørelsen hos udvalgte arter, i særdeleshed øresvin (*Tursiops truncatus*) og hvidhval (*Delphinapterus leucas*). Arterne i denne gruppe har bedste hørelse ved frekvenser langt over bardehvalerne, men ikke så højt som højfrekvensgruppen (se næste afsnit). Selvom gruppen indeholder mange arter og spænder vidt i størrelse, så er tålegrænserne for denne gruppe i vidt omfang baseret på direkte målinger og observationer på kun to arter: øresvin og hvidhval.

2.1.3 Hvaler med bedste hørelse i det høje frekvensområde (HF-hvaler)

Denne gruppe indeholder de mindste tandhvaler, herunder marsvin og en række floddelfiner. Mange af disse arter, inkl. marsvin, er kendetegnet ved at anvende ekkolokaliseringsslyde omkring 130 kHz, som er betragteligt højere end for mellemfrekvensgruppen. De få audiogrammer, der findes (herunder for marsvin), er konsistente med et høreområde forskudt opad i forhold til mellemgruppen. For denne gruppe findes ikke samme information om hørephysiologi, TTS-tærskler og adfærdsreaktioner, som for mellemgruppen, men for især marsvin er der et godt datagrundlag til stede. Det meste af dette datamateriale er imidlertid fremkommet efter Southall *et al.* (2007) og er derfor ikke inkluderet i deres gennemgang.

2.1.4 Sæler og søløver

Denne gruppe består af de ægte sæler² (hvortil de danske arter hører), samt søløver, pelssæler og hvalros. Tilgængelige data om hørelse og følsomhed over for støj findes med overvægt fra spættet sæl og andre ægte sæler. For spættet sæl er datagrundlaget godt med mange hørephysiologiske informationer og TTS-tærskler tilgængelige. For andre arter, herunder gråsæl, er datagrundlaget meget ringe. Tålegrænser for denne gruppe gives af Southall *et al.* (2007) for både ophold neddykket i vand og ophold i luft. Denne opdeling er betinget af de store fysiske forskelle mellem vand og luft, hvilket gør det vanskeligt og upraktisk at operere med et fælles kriterium.

¹ Basilarmembranen findes inde i sneglen i det indre øre og er den membran, hvori hørecellerne (hårceller) sidder. Lyd, der kommer ind i øret, sætter basilarmembranen i bevægelse, og denne bevægelse stimulerer igen hørecellerne.

² Familie Phocidae, også kaldet øreløse sæler, da disse arter helt mangler et ydre øre.

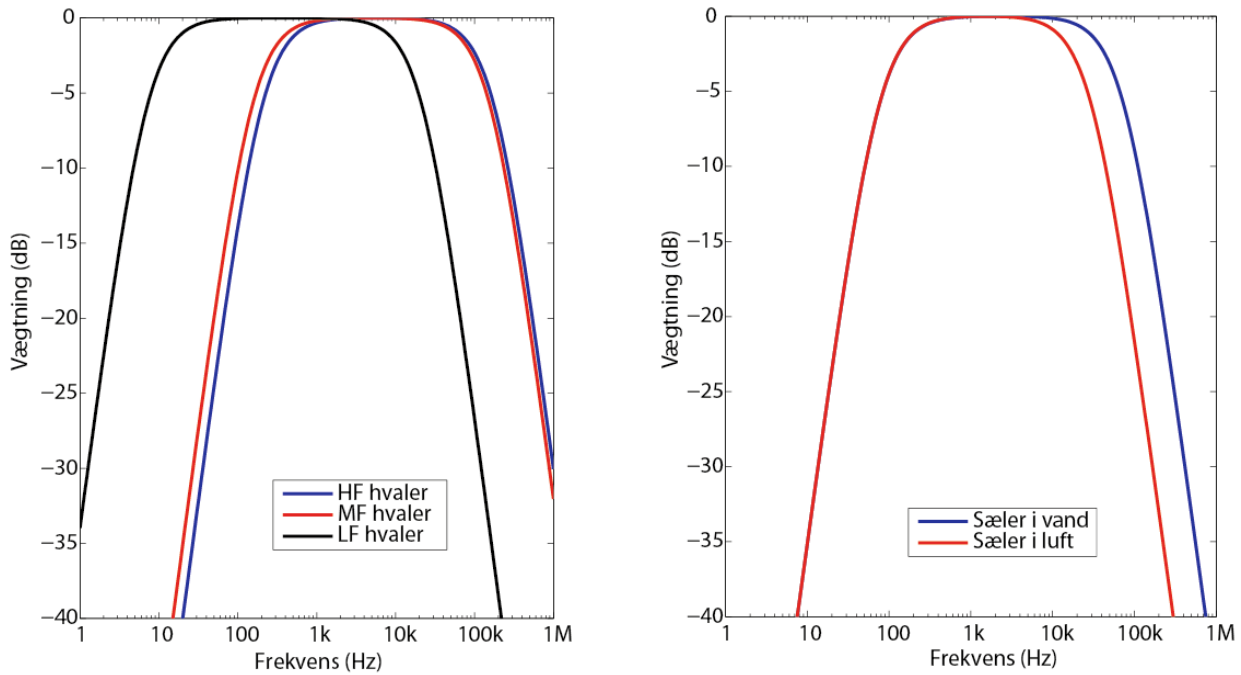
Tabel 2. Oversigt over det hørbare område (båndbredde) for de 4 grupper, *sensu Southall et al. (2007)*.

Gruppe	Båndbredde i vand	Båndbredde i luft
LF-hvaler (bardehvaler)	7 Hz - 22 kHz	ikke relevant
MF-hvaler (herunder øresvin, hvidnæse, kaskelot, spækhugger og grind)	150 Hz - 160 kHz	ikke relevant
HF-hvaler (herunder marsvin)	200 Hz - 180 kHz	ikke relevant
Sæler og søløver	75 Hz - 75 kHz	75 Hz - 30 kHz

2.2 Hørbarhed (M-vægtning)

Hovedformålet med definering af de fire artsgrupper baseret på deres hørelse er at kunne angive retningslinjer for frekvensvægtning af lyde for de enkelte grupper. Intuitivt giver det god mening at vægte lyde efter deres hørbarhed, sådan at lyde med energi i det frekvensområde, hvor en art har bedste hørelse, vægtes med større potentiale for påvirkning end en tilsvarende lyd med energien anbragt uden for området med bedste hørelse. Denne type frekvensvægtning er næsten universelt implementeret i forhold til vurdering af støjgener for mennesker, hvor lydtryk som oftest angives som dB (A), hvor A'et indikerer, at en såkaldt A-vægtning er foretaget. A-vægtningen svarer omtrent til, at energien ved de forskellige frekvenser er vægtet i forhold til deres hørbarhed for mennesker, således at lyde i området omkring 1 kHz vægtes med 100 %, og lyde med højere eller lavere frekvens vægtes mindre og mindre, jo længere væk de er fra 1 kHz. Formen på vægtningsfunktionen svarer omtrent til det inverterede humane audiogram (høj vægtning, hvor høretærsklen er lav (bedste hørelse), og lav vægtning hvor høretærsklen er høj).

En tilsvarende vægtning bør også gennemføres, før en vurdering af eventuelle effekter på marine organismer foretages og *Southall et al. (2007)* anvender her inddelingen i de fire høregrupper som basis for vægtningen. Forfatterne tager imidlertid ikke udgangspunkt i audiogrammerne for de forskellige arter, men i den såkaldte C-vægtningskurve for mennesker. Baggrunden for C-vægtningen og de mulige problemer med dette valg gennemgås i et senere afsnit. For nuværende er det tilstrækkeligt at notere, at C-vægtningskurven for mennesker er betragteligt bredere end det inverterede audiogram, og således vægter især lavfrekvente lyde mere end en A-vægtning gør. Vægtningskurver for havpattedyr, der svarer til C-vægtningen for mennesker, benævnes M-vægtningskurver, og de foreslåede kurver for de fire høregrupper af havpattedyr er angivet i *figur 1*.



Figur 1. M-vægtningskurver *sensu Southall et al. (2007)*, for hvaler til venstre, og for sæler til højre. Kurverne angiver den frekvensafhængige korrektion af frekvensspektrret for at opnå M-vægtede værdier.

2.3 Kriterier for fysisk skade/høretab

Påvirkning fra enkelte, kraftige lydkilder er de hidtil bedst undersøgte effekter af menneskeskabt undervandsstøj. Der er således dokumenteret effekter på havpattedyr fra bl.a. seismiske undersøgelser, pæleramninger i forbindelse med vindmøllebyggerier, anti-ubådssonarer og skræmmeanordninger (sæl-skræmmere). Disse lydkilder kan direkte skade sæler og hvaler på nært hold. Forud for *Southall et al. (2007)* foregik en lang diskussion af, hvordan skader skulle defineres. Disse diskussioner endte med generel enighed om midlertidigt høretab (temporary threshold shift - TTS) som et konservativt (forsigtighedsbaseret) mål for skader ud fra betragtningen, at ørerne som specialiserede sanseorganer er de mest følsomme organer over for høje lydtryk, hvor TTS er det første tegn på reversible skader.

2.3.1 Midlertidigt høretab - TTS

Midlertidig (reversibel) forhøjelse af høretærsklen er et velbeskrevet fænomen fra mennesker og alt tyder på, at det findes generelt hos pattedyr. Udsættes øret for en kraftig og/eller vedvarende støjpåvirkning, vil følsomheden af øret falde, hvilket vil give sig udslag i en større eller mindre hørenedsættelse. Denne hørenedsættelse er midlertidig og hørelsen vender tilbage til normalt niveau i løbet af en periode på få minutter for meget små påvirkninger og timer til døgn for meget kraftige påvirkninger. Imidlertid er det vist, at TTS kan føre til permanente skader på ørets sanseceller, også selvom følsomheden er uændret (*Kujawa & Liberman, 2009*). Ved gentagne påvirkninger eller ved meget kraftig og/eller langvarig støjpåvirkning vil følsomheden ikke vende fuldstændigt tilbage til normalen (*Clark, 1991*), og dermed har påvirkningen resulteret i et permanent høretab (PTS). TTS er et almindeligt fænomen og kendes af de fleste som fornemmelsen af at have vat i ørerne, fx efter en rockkoncert.

Konsensus omkring TTS også gældende for havpattedyr, som et anvendeligt nedre mål for skader forårsaget af lyd, medførte, at en lang række målinger af TTS-tærskler hos havpattedyr, herunder især øresvin, hvidhval og spættet sæl blev igangsat. Den generelle konklusion fra disse studier var, at TTS kan udløses både af en kortvarig belastning ved et højt lydtryk og af en længerevarende påvirkning ved lavere lydtryk. Grænseværdierne udtrykkes derfor på to måder af *Southall et al. (2007)*: dels som et absolut spids-lydtryk (målt i dB re 1 μPa), dels som total energi af hele pulsen (målt i dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$), uanset varighed.

Southall et al. (2007) tog imidlertid diskussionen af definition af skader et skridt videre, og endte med en definition baseret ikke på midlertidigt høretab (TTS), men permanent høretab (PTS). Tærsklen for PTS ligger naturligvis over tærsklen for TTS, hvilket betyder, at forfatterne har opjusteret de tærskler, der er fundet eksperimentelt for TTS (af indlysende dyretiske grunde måler man ikke tærskler for PTS på havpattedyr). Denne opjustering er foretaget på baggrund af erfaringer fra mennesker, hvor det er set, at der ved tærskelændringer på 40 dB eller mere er forhøjet risiko for permanent høretab. PTS tærsklerne er estimeret af *Southall et al. (2007)* ved ekstrapolering af TTS-funktionen, som beskriver, hvor mange dB høretærsklen hæves, for hver gang støjen øges med 1 dB. Baseret på erfaringer fra landlevende pattedyr anvender *Southall et al. (2007)* konservative værdier for forskellen mellem TTS- og PTS-tærskler, dvs. de anvender TTS-kurver, der formentlig er stejlere end i virkeligheden. For pulser skønner *Southall et al. (2007)*, at PTS-tærsklen ligger 15 dB over TTS-tærsklen, når denne udtrykkes som energi og 6 dB over TTS-tærsklen, når den udtrykkes som lydtryk. Tilsvarende anvendes for ikke-pulser en forskel på 20 dB for energi og 6 dB for lydtryk.

Grænseværdier for frembringelse af PTS hos havpattedyr, som anslået af *Southall et al. (2007)*, er angivet i tabel 3.

Tabel 3. Grænseværdier for fysisk skade (PTS) forårsaget af lyd for hvaler og sæler i vand, *sensu Southall et al. (2007)*.

Gruppe	Pulser ¹⁾		Ikke-pulser	
	Lydtryk (0-spids) ²⁾	SEL (energi) ³⁾	Lydtryk (0-spids) ²⁾	SEL (energi) ³⁾
Hvaler	230 dB re. 1 μPa	198 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}^4$	230 dB re. 1 μPa	215 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}^4$
Sæler i vand	218 dB re. 1 μPa	186 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	218 dB re. 1 μPa	203 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$

Noter: ¹⁾ Både enkeltpulser og gentagne pulser. For gentagne pulser summeres energien (SEL) af samtlige pulser før sammenstilling med værdien i tabellen. For spids-lydtryk angives alene spids-lydtrykket af den kraftigste enkeltpuls.

²⁾ Spids-lydtrykket angives som uvægtet, dvs. der anvendes ikke en M-vægtningsskurve til udregningen.

³⁾ Energien beregnes på M-vægtede signaler for den pågældende høregruppe (LF-, MF- og HF-hvaler, samt sæler i vand).

⁴⁾ Alle tre høregrupper af hvaler er i *Southall et al. (2007)* slået sammen og baseret alene på data fra MF-gruppen, da ingen data fra LF- eller HF-gruppen forelå. Der er imidlertid senere fremkommet data for HF-gruppen (på marsvin), som har vist sig betragteligt mere følsomme end MF-gruppen (se senere afsnit om specifikke anbefalinger for marsvin).

Table 4. Skala for grad af respons til lyd som blev anvendt af *Southall et al. (2007)* til fastsættelse af grænseværdier for adfædsændringer forårsaget af undervandslyd.

Niveau	Fritsvømmende dyr	Dyr i fangenskab
0	Ingen observerbar reaktion.	Ingen observerbar reaktion.
1	Kortvarig orienteringsadfærd (dyret vender hovedet mod lyden).	Ingen observerbar reaktion.
2	Orienteringsadfærd. Kortvarig ændring i lydproduktion. Kortvarig ændring i åndedrætsmønster.	Ingen observerbar negativ reaktion. Evt. undersøgende adfærd.
3	Vedvarende orienteringsadfærd. Opmærksomhedsadfærd hos enkelt dyr. Mindre ændringer i svømmehastighed, -retning, og/eller dykkeadfærd. Ændring i åndedrætsmønster. Kortvarigt ophold og/eller ændring i lydproduktion, inkl. øgning af lydtryk (Lombard-effekt).	Små ændringer i trænet adfærd.
4	Større ændringer i svømmehastighed, -retning, og/eller dykkeadfærd, men ikke negativ phonotaxi (bevægelse væk fra lyden). Kortvarige ændringer i gruppestruktur. Moderat ophold og/eller ændring i lydproduktion, inkl. øgning af lydtryk (Lombard-effekt).	Moderate ændringer i trænet adfærd (fx afvisning af at komme til træner, lang responstid på tegn).
5	Kraftige ændringer i svømmehastighed, -retning, og/eller dykkeadfærd, men ikke negativ phonotaxi (bevægelse væk fra lyden). Moderate ændringer i gruppestruktur, herunder ændringer i afstande mellem individer inden for en gruppe. Vedvarende ophold og/eller ændring i lydproduktion, inkl. øgning af lydtryk (Lombard-effekt).	Svære og vedholdende ændringer i trænet adfærd (forlader træner under forsøg).
6	Mindre grad af negativ phonotaxi (undvigelse fra lyden) hos individer eller hele grupper. Kortvarig adskillelse af hunner og unger. Aggressiv adfærd over for lydkilden. Markant og vedvarende ændringer i lydproduktion. Synlig forskrækkelse på pludselig lyd. Kortvarig afbrydelse af parringsadfærd.	Afvisning af deltagelse i træning.
7	Voldsom eller vedvarende aggressiv adfærd. Moderat adskillelse af hunner og unger. Tydelig adfærd normalt rettet mod rovdyr. Markant og/eller langvarig undvigelse af lydkilden. Moderat afbrydelse af parringsadfærd.	Undviger forsøgsopstilling. Retræte til beskyttet område. Evt. trusselsadfærd eller angreb på lydkilde.
8	Tydeligt ubehag og/eller stigende sensitivering. Langvarig eller signifikant adskillelse af hunner og unger. Langvarig undvigelse af området med lydkilden. Langvarig afbrydelse af parringsadfærd.	Afvisning af forsøgsopstilling rækkende ud over den enkelte træningssession. Vedvarende retræte til beskyttet område.
9	Åbenlys panik og/eller flugt. Angreb på artsfæller. Levende strandinger. Undvigeadfærd, som ellers normalt er udløst af angreb fra rovdyr.	Totalt fravær fra det lydeksponerede område. Afvisning af deltagelse i træning ud over et døgn.

2.3.2 Kriterier for adfærdsreaktioner

Når det kommer til adfærdsforstyrrelser er fastsættelse af tærskler for reaktioner langt vanskeligere. Dels er der problemet med at definere, hvad en adfærdsreaktion er, dels er det forventeligt, at der er meget stor variation i respons mellem individer (bl.a. baseret på deres tidligere erfaring med lyd) og også inden for det enkelte individ (respons til en given lyd afhænger i udstrakt grad af de omstændigheder, hvorunder dyret udsættes for lyden). Sidst, men ikke mindst er der praktiske problemer med at observere reaktioner hos dyr i naturen samt med at overføre resultater fra dyr i fangenskab til realistiske situationer i naturen. Alt andet lige må man forvente andre reaktioner hos dyr i fangenskab end for fritsvømmende dyr i naturen. Fangenskabsdyrene har ofte været eksponeret for undervandsstøj gennem lang tid, de kan være trænet til at acceptere mere eller mindre ubehagelige stimuli mod kontant belønning i form af mad, og ikke mindst er dyr i fangenskab, på grund af de begrænsede fysiske rammer, stærkt begrænset i deres mulighed for at udvise hele deres repertoire af adfærd som respons på lyd. Det er derfor ikke nogen nem opgave at definere disse tålegrænser, og *Southall et al. (2007)* fortjener anerkendelse for overhovedet at forsøge, på trods af at de ikke følte sig i stand til at tage det endelige skridt og sætte tal på. I det følgende er en kort gennemgang af deres metode og konklusioner. Udgangspunktet for vurderingen er en skala til vurdering af graden af respons, gående fra ingen synlig ændring i adfærd til åbenlyse panikreaktioner (*tabel 4*). Reaktionen er opdelt i fritsvømmende dyr og dyr i fangenskab.

2.3.3 Adfærdsreaktioner hos de enkelte grupper

Den væsentligste forudsætning for at kunne diskutere tærskler for adfærdsændringer er observationer og/eller forsøg, hvor man ret entydigt kan sammenholde observationer af adfærd med målinger eller estimater af det lydtryk, der var til stede ved dyret på tidspunktet for observationen af adfærdsændringen (eller fraværet af en ændring i adfærd, hvilket er lige så værdifuldt i denne sammenhæng). Fremgangsmåden for *Southall et al. (2007)* var en sammenstilling af alle observationer fra naturen og fangenskab, hvor denne kobling mellem eksponering (lydtryk) og reaktion (adfærdsændring) med rimelighed kunne etableres. Håbet hos forfatterne har tydeligvis været, at fornuftige dosis-responsrelationer derved ville fremkomme, således at man ville se gradvist flere og sværere reaktioner (bedømt ud fra kriterierne i *tabel 4*) med stigende lydeksponering, og at minimumsniveauer eller gennemsnitsniveauer svarende til moderate reaktioner (niveau 4-6 i *tabel 4*) dermed kunne etableres. I praksis viser det sig imidlertid, at en sådan simpel og generel dosis-respons-sammenhæng ikke lader sig etablere. Dette skyldes sandsynligvis en række forhold. Dels de ovenfor nævnte forskelle i respons både mellem individer og inden for det samme individ, afhængigt af de konkrete omstændigheder, men dels også fordi det langtfra er trivielt, hvis overhovedet muligt, at sammenfatte, hvor generende forskellige lyde er med et simpelt mål, såsom rms-lydtrykket eller det M-vægtede lydeksponeringsniveau (SEL). Erfaringer fra mennesker viser det modsatte. Visse typer lyd (fx barnegråd) kan være forstyrrende ved meget lave lydstyrker, mens andre (fx musik eller fuglesang) ofte tolereres selv ved høje lydstyrker (omend med meget store variationer mellem individer).

Hovedkonklusionerne fra *Southall et al. (2007)* gennemgås i det følgende kun kort, idet de enkelte, for Danmark, relevante arter gennemgås mere fyldestgørende i et senere afsnit. Hovedvægten er lagt på yderområderne, dvs. de

laveste niveauer, hvor reaktioner er set og de højeste niveauer, hvor reaktioner ikke blev observeret (tabel 5).

2.3.4 LF-hvaler (bardehvaler)

En række studier har på den ene side påvist reaktioner ved meget lave modtagne lydtryk (110-140 dB re. 1 μ Pa rms for seismiske signaler og 90-120 dB re. 1 μ Pa rms for støj fra olieudvinding), men på den anden side er der observationer af bardehvaler, der ikke reagerer på noget højere niveauer (150-180 dB re. 1 μ Pa rms for seismiske signaler og 130-140 dB re. 1 μ Pa rms for borestøj + sonarpulser). Sammenfattende må man derfor for ikke-pulser konkludere, at niveauer under 90 dB re. 1 μ Pa rms ikke giver anledning til reaktioner, mens niveauer over 140 dB re. 1 μ Pa rms gør. For pulser er tærskelområdet bredere, 110-180 dB re. 1 μ Pa rms, men her er sammenligningen af de enkelte studier vanskeliggjort af, at rms-lydtryk er dårligt defineret for seismiske signaler (Madsen, 2005), samt det faktum at hørbarheden for korte pulser afhænger af pulsvarigheden (ørets integrationstid, se senere afsnit).

Tabel 5. Eksempler på reaktioner på undervandslyd hos bardehvaler, *sensu Southall et al (2007, deres tabel 6, 7, 14 og 15).*

Lydkilde	Art og omstændigheder	Reaktioner	Niveau for reaktion (jf. tabel 4)	Fravær af reaktioner
Luftkanoner (seismiske undersøgelser)	Migrerende grønlandshvaler	110-140 dB re. 1 μ Pa rms ¹⁾ (Richardson et al., 1999)	1, 5 og 6	
Luftkanoner (seismiske undersøgelser)	Gråhvaler Fouragerende grønlandshvaler			150-180 dB re. 1 μ Pa rms ¹⁾ (Malme, 1983, 1984; Miller, 2005)
Skibsstøj, borestøj	Pukkelhvaler Migrerende gråhvaler Migrerende grønlandshvaler	90-120 dB re. 1 μ Pa rms <i>Baker, 1982; Malme, 1983, 1984;</i> (Richardson et al., 1990)	2, 3, 4 og 6	
Borestøj, LF-sonar + andre ikke-pulser	Migrerende gråhvaler Fouragerende fin- og blåhvaler Nordkaper			130-140 dB re. 1 μ Pa rms <i>Malme, 1983, 1984; Croll, 2001; Nowacek, 2004</i>

Note: ¹⁾ rms-mål er meget dårligt defineret for transienter, såsom luftkanonpulser, og det er derfor vanskeligt at sammenligne værdierne med hinanden og med andre mål for lydstyrke (se Madsen, 2005) og Tougaard, 2014.

2.3.5 MF-tandhvaler

Der er ret få studier af reaktioner på pulser hos MF-tandhvaler, om end der er kommet flere efter Southall et al.'s gennemgang. Et større antal studier af reaktioner på ikke-pulslyde er til rådighed, men til gengæld er spredningen i lyd niveauer, hvor reaktioner ses meget stort, og det er vanskeligt at generalisere. Southall et al. var derfor ikke i stand til at give generelle konklusioner for MF-tandhvaler, idet nogle studier så reaktioner allerede ved lydtryk på 90 dB re. 1 μ Pa rms (hvidhvaler, der reagerer på isbryderstøj), mens andre studier ikke kunne se reaktioner ved niveauer helt op til 180 dB re. 1 μ Pa rms (bl.a. kaskelotter udsat for luftkanon-pulser). Se tabel 6.

Tabel 6. Eksempler på reaktioner på undervandslyd hos MF-tandhvaler, sensu *Southall et al. (2007, deres tabel 8, 9, 15 og 16)*.

Lydkilde	Art og omstændigheder	Lydtryk hvor reaktioner sås	Niveau for reaktion (jf. tabel 4)	Lydtryk hvor reaktioner stadig var fraværende
Luftkanoner (seismiske undersøgelser)	Hvidhvaler	120-150 dB re. 1 μ Pa rms ¹⁾ (<i>Miller, 2005</i>)	6	
Luftkanoner Div. pulsllyde	Kaskelot Halvspækhugger			170-180 dB re. 1 μ Pa rms ¹⁾ (<i>Madsen & Møhl, 2000; Akamatsu, 1993</i>)
Pingere Skibsstøj/isbryderstøj	Kaskelotter Hvidhval og narhval	80-120 dB re. 1 μ Pa rms (<i>Watkins, 1975; Anonymous, 1986</i>)	3 og 8	
Støj	Øresvin (i fangenskab)			180-200 dB re. 1 μ Pa rms (<i>Finneran, 2004</i>)

Note: ¹⁾ rms-mål er meget dårligt defineret for transienter, såsom luftkanonpulser, og det er derfor vanskeligt at sammenligne værdierne med hinanden og med andre mål for lydstyrke (se *Madsen, 2005*) og *Tougaard, 2014*.

2.3.6 HF-tandhvaler

Observationer fra denne gruppe stammer stort set udelukkende fra marsvin, hvor der til gengæld findes en del studier inkluderet i *Southall et al. (2007)*, og flere er kommet til siden. Resultaterne er generelt samstemmende med tærskler i området 80-130 dB re. 1 μ Pa rms. Se tabel 7.

Tabel 7. Eksempler på reaktioner på undervandslyd hos HF-tandhvaler, sensu *Southall et al. (2007, deres tabel 18 og 19)*. På det tidspunkt opgørelsen blev lavet, var ingen tærskler tilgængelige for pulser.

Lydkilde	Art og omstændigheder	Reaktioner	Niveau for reaktion (jf. tabel 4)	Fravær af reaktioner
Diverse ikke-pulsllyde	Marsvin (i fangenskab)	80-110 dB re. 1 μ Pa (<i>Kastelein, 1997</i>)	4 og 6.	
Sælskræmmer	Marsvin (i naturen)			120-130 dB re. 1 μ Pa rms. (<i>Johnston, 2002</i>)

2.3.7 Sæler

De fleste studier af sælers reaktion på lyd viser forholdsvis stor tolerance over for selv middelhøje lydpåvirkninger, med begyndende reaktioner i området 130-150 dB re. 1 μ Pa rms. En undtagelse er forsøg i fangenskab, hvor svage reaktioner kunne påvises ved lavere niveauer (*Kastelein et al., 2006a*). Se tabel 8.

Tabel 8. Eksempler på reaktioner på undervandslyd hos sæler, *sensu Southall et al. (2007, deres tabel 10, 11, 20 og 21)*.

Lydkilde	Art og omstændigheder	Reaktioner	Niveau for reaktion (jf. tabel 4)	Fravær af reaktioner
Luftkanoner Pæleramninger	Ringsæl m.fl.	130-170 dB re. 1 μ Pa rms ¹⁾ (Harris, 2001; Blackwell, et al. 2004)	1 og 6.	
Luftkanoner (seismiske undersøgelser)	Ringsæl Remmesæl			180-200 dB re. 1 μ Pa rms ¹⁾ (Miller, 2005; Harris, 2001)
Div. undervandstele foni-signaler m.m.	Spættet sæl	100-130 dB re. 1 μ Pa rms (Kastelein et al., 2006a)	6.	
Sælskræmmer ATOC ²⁾	Spættet sæl Søelefant			110-130 dB re. 1 μ Pa rms (Jacobs & Terhune, 2002; Costa, 2003)

Noter: ¹⁾ rms-mål er meget dårligt defineret for transienter, såsom luftkanonpulser, og det er derfor vanskeligt at sammenligne værdierne med hinanden og med andre mål for lydstyrke (se Madsen, 2005 og Tougaard, 2014).

²⁾ 75 Hz signal benyttet til langdistancemålinger af lydhastighed.

Sammenfattende konkluderer Southall et al. (2007), at der endnu ikke er grundlag for at fastsætte generelle tærskler for adfærdsreaktioner, men at flere studier er nødvendige. I det efterfølgende afsnit diskuteres nogle af de væsentligste svagheder i Southall et al.'s analyse.

3 Begrænsninger i Southall et al. (2007)

Forfatterne til sammenfatningen i *Southall et al. (2007)* fortjener stor ros for at stikke hovederne frem og faktisk komme med forslag til konkrete kriterier og dermed åbne for muligheden for den kritik, der altid vil opstå af forsøg på generaliseringer baseret på sparsomt datamateriale. Denne kritik er væsentlig at få med, men findes endnu ikke klart udtrykt på skrift. Nedenfor følger en diskussion af en række punkter, hvor *Southall et al. (2007)* i større eller mindre grad kommer til kort.

3.1 Potentielle støjefakter, der ikke omtales

Southall et al. (2007) ligger i naturlig forlængelse af *Richardson et al. (1995)*, der præsenterede et af de første sammenhængende oversigtsarbejder om effekter af undervandsstøj. *Richardson et al. (1995)* definerede fire påvirkningszoner: 1) hørbarhed, 2) adfærdspåvirkning, 3) maskering og 4) fysisk skade. Af disse er hørbarhed ikke en egentlig påvirkning, men i kraft af antagelsen om hørbarhed som forudsætning for en effekt tjener den som basis for worst-case estimater af påvirkningsafstande. *Southall et al. (2007)* diskuterer alene udstrækningen af zonerne for fysisk skade og adfærdspåvirkninger. Maskering behandles ikke, ligesom et par andre effekter, som heller ikke medtages af *Richardson et al. (1995)*. Her er dels tale om de ikke-auditoriske effekter (se nedenfor), og dels de effekter, der ikke giver anledning til synlig ændring af adfærden hos de påvirkede dyr, hvor der er tale om mindst to undertyper; 1) de fysiologiske effekter såsom øget koncentration af stresshormoner og påvirkning af åndedræt og blodkredsløb, 2) en række subtile effekter, der kan sammenfattes som forpassede muligheder, hvor støjen distraherer dyret, sådan at en mulighed for fx byttefangst, parring, og flugt fra et rovdyr forpasses. Metodisk er de sidstnævnte effekter meget vanskelige at påvise, idet de giver sig udslag i fraværet af en adfærd, der under normale omstændigheder ville være foregået (et byttedyr der ikke bliver fanget, et rovdyr der ikke opdages i tide osv.). Dog kan effekterne af dette fravær i visse tilfælde være meget dramatiske (som fx for en fisk, der ikke opdager en prædator i tide). Som nævnt er disse effekter overordentligt udfordrende at påvise eksperimentelt (omend ikke umulige), men det er væsentligt at huske på deres tilstedeværelse, idet de udfordrer antagelsen om, at dyr, der ikke ændrer adfærd, ikke er påvirket

3.2 Hørbarhed som forudsætning for effekt

Det er en grundlæggende forudsætning for *Southall et al. (2007)*, at audiogrammet for en given art sætter den nedre grænse for effekter af støj ud fra den betragtning, at øret er specialiseret til at registrere lyd og derfor må være det mest følsomme organ i kroppen. Heraf følger, at hvis et dyr ikke kan høre lyden, så vil lyden heller ikke kunne påvirke andre organer og dermed skade dyret. Denne antagelse er absolut rimelig i det frekvensområde, hvor dyret hører bedst, men kan være problematisk i yderområderne, specielt ved lave frekvenser. Alvorlige ikke-auditoriske effekter kan forårsages af meget lave frekvenser, som har mulighed for at påvirke andre organer end hørelsen, heraf både sanseorganer (ligevægtssansen og hos fisk også sidelinjesystemet) og luftfyldte hulrum som lunger, tarm og svømmeblære. Se fx *Salt & Lichtenhan (2014)* for omtale af mulige effekter af infralyd på mennesker. Denne type effekter er ikke beskrevet eller påvist hos havpattedyr, men kan ikke udelukkes.

3.3 Skalering af adfærdsreaktioner

Grundlaget for diskussion af adfærdseffekter i *Southall et al. (2007)* er en antagelse om proportionalitet mellem effekt og graden af reaktion, eller med andre ord: jo kraftigere adfærdsændring hos dyret, jo større effekt har påvirkningen på dyret. Denne antagelse er ikke underbygget af data. Målestokken i sådanne sammenhænge bør i stedet være størrelsen *fitness*, der sammenfatter dyrets langsigtede muligheder for overlevelse, samt dets muligheder for at sætte afkom i verden. Bruger man *fitness* som mål for effekten, er det vanskeligt at argumentere for en generel proportionalitet mellem reaktion og effekt. Nogle effekter kan være meget voldsomme, men kortvarige. Det kan fx være flugtadfærd udløst af en høj, skarp lyd, såkaldte startle-reaktioner (forskrækkelse), der meget hurtigt kan bringe et dyr væk fra en eventuel fare. Ofte vil effekten af en startle-reaktion være meget kortvarig, idet dyret vil genoptage den normale adfærd kort tid efter påvirkningen, under forudsætning af at påvirkningen ikke gentages. I den anden ende af skalaen findes meget mindre voldsomme reaktioner, der alligevel kan have meget vidtrækkende konsekvenser. En lav, men vedvarende lyd kan fx forårsage, at de påvirkede dyr i langsomt tempo bevæger sig væk fra lyden og dermed fortrænges fra det område, de opholdt sig i, da påvirkningen startede. Hvis det påvirkede område indeholder væsentlige ressourcer for dyrene, vil en sådan fortrængning kunne have meget store konsekvenser for *fitness*, på trods af at selve adfærdsreaktionen ikke ser voldsom ud. Et paradoks opstår i denne sammenhæng, idet det generelt er sådan, at dyr (og mennesker) vil tolerere højere grad af forstyrrelser, før de forlader et område, hvis området er vigtigt for dem, i forhold til hvis området er af marginal betydning. Det giver den paradoksale situation, at den samme lyd vil kunne forårsage større effekt i et område af marginal betydning end i et vigtigt område. Dyrene har populært sagt mindre at miste ved at reagere på lyden i det marginalt vigtige område.

3.4 Maskering

Maskering er, når støj kan gøre det vanskeligere at høre andre lyde og er potentielt et betydeligt problem for havpattedyr. På trods af at der findes en række studier af maskering på dyr i fangenskab (fx *Au & Moore, 1990; Erbe & Farmer, 1998; Johnson, 1968a*), inklusiv marsvin (*Kastelein et al., 2009a; Popov et al., 2006*), er maskering en af de vanskeligste effekter af undervandsstøj at håndtere eksperimentelt. Hovedårsagen er, at maskering (per definition) manifesterer sig som en hævet høretærskel, som er meget vanskelig at påvise på fritsvømmende, vilde dyr. Resultatet af maskering er derfor ofte fraværet af en adfærd, idet dyret, hvis dets hørelse er maskeret, ikke hører en artsfælle, et byttedyr eller et rovdyr. Som nævnt ovenfor kan konsekvensen af dette fravær af adfærd være betydelig, men det er eksperimentelt meget vanskeligt at påvise. Dette er årsagen til, at der ikke findes direkte studier af maskering hos hverken fisk eller havpattedyr i naturen, og dette er sandsynligvis forklaringen på, at *Southall et al. (2007)* helt ignorerer effekten.

Maskering af kommunikationslyde er særligt en problemstilling i de åbne oceaner, hvor bardehvalers lavfrekvente kommunikationslyde under naturlige forhold kan høres hundredvis af kilometer væk. Da kommunikations-signalerne netop ligger i det frekvensområde (10-1000 Hz), der er domineret af skibsstøj, er potentialet for maskering, med heraf følgende reduktion af kommunikationsafstandene, meget stort. Problemet er mindre, men ikke fraværende, i danske farvande. Af bardehvaler er kun vågehvalen almindeligt forekommende i den danske del af Nordsøen, og den generelt lave

vanddybde i Nordsøen gør, at de naturlige kommunikationsafstande for vågehval er væsentligt mindre end i det dybe ocean. Den menneskeskabte støj i Nordsøen må dog formodes at være ganske betydelig og overlappende med vågehvalernes kommunikationslyde. Maskering af marsvins sonar- og kommunikationslyde med skibsstøj er vurderet af *Hermannsen et al. (2014)*, som konkluderede, at maskering af marsvins egne lyde kun forekommer i nærheden af skibet (under 1 km), mens lavere frekvenser kan maskeres i større afstand. De øvrige arter af relevans for Danmark (hvidnæse, spættet sæl og gråsæl) har ikke været vurderet. Især sælerne bør påkalde sig opmærksomhed, da deres kommunikationslyde er i samme frekvensområde som skibsstøjen, hvorimod de små tandhvaler bruger lyde, der i frekvens ligger over skibenes bidrag til baggrundsstøjen (for marsvins vedkommende ganske betragteligt over).

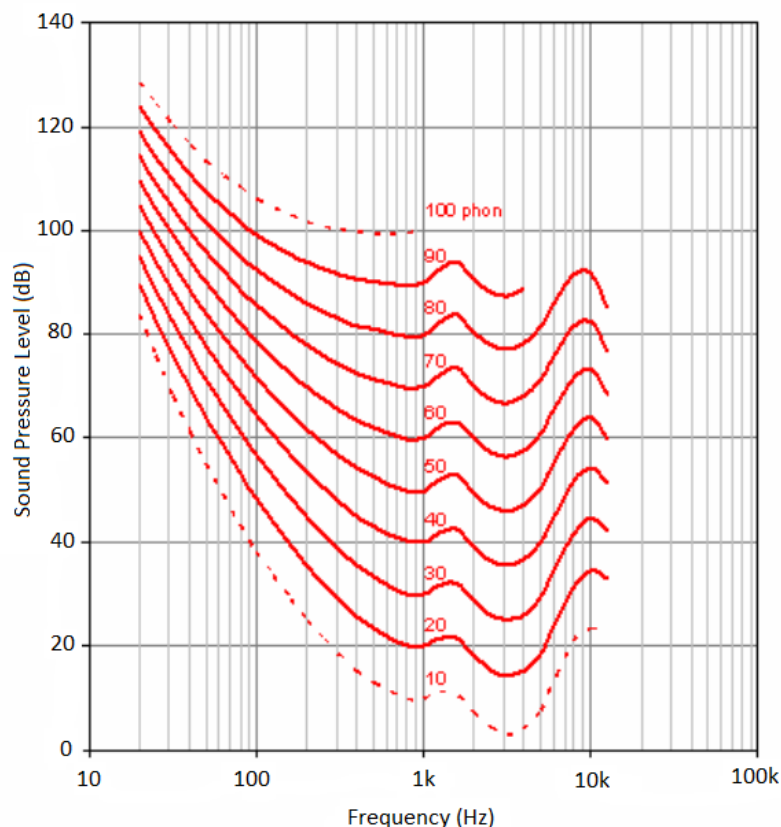
3.5 Frekvensvægtning baseret på hørbarhed (M-vægtning)

Det er indlysende, at det er praktisk umuligt at udvikle separate eksponeringskriterier for samtlige arter af havpattedyr (for slet ikke at tale om fisk), og en vis gruppering af arterne er uundgåelig. Der er ligeledes behov for at udvikle et eller nogle få ensartede mål for lydpåvirkningen, uafhængigt af hvilken lyd, der vurderes. Som rigtigt påpeget af *Southall et al. (2007)* må man i denne proces tage højde for de enkelte arters hørelse, sådan at man på samme tid kun sammenligner arter, der har sammenlignelig hørelse og har et tilpas generelt mål, som tillader sammenligninger på tværs af lydtyper og artsgrupper. *Southall et al.*'s svar på disse udfordringer er M-vægtningerne, som gennemgået ovenfor. M-vægtningen er som omtalt en analog til C-vægtningen i human audiologi, på trods af at C-vægtningen har meget ringe udbredelse. I alle praktiske sammenhænge, inkl. lovgivningsmæssig regulering af støj, anvendes den langt mere udbredte A-vægtning.

Hørbarhed (loudness) er et subjektivt mål, der for mennesker kvantificeres i den relative enhed Phon (*figur 2*). Et signal siges fx at have hørbarheden 40 Phon, hvis det opfattes som værende af samme styrke som en 1 kHz tone med lydtrykket 40 dB re. 20 μ Pa. Da vægtningskurverne oprindeligt blev fastlagt, var logikken at bruge en 40 Phon iso-hørbarhedskurve til at vurdere effekten af svage lyde (A-vægtning), en 60 Phon iso-hørbarhedskurve til mellemområdet (B-vægtning) og en 80 Phon iso-hørbarhedskurve til kraftige lyde (C-vægtning³). Imidlertid har det vist sig, at A-vægtede niveauer korrelerer bedre med både høreskader og subjektive vurderinger af, hvor generende støjen er end C-vægtede niveauer (*Meloni & Rosenheck, 1995; Vos, 2003*). Der er derfor god grund til at sætte spørgsmålstegn ved det at basere M-vægtningen hos havpattedyr på samme logik som C-vægtningen, dvs. at den skal følge en 80 Phon iso-hørbarhedskurve. Erfaringerne fra human audiologi taler derfor for at bruge en vægtningskurve, der ligner hørbarhedskurven, idet den er en god tilnærmelse til 40 Phon iso-hørbarhedskurven. Nyere resultater fra forsøg med delfiner synes også at understøtte dette (*Finneran & Schlundt, 2011*).

³ Senere kom en D-vægtningskurve også til, specielt beregnet for analyse af flystøj.

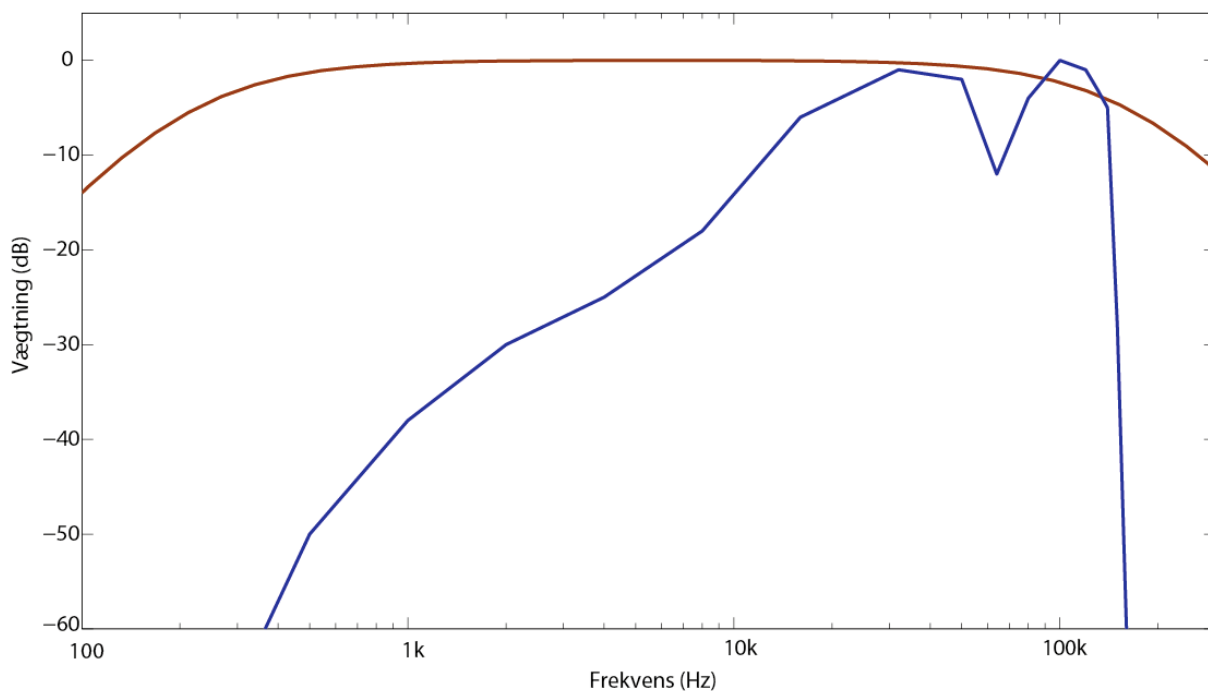
Figur 2. Iso-hørbarhedskurver for mennesker. Ved referencefrekvensen 1 kHz er hørbarheden (i Phon) lig med lydtrykket (i dB re. 20 μ Pa). A-vægtningskurven er baseret på 40 Phon iso-hørbarhedskurven, mens C-vægtningskurven er baseret på 80 Phon.



3.5.1 Konsekvenser af valg af vægtningskurve

Hvilken betydning har det at bruge den ene eller den anden vægtningskurve? M-vægtningskurverne er markant bredere end de inverterede audiogrammer. Southall *et al.* (2007) argumenterer for, at en eventuel fejl ved dette valg vil være til den gode side (set fra dyrene), forstået på den måde at det vil overestimere det vægtede lydtryk. Dette er kun delvist rigtigt. Det er korrekt, at man, når man skal vurdere en konkret lyd og sammenligne den med opstillede grænseværdier, vil regne til den forsigtige side ved at anvende en for bred vægtning, idet man overestimerer hørbarheden af lyden. Problemerne opstår imidlertid, når man skal opstille kriterierne. Her er det meget vigtigt ikke at anvende en vægtning, der er for bred, idet man igen risikerer at overestimere hørbarheden af lyden, hvilket betyder, at man får sat grænseværdien for højt. Dette forhold gør brugen af M-vægtning utilfredsstillende, og der bør arbejdes på at udrede problemerne, sådan at der kan opnås konsensus om en egnet vægtningsfunktion. Da erfaringerne fra human audiologi er, at A-vægtningen er det bedste universelle mål, så foreslås det, at der udvikles et antal vægtningsfunktioner til havpattedyr baseret på de inverterede audiogrammer (for de arter hvor disse findes).

Den store forskel mellem M-vægtning og brug af det inverterede audiogram ses ved lave frekvenser, under 10 kHz (figur 3). Ved 1 kHz er et M-vægtet lydtryk 35 dB højere end det audiogram-vægtede lydtryk, og ved 500 Hz er det 50 dB højere. Det er væsentlige forskelle, og hvis en grænseværdi, som er fastsat på baggrund af målinger ved høje frekvenser, anvendes ved lave frekvenser, vil M-vægtningen kunne føre til kraftig overregulering af støjproducerende aktiviteter til havs. Omvendt vil brug af et kriterium baseret på målinger ved lave frekvenser føre til kraftig underregulering af aktiviteter, såfremt det anvendes ved høje frekvenser.



Figur 3. M-vægtningskurve for HF-tandhvaler (brun) sammenlignet med det inverterede, normaliserede audiogram (blå) (Kastelein et al., 2010).

3.6 Brug af repræsentative arter

Som omtalt under diskussion af M-vægtning er det ikke realistisk at opnå detaljeret information om hørelse og effekter af støj for de over 100 arter af havpattedyr, der findes globalt, for slet ikke at tale om de mere end 30.000 arter af fisk. Det er derfor nødvendigt at anvende et mindre antal arter, som er repræsentative for større grupper. For havpattedyrene er den forskning, der ligger til grund for anbefalingerne i Southall et al. (2007) mht. skader baseret på forsøg primært på øresvin, hvidhval og spættet sæl. Hvor de danske sæler således er dækket godt ind, er det mere problematisk med marsvin. Disse er af Southall et al. (2007) anbragt i gruppen af HF-tandhvaler – en gruppe som der ikke forelå data fra på det tidspunkt sammenfatningen blev skrevet. Efterfølgende er der imidlertid kommet data fra både almindeligt marsvin (Kastelein et al., 2012b; Kastelein et al., 2013b; Lucke et al., 2009) og finneløst marsvin (*Neophocaena asiaeorientalis*, Popov et al., 2011). Alle disse studier har vist, at TTS hos marsvin kan udløses ved markant lavere lydtryk end for øresvin og hvidhval (som af Southall et al. (2007) henregnes til MF-tandhvalerne). Dette giver naturligvis baggrund for at revidere anbefalingerne fra Southall et al. (2007) for så vidt angår HF-tandhvaler.

Et langt mere grundlæggende problem er det næsten totale fravær af information om hørelse hos bardehvaler. Det er vigtigt at holde sig for øje, når problemstillinger om høreskader på bardehvaler diskuteres, idet M-vægtningsskurven og tærsklerne for TTS/PTS for bardehvaler næppe kan siges at være andet end (dårligt) informerede gæt. I konkrete situationer, der involverer bardehvaler, må der derfor lægges en betydelig margen til konklusionerne, idet der for bardehvaler reelt ikke er nogen information til rådighed vedrørende det indre øres følsomhed over for kraftige lyde.

4 anbefalinger for danske arter

Nedenfor følger en diskussion af vidensgrundlaget for danske arter af havpattedyr, som det foreligger i skrivende stund. Det er væsentligt at holde in mente, at der foregår meget arbejde i disse år inden for dette område, og nye resultater fremkommer hele tiden. Fokus er på havpattedyrene, idet det er her vidensgrundlaget er størst, og der blandt disse findes arter omfattet af lovkrav til regulering af påvirkninger (hovedsageligt i medfør af EU habitatdirektivet).

4.1 Havpattedyr

4.1.1 Spættet sæl og gråsæl

Spættet sæl er den mest almindelige sæl i danske farvande, og også den art man ved mest om mht. hørelse og reaktion på lyd. Viden om gråsæler er langt mere sparsom. Selvom gråsæler er større end spættede sæler, og derfor sandsynligvis ikke kan sammenlignes fuldstændigt, er de så nært beslægtede, at resultater fra spættet sæl formentlig kan anvendes for gråsæler, indtil artsspecifikke data foreligger. De to arter behandles derfor for nuværende under et.

Hørenedsættelse/TTS

For spættet sæl foreligger direkte målinger af TTS udløst af længerevarende støjsignaler (*Kastak et al., 2005; Kastelein et al., 2012a*). Se tabel 9. I begge tilfælde blev sælerne (en i hvert forsøg) udsat for længerevarende oktavnådsstøj. Tærsklen ved 2,5 kHz (*Kastak et al., 2005*) var højere end ved 4 kHz (*Kastelein et al., 2012b*), hvilket kan tilskrives en faktisk forskel i følsomhed med frekvens eller blot en forskel mellem de to individer og/eller eksperimentelle faciliteter (hhv. Long Marine Lab, Californien og SeaMarco, Holland).

Der er ikke målt TTS induceret af pulser på spættet sæl. Den eneste måling, der foreligger for puls-induceret TTS, er fra en californisk søløve (*Finneran et al. 2003*). Her var korte pulser (ca. 20 ms) med peak-peak lydtryk på op til 183 dB re. 1 μPa (SEL 163 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$.) *ikke* i stand til at inducere TTS.

To studier har dokumenteret hhv. PTS og meget kraftig TTS, begge under utilsigtet eksponering af sæler for meget høje lydtryk. *Kastak et al., (2008)* så PTS (7-10 dB efter 2 måneder) ved eksponering med 4 kHz ved 202 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$. *Kastelein et al. (2013a)* så tilsvarende et meget kraftigt TTS (44 dB) ved en sæl udsat for 4 kHz ved 199 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$, der først var helt forsvundet efter 4 døgn, og dermed har været lige på kanten til at give dyret PTS.

Tabel 9. Målinger af TTS og PTS på spættet sæl.

Type af lyd	Frekvens	Tærskel	Reference	Noter
Langvarig oktavbåndsstøj ⁴ (op til 50 min)	2,5 kHz	182 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<i>Kastak et al. (2005)</i>	3 dB TTS
Langvarig oktavbåndsstøj (op til 50 min)	4 kHz	169-176 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<i>Kastelein et al. (2012a)</i>	3 dB TTS, aflæst på figur
Langvarig oktavbåndsstøj, 60 min	4 kHz	199 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<i>Kastelein et al. (2013a)</i>	Meget kraftig TTS, på kanten af PTS
Rentone, 1 min	4,1 kHz	202 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<i>Kastak et al. (2008)</i>	Meget kraftig TTS (50 dB), efterfulgt af PTS

Adfærdsreaktioner

Der findes meget få studier af sælers reaktioner på undervandslyd i naturen. *Jacobs & Terhune (2002)* så ingen reaktioner hos spættet sæl på sælskræmmerlyde med modtagne lydtryk på 120-130 dB re. 1 μPa , og *Blackwell et al. (2004)* så ingen eller kun svage reaktioner på pæleramning hos ringsæl ved modtagne niveauer på 160-200 dB re. 1 μPa . Observationer af spættet sæl og gråsæl i forbindelse med stående fiskeredskaber viste ligefrem en tiltrækning af sæler til kraftige lyde fra en sælskræmmer, der ellers var designet til at skræmme sælerne væk (*Königson, 2007*). Antageligt var disse sæler vant til at finde føde i fiskeredskaber og opfattede lyden som et tegn på et garn og dermed føde (middagsklokke-effekt). De modtagne lydtryk er ikke angivet, men da sælskræmmere generelt udsender meget kraftige lyde (omkring 190 dB re. 1 μPa), må de modtagne lydtryk ligeledes have været betragtelige (ca. 150 dB re. 1 μPa i 100 m's afstand).

Sæler regnes almindeligvis for at være tolerante over for undervandslyd, bl.a. på baggrund af ovennævnte observationer, men det er sandsynligt, at reaktionerne (eller fraværet af reaktioner) er meget afhængige af konteksten. Den samme lyd kan således tænkes at være skræmmende i én sammenhæng (sælskræmmer brugt som advarsel før en eksplosion eller pæleramning), men tiltrækkende i en anden ('middagsklokke' ved ruse eller garn). Det er på baggrund af den begrænsede mængde relevante undersøgelser ikke muligt at give konkrete anbefalinger vedr. maksimumniveauer i forhold til adfærdsforstyrrelser.

I skarp kontrast til disse resultater er undersøgelser på sælers reaktion på lyd i fangenskab, hvor langt lavere tærskler for reaktion er set. *Kastelein et al., (2006a; 2006b)* undersøgte reaktioner på forskellige rentonesignaler og undervandskommunikationssignaler i frekvensområdet 8-45 kHz og fandt reaktionstærskler i området 110-130 dB re. 1 μPa (rms). En forsigtig udlægning af resultaterne er, at sæler i fangenskab, der får rigeligt med føde uden selv at skulle opsøge den, foretrækker at opholde sig i den stille ende af bassinet, når der udsendes undervandslyd i den anden ende. Det er imidlertid vanskeligt at afgøre, om, og i givet fald hvordan, denne konklusion kan overføres til et frisvømmende dyr i naturen, og illustrerer måske mest af alt med stor tydelighed betydningen af kontekst for reaktionen på undervandslyd.

⁴ Støj med energi i et bånd +/- en halv oktav på hver side af centerfrekvensen. 4 kHz oktavbåndsstøj har således energi i området 2,4-6,6 kHz og 2,5 kHz oktavbåndsstøj i området 1,5-4,1 kHz.

Maskering

For at maskering af signaler kan foregå, må der være et overlap i frekvens og tid mellem det maskerede signal og maskeringslyden. Dette betyder for det første, at kortvarige pulser og rentoner generelt har meget ringe evne til at maskere, hvorimod vedvarende bredbåndsstøj, såsom skibsstøj, har langt større potentiel maskeringseffekt. Kravet om overlap i frekvens bevirker desuden, at man må have viden om, hvilke lyde dyrene lytter efter, før man kan vurdere potentialet for maskering. På trods af at man ved forholdsvis meget om hørelsen hos spættet sæl, så ved man forbausende lidt om, hvad de bruger hørelsen til. Spættet sæl er ikke kendt for en righoldig undervandskommunikation, med undtagelse af hannernes kald i parringstiden (Bjorgesæter et al., 2004; Hanggi & Schusterman, 1994; Van Parijs et al., 1997). Disse kald har hovedparten af energien i området 100-200 Hz og med meget lidt energi over 1 kHz (Bjorgesæter et al., 2004). Den præcise betydning af kaldene er ukendt, men det er tilsyneladende kun hannerne, der kalder og kun i parringstiden på bestemte steder i forbindelse med yngle- og hvilebankerne (Van Parijs et al., 2000). Man kan derfor med sikkerhed sige, at der er potentiale for maskering af sælernes kommunikation, såfremt støj med signifikant energi i området 100-1000 Hz udsendes i nærheden af ynglebankerne i sælernes yngletid (juni-juli måned). Det er ikke for nuværende muligt at vurdere omfanget af en sådan maskering, bl.a. fordi det er ukendt, hvem modtageren af signalerne er (parringsklare hunner og/eller konkurrerende hanner). Da kommunikationen imidlertid er en del af parringsadfærd, er maskering potentielt en væsentlig påvirkning.

Mange af sælernes byttedyr, herunder torskefisk og forskellige bundfisk som knurhane og ulk, er kendt for at bruge lavfrekvent undervandslyd (under 500 Hz) til kommunikation, og selvom det aldrig har været påvist, så er det tænkeligt, at sælerne udnytter fiskenes parringskald til at lokalisere dem. Dermed er der et tilsvarende potentiale for maskering af disse fiskelyde med konsekvenser for sælernes mulighed for at finde dem. Det er imidlertid ikke muligt for nuværende på nogen måde at vurdere omfang og eventuel betydning for sælerne.

Endnu mere vanskeligt er det at vurdere, om maskering kan have betydning ved højere frekvenser. Selvom spættet sæl har den bedste hørelse over 10 kHz, findes der ingen viden om lyde af betydning for sælerne i dette frekvensområde.

4.1.2 Marsvin

Hørenedsættelse/TTS

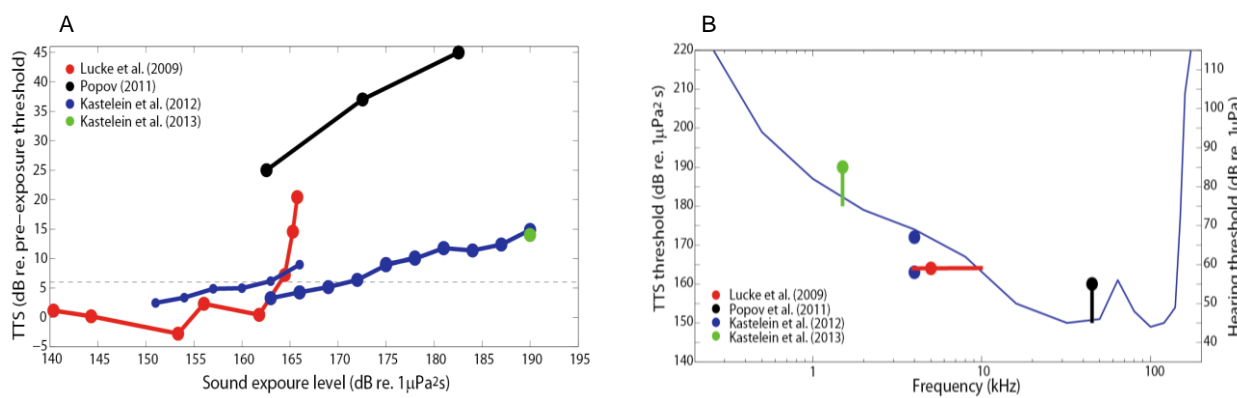
Da udgivelsen af Southall et al. (2007) fremkom, forelå der ingen informationer om TTS hos HF-tandhvaler, herunder marsvin, og forfatterne anvendte derfor de værdier, der forelå for øresvin og hvidhval også for marsvin. Efterfølgende er der imidlertid fremkommet en række studier på alm. marsvin (Kastelein et al., 2012b; Kastelein et al., 2013b; Lucke et al., 2009), og et studie på finneløst marsvin (Popov et al., 2011). Se tabel 10. Lucke et al. (2009) fandt en tærskel for udløsning af TTS fra korte enkeltpulser (en luftkanon/airgun) udtrykt som lydeksponeringsniveau på 164 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$, hvilket er markant under de niveauer, som er nødvendige for at udløse TTS hos andre tandhvaler, såsom øresvin (se senere). Denne lave tærskel er senere genfundet i studier på et andet marsvin, udsat for langvarig støjpåvirkning ved hhv. 1.2 kHz og 4 kHz (Kastelein et al., 2012b; 2013b). Popov et al. (2011) undersøgte TTS hos en nærtstående art, finneløst marsvin, men da bestemmelse af tærskler ikke var målet med studierne, kan disse kun bestemmes indi-

rekte. Ved stimulering med lange pulser (op til 30 min) af oktavbåndsstøj ved 45 kHz kunne betydelig TTS fremkaldes. Laveste niveau var ved en stimulus på 163 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$, hvor ca. 25 dB TTS blev udløst, dvs. TTS kan forventes at indtræde ved betydeligt lavere niveauer, skønsmæssigt 150-160 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$. Samme finneløse marsvin blev også udsat for meget kraftig lydpåvirkning, igen ved 45 kHz (183 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$), der udløste en TTS på 45 dB, aftaget til 20 dB efter en halv time, hvorefter målingerne ophørte. Drager man en parallel til resultaterne for spættet sæl ovenfor, hvor en TTS på 50 dB blev efterfulgt af PTS, må det betragtes som sandsynligt, at marsvin, der udsættes for mere end 183 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ved 45 kHz vil kunne pådrage sig PTS.

Tabel 10. Målinger af TTS hos marsvin.

Type af lyd	Frekvens	Tærskel	Reference	Noter
Enkeltpulse fra airgun	4-10 kHz	164 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<i>Lucke et al. (2009)</i>	Alm. marsvin
Langvarig oktavbåndsstøj	4 kHz	163-172 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<i>Kastelein et al. (2012b)</i>	Alm. marsvin
Langvarig rentone	1,5 kHz	14 dB TTS ved 183 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<i>Kastelein et al. (2013b)</i>	Alm. marsvin. Ingen tærskel målt.
Oktavbåndsstøj	45 kHz	Under 163 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<i>Popov et al. (2011)</i>	Finneløst marsvin, laveste TTS målt var 25 dB, markant over tærsklen.
Oktavbåndsstøj	45 kHz	183 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<i>Popov et al. (2011)</i>	Finneløst marsvin, meget kraftig TTS (45 dB), tæt på PTS.

Sammenholder man de fire studier (*figur 4A*) ser man store forskelle, men plotter man tærskler og tærskelområder som funktion af signalfrekvensen (*figur 4B*), ser man en tydelig frekvensafhængighed: lavere tærskler ved højere frekvenser, hvor marsvin har bedre hørelse. Punkterne fordeler sig omtrent omkring en linje af samme form som audiogrammet, blot forskudt omtrent 105 dB opad. Denne sammenhæng antyder, at den vigtigste bestemmende faktor for udløsning af TTS er det audiogramvægtede lydeksponeringsniveau (SEL).



Figur 4. A) TTS hos almindeligt marsvin og finneløst marsvin som funktion af lydeksponeringsniveauet (SEL). B) Tærskler eller tærskelområder fra forsøgene som funktion af signalfrekvensen. Signalet brugt af *Lucke et al. (2009)* var et bredbåndsklik, hvorfor det er plottet som peakfrekvens (cirkel) og et interval (linje). Egentlige tærskler (6 dB TTS) er målt af *Lucke et al. (2009)* og *Kastelein et al. (2012b)*. Maksimumværdi for tærskel (cirkel) og skønnet tærskelområde er angivet som linjer for data fra *Kastelein et al. (2013b)* og *Popov et al. (2011)*. Audiogrammet er fra *Kastelein et al. (2010)*.

Adfærdsreaktioner

Der findes en lang række studier, der demonstrerer reaktioner på undervandsstøj hos marsvin. En stor del er foretaget på dyr i fangenskab, men da disse studier lider af samme problemer som nævnt for studierne på sæler i fangenskab, er disse udeladt, og kun studier på fritsvømmende dyr er medtaget. Endvidere diskuteres kun de studier, der indeholder tilstrækkelige detaljer om lydniveauer og reaktionsafstande til, at tærskler for reaktion på lyden kan estimeres. Som kriterium for reaktion er anvendt bevægelse væk fra lydkilden (negativ phonotaxi), svarende til niveau 6 på skalaen fra *Southall et al. (2007)*. Graden af påvirkning vil kunne række fra meget lille (marsvin bliver fortrængt fra et område af marginal betydning eller for en meget kort periode) til betydelig (marsvin fortrænges fra afgørende ressourcer gennem længere tid). Dette kriterium er anvendt dels af pragmatiske grunde, da reaktionen kan iagttages ved fraværet af marsvin inden for påvirkningsområdet, dels da denne reaktion kan afsløre, om der potentielt er længerevarende effekter på marsvinene. Det sidste vil forekomme, såfremt marsvin fortrænges fra vigtige områder gennem længere tid eller forhindres i at trække gennem vigtige trækcorridorer.

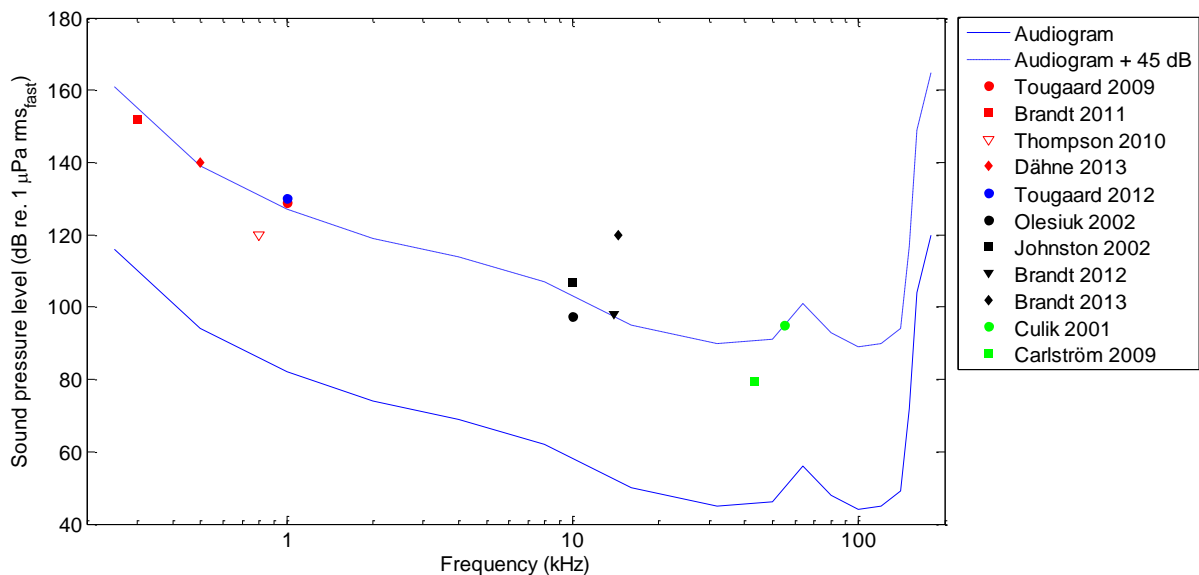
De 11 studier for marsvin er opsummeret i *tabel 11* og *figur 5*. Det er ikke indlysende, hvilken måleenhed man skal anvende til sammenligning af resultaterne. Dog er der en vis enighed om, at lydtrykket, og ikke lydeksponeringsniveauet (SEL), er den væsentligste parameter til vurdering af adfærdspåvirkninger (fx *Southall et al., 2007*), men det er ligeledes velkendt, at hørbarheden af lyde ikke bare afhænger af deres frekvens, men også deres varighed. En række studier på bl.a. mennesker (*Plomp & Bouman, 1959*), delfiner (*Johnson, 1968b*) og marsvin (*Kastelein et al., 2010*) har vist, at høretærsklen for korte signaler aftager med omtrent 3 dB for hver fordobling af varigheden, svarende til konstant energi ved tærsklen. Denne sammenhæng gælder op til en vis grænse (kaldet integrationstiden), hvorefter tærsklen er konstant, uafhængigt af yderligere øgning af varigheden. Integrationstiden er afhængig af stimulusfrekvensen, men ligger i området ca. 50-500 ms for alle pattedyr, hvor data foreligger. I human audiologi anvendes en værdi på 125 ms i måleinstrumenter, der skal emulere human hørelse, herunder lydniveaumålinger. Denne vægtning kaldes i disse sammenhænge rms_{fast} og dækker således over et rms-gennemsnit⁵ af lydtrykket målt over 125 ms. Målinger viser, at 125 ms ligeledes er en fornuftig middelværdi for marsvin (*Kastelein et al., 2010*).

Ser man på tværs af alle studierne træder en kraftig korrelation mellem reaktionstærskler og stimulus-frekvens frem, når tærsklerne udtrykkes som rms_{fast} lydtryk, dvs. korrigeret for ørets integrationstid. Plottes tærsklerne sammen med marsvins høretærskelkurve, ses det, at adfærdsreaktioner fremkommer ved lydtryk ca. 45 dB over marsvins høretærskel, og det er nærliggende at tage det som udtryk for en generel reaktionstærskel på ukendte lyde. Hvorvidt kurven kan forlænges ud over de 55 kHz, som er øverste datapunkt, er uvist. Imidlertid antyder *figur 5*, at en brugbar tærskel for adfærdsreaktioner er et rms_{fast} lydtryk på 45 dB relativt til audiogrammet.

⁵ rms står for root-mean-squared og angiver kvadratroden af gennemsnittet på de kvadrerede enkeltmålinger. I akustik svarer et rms-gennemsnit af et signal til det lydtryk, som et signal af samme varighed og konstant amplitude skal have for at indeholde den samme energi som det analyserede signal.

Table 11. Oversigt over studier hvor effekten af undervandslyd på marsvin har kunnet kvantificeres.

Studie	Type af lydkilde	Frekvensområde	Bemærkninger
<i>Culik et al. (2001)</i>	PICE pinger	20-160 kHz (peak 55 kHz)	Visuelle observationer af marsvin omkring aktiv pinger. Tærskel sat ud fra mindste gennemsnitsafstand til aktiv pinger (200 m).
<i>Carlström et al. (2009)</i>	Dukane Netmark1000 pinger	11 kHz, med en kraftig 4. harmonisk overtone ved 43 kHz.	Visuelle observationer af marsvin omkring aktiv pinger. Tærskel sat ud fra mindste gennemsnitsafstand til aktiv pinger (250 m).
<i>Olesiuk et al. (2002)</i>	Airmar sælskræmmer	10 kHz	Visuelle observationer omkring sælskræmmer. Tærskel sat ud fra største observationsafstand (3,5 km), hvor reaktion stadig kunne observeres.
<i>Johnston (2002)</i>	Airmar sælskræmmer	10 kHz	Visuelle observationer omkring sælskræmmer. Tærskel sat ud fra største observationsafstand (1,5 km), hvor reaktion stadig kunne observeres.
<i>Brandt et al. (2012)</i>	Lofitek sælskræmmer	12 kHz	Passiv akustisk overvågning (T-PODs) omkring sælskræmmer. Tærskel sat ud fra største afstand (7,5 km), hvor reaktion kunne observeres.
<i>Brandt et al. (2013)</i>	Lofitek sælskræmmer	12 kHz	Visuelle observationer omkring sælskræmmer. Meget få observationer, men reaktioner ud til mindst 2,4 km fra sælskræmmeren.
<i>Tougaard et al. (2009)</i>	Pæleramning Horns Rev 1 havmøllepark	50-2000 Hz (peak 1 kHz)	Passiv akustisk overvågning (T-PODs) omkring vindmøllefundament. Tærskel sat ud fra største afstand (20 km), hvor reaktion blev observeres.
<i>Brandt et al. (2011)</i>	Pæleramning Horns Rev 2 havmøllepark	50-2000 Hz (peak 300 Hz)	Passiv akustisk overvågning (T-PODs) omkring vindmøllefundament. Tærskel sat ud fra største afstand (21 km), hvor reaktion kunne observeres.
<i>Thompson et al. (2010)</i>	Pæleramning Beatrice havmøllepark	50-2000 Hz (peak 800 Hz)	Passiv akustisk overvågning (T-PODs) i en enkelt afstand (40 km) fra vindmøllefundament. Ingen reaktion kunne måles ved denne afstand.
<i>Dähne et al. (2013)</i>	Pæleramning Alpha Ventus havmøllepark	50-2000 Hz (peak 500 Hz)	Passiv akustisk overvågning (T-PODs) omkring vindmøllefundament. Tærskel sat ud fra største afstand (25 km), hvor reaktion kunne observeres.



Figur 5. Lydtryk, hvor reaktioner på undervandsstøj er set hos marsvin. Alle lydtryk er omregnet til rms-lydtryk, hvor der er korrigeret for ørets integrationstid, sat til 125 ms (rms_{fast}). Røde symboler: ramninger af vindmøllefundamenter, blå: simulering af ramning af vindmøllefundament, sort: sælskræmmere og grøn: pingere. *Thompson et al. (2010)* ligger under tærsklen, da det viste niveau ikke gav anledning til reaktioner. Yderligere information om studierne se *tabel 11*. Den fuldt optrukne kurve angiver audiogrammet for marsvin (*Kastelein et al., 2002; 2010*), den stiplede er audiogrammet forskudt 45 dB.

Maskering

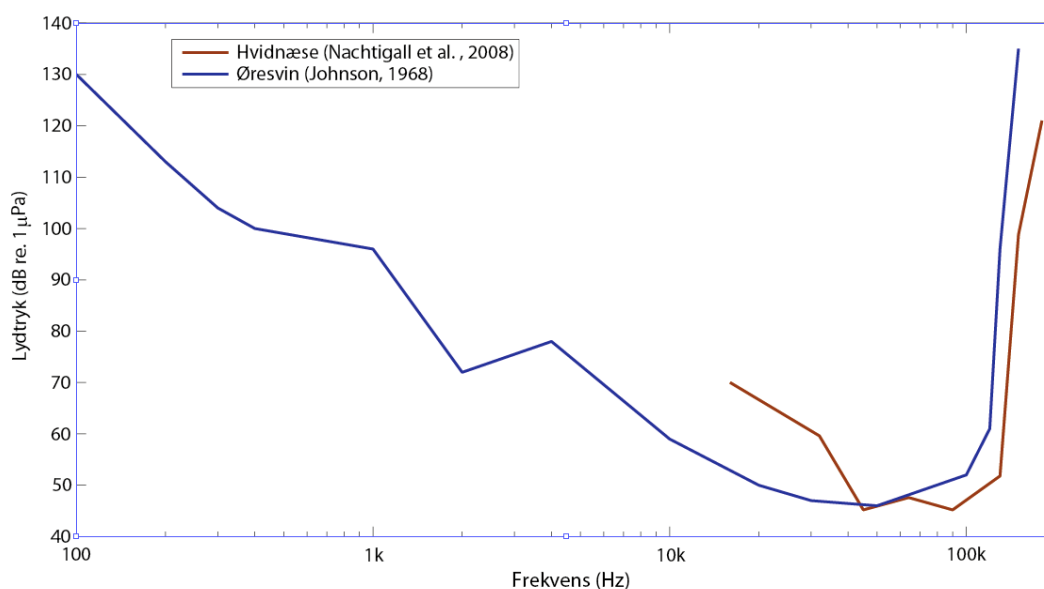
Marsvin producerer grundlæggende kun én type lyde, meget korte rentonepulser op til 100 μ s i varighed og med hovedparten af energien ved 130 kHz. Disse lyde bruges både til orientering (ekkolokalisering) og til kommunikation med andre marsvin (*Clausen et al., 2010*). Af flere grunde anses det for meget vanskeligt at maskere disse signaler. Ekkolokaliseringsslyde er specielt vanskelige at maskere, bl.a. fordi modtageren er dyret selv og dermed på forhånd ved, hvornår og fra hvilken retning lyden kommer.

Den anden væsentlige faktor, der taler imod udbredt maskering af marsvins ekkolokalisering, er den høje absorptionskoefficient for lyde over 100 kHz (ca. 35 dB/km ved 130 kHz) i havet. Den meget højfrekvente del af frekvensspektret dæmpes meget hurtigt med afstanden fra lydkilden, og derfor vil lydtrykket fra selv kraftige lydkilder hurtigt (indenfor maksimalt nogle få km) nå under marsvins høretærskel, så maskering ikke kan forekomme.

Som det er tilfældet med sælerne, så vides der intet om, i hvilket omfang marsvin anvender hørelsen under 100 kHz i fx sammenhæng med fødesøgning eller passiv akustisk orientering, og så længe det ikke vides, er det umuligt at udtale sig om, hvorvidt maskering i mellemfrekvensområdet kan have en betydning for marsvin.

4.1.3 Hvidnæse

Der vides stort set intet om hvidnæsers naturlige adfærd og adfærdsreaktioner på lyd. Hvidnæsers systematiske placering er omstridt, men hører til i delfinfamilien Delphinidae sammen med øresvin (*LeDuc et al., 1999*), men de to arter er næppe nært beslægtede. Da hvidnæse findes længere fra kysten og er mere knyttet til de frie vandmasser end øresvin, der er tilknyttet kyster og fjorde, er øresvinet formentlig en dårlig model for forståelsen af adfærdsreaktioner hos hvidnæse.



Figur 6. Audiogram for en enkelt hvidnæse samt øresvin til sammenligning.

Midlertidig hørenedssettelse/TTS

Modsat de antageligt forskellige adfærdsreaktioner hos øresvin og hvidnæse, kan data for hørelse hos øresvin sandsynligvis overføres nogenlunde uændret til hvidnæse. De to arter er omtrent lige store, hvidnæse lidt mindre end øresvin, men det ene audiogram, der foreligger for en hvidnæse (*Nachtigall et al., 2008*), minder meget om øresvinets (*Johnson, 1968a*), dog med en antydning af en mulig forskydning opad i frekvens (*figur 6*). Indtil artsspecifikke data måtte fremkomme for hvidnæse, kan data vedr. TTS fra øresvin formentlig anvendes. *Tablet 12* viser en række resultater fra studier af TTS hos øresvin.

Tablet 12. TTS hos øresvin og hvidhval.

Type af lyd	Frekvens	Tærskel	Reference	Noter
Korte enkeltpulser	Bredbånds 1-40 kHz	179 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<i>Finneran et al. (2000)</i>	Kunne ikke fremkalde TTS hos øresvin
Korte enkeltpulser	50 Hz-10 kHz	188 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<i>Finneran et al. (2002)</i>	Kunne ikke fremkalde TTS hos øresvin, men hos hvidhval
Korte rentonepulser (1 sek.)	0,4, 3, 10, 20 og 75 kHz	192-201 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ 3-20 kHz; ingen TTS ved 0,4 kHz 193 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<i>Schlundt et al. (2000)</i>	Resultater ved 75 kHz tvetydige og ikke medtaget.
Oktavbåndsstøj, 30 min	7,5 kHz	212-214 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<i>Nachtigall et al. (2003)</i>	Måling af TTS 20 min efter eksponering, hvilket giver forhøjede tærskler
Oktavbåndsstøj, 50 min	7,5 kHz	193-195 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<i>Nachtigall et al. (2004)</i>	
Korte rentoner	3 kHz	190-204 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<i>Finneran et al. (2005)</i>	
Rentoner, op til 128 sek.	3 kHz	217 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<i>Schlundt et al. (2006)</i>	Kraftig TTS (23 dB)
Serier af korte rentonepulser (0,5 sek.)	5,6 kHz	218 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<i>Mooney et al. (2009)</i>	
Rentoner, 16 sek.	3-80 kHz	177-195 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<i>Finneran & Schlundt (2013)</i>	

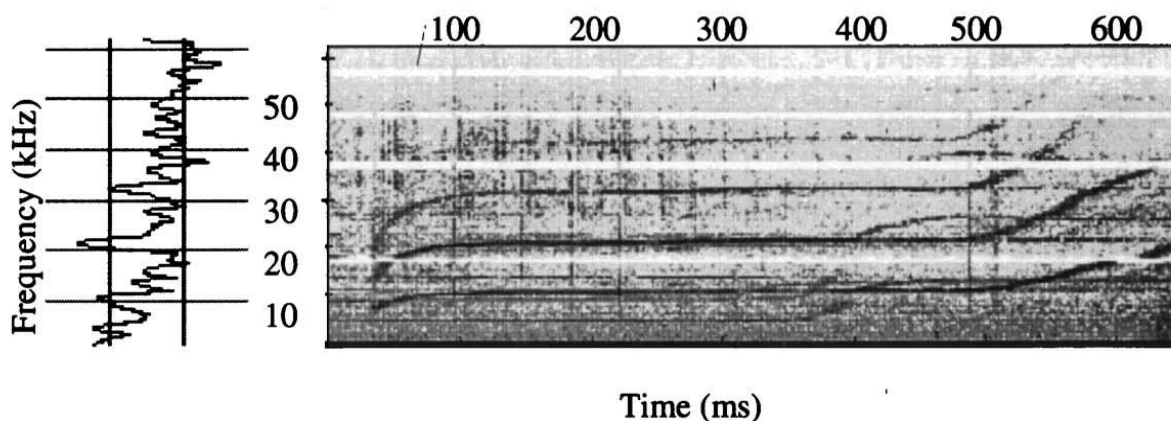
De mange studier spænder over mange signaltyper og signalfrekvenser, og tilsvarende ligger tærsklerne for TTS i et bredt interval, fra ca. 190-210 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$, afhængigt af stimulusfrekvens og varighed af stimulus. Det er imidlertid meget tydeligt, at øresvin (og formentlig hvidnæse) er langt mindre følsomme for TTS end marsvin.

Adfærdsreaktioner

Der findes stort set ingen information om hvidnæsers reaktion på undervandslyd. Et enkelt studie (*Stone & Tasker, 2006*) så på hvalers reaktion på seismiske undersøgelser, og her blev der observeret signifikant færre hvidnæser fra seismiskibene, når luftkanonerne var aktive, og afstanden til dyrene var større, når der blev skudt. Det er ikke muligt at sige noget om de lydtryk/lydeksposering, dyrene har været udsat for, og studiet kan derfor ikke danne baggrund for anbefalinger.

Maskering

Med hensyn til maskering er der for hvidnæse to problemstillinger: Dels er der maskering af ekkolokaliseringslydene, dels maskering af sociale fløjtelyde. Som for marsvin må man forestille sig, at det er vanskeligt at maskere dyrenes ekkolokaliseringslyde, også selv om hvidnæsens sonarsignaler har betydelig energi under 100 kHz. De sociale fløjtelyde har hovedparten af energien omkring 20 kHz (*Rasmussen & Miller, 2002; figur 7*), og man kan ikke udelukke, at støj i dette frekvensområde kan maskere signaler. Den frekvensafhængige absorption ved 20 kHz (3,5 dB pr. km) er imidlertid stor nok til, at selv kraftige lydkilder i praksis ikke vil have en rækkevidde på mere end nogle få kilometer. Samlet set kan det ikke afvises, at maskering kan påvirke hvidnæsernes sociale kommunikation i nærheden af kraftige lydkilder, men omfanget og betydningen af denne potentielle maskering kan ikke vurderes nærmere.



Figur 7. Spektrogram af fløjt fra hvidnæse. Hovedparten af energien ligger i den 2. harmoniske overtone omkring 22 kHz. Fra *Rasmussen et al. (2006)*.

4.1.4 Vågehval

Der findes ingen direkte information om hørelsen hos vågehval eller andre bardehvaler, og der findes meget lidt information om vågehvalers reaktion på undervandsstøj. Det er derfor ikke muligt at give konkrete anbefalinger, men nedenstående retningslinjer kan uddrages af litteraturen.

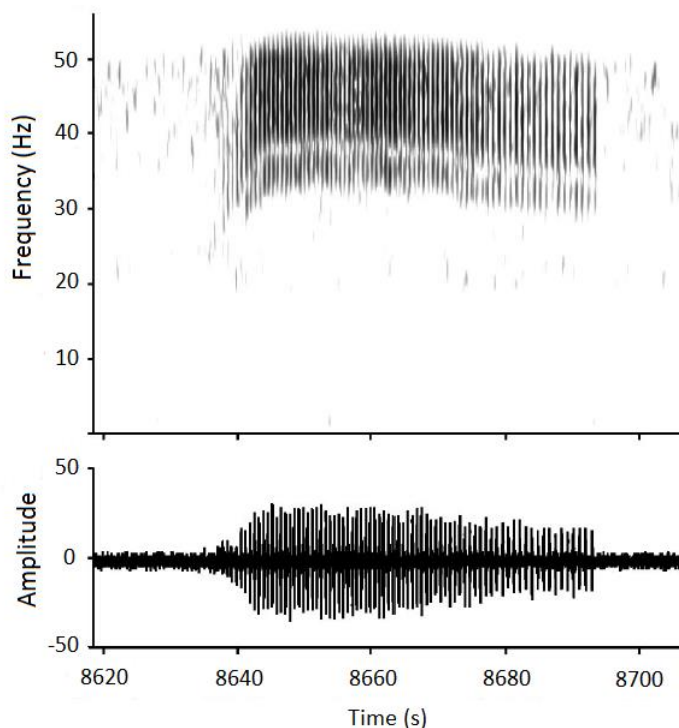
Midlertidig hørenedsættelse/TTS

Som nævnt findes der ingen målinger af hørelsen hos bardehvaler og kun indirekte information om i hvilket frekvensområde, de har deres bedste hørelse. Endnu mindre findes der målinger af TTS/PTS. Det er derfor ikke muligt at komme med bud på lydtryk/lydeksposering, der kan tænkes at inducere TTS hos vågehval. *Southall et al. (2007)* angiver grænseværdier på 198 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ (SEL) for bardehvaler, men disse er alene baseret på målinger fra hvidhval og øresvin. Da der ikke foreligger nogen uafhængig information vedrørende bardehvalers følsomhed, synes det ikke rimeligt at bruge værdierne for hvidhval og øresvin, da det end ikke er muligt at vurdere, om denne grænseværdi mest sandsynligt er over- eller undervurderet.

Maskering

Der vides meget lidt om vågehvalers lyde, og hvor og hvordan de bruger dem. I lighed med lydene fra de øvrige bardehvaler er de meget lavfrekvente, nogle få hundrede Hz eller lavere. Det er uvist, om de overhovedet anvender disse lyde i lavvandede områder som Nordsøen, eller om de alene bruger dem på dybt vand uden for kontinentalsoklen. Et signal, som det vist i *figur 8*, med en centerfrekvens omkring 40 Hz har en bølgelængde på næsten 40 m og vil have meget vanskeligt ved overhovedet at udbrede sig i den lavvandede Nordsø.

Figur 8. Eksempel på kald fra vågehval i Atlanterhavet. Fra *Nieukirk et al. (2004)*.



Adfærdsmæssige reaktioner

Der findes bemærkelsesværdigt få observationer af vågehvalers reaktion på undervandslyd, og det er derfor endnu mere vanskeligt end for de øvrige arter at angive tærskler for reaktioner. For arktiske bardehvaler, især grønlandshval, foreligger en del data for reaktioner til seismiske undersøgelser, skibsstøj m.m., men det er usikkert, om disse resultater meningsfuldt kan overføres til vågehvaler i Nordsøen. Dels er der tale om en anden og mindre art, dels er Nordsøen et helt andet miljø end Arktis, med langt højere niveauer af baggrundsstøj, domineret af skibstrafik og andre menneskelige kilder.

Et enkelt studie (*Stone & Tasker, 2006*) undersøgte reaktioner på seismiske undersøgelser i Nordsøen for en lang række arter, baseret på observationer fra seismiskibene. For vågehvaler var der ikke signifikant større afstand til hvalerne, når luftkanonerne var aktive, end når de ikke var, men hvis alle bardehvaler blev analyseret under et, så steg minimumsafstanden til hvalerne signifikant fra 1 km til 1,6 km (medianer af alle observationer). Antallet af observationer pr. km var ikke afhængigt af, om der blev skudt eller ej. Disse resultater peger på en begrænset reaktion til luftkanonerne. Lydtrykket i 1,6 km's afstand fra et seismiskib er betragteligt og peger derfor på en betydelig tolerance over for selv kraftige impulslyde i det lavfrekvente del af spektret, hvor vågehvalers hørelse må forventes at være bedst.

4.1.5 Opsummering for danske havpattedyr

Nedenfor, i *tabel 13*, er opsummeret anbefalingerne for danske arter. For fire områder (TTS og adfærdsreaktioner hos sæler og marsvin) bygger anbefalingerne på faktiske observationer og data fra eksperimenter med de pågældende arter, mens der for de resterende områder (hvidnæse og vågehval, samt maskering hos alle arter) findes enten kun sporadisk information eller slet intet datagrundlag at bygge anbefalingerne på.

Tabel 13. Opsummering af anbefalinger for danske havpattedyr. Mørkegrøn: reelt datagrundlag til stede; lysegrøn: begrænset datagrundlag til stede; lys orange: meget sparsomt datagrundlag; dyb orange: intet datagrundlag.

	Spættet sæl/gråsæl	Marsvin	Hvidnæse	Vågehval
TTS	182 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$, baseret på målinger på spættet sæl. Peak-lydtryk for pulser under 179 dB re. 1 μPa må anses for uskadelige, baseret på forsøg hos søløve, hvor TTS <i>ikke</i> kunne induceres.	105 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$, baseret på målinger på marsvin.	Tærskler fra øresvin kan formentlig overføres uændret. TTS kan udløses ved lydeksponering over 190-210 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$, afhængigt af frekvens og varighed af støjen.	Intet datagrundlag.
PTS	202 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ved 4 kHz har givet PTS.	183 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ved 45 kHz formentlig lige under grænsen for PTS.	Intet datagrundlag.	Intet datagrundlag.
Maskering	Potentielt af betydning i forhold til parringskald i det lavfrekvente område 100 Hz-2 kHz. Potentielt muligt at maske lyde fra byttedyr (fisk) i området under 500 Hz.	Ikke sandsynlig i det højfrekvente område. Maskering af lyde muligt i det lavfrekvente område, men da betydningen af hørelsen for marsvin i dette område er helt ukendt, kan betydningen af evt. maskering ikke vurderes.	Muligt at maskere fløjt i området 10-80 kHz. Effekten formentlig lokal, men betydningen kan ikke vurderes.	Muligt i det lavfrekvente område, hvor vågehvaler kommunikerer. Betydningen af undervandskommunikation generelt og i Nordsøen specifikt er ukendt, og dermed er det ikke muligt at vurdere betydningen af evt. maskering.
Adfærd	Formentlig stærkt kontekst-afhængig. Fravær af reaktioner ved lydtryk op til 160 dB re. 1 μPa og tolerance af lydtryk op mod 200 dB re. 1 μPa antyder stor generel tolerance over for undervandslyd.	Lyde med et vægtet lydtryk (rms_{fast}) mere end 45 dB over høretærsklen giver konsistente, negative reaktioner.	Intet datagrundlag.	Ukendt. Fraværet af reaktioner på seismiske undersøgelser i Nordsøen må tages som en forsigtig indikation på betydelig tolerance overfor selv kraftig impulslyd.

4.2 Øvrige arter

4.2.1 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 dykænder). 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 landlevende 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. Der er derfor reelt intet datagrundlag til rådighed for vurdering af fugles følsomhed over for undervandsstøj.

4.2.2 Fisk

Fisk er en problematisk gruppe, hvad angår effekter af undervandsstøj. Det skyldes navnlig, at gruppen er så stor (> 20.000 arter globalt) og meget forskelligartet. Hørelsen er studeret hos en lang række arter, og de 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 er karakteriseret ved at være meget lidt følsomme over for trykkomponenten af lydfeltet, hvorimod de er meget følsomme overfor partikelbevægelserne, der opfattes både med sidelinjesystemet og det indre øre. Arter med svømmeblære eller andre luftfyldte strukturer har i højere grad også følsomhed for trykkomponenten, 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. Der findes en del studier af effekter af støj på forskellige arter, men noget entydigt billede kan man endnu ikke tegne.

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. På grund af ultralydens ringe rækkevidde i vand vil det dog højst give sig udtryk i helt lokale problemstillinger vedrørende kraftige ultralydskilder (fx sonar og ekkolod og evt. kraftig kavitationsstøj fra skibe).

4.2.3 Invertebrater

Det er kendt, at en del invertebrater (hvirvelløse dyr), især krebsdyr, anvender lyd til forskellige formål. Der vides imidlertid stort set intet om eventuelle negative effekter af støj på denne dyregruppe. En undtagelse er et studie på hesterejer, der viste, at rejernes metaboliske rate kan øges ved kronisk støjpåvirkning (*Regnault & Lagardère, 1983*).

4.2.4 Plankton

Plankton, herunder pelagiske fiske- og invertebratlarver, har tiltrukket sig en vis opmærksomhed bl.a. i forbindelse med effekter af 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 (*Radford et al., 2011; Vermeij et al., 2010*). 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.

5 Effekter af opmålingsudstyr

5.1 Ekkolod under 180 kHz

Ekkolod er generelt meget kraftige lydkilder, og hvis de anvender lyde med frekvens under 180 kHz, vil de være hørbare for marsvin på stor afstand og potentielt kunne inducere TTS på tæt hold. Marsvin, der befinder sig i lydstrålen, må forventes at reagere negativt på lyden. For sæler gælder, at frekvensen skal være under ca. 80 kHz, for at signalerne er hørbare. Lydstrålen er dog meget smal (under 10 grader) med svage sidelobes og udsendes lodret nedad. Så dyrene skal være lige under skibet for at udsættes for maksimumniveauer og tiden, de udsættes for disse, er kort. Ved en strålebredde på 7 grader og en fart på 5 knob vil et stationært dyr på 500 m's dybde således være i strålen ca. 30 sek. Påvirkningen fra ekkolod er derfor meget lokal.

5.2 Ekkolod over 180 kHz

Ekkolod, der anvender lyde med frekvens over 180 kHz, vil ikke være hørbare for hverken sæler eller marsvin, og effekter på disse er således ikke sandsynlige.

5.3 Sonar over 180 kHz

En stor del af multibeam- og sidescansonarer anvender frekvensområdet over 200 kHz, og i lighed med højfrekvens-ekkolod er effekter af dette udstyr på sæler og hvaler ikke sandsynlige.

5.4 Sonar under 180 kHz

Sonar til navigation, kortlægning og opmåling kan anvende lyde med frekvens helt ned til 10 kHz, og da signalerne samtidigt kan være meget kraftige, kan det give forventning om negative effekter på sæler og marsvin. Værst er typer, der udsender lyden fremad i skibets sejlretning (forward-looking sonar), idet skibet under uheldige omstændigheder (fx et smalt farvand) vil kunne drive sæler og marsvin foran sig igennem længere tid. Multibeam-systemer, der vender lodret nedad, er generelt mindre problematiske, idet lyden udsendes i et meget smalt 'gardin' vinkelret på sejlretningen med væsentligt reducerede lydtryk foran og bagved sonaren (men ikke til siden, hvor påvirkning kan forekomme). I lighed med ekkolod er den tid et stillestående dyr vil udsættes for maksimal lydtryk (lige under eller lige ud for sonaren) begrænset. Der kendes et enkelt veldokumenteret tilfælde af strandinger og dødsfald af et større antal elektradelfiner i forbindelse med brugen af en stor søopmålingssonar (Kongsberg Simrad EM120, 12 kHz) ud for Madagaskar (*Southall et al., 2013*). Den præcise årsagssammenhæng mellem sonar og strandinger er dog ikke klarlagt. Det kan ikke udelukkes, at tilsvarende påvirkninger vil kunne forekomme også for marsvin og (i mindre grad) sæler, især i smalle farvande ved anvendelse af en tilsvarende sonar eller andre multibeam-systemer.

5.5 Sparkere og boomere

Sparker- og boomerlydkilder, som anvendes til kortlægning af den øverste del af havbunden (sub bottom profiling), genererer korte, kraftige lydimpulser i det lavfrekvente område (op til nogle få kHz). Der er ikke publiceret målinger af lydfeltet omkring disse lydkilder, men det er forventeligt, at det kraftigste lydtryk i lighed med ekkolod findes lige under lydkilden. Lydtrykket

er tilstrækkeligt højt til, at sæler og marsvin vil kunne høre dem på stor afstand (sandsynligvis flere km), men der findes ikke specifikke studier af effekter på dyrene.

5.6 Luftkanoner (airguns)

De kraftigste lydkilder, der anvendes til opmåling i havbunden, er luftkanoner, der genererer meget kraftige lydpulser ved at lukke luft ud under stort tryk. Afhængigt af den dybde hvortil der skal undersøges, anvendes alt fra en enkelt sleeve gun (rumfang 10-30 cubic inch, sub bottom profiling) til et array af mange airguns (samlet volumen op til 4-5000 cubic inch, seismiske undersøgelser til mange km's dybde, ikke medtaget). Lydene fra selv de små sleeve guns kan inducere TTS (de har været brugt som lydkilde i adskillige TTS-forsøg), og det må forventes, at sæler og marsvin kan høre og reagerer på lydene i stor afstand. Der er dog ikke megen konkret viden på området.

Tabel 14. Oversigt over en række typer udstyr anvendt til søopmåling m.m. og eksempler på anslåede påvirkningsafstande for typiske modeller af udstyret. Påvirkningsafstandene er udregnet på baggrund af de kriterier og reaktionstærskler, der er beskrevet ovenfor i afsnit 4.

Type	Lyd	Sæler TTS	Sæler adfærd	Marsvin TTS	Marsvin adfærd
Ekkolod under 180 kHz	Simrad ES38B transducer, 1 kW 38 kHz puls, 1 ms Kildestyrke 226 dB re. 1 mPa peak-peak.	En enkelt puls vil være tilstrækkelig til at udløse TTS i 2 m's dybde (modtaget SEL overstiger 182 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$). I 10 m's dybde kræves mere end 20 pulser for at overstige 15 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$.	Sæler må forventes at reagere negativt på lydene, men reaktionsafstand er ukendt.	En enkelt puls vil være tilstrækkelig til at udløse TTS i 50 m's dybde (modtaget SEL overstiger 150 re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ (figur 4)). I 500 m's dybde kræves mere end 50 pulser for at overstige 150 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$.	Marsvin må forventes at reagere kraftigt på pulserne selv på stor dybde. Modtaget lydtryk overstiger 130 dB re. 1 μPa rms _{fast} 500 meter under skibet, og tærsklen anslås til 100 dB re. 1 μPa rms _{fast} ved 38 kHz. (figur 5).
Ekkolod over 180 kHz		Ikke hørbar.	Ikke hørbar.	Ikke hørbar.	Ikke hørbar.
Sonar over 180 kHz (sidescan, seabat m.m.)		Ikke hørbar.	Ikke hørbar.	Ikke hørbar.	Ikke hørbar.
Sonar under 180 kHz (multibeam m.m.)	Kongsberg EM710 70-100 kHz, 2 ms 228 dB re 1 μPa .	En enkelt puls vil være tilstrækkelig til at udløse TTS i 2 m's dybde (modtaget SEL overstiger 182 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$). I 10 m's afstand kræves mere end 30 pulser for at overstige 182 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$.	Sæler må forventes at reagere negativt på lydene, men reaktionsafstanden er ukendt.	En enkelt puls vil være tilstrækkelig til at udløse TTS i 50 m's dybde/vinkelret afstand (modtaget SEL overstiger 150 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ (figur 4)). I 500 m's dybde/afstand kræves mere end 50 pulser for at overstige 150 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$.	Marsvin må forventes at reagere kraftigt på pulserne selv på stor dybde. Modtaget lydtryk i 4 km's vinkelret afstand overstiger den anslåede tærskel ved 100 kHz på 100 dB re. 1 μPa rms _{fast} (figur 5).
Sparker	Geo-sparker 200 1 ms pulser, typisk 1 puls/s. Kildestyrke 190 dB re, 1 μPa peak. Frekvensområde 1-3 kHz.	Energien i de enkelte pulser er for lavt til, at TTS kan udløses, selv tæt på lydkilden og først ved summering af energien i 1000 pulser i 1 m's afstand, når SEL op over 182 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$.	Sæler må forventes at reagere negativt på lydene. Reaktionsafstanden er ukendt.	En enkelt puls er ikke tilstrækkelig til at udløse TTS i 1 m's dybde, men 50 pulser ved 1 m summeret vil overstige tærsklen for TTS i frekvensområdet 1-3 kHz (170 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$, figur 4).	Marsvin må forventes at reagere på pulserne selv på stor dybde/afstand. Modtaget lydtryk overstiger 110 dB re. 1 μPa rms _{fast} 100 meter under skibet, og tærsklen anslås til 100 dB re. 1 μPa rms _{fast} ved 2 kHz. (figur 5).

Tabel 14. fortsat

Type	Lyd	Sæler TTS	Sæler adfærd	Marsvin TTS	Marsvin adfærd
Boomer	Applied Acoustics AA301 215 dB peak, 3 pulser/s. 100 μ s varighed 1-5 kHz.	Energien i de enkelte pulser er for lavt til, at TTS kan udløses (SEL i 1 m's afstand 172 dB re. 1 μ Pa ² s). Ved summering af energien i 10 pulser i 1 m's afstand, når SEL op over 182 dB re. 1 μ Pa ² s.	Sæler må forventes at reagere negativt på lydene. Reaktionsafstanden er ukendt.	En enkelt puls er akkurat tilstrækkelig til at overstige tærsklen for TTS i frekvensområdet 1-3 kHz (170 dB re. 1 μ Pa ² s, <i>figur 4</i>). I 100 m's dybde kræves summering af 100 pulser (varighed ca. 30 s) for at overskride tærsklen for TTS.	Marsvin må forventes at reagere på pulserne selv på stor dybde/afstand. Modtaget lydtryk overstiger 130 dB re. 1 μ Pa rms _{fast} 100 meter under lydkilden, og tærsklen anslås til 100 dB re. 1 μ Pa rms _{fast} ved 2 kHz. (<i>figur 5</i>).
Enkelt sleeve gun, 10 cubic inch	210 dB re. 1 μ Pa, peak-peak. 10 ms. Energi hovedsageligt i området op til 2-3 kHz.	SEL for en enkelt puls i 1 m's afstand (181 dB re. 1 μ Pa ² s) er lige under tærsklen for TTS. I 10 m's afstand kræves mere end 100 pulser for at overskride tærsklen.	Sæler må forventes at reagere negativt på lydene. Reaktionsafstanden er ukendt.	En enkelt puls overstiger tærsklen for TTS (164 dB re. 1 μ Pa ² s, som målt af <i>Lucke (2009)</i> for denne type sleeve gun) i 20 m's afstand. I 100 m's dybde/afstand kræves summering af 20 pulser for at overskride tærsklen for TTS.	Marsvin må forventes at reagere på pulserne selv på stor dybde/afstand. Modtaget lydtryk overstiger 130 dB re. 1 μ Pa rms _{fast} 100 meter fra sleeve gun'en, og tærsklen anslås til 100 dB re. 1 μ Pa rms _{fast} ved 2 kHz. (<i>figur 5</i>).

6 Referencer

Akamatsu, T., Hatakeyama, Y. & Takatsu, N. 1993: Effects of pulse sounds on escape behavior of false killer whales. - Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries 59: 1297-1303.

Anonymous 1986: Reactions of beluga whales and narwhals to ship traffic and icebreaking along ice edges in the eastern Canadian High Arctic: 1982-1984. - In Environmental studies (No. 37). Ottawa, ON, Canada: Indian and Northern Affairs Canada. LGL Ltd. & Greeneridge Sciences, 301 pp.

Au, W.W.L. & Moore, P.W.B. 1990: Critical ratio and critical bandwidth for the Atlantic bottlenose dolphin. - The Journal of the Acoustical Society of America 88: 1635-1638.

Baker, C.S., Herman, L.M., Bays, B.G. & Stifel, W.F. 1982: The impact of vessel traffic on the behavior of humpback whales in southeast Alaska. Honolulu: Research from Kewalo Basin Marine Mammal Laboratory for U.S. National Marine Fisheries Service, Seattle, WA.

Björgesæter, A., Ugland, K.I. & Bjørge, A. 2004: Geographic variation and acoustic structure of the underwater vocalization of harbor seal (*Phoca vitulina*) in Norway, Sweden and Scotland. - The Journal of the Acoustical Society of America 116: 2459-2468.

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. - The Journal of the Acoustical Society of America 115: 2346-2357.

Brandt, M.J., Diederichs, A., Betke, K. & Nehls, G. 2011: Responses of harbour porpoises to pile driving at the Horns Rev II offshore wind farm in the Danish North Sea. - Marine Ecology Progress Series 421: 205-216.

Brandt, M.J., Höschle, C., Diederichs, A., Betke, K., Matuschek, R., Witte, S. & Nehls, G. 2012: Far-reaching effects of a seal scarer on harbour porpoises, *Phocoena phocoena*. - Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 23: 222-232.

Brandt, M.J., Höschle, C., Diederichs, A., Betke, K., Matuschek, R. & Nehls, G. 2013: Seal scarers as a tool to deter harbour porpoises from offshore construction sites. - Marine Ecology Progress Series 475: 291-302.

Carlström, J., Berggren, P. & Tregenza, N.J.C. 2009: Spatial and temporal impact of pingers on porpoises. - Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 66: 72-82.

Clark, W.W. 1991: Recent studies of temporary threshold shift (TTS) and permanent threshold shift (PTS) in animals. - The Journal of the Acoustical Society of America 90: 155-163.

Clausen, K.T., Wahlberg, M., Beedholm, K., DeRuiter, S.L. & Madsen, P.T. 2010: Click communication in harbour porpoises *Phocoena phocoena*. - *Bioacoustics* 20: 1-28.

Costa, D.P., Crocker, D.E., Gedamke, J., Webb, P.M., Houser, D., Blackwell, S.B., Waples, D.M., Hayes, S.A. & Le Boeuf, B.J. 2003: The effect of a low-frequency sound source (Acoustic Thermometry of Ocean Climate) on the diving behavior of juvenile northern elephant seals, *Mirounga angustirostris*. - *The Journal of the Acoustical Society of America* 113: 1155-1165.

Croll, D.A., Clark, C.W., Calambokidis, J., Ellison, W.T. & Tershy, B.R. 2001: Effects of anthropogenic lowfrequency noise on the foraging ecology of *Balaenoptera* whales. - *Animal Conservation* 4: 13-27.

Culik, B., Koschinski, S., Tregenza, N. & Ellis, G. M. 2001: Reactions of harbor porpoises *Phocoena phocoena* and herring *Clupea harengus* to acoustic alarms. - *Marine Ecology Progress Series* 211: 255-260.

Dähne, M., Gilles, A., Lucke, K., Peschko, V., Adler, S., Krügel, K., Sundermeyer, J. & Siebert, U. 2013: Effects of pile-driving on harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) at the first offshore wind farm in Germany. - *Environmental Research Letters* 8: 025002.

Erbe, C. & Farmer, D.M. 1998: Masked hearing thresholds of a beluga whale (*Delphinapterus leucas*) in icebreaker noise. - *Deep-Sea Research Part II - Topical Studies in Oceanography* 45: 1373-1388.

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

Finneran, J.J., Schlundt, C.E., Carder, D.A., Clark, J.A., Young, J.A., Gaspin, J.A. & Ridgway, S.H. 2000: Auditory and behavioral responses of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) and a beluga whale (*Delphinapterus leucas*) to impulsive sounds resembling distant signatures of underwater explosions. - *The Journal of the Acoustical Society of America* 108: 417-431.

Finneran, J.J., Schlundt, C.E., Dear, R., Carder, D. & Ridgway, S.H. 2002: Temporary shift in masked hearing thresholds in odontocetes after exposure to single underwater impulses from a seismic watergun. - *The Journal of the Acoustical Society of America* 111: 2929-2940.

Finneran, J.J., Dear, R., Carder, D.A. & Ridgway, S.H. 2003: Auditory and behavioral responses of California sea lions (*Zalophus californianus*) to single underwater impulses from an arc-gap transducer. - *The Journal of the Acoustical Society of America* 114: 1667-1677.

Finneran, J.J. & Schlundt, C.E. 2004: Effects of intense pure tones on the behavior of trained odontocetes (SPAWAR Systems Command Technical Report #1913). U.S. Navy, San Diego

Finneran, J.J., Carder, D.A., Schlundt, C.E. & Ridgway, S.H. 2005: Temporary threshold shift in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) exposed to mid-frequency tones. - *The Journal of the Acoustical Society of America* 118: 2696-2705.

- Finneran, J.J. & Schlundt, C.E. 2011: Subjective loudness level measurements and equal loudness contours in a bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*). - The Journal of the Acoustical Society of America 130: 3124-3136.
- Finneran, J.J. & Schlundt, C.E. 2013: Effects of fatiguing tone frequency on temporary threshold shift in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*). - The Journal of the Acoustical Society of America 133: 1819-1826.
- Hanggi, E.B. & Schusterman, R.J. 1994: Underwater acoustic displays and individual variation in male harbour seals, *Phoca vitulina*. - Animal Behaviour 48: 1275-1283.
- Harris, R.E., Miller, G.W. & Richardson, W.J. 2001: Seal responses to airgun sounds during summer seismic surveys in the Alaskan Beaufort Sea. - Marine Mammal Science 17: 795-812.
- Hermannsen, L., Beedholm, K., Tougaard, J. & Madsen, P.T. 2014: High frequency components of ship noise in shallow water: implications for harbor porpoises (*Phocoena phocoena*). - The Journal of the Acoustical Society of America 136: 1640.
- Jacobs, S.R. & Terhune, J.M. 2002: The effectiveness of acoustic harassment devices in the Bay of Fundy, Canada: seal reactions and a noise exposure model. - Aquatic Mammals 28: 147-158.
- Johnson, C.S. 1968a: Masked Tonal Thresholds in the Bottlenosed Porpoise. - The Journal of the Acoustical Society of America 44: 965-967.
- Johnson, C.S. 1968b: Relation between absolute threshold and duration-of-tone pulses in the bottlenosed porpoise. - The Journal of the Acoustical Society of America 43: 757-763.
- Johnston, D.W. 2002: The effect of acoustic harassment devices in harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) in the Bay of Fundy, Canada. - Biological Conservation 108: 113-118.
- Kastak, D., Southall, B.L., Schusterman, R.J. & Kastak, C.R. 2005: Underwater temporary threshold shift in pinnipeds: effects of noise level and duration. - The Journal of the Acoustical Society of America 118: 3154-3163.
- Kastak, D., Mulsow, J., Ghoul, A. & Reichmuth, C. 2008: Noise-induced permanent threshold shift in a harbor seal. - The Journal of the Acoustical Society of America 123: 2986-2986.
- Kastelein, R.A., de Haan, D., Goodson, A.D., Staal, C. & Vaughan, N. 1997: The effects of various sounds on harbor porpoise. -In: Read, A.J., Wiepkema, P.R. & Nachtigall, P.E. (Eds.); The biology of the harbor porpoise De Spil, Woerden, The Netherlands, pp. 367-383.
- Kastelein, R.A., Bunschoek, 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. - The Journal of the Acoustical Society of America 112: 334-344.

Kastelein, R.A., van der Heul, S., Verboom, W.C., Triesscheijn, R.J.V. & Jennings, N.V. 2006a: The influence of underwater data transmission sounds on the displacement behaviour of captive harbour seals (*Phoca vitulina*). - Marine Environmental Research 61: 19-39.

Kastelein, R.A., van der Heul, S., Terhune, J.M., Verboom, W.C. & Triesscheijn, R.J.V. 2006b: Deterring effects of 8-45kHz tone pulses on harbour seals (*Phoca vitulina*) in a large pool. - Marine Environmental Research 62: 356-373.

Kastelein, R.A., Wensveen, P.J., Hoek, L., Au, W.W.L., Terhune, J.M. & de Jong, C.A.F. 2009a: Critical ratios in harbor porpoises (*Phocoena phocoena*) for tonal signals between 0.315 and 150 kHz in random Gaussian white noise. - The Journal of the Acoustical Society of America 126: 1588-1597.

Kastelein, R.A., 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. - The Journal of the Acoustical Society of America 128: 3211-3222.

Kastelein, R.A., Gransier, R., Hoek, L., MacLeod, A. & Terhune, J.M. 2012a: Hearing threshold shifts and recovery in harbor seals (*Phoca vitulina*) after octave-band noise exposure at 4 kHz. - The Journal of the Acoustical Society of America 132: 2745-2761.

Kastelein, R.A., Gransier, R., Hoek, L. & Olthuis, J. 2012b: Temporary threshold shifts and recovery in a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) after octave-band noise at 4kHz. - The Journal of the Acoustical Society of America 132: 3525-3537.

Kastelein, R.A., Gransier, R. & Hoek, L. 2013a: Comparative temporary threshold shifts in a harbor porpoise and harbor seal, and severe shift in a seal (L). - The Journal of the Acoustical Society of America 134: 13-16.

Kastelein, R.A., Gransier, R., Hoek, L. & Rambags, M. 2013b: Hearing frequency thresholds of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) temporarily affected by a continuous 1.5 kHz tone. - The Journal of the Acoustical Society of America 134: 2286-2292.

Königson, S. 2007: Seal behaviour around fishing gear and its impact on Swedish fisheries. - Licentiate thesis. Department of Marine Ecology, Göteborg University.

Kujawa, S.G. & Liberman, M.C. 2009: Adding Insult to Injury: Cochlear Nerve Degeneration after "Temporary" Noise-Induced Hearing Loss. - The Journal of Neuroscience 29: 14077-14085.

LeDuc, R.G., Perrin, W.F. & Dizon, A.E. 1999: Phylogenetic relationships among the delphinid cetaceans based on full cytochrome B sequences. - Marine Mammal Science 15: 619-648.

Lucke, K., Siebert, U., Lepper, P.A. & Blanchet, M.-A. 2009: Temporary shift in masked hearing thresholds in a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) after exposure to seismic airgun stimuli. - The Journal of the Acoustical Society of America 125: 4060-4070.

Madsen, P.T. & Møhl, B. 2000: Sperm whales (*Physeter catodon* L. 1758) do not react to sounds from detonators. - The Journal of the Acoustical Society of America 107: 668-671.

Madsen, P.T. 2005: Marine mammals and noise: Problems with root mean square sound pressure levels for transients. - The Journal of the Acoustical Society of America 117: 3952-3957.

Malme, C.I., Miles, P.R., Clark, C.W., Tyack, P. & Bird, J.E. 1983: Investigations of the potential effects of underwater noise from petroleum industry activities on migrating gray whale behaviour. Report No. 5366 to U.S. Minerals Management Service, Bolt Beranek and Newman Inc., Anchorage, Alaska.

Malme, C.I., Miles, P.R., Clark, C.W., Tyack, P. & Bird, J.E., 1984: Investigations of the potential effects of underwater noise from petroleum industry activities on migrating gray whale behaviour. Phase II: January 1984. Report No. 5386 to U.S. Minerals Management Service, Bolt Beranek and Newman Inc., Anchorage, Alaska.

Meloni, T. & Rosenheck, A. 1995: Choice of frequency weighting for the evaluation of weapon noise. - The Journal of the Acoustical Society of America 97: 3636-3641.

Miller, G.W., Moulton, V.D., Davis, R.A., Holst, M., Millman, P., MacGillvray, A. & Hannay, D. 2005: Monitoring seismic effects on marine mammals - southeastern Beaufort Sea 2001-2002. - In: S.L. Armsworthy, P.J. Cranford & K. Lee (Eds.), Offshore oil and gas environmental effects monitoring: Approaches and technologies, Battelle Press, Columbus, Ohio, pp. 511-542.

Mooney, T.A., Nachtigall, P.E., Breese, M., Vlachos, S. & Au, W.W.L. 2009: Predicting temporary threshold shifts in a bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*): The effects of noise level and duration. - The Journal of the Acoustical Society of America 125: 1816-1826.

Nachtigall, P.E., Pawloski, D.A. & Au, W.W.L. 2003: Temporary threshold shifts and recovery following noise exposure in the Atlantic bottlenosed dolphin (*Tursiops truncatus*). - The Journal of the Acoustical Society of America 113: 3425-3429.

Nachtigall, P.E., Supin, A.Y., Pawloski, J.L. & Au, W.W.L. 2004: Temporary threshold shifts after noise exposure in the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) measured using evoked auditory potentials. - Marine Mammal Science 20: 673-687.

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.

- National Research Council 2003: Ocean noise and marine mammals. The National Academies Press, Washington, D.C.
- National Research Council 2005: Marine mammal populations and ocean noise: Determining when noise causes biologically significant effects. National Academic Press, Washington D.C.
- Nieukirk, S.L., Stafford, K.M., Mellinger, D.K., Dziak, P. & Fox, C.G. 2004: Low-frequency whale and seismic airgun sounds recorded in the mid-Atlantic Ocean. - *The Journal of the Acoustical Society of America* 115: 1832-1843.
- Nowacek, D.P., Johnson, M.P. & Tyack, P.L. 2004: North Atlantic right whales (*Eubalaena glacialis*) ignore ships but respond to alerting stimuli. - *Proceedings of The Royal Society of London, B*. 271, 227-231.
- Nowacek, D.P., Thorne, L.H., Johnston, D.W. & Tyack, P.L. 2007: Responses of cetaceans to anthropogenic noise. - *Mammal Review* 37: 81-115.
- Olesiuk, P.F., Nichol, L.M., Sowden, M.J. & Ford, J.K.B. 2002: Effect of the sound generated by an acoustic harassment device on the relative abundance and distribution of harbor porpoises (*Phocoena phocoena*) in Retreat Passage, British Columbia. - *Marine Mammal Science* 18: 843-862.
- Plomp, R. & Bouman, A. 1959: Relation between hearing threshold and duration for tone pulses. - *The Journal of the Acoustical Society of America* 31: 749-758.
- Popov, V.V., Supin, A.Y., Wang, D. & Wang, K. 2006: Nonconstant quality of auditory filters in the porpoises, *Phocoena phocoena* and *Neophocoena phocaenoides* (Cetacea, Phocoenidae). - *The Journal of the Acoustical Society of America* 119: 3173-3180.
- Popov, V.V., Supin, A.Y., Wang, D., Wang, K., Dong, L. & Wang, S. 2011: Noise-induced temporary threshold shift and recovery in Yangtze finless porpoises *Neophocaena phocaenoides asiaorientalis*. - *The Journal of the Acoustical Society of America* 130: 574-584.
- Radford, C., Stanley, J., Simpson, S. & Jeffs, A. 2011: Juvenile coral reef fish use sound to locate habitats. - *Coral Reefs* 30: 295-305.
- Rasmussen, M.H. & Miller, L.A. 2002: Whistles and clicks from white-beaked dolphins, *Lagenorhynchus albirostris*, recorded in Faxaflói Bay, Iceland. - *Aquatic Mammals* 28: 78-89.
- Rasmussen, M.H., Lammers, M., Beedholm, K. & Miller, L.A. 2006: Source levels and harmonic content of whistles in white-beaked dolphins (*Lagenorhynchus albirostris*). - *The Journal of the Acoustical Society of America* 120: 510-517.
- Regnault, M. & Lagardère, J.P. 1983: Effects of ambient noise on the metabolic level of *Crangon crangon* (Decapoda, Natantia). - *Marine Ecology Progress Series* 11: 71-78.

Richardson, W.J., Würsig, B. & Greene, C.R. 1990: Reactions of Bowhead Whales, *Balaena mysticetus* to Drilling and Dredging Noise in the Canadian Beaufort Sea. - *Marine Environmental Research* 29: 135-160.

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

Richardson, W.J., Miller, G.W. & Greene, C.R. 1999: Displacement of migrating bowhead whales by sounds from seismic surveys in shallow waters of the Beaufort Sea. - *The Journal of the Acoustical Society of America* 106: 2281.

Salt, A.N. & Lichtenhan, J.T. 2014: How does wind turbine noise affect people? - *Acoustics Today* 10: 20-28.

Schlundt, C.E., Finneran, J.J., Carder, D. & Ridgway, S.H. 2000: Temporary shift in masked hearing thresholds of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, and white whales, *Delphinapterus leucas*, after exposure to intense tones. - *The Journal of the Acoustical Society of America* 107: 3496-3508.

Schlundt, C.E., Dear, R.L., Carder, D.A. & Finneran, J.J. 2006: Growth and recovery of temporary threshold shifts in a dolphin exposed to midfrequency tones with durations up to 128 s. - *The Journal of the Acoustical Society of America* 120: 3227.

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: Initial Scientific Recommendations* - *Aquatic Mammals* 33: 411-521.

Southall, B.L., Rowles, T.K., Gullard, F.M.D., Baird, R. W. & Jepson, P.D. 2013: Final report of the Independent Scientific Review Panel investigating potential contributing factors to a 2008 mass stranding of melon-headed whales (*Peponocephala electra*) in Antsohihy, Madagascar. IWC, Cambridge.

Stone, C.J. & Tasker, M.L. 2006: The effects of seismic airguns on cetaceans in UK waters. - *Journal of Cetacean Research and Management* 8: 255-263.

Thompson, P.M., Lusseau, D., Barton, T., Simmons, D., Rusin, J. & Bailey, H. 2010: Assessing the responses of coastal cetaceans to the construction of offshore wind turbines. - *Marine Pollution Bulletin* 60: 1200-1208.

Tougaard, J., Carstensen, J., Teilmann, J., Skov, H. & Rasmussen, P. 2009: Pile driving zone of responsiveness extends beyond 20 km for harbour porpoises (*Phocoena phocoena*, (L.)). - *The Journal of the Acoustical Society of America* 126: 11-14.

Tougaard, J., Kyhn, L.A., Amundin, M., Wennerberg, D. & Bordin, C. 2012: Behavioral reactions of harbor porpoise to pile-driving noise. - In: Popper, A.N. & Hawkins, A.D. (Eds.); *The Effects of Noise on Aquatic Life*. Springer, New York, pp. 277-280.

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. – Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 44.

Tyack, P.L. 2009: Human-generated sound and marine mammals. - *Physics Today* 62: 39-44.

Van Parijs, S.M., Thompson, P.M., Tollit, D.J. & Mackay, A. 1997: Distribution and activity of male harbour seals during the mating season. - *Animal Behaviour* 54: 35-43.

Van Parijs, S. M., Janik, V.M. & Thompson, P.M. 2000: Display-area size, tenure length, and site fidelity in the aquatically mating male harbour seal, *Phoca vitulina*. - *Canadian Journal of Zoology* 78: 2209-2217.

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.

Vos, J. 2003: A- and C-weighted sound levels as predictors of the annoyance caused by shooting sounds, for various facade attenuation types. - *The Journal of the Acoustical Society of America* 113: 336-347.

Watkins, W.A. & Schevill, W.E. 1975: Sperm whales (*Physeter catodon*) react to pingers. - *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 22: 123-129.

VURDERING AF EFFEKTER AF UNDERVANDSSTØJ PÅ MARINE ORGANISMER

Del 2 - Påvirkninger

Der er stigende opmærksomhed på effekter af undervandsstøj på organismer i marine miljøer. Der er således stigende krav til vurdering og overvågning af undervandsstøj i forbindelse med menneskelige aktiviteter på havet. På baggrund af amerikanske anbefalinger fra 2007 og den yderligere viden, der er fremkommet siden, fremsættes en række anbefalinger vedrørende danske forhold. Anbefalingerne vedrører fastsættelse af grænser for lydpåvirkning, der kan medføre midlertidigt og permanent høretab og påvirkning af sæler og marsvins adfærd. For begge typer af påvirkninger anbefales det for marsvin at lydtryk vægtes efter deres hørbarhed, dvs. de dele af frekvensspektret hvor marsvin hører godt skal tillægges større vægt i vurderingen af negative effekter end de dele hvor marsvins hørelse er dårligere. For øvrige arter af havpattedyr, havfugle og fisk er datagrundlaget ikke omfattende nok til at give egentlige anbefalinger.