Rapport 31/2015 • Utgitt Juli 2015

Ultralyd – et nytt våpen i kampen mot lakselusa?

Atle Mortensen og Martin H. Skjelvareid

Nofima er et næringsrettet forskningsinstitutt som driver forskning og utvikling for akvakulturnæringen, fiskerinæringen og matindustrien.

Nofima har om lag 350 ansatte.

Hovedkontoret er i Tromsø, og forskningsvirksomheten foregår på fem ulike steder: Ås, Stavanger, Bergen, Sunndalsøra og Tromsø

Felles kontaktinformasjon:
Tlf: 02140
E-post: post@nofima.no
Internett: www.nofima.no

Foretaksnr.:
NO 989 278 835

Hovedkontor Tromsø:
Muninbakken 9–13
Postboks 6122 Langnes
NO-9291 Tromsø

Ås:
Osloveien 1
Postboks 210
NO-1431 ÅS

Stavanger:
Måltidets hus, Richard Johnsensgate 4
Postboks 8034
NO-4068 Stavanger

Bergen:
Kjerreidviken 16
Postboks 1425 Oasen
NO-5828 Bergen

Sunndalsøra:
Sjølseng
NO-6600 Sunndalsøra

Rapport

ISBN: 978-82-8296-315-2 (trykt)
ISBN: 978-82-8296-316-9 (pdf)
ISSN 1890-579X

Tittel: **Ultralyd – et nytt våpen i kampen mot lakselusa?**	*Rapportnr.:* 31/2015 *Tilgjengelighet:* **Åpen**
Forfatter(e)/Prosjektleder: Atle Mortensen og Martin H. Skjelvareid	*Dato:* 1. juli 2015
Avdeling: Produksjonsbiologi	*Ant. sider og vedlegg:* 25
Oppdragsgiver: Fiskeri- og havbruksnæringens forskningsfond (FHF)	*Oppdragsgivers ref.:* FHF # 901129
Stikkord: Lakselus, ultralyd, kavitasjon, fisk, begroing, marine pattedyr	*Prosjektnr.:* 11357

Sammendrag/anbefalinger:

Lakselus er den største miljømessige utfordringen for lakseoppdrettsnæringen. Å utvikle effektive metoder for å bekjempe lakselus har derfor svært høy prioritet. Ultralyd er lansert som en potensiell metode for å bekjempe lakselus, og målet for rapporten har vært å frambringe kunnskap for å vurdere om det kan være en egnet metode. Rapporten beskriver dannelsen og egenskaper for ultralyd i vann, og hvilken effekt ultralyd har på forskjellige begroingsorganismer. Studiene som er gjort på påslag av rur peker i retning av at ultralyd muligens kan benyttes til å hindre påslag av lakseluskopepoditter på vertsfisken. Virkningen av ultralyd på lakselus kan imidlertid bare dokumenteres gjennom kontrollerte forsøk. Det er lite som tyder på at ultralyd vil ha negativ effekt på oppdrettslaks eller villfisk i området rundt oppdrettsanleggene, men også det må fastslås ved hjelp av kontrollerte forsøk. Sel og hval kan høre ultralyd og vil kanskje bli påvirket, men ikke skadet. Ultralyd i vann representerer ingen utfordringer av HMS-messig karakter.

English summary/recommendation:

Infection with salmon lice is currently the most serious environmental problem in commercial salmon farming. Development of new and efficient mitigating methods is therefore highly prioritized. Ultrasound might be such a method as it has been shown to have an effect on different biofouling organisms. Studies on barnacles indicate that ultrasound may also be efficient against attachment of salmon louse copepodids on the host fish, but this would have to be experimentally confirmed. It seems that ultrasound has no negative effects on fish, but probably a deterrent effect on marine mammals. Under water ultrasound is not a threat to human health.

Innhold

1 Introduksjon 1

1.1 Bekjempelse av lakselus 1

1.1.1 Ultralyd – en ny metode 1

1.1.2 Eksisterende metoder for bekjempelse av lakselus 1

1.2 Målsetning 3

2 Fysiske aspekter ved lyd og ultralyd 4

2.1 Grunnleggende om lyd og ultralyd 4

2.2 Lyd under vann 4

2.3 Generering av ultralyd 5

2.4 Kavitasjon 7

2.5 Forplantning av lyd og ultralyd i havet 10

2.6 Sammenheng mellom lydkildens effekt og lydnivå i havet 12

3 Bruk av ultralyd for kontroll av organismer 13

3.1 Introduksjon 13

3.2 Eksempler 14

3.2.1 Algevekst 14

3.2.2 Begroing ved vanninntaksrør 14

3.2.3 Begroing på skip 14

3.3 Bekjempelse av lakselus med ultralyd 16

3.3.1 Fjerning av lakselus som allerede har etablert seg på fisken. 16

3.3.2 Preventiv bruk av ultralyd for å forhindre påslag av lakselus 16

4 Effekten av ultralyd på fisk og andre marine dyr 18

4.1 Effekter på fisk 18

4.2 Effekter på krepsdyr 19

4.3 Effekter på marine pattedyr 19

4.4 ASC-sertifisering 20

5 HMS 21

6 Sammendrag og konklusjoner 22

7 Referanser 23

1 Introduksjon

Ifølge Vitenskapelig råd for lakseforvaltning (2015) er innsiget av villaks (*Salmo salar*) til norskekysten mer enn halvert fra 1980 til i dag. Det er mange forhold som kan ha påvirket denne negative utviklingen, både i ferskvannsfasen og i sjøfasen. I deres vurdering av trusselfaktorer for villaksbestanden blir rømt oppdrettslaks og lakselus rangert på topp som «ikke-stabiliserte» trusselfaktorer. Lakselus (*Lepeophtheirus salmonis*) er en naturlig ektoparasitt på villaks i sjøfasen, og grunnen til at den rangeres så høyt som trusselfaktor er potensialet for oppformering og spredning fra lakseoppdrettsanlegg. På denne bakgrunn har Mattilsynet satt en øvre grense på 0,5 kjønnsmodne hunnlus per laks for hva som aksepteres i oppdrettsanlegg. Når det er fare for at denne grensen overskrides må det iverksettes lusebehandling. I regjeringens «Havbruksmelding» (Stortingsmelding nr 16, 2014-2015) ble det nylig foreslått regler som forutsetter at videre vekst i lakseoppdrettet i et område kun tillates når visse miljøkriterier er innenfor akseptable grenser. Foreløpig er tetthet av lakselus i anlegg det eneste foreslåtte kriteriet, men flere kan bli inkludert senere.

1.1 Bekjempelse av lakselus

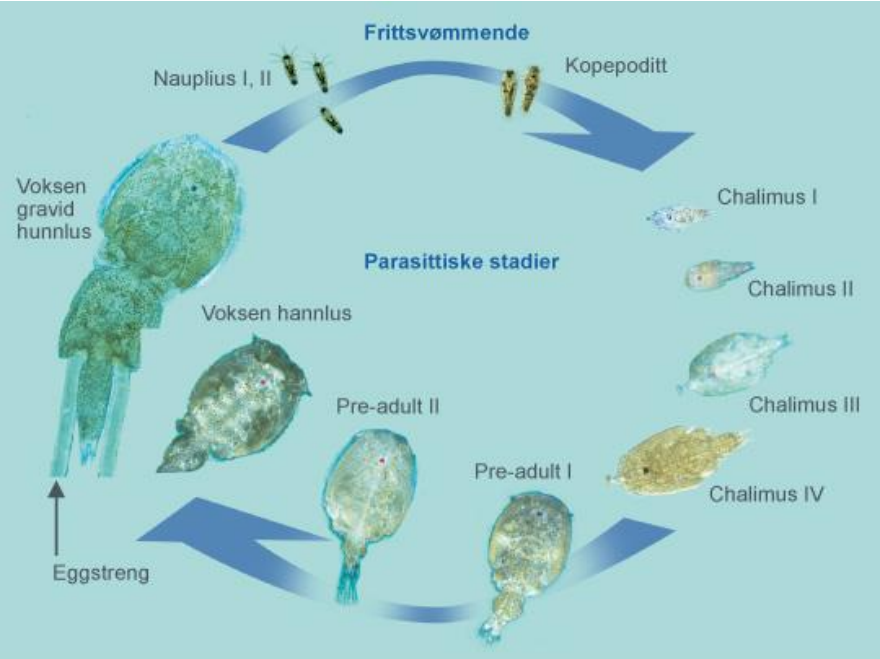
1.1.1 Ultralyd – en ny metode

I det siste er bruk av ultralyd lansert som en ny metode for bekjempelse av lakselus. I 2014 vant det chilenske selskapet Usonic Ltda Global Aquaculture Alliance's innovasjonspris for utvikling av denne metoden til kontroll av lakselus (*Caligus rogercressei*) i chilensk lakseoppdrett [1]. Det har vært vanskelig å fremskaffe dokumentasjon på hvilken effektivitet man har oppnådd med denne metoden i Chile, men det er klart at metoden tilfredsstiller flere av de ønskede kriteriene: Lave kostnader, ingen handtering av laksen, ikke økt rømningsfare. Hvorvidt ultralyd virker på vår lakselus (*L. salmonis*) er ennå ukjent.

1.1.2 Eksisterende metoder for bekjempelse av lakselus

Lakselus er et marint krepsdyr som i hovedsak lever parasittisk på anadrom laksefisk (laks, sjøørret og sjørøye). Lakselusas livssyklus er vist i fig 1. Ifølge denne figuren har lakselus 9 livsstadier, hvorav de tre første er frittlevende. Nyere forskning har imidlertid vist at den bare har 7 livsstadier i og med at den ikke har fire chalimus-stadier, men bare to (Hamre et al., 2013). I de frittlevende stadiene søker lakselusa mot lys (positiv fototaksis), og finnes derfor i størst mengder nær vannoverflaten. I tredje stadium (kopepodittstadiet) fester lusa seg på vertsfisken. Der lever den av slim, hud og blod. Lakselus kan øke risikoen for infeksjoner, skade fiskens saltbalanse og i verste fall medføre at fisken dør.

[1] Se http://www.seafoodsource.com/news/aquaculture/goal-2014-usonic-wins-innovation-award-for-sea-lice-mitigation



Figur 1 Lakselusas livssyklus

I lakselusas pelagiske stadier vil den normalt finnes spredt i store vannvolum. Bekjempelse av lakselus har derfor blitt fokusert på stadiene etter at den har festet seg på laksen. Tradisjonelt har den blitt bekjempet ved hjelp av kjemisk behandling. En rekke midler med forskjellige virkningsmekanismer er tatt i bruk. Mange av midlene benyttes til badbehandling, mens andre gis gjennom laksefôret. Et stort problem for alle midlene er at lakselus over tid utvikler resistens, slik at de etter hvert mister sin effekt. De kjemiske midlene har også negative miljømessige effekter da de også kan påvirke ville organismer utenfor laksemerdene. Behandlingen påfører også laksen stress som kan redusere fiskens vekst, og i verste fall medføre dødelighet. Blant anlegg som ble foreskrevet behandling mot lakselus i 2014 var det gjennomsnittlig 5,05 foreskrivinger per lokalitet (Jensen, 2015).

I de senere årene er det lagt ned stor innsats i å utvikle andre bekjempelsesmetoder mot lakselus enn kjemisk behandling. Disse metodene kan deles inn i to grupper: 1) Forebyggende metoder som har som mål å hindre lakselus i å sette seg på laksen. 2) Kurative metoder som har som mål å fjerne eller drepe lus som allerede sitter på laksen. Flere av disse metodene er beskrevet av Sjøthun Røen (2015). I den første gruppen inngår metoder der målet er å hindre fysisk kontakt mellom lus og laks. Luseskjørt tar utgangspunkt i at de frittlevende stadiene av lakselus søker mot lys (positiv fototaksi) og dermed fins i størst konsentrasjon i de øverste meterne av vannsøylen. Luseskjørt virker ved å hindre at lus i den øvre delen av vannsøylen kommer i kontakt med fisken i merden. Snorkelmerden virker ved at laksen tvinges til å holde seg flere meter under vannoverflaten ved hjelp av et nettak i merden, men har tilgang til luft fra overflaten via en snorkel (laks må ha tilgang til vannoverflaten for å fylle svømmeblæren med luft). Flytende lukkede anlegg som forsynes med vann fra større dyp (20 m eller mer) skal også redusere infeksjonsraten for lakselus. I dag argumenteres det også fra mange hold at lakseoppdrettet bør foregå i landbaserte anlegg for blant annet å redusere luseplagene.

I senere tid er det også gjort forsøk med elektriske spenningsfelt i notveggen som skal hindre lus i å komme inn i merden (Grøntvedt, 2011). En alternativ strategi for å forebygge problemet med lakselus

er å styrke laksens motstandskraft mot lakselus. Arbeidet med dette følger to forskjellige ruter: Den ene går ut på å utvikle en vaksine for å styrke laksens immunforsvar mot lakselus (http://www.sysla.no/2014/03/08/havbruk/jaktar-pa-vaksine-mot-lakselus_7443/), mens den andre går ut på å avle fram en mer motstandsdyktig laks (Sjøthun Røen, 2015). Begge disse metodene er ennå på et tidlig utviklingsstadium.

Metodene for å fjerne lus som allerede sitter på fisken inkluderer både fysiske og biologiske metoder. Blant de fysiske metodene er behandling med ferskvann (lakselus har liten evne til osmoregulering), behandling med oppvarmet vann (på grunn av størrelsesforskjellen blir lusa raskere oppvarmet enn laksen), spyling og mekanisk børsting av laksen (Sjøtun Røen, 2015). Disse metodene har det til felles med kjemisk behandling at de er kostbare og påfører fisken stress. En alternativ metode er å drepe fastsittende lus ved hjelp av laser

(http://www.tu.no/industri/2012/02/15/skyter-lakselus-med-laser). Biologisk avlusing ved hjelp av lusespisende fisk (leppefisk og rognkjeks) ansees som en miljømessig bedre metode enn kjemisk avlusing, og øker i omfang.

Det kan settes opp en rekke kriterier for den ideelle metoden for lusbekjempelse: 1) Høy effektivitet mot lakselus, 2) Krever ikke fysisk handtering av laksen, 3) Har ikke negative helse- eller fiskevelferdsmessig effekter på laksen, 4) Medfører ikke uakseptabel virkning på det marine miljøet, 5) Er kostnadsmessig forsvarlig, 6) Medfører ikke økt rømningsfare, 7) Har ingen HMS-messige utfordringer. Ingen av dagens metoder kan sies å oppfylle de ønskede kriteriene fullt ut: Lav effektivitet, høye kostnader og/eller negative effekter på laks og miljø kjennetegner de fleste av metodene som benyttes i dag.

1.2 Målsetning

Målsetningen med denne rapporten er å lage en oversikt over hva vi vet om ultralyd i vann og ultralydens påvirkning på forskjellige organismer, og på bakgrunn av det vurdere om ultralyd kan være en egnet metode for bekjempelse av lakselus i oppdrettsnæringen. Viktige spørsmål i så måte er om ultralyd har den ønskede virkningen på lakselus, og om ultralyd kan ha negative virkninger på laksen og miljøet rundt oppdrettsanleggene.

2 Fysiske aspekter ved lyd og ultralyd

2.1 Grunnleggende om lyd og ultralyd

Begrepet lyd brukes gjerne for å beskrive luftbåren lyd som mennesker kan høre, f.eks. tale, men i utvidet forstand kan lyd brukes om alle typer mekaniske vibrasjoner i faste stoffer, væsker og gass.

Lyd finnes i to hovedformer, skjærbølger og trykkbølger. Begge deler kan forplante seg i faste materialer, men i luft og væske er det kun trykkbølger som forplanter seg. En trykkbølge gir lokale variasjoner i trykk rundt det statiske luft- eller væsketrykket. Denne variasjonen kalles «lydtrykket». For enkelhets skyld angis ofte lydtrykket som det effektive trykket i gjennomsnitt over tid («root-mean-square»-verdi). Lydtrykket angis ofte i dB og angir forholdet mellom det målte lydtrykket og en referanse:

$$SPL = 20\ \log \frac{P_m}{P_{ref}}$$

Der SPL står for «sound pressure level», P_m representerer målt lydtrykk og P_{ref} representerer referanse-lydtrykket. For luftbåren lyd brukes ofte P_{ref} = 20 µPa, som tilsvarer det laveste lydnivået som mennesket kan høre. Ved målinger i vann brukes vanligvis P_{ref} = 1 µPa.

Ultralyd er lydbølger ved frekvenser som er over hva det menneskelige øret kan høre, vanligvis definert som over 20 kHz. Ut over dette er det ingen vesensforskjell mellom hørbar lyd og ultralyd.

2.2 Lyd under vann

Mennesker kan høre lyd under vann, men hørselen er mindre sensitiv enn i luft, og man hører også høye frekvenser dårligere (Parvin & Nedwell, 1995). Hørselsterskelen over og under vann er vist i figur 2. Denne viser at hørselen er mest sensitiv rundt 1 kHz, der mennesker kan høre lydtrykk ned til ca. 67 dB (re. 1 µPa).

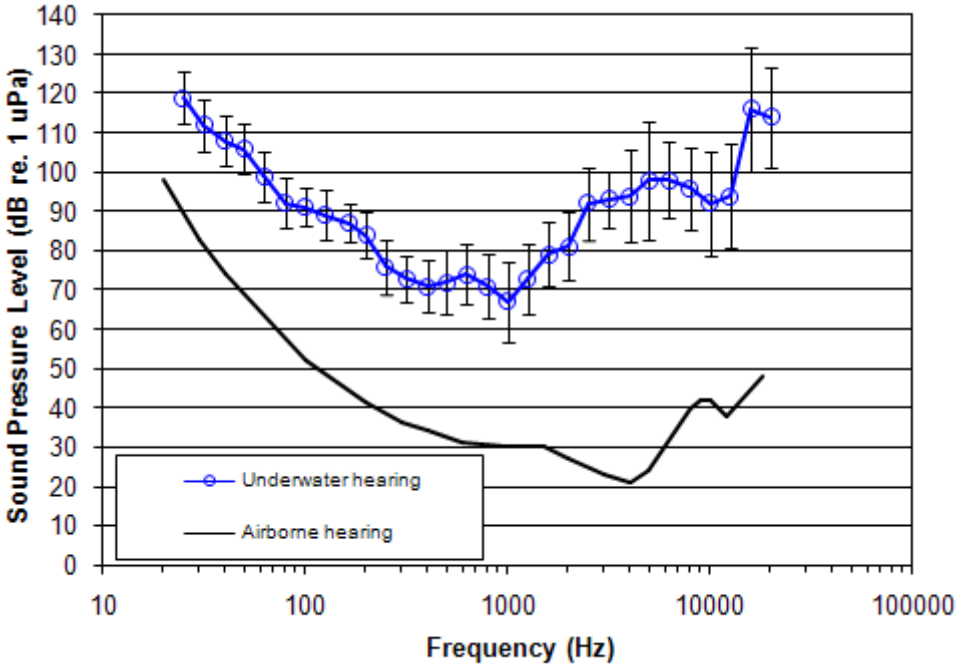
I tillegg til lydtrykk er det også vanlig å måle intensiteten til lydbølger, dvs. hvor mye arbeid (i fysisk forstand) som utføres av bølgen per areal (W/m^2). Lydintensiteten er relevant i betraktninger rundt hvilken mekanisk påvirkning lydbølgen kan ha på et objekt. På grunn av de fysiske forskjellene mellom luft og vann vil et gitt lydtrykk gi opphav til mye høyere intensitet i luft enn i vann. I praksis betyr dette at man må legge til ca. 36 dB til lydtrykket i luft for å få et lydtrykk i vann som gir samme lydintensitet.

Kombinasjonen av ulike referanseverdier, ulike hørselsterskler og ulike lydintensiteter gjør at det ikke er mulig å sammenligne lydtrykksverdier mellom luft og vann direkte. Det er mulig å konvertere verdier mellom luft og vann på ulike måter:

- **Like lydintensiteter:** Legg til 26 dB (forskjell i referanseverdi) + 36 dB (forskjell i lydintensitet) = 62 dB for å konvertere SPL mellom luft og vann.

- **Likt opplevd lydnivå for det menneskelige øre:** Legg til 26 dB (forskjell i referanseverdi) + forskjellen i hørselsterskel (frekvensavhengig). Ved 1 kHz og under er forskjellen ca. 30-40 dB, og den totale forskjellen er 56-66 dB, mens forskjellen er større over 1 kHz.

Det er verdt å merke seg at ved 1 kHz og under er konverteringsfaktoren omtrent den samme for disse to fremgangsmåtene. Vi kan derfor bruke 62 dB som et utgangspunkt for grov sammenligning. Eksempel: Ved en rockekonsert kan lydtrykket være opp mot 120 dB, nært smerteterskelen for det menneskelige øret. I vann tilsvarer dette 120 + 62 = 182 dB. Dette er sammenlignbart med støyen i havet fra et tankskip, målt på noen meters avstand (Collins, 2015).



Figur 2 *Terskler for menneskelig hørsel over og under vann ved forskjellige frekvenser. Figuren er hentet fra nettsiden Subacousttech (http://www.subacoustech.com/underwater-noise/hearing-underwater/).*

2.3 Generering av ultralyd

Ultralyd kan genereres av alle slags gjenstander som vibrerer ved ultralyd-frekvenser, dvs. over 20 kHz, og som kan overføre denne vibrasjonen til et medium som kan forplante en lydbølge, f.eks. vann. Vanligvis brukes såkalte transducere som kan konvertere elektrisk energi til lydenergi. Det finnes en rekke ulike typer transducere, men de mest aktuelle transducere i denne sammenhengen er:

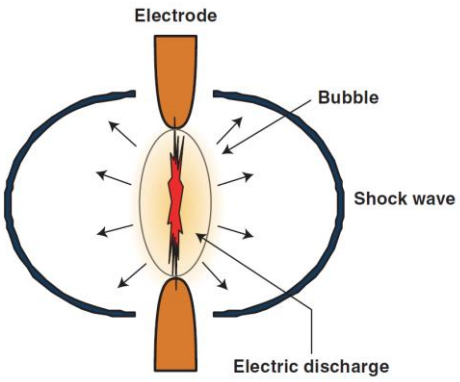
- **Piezoelektriske transducere:** Disse fungerer ved at det settes opp et elektrisk felt over et piezoelektrisk krystall. Når det elektriske feltet endrer seg, endrer også formen på krystallet seg. Ved å påtrykke en varierende elektrisk spenning over krystallet får man dette til å vibrere og generere ultralyd. En piezoelektrisk transducer ser ofte ut som en sylinder, der den ene endeflaten vibrerer. Et eksempel er vist i figur 3.

- **«Gnist»-transducere:** Disse fungerer ved at to elektroder, plassert tett sammen, senkes ned i vann, og at en høy spenning påtrykkes mellom disse. Dette gjøres vanligvis gjennom utladning av en kondensator. Det kraftige elektriske feltet gir en umiddelbar oppvarming og fordampning av vannet mellom elektrodene, som gir opphav til en voksende boble og en sjokkbølge av ultralyd, som vist i figur 4. Gassboblen etter det fordampede vannet vil

ekspandere og kollapse gjennom flere sykluser, og vil i denne prosessen generere flere ultralydbølger.

Bølgene er i sin natur veldig kortvarige, og dekker derfor et bredt frekvensområde, fra det hørbare området og opp mot flere hundre kHz (Schaefer et al., 2010).

Figur 3 Eksempel på en piezoelektrisk ultralydtransducer. Den hvite eneflaten vibrerer og genererer ultralyd når transduceren drives med en varierende elektrisk spenning.

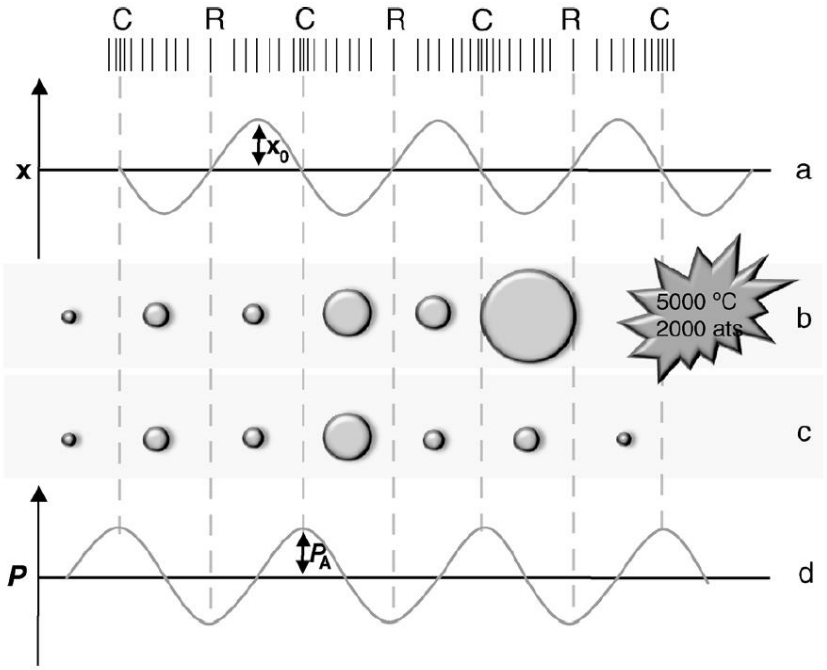


Figur 4 Skjematisk fremstilling av en gnist-transducer. En høy spenning settes opp mellom elektrodene, og dette gir opphav til en boble mellom elektrodene og en sjokkbølge som brer seg utover.

2.4 Kavitasjon

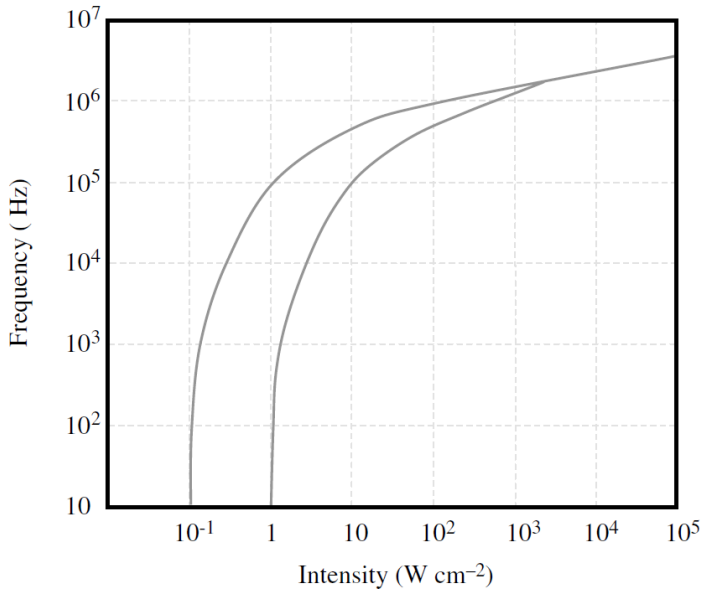
Kavitasjon oppstår i en væske dersom trykket i et gitt punkt blir så lavt at væsken fordamper og etterlater et hulrom (en «kavitet») av gass. Kavitasjon kan oppstå når et objekt beveger seg gjennom væske med stor hastighet, for eksempel en propell som roterer raskt, eller en lydbølge kan være så kraftig at kavitasjon oppstår i delen av bølgesyklusen der trykket er lavest, som vist i figur 5.

Kavitasjon forårsaket av trykkbølger kan deles inn i to hovedtyper: Stabil kavitasjon; der kavitasjonsboblen ekspanderes og komprimeres av bølgen, men beholder omtrent samme størrelse, og transient kavitasjon; der kavitasjonsboblen vokser raskt og kollapser kort tid etter den har oppstått. Transient kavitasjon krever høyere lydtrykk enn stabil kavitasjon. En boble som kollapser i vann vil gi opphav til høy temperatur (opp til 5000 °C) og høyt trykk (opp til ca. 2000 atm), og dette fører til dannelse av frie radikaler (Santos et al., 2009). Disse voldsomme effektene gjør at kavitasjon blant annet brukes i forbindelse med kjemiske prosesser og for sterilisering av vann. En boble som kollapser nært en solid overflate kan også gi opphav til en såkalt «mikrojet», en vannstråle med høyt trykk som slår inn mot overflaten (Brennen, 2005). Slike mikrojet-stråler utgjør en stor belastning på overflaten og kan blant annet forårsake kraftig korrosjon.



Figur 5 Skjematisk forklaring av transient og stabil kavitasjon. Figuren er hentet fra (Santos et al., 2009).Graf d) viser hvordan lydtrykket varierer med tid, figurserie c) viser hvordan en boble komprimerer og ekspanderer ved stabil kavitasjon, mens figurserie b) viser hvordan en boble vokser gjennom flere ekspansjonssykulser og til slutt kollapser.

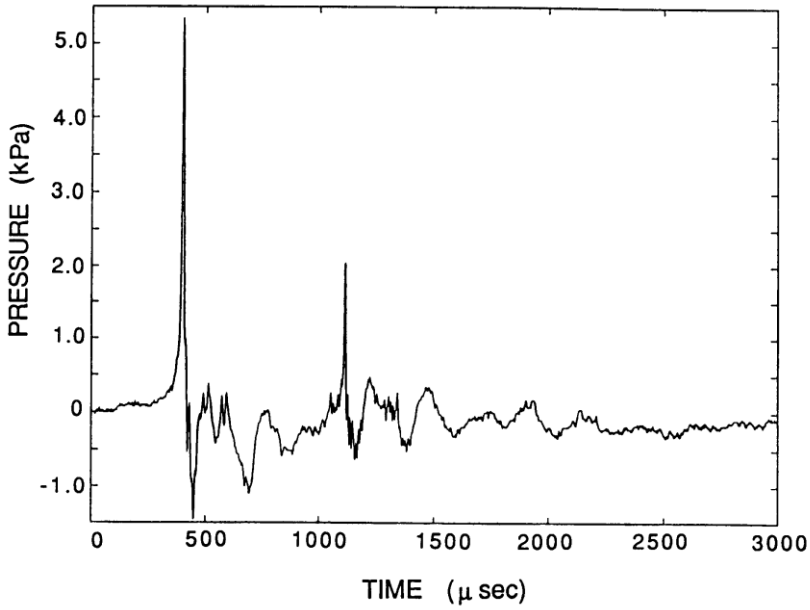
Lydtrykket må være over en viss terskel for at en trykkbølge skal kunne generere kavitasjonsbobler. Denne terskelen er avhengig av frekvens og gassinnhold i vannet, som vist i figur 6. Terskelen er generelt lavere for lave frekvenser og ved innhold av gass i vannet. For bruksområder der kavitasjon er viktig brukes ofte frekvenser rundt 20-40 kHz U, slik at man får maksimal kavitasjonseffekt uten at lyden er hørbar for mennesker (Santos et al., 2009).



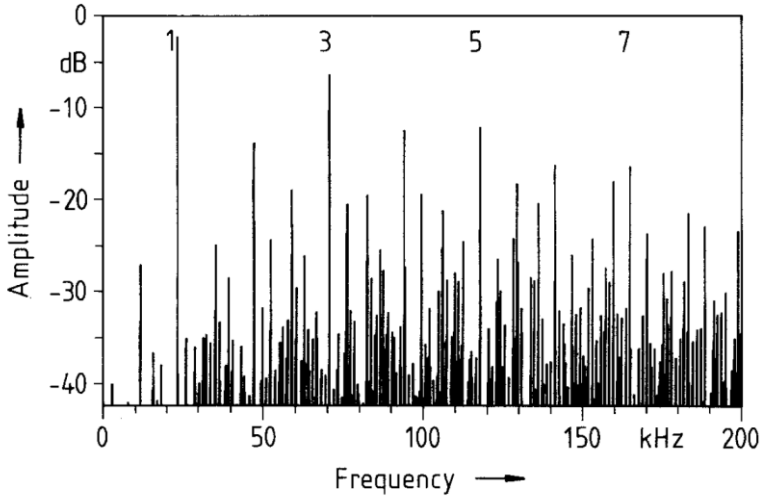
Figur 6 *Terskel for generering av kavitasjonsbobler som funksjon av lydintensitet og frekvens. Figuren er hentet fra (Santos et al., 2009) .Venstre kurve tilsvarer vann mettet med luft, og høyre kurve tilsvarer vann uten luft.*

Kollaps av en kavitasjonsboble utløser en sjokkbølge der bølgefronten forplanter seg raskere enn lydhastigheten i mediet. Man har funnet at for en kavitasjonsboble i vann indusert med en 20 kHz transducer vil sjokkbølgen ha en utgangshastighet på rundt 4000 m/s, men at sjokkbølgen degenererer til en vanlig bølge etter å ha forplantet seg rundt 50 µm. Sjokkbølgen taper også energi gjennom absorpsjon i større grad enn vanlige bølger, og over 50 % av energien er tapt etter at bølgen har forplantet seg 25 µm (Pecha & Gompf, 2000). I praksis betyr dette at sjokkbølgen fra kavitasjon har en svært begrenset rekkevidde, men at den vanlige lydbølgen som sjokket konverteres til kan forplante seg over lengre avstander.

Lydbølgen fra en kollapset boble har form som en skarp topp i lydtrykk, etterfulgt av noen få oscillasjoner med lavere amplitude, som vist i figur 7. Ved kavitasjon indusert gjennom ultralyd vil bobler kontinuerlig vokse fram og kollapse, og dette resulterer i en kavitasjons-«støy» med sterke frekvenskomponenter på transducerens grunnfrekvens, sub- og overharmoniske av denne, samt et bredt støygulv. For kavitasjonsbobler generert med en transducer på 23,56 kHz er kavitasjonsstøyen sterkest under ca. 100 kHz, men de høyeste frekvenskomponentene ligger på flere hundre kHz, som vist i figur 8 (Cramer & Lauterborn, 1982).



Figur 7 *Eksempel på lydsignal generert av en kavitasjonsboble som kollapser. Figuren er hentet fra (Brennen, 2005).*



Figur 8 *Eksempel på simulert frekvensspektrum for kavitasjons-støy ved bruk av en transducer på 23,56 kHz. Figuren er hentet fra (Cramer & Lauterborn, 1982), som også viser eksperimentelle data som samsvarer med simuleringen.*

2.5 Forplantning av lyd og ultralyd i havet

En lydbølge som forplanter seg i vann vil bli svakere og dø ut ettersom avstanden til lydkilden øker. Det er to hovedårsaker til at lyden dempes:

- Spredning av energien i lydbølgen ut over et større areal medfører at energien per areal minskes («geometrisk spredning»).
- Noe av energien absorberes i vannet mens bølgen forplanter seg («absorpsjon»). Absorpsjonen avhenger av temperatur, trykk og saltinnhold i vannet.

Andre faktorer som kan bidra er spredning av lydbølgen av partikler i vannet, refleksjon av bølgen i vannflaten og på havbunnen, avbøyning av lydbølgen pga. variasjoner i lydhastighet, osv. I denne rapporten er det imidlertid kun relevant å se på hvordan lydintensiteten varierer på relativt korte avstander (under 100 meter), og vi antar derfor at lydbølgene forplanter seg i fritt rom med en konstant lydhastighet.

Dempning av lydbølger oppgis ofte som transmisjonstap (TT), i deciBel per meter. Transmisjonstap er definert som:

$$TT(r) = 20 \log \frac{P(r=1)}{P(r)}$$

der «log» betegner logaritmen med base 10, og P(r) er lydtrykket målt r meter fra lydkilden. Transmisjonstapet kan deles opp i geometrisk spredning (TT_G) og absorpsjon (TT_A), som nevnt ovenfor (Kinsler et al., 1999):

$$TT = TT_G + TT_A$$

I fritt rom vil bølgeutbredelsen har en kuleform, slik at amplituden er inverst proporsjonal med avstanden, og transmisjonstapet grunnet geometrisk spredning blir:

$$TT_G = 20 \log r$$

Merk at dette leddet kun er avhengig av avstand, og ikke av frekvens. Som et eksempel vil 100 meters avstand utgjøre en TT_G på 40 dB.

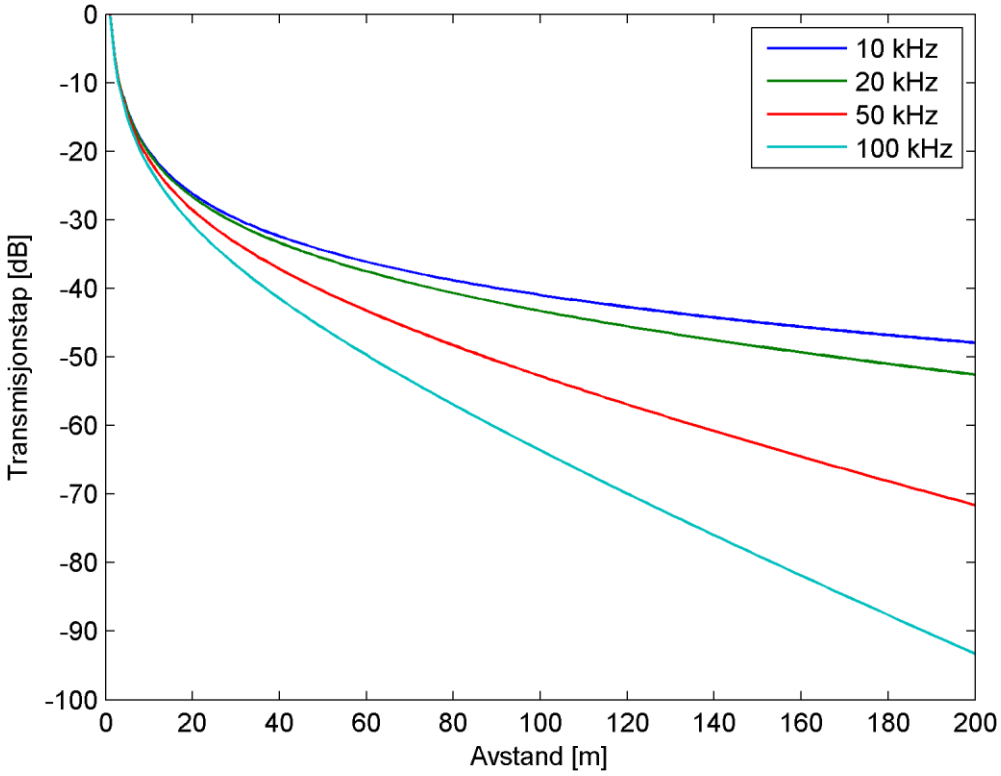
Et tilnærmet uttrykk for absorpsjon i havet er gitt ved (Kinsler et al., 1999)

$$TT_A = rf^2 \cdot \left(\frac{0{,}08}{0{,}9 + f^2} + \frac{30}{3000 + f^2} + 0{,}0004 \right) \quad (dB/km)$$

der f betegner frekvens i kHz, og følgende antagelser er gjort: pH = 8, saltinnhold = 3,5 %, Temperatur = 5°. Uttrykket vil være relativt nøyaktig også ved små variasjoner i temperatur, saltinnhold osv. De to første leddene i parentesen skyldes overganger mellom ulike tilstander av borsyre og magnesiumsulfat i vannet, mens det siste skyldes viskøse tap (friksjon) i vannet. Absorpsjonen er sterkt frekvensavhengig, og øker med økende frekvens.

Figur 9 viser samlet transmisjonstap grunnet spredning og absorpsjon som funksjon av avstand til lydkilden, for et utvalg av frekvenser mellom 10 og 100 kHz. Transmisjonstapet er angitt som negative

verdier. Figuren viser hvordan lydintensiteten avtar raskt nærmest lydkilden, mens den avtar saktere på større avstander. Man ser også at transmisjonstapet er tilnærmet uavhengig av frekvens på korte avstander, mens det på større avstander er større for høye frekvenser. Bidraget fra geometrisk spredning er identisk for alle frekvenser, men siden absorpsjonen er høyere for høye frekvenser, blir også det totale transmisjonstapet høyere.



Figur 9 Transmisjonstap for lydbølger i havvann ved ulike frekvenser.

Det er verdt å merke seg at det vil være vanskelig å begrense utbredelsen av lyd til et område tilsvarende en fiskemerd. Dersom lydkilden er kraftig, vil det være et betydelig lydnivå også på 100 meters avstand (transmisjonstap på ca. 40-60 dB for frekvenser mellom 10 og 100 kHz). For å begrense lydutbredelsen vil fiskemerden måtte skjermes med et materiale som reflekterer lyd, f.eks. metallplater. En annen mulighet er bruk av såkalt boblegardin, der luft pumpes ut av perforerte rør et stykke undervannflaten og genererer en sammenhengende «gardin» av bobler som reflekterer lyd (Lucke et al., 2011). En mulig ulempe ved denne løsningen er at vannet mettes med oksygen på stort dyp, noe som kan gi negativ effekt på oppdrettsfiskens helse (de dette skaper gassovermetning når overflaten).

2.6 Sammenheng mellom lydkildens effekt og lydnivå i havet

En transducer som drives med en gitt elektrisk effekt (P_e), og som har en gitt effektivitet (η) i konvertering mellom elektrisk og akustisk energi gir en akustisk effekt på Pe· η. En transducer kan også ha en viss direktivitet (D), dvs. at lydbølgen sendes ut innenfor en mindre åpningsvinkel. Direktiviteten måles som forholdet mellom den maksimale lydintensiteten fra transduceren (vanligvis rett foran transduceren) og lydintensiteten man ville ha målt dersom den samme akustiske effekten ble jevnt fordelt i alle retninger. Dersom P_e, η og D er kjent, kan man regne ut lydtrykket på en gitt avstand r (Kinsler et al., 1999):

$$SPL = 10\log(P_e \cdot \eta) + 10\log D + 171 - TT(r)$$

Effektiviteten til en piezoelektrisk transducer er vanligvis mellom 50 og 70 % (Johannesson & Mitson, 1983). Dersom man tar følgende tilfelle som eksempel: P_e = 100 W, η = 70 %, og D = 20 (rimelige parametere for en 20 kHz transducer med 10 cm diameter), får man:

$$SPL = 202{,}5 - TT(r)$$

Denne sammenhengen kan brukes sammen med figur 8 for å beregne lydtrykk på ulike avstander. For eksempel vil man på 3 og 20 meters avstand ha et transmisjonstap på henholdsvis ca. 10 og 26 dB, og dermed et lydnivå på henholdsvis ca. 192,5 og 176,5 dB.

3 Bruk av ultralyd for kontroll av organismer

3.1 Introduksjon

Ultralyd har blitt brukt som et middel for å forhindre etablering og vekst av en rekke forskjellige organismer. Fordelene med ultralyd sammenlignet med f.eks. kjemiske metoder er at ultralyd ofte er relativt billig og enkelt å generere, at den enkelt brer seg ut over et stort volum (f.eks. vann), og at den kan slås av og på umiddelbart. I noen tilfeller er det også mulig å velge frekvensområder som kun påvirker organismene man vil fjerne, mens andre organismer i samme miljø forblir relativt upåvirket.

Hvilken egenskap ved ultralyd som forårsaker hemming eller dødelighet varierer også mellom ulike bruksområder og organismer. Dersom intensiteten til lydbølgene er så høy at det oppstår kavitasjon (avsnitt 2.4), vil lokalt høyt trykk, høy temperatur og «mikro-jets» gi et miljø som er skadelig for de fleste organismer. Dette utnyttes for eksempel for sterilisering av vann (Vehmeijer, 2007).

Kavitasjon krever så høye lydintensiteter at fenomenet kun kan oppstår i nærheten av transduceren (Legg et al., 2015). Kavitasjon kan derfor vanskelig brukes direkte i et større volum av vann, f.eks. en fiskemerd. Dersom man tar utgangspunkt i Figur , og antar at man bruker en frekvens på 20 kHz, vil kavitasjon oppstå ved lydintensiteter over ca. 1 W / cm^2. Dersom man bruker en transducer som kan levere 100 W akustisk energi (en relativt kraftig transducer), og antar at bølgen sendes ut innenfor en åpningsvinkel på 10 grader, vil lydintensiteten synke til under 1 W / cm^2 ved en avstand på ca. 65 cm. I praksis betyr dette at man ikke kan forvente å generere kavitasjon utenfor en rekkevidde på rundt en meter fra transduceren, og i de fleste tilfeller mindre enn dette. Dette gjelder ved bølgeutbredelse i åpent hav.

Lyd med høy frekvens kan imidlertid brukes for å generere et ubehagelig miljø for organismer også ved lavere intensiteter, der kavitasjon ikke oppstår. Et eksempel fra oppdrettsindustrien er selskremmere, som opererer med en frekvens på ca. 15 kHz (Lofitech, 2015).

I avsnittene under vil vi presentere noen eksempler på bruk av ultralyd for kontroll av organismer i marine omgivelser. Mange av disse eksemplene er godt beskrevet i Legg et al. (2015), som gir en oversikt over kunnskapsstatus på bruk av ultralyd for «biofouling control», der man med «biofouling» mener all slags vekst av uønskede organismer. Forfatterne av denne artikkelen påpeker at metodene som er brukt i tidligere studier ikke er standardiserte, og at effekten av ultralydbehandlingen ofte er subjektivt vurdert, slik at det er vanskelig å gi noen konklusjon på hvilke behandlingsparametere som er best.

3.2 Eksempler

3.2.1 Algevekst

Ultralyd brukes for å forhindre vekst av alger, både på skip, i vannbassenger og i andre sammenhenger. Ved bekjempelse av alger oppgis det flere mulige mekanismer som gjør at algene dør; at vibrasjonene ødelegger algenes vakuoler (små luftfylte hulrom som gir oppdrift), at vibrasjonene gjør skade på celleveggene, og at vibrasjonene får celleinnholdet til å samles i midten av cellen, slik at den ikke kan ta til seg næring som normalt. Denne type effekter kan oppnås ved moderate ultralyd-intensiteter, og en enkelt transducer var nok til å redusere algevekst i Albertssund Rådhusbassin med 80 % i 2009 (Aabling, 2010). Det er likevel usikkert hvorvidt effekten på alger er sammenlignbar med en eventuell effekt på lakselus.

3.2.2 Begroing ved vanninntaksrør

Begroing i rør er et betydelig problem i skip og for industri som henter vann fra havet eller innsjøer. Det er gjort flere studier på bruk av ultralyd for å forhindre slik begroing, og i de fleste av disse studiene har man anvendt «gnist»-transducere, som beskrevet i avsnitt 2.3. Transducerne settes opp slik at lyden forplanter seg langs vannet inne i røret. I Mackie et al. (2000) fant man at ultralyden ga en 99 % reduksjon i etablering av sebramuslinger i et 4 meters rør med 30 cm diameter. Det var ikke mulig å anslå rekkevidden av behandlingen, ettersom kun 4 meters rør ble brukt. I Schaefer et al. (2010) ble det brukt lignende utstyr, montert i et inntaksrør med 76 cm diameter. Denne transduceren ga en kavitasjonsboble på 10-15 cm, dvs. betydelig større enn kavitasjonsboblene som genereres av ultralydtransducere, som vanligvis har en diameter på noen millimeter eller mindre (Brennen, 2005). Pulser ble generert hvert 45. sekund. Behandlingen forhindret etablering av sebramuslinger på en avstand opp til 23 m fra transduceren. På denne avstanden var maksimum lydtrykk for lydpulsen 40 kPa, eller 212 dB re 1 µPa. Merk at det er en vesensforskjell mellom denne type kortvarige pulser (noen millisekunder lange) og kontinuerlig generering av ultralyd med en piezoelektrisk transducer.

3.2.3 Begroing på skip

Begroing av marine organismer på skipsskrog er et stort problem for skipsindustrien, ettersom det øker skipets friksjon i vannet og gir økte driftskostnader og miljøbelastning. Rur er en av de mest problematiske organismene, ettersom denne gir stor friksjon og etablerer seg i kolonier på skipsskrog (Guo et al., 2011).

Det har blitt utført noen studier med ultralydsystemer montert på skip, blant annet i den russiske flåten (Sheherbakov et al., 1972), der en transducer med 200 W effekt og 17-30 kHz frekvensområde ble brukt. Resultatene her viste en tydelig reduksjon i begroing nært transduceren, men lite reduksjon i begroing i områder der ultralyden ble betydelig dempet (ultralyden ble overført gjennom selve skipsskroget). Det er imidlertid få studier og lite konsistent rapportering når det gjelder praktisk bruk av ultralyd på skip (Legg et al., 2015).

Produktet USAF (Ultrasonic Anti Fouling System) er et kommersielt ultralyd-basert system for å forhindre begroning på skip. Produktet produseres av Luykx Ultrasound[2] i Nederland og markedsføres

[2] Luykx Ultrasound http://www.ultrasoundinfo.nl/index.php/en/

av Ned Marine Services B.V. [3]. Ultralyd-transducere installeres i skipsskrog med en avstand på ca. 75 m mellom hver enhet (pers. komm. Kees Luykx, 2. juni 2015), og skal kunne forhindre all slags begroing, inkludert rur. I følge Luykx Ultrasound og Ned Marine Services fungerer produktet på følgende måte: Det oppstår kavitasjonsbobler i vannet i umiddelbar nærhet av transduceren. Når disse boblene kollapser genereres sjokkbølger som «skremmer bort» rur-laver og andre organismer. Det virker usannsynlig at sjokkbølgene skal påvirke larver på lang avstand, ettersom disse konverteres til vanlige lydbølger innen noen mikrometers avstand fra boblen (se avsnitt 2.4). Det er likevel mulig at de vanlige lydbølgene fra kavitasjonsprosessene og/eller den originale lyden fra transduceren gir den ønskede effekten med forhindring av begroing. Luykx Ultrasound har også gjennomført tester et med havgående skip, Nova Cura, og mener å påvise at ultralyden har gitt en betydelig reduksjon i begroing (Nova Sea Transport, 2010).

Det finnes også flere kommersielle produkter for fritidsbåter som bruker ultralyd for å forhindre begroing [4] [5]. Produsentene påstår at disse er effektive mot begroing, men vi har ikke klart å finne noen vitenskapelige studier på virkningsgraden av disse.

Det har blitt gjennomført laboratorieforsøk på bruk av ultralyd for å drepe rur-larver eller for å hindre at disse etablerer seg på en overflate (Kitamura et al., 1995; Guo et al., 2011). I disse forsøkene ble larvene plassert nært transduceren (innenfor en meter eller mindre), og det ble benyttet svært høye lydtrykk (9-30 kPa, dvs. 199-210 dB re 1µPa). Frekvenser i området 19-100 kHz ble testet, og larvene ble eksponert i opp til 5 minutter. Resultatene viser at dødelighet og reduksjon i etablering øker med økende lydtrykk og økende eksponeringstid, og at frekvenser rundt 20 kHz er mest effektive. Forfatterne forklarer dette med at denne frekvensen gir størst grad av kavitasjon i vannet. En ultralyd-«dose» (trykk multiplisert med tid) på 140 kPa·s ga 50 % reduksjon i etablering, mens en dose på 4300 kPa·s ga 50 % dødelighet (Kitamura et al., 1995). Det er også vist at høye lydtrykk og kavitasjon kan brukes for å fjerne rur som allerede har etablert seg (Guo et al., 2013). Selv om dette er interessante resultater, forutsetter de bruk av svært høye lydtrykk, og dette kan kun oppnås i et lite volum av vann. Dersom en slik metode skulle brukes for behandling av lakselus, måtte laksen behandles i et lite kar eller lignende.

En lignende studie har også blitt gjennomført med bruk av ultralyd under kavitasjons-terskelen (5kPa lydtrykk, 194 dB re 1µPa) over et lengre tidsrom (Guo et al., 2012). Frekvenser på 23, 63 og 102 kHz ble testet. Resultatene fra denne studien viser at eksponering for 23 kHz ultralyd over en periode på 24 timer ga en reduksjon i etablering på ca. 80 %, men ingen dødelighet. Behandling ved 63 og 102 kHz hadde en viss effekt, men betydelig mindre enn 23 kHz. Studien viser også at det er mulig å bruke transduceren kun 20 % av tiden (1 minutt på, 4 minutter av) og oppnå de samme resultatene som ved kontinuerlig eksponering. Det er ikke klart hvilken egenskap med ultralyden som gir reduksjon i etablering, men forfatternes hypotese er at vibrasjonen fra ultralyden gjør det vanskeligere for larvene å feste seg til overflaten.

[3] Ned Marine Services B.V., USAF system http://www.usaf-nedmarine.com/

[4] Toscano DUMO Algaecleaner Marina ACM http://www.toscano.es/en/products/ultrasounds-environment/boat-marina/dumo-algacleaner-marina-acm/

[5] AlgaeFree, http://algaefree.no/

3.3 Bekjempelse av lakselus med ultralyd

Eksemplene i avsnitt 3.2 viser at ultralyd har blitt brukt i flere sammenhenger for å forhindre vekst og etablering av organismer, og i flere tilfeller med god effekt. Studiene på rur og sebramusling er spesielt interessante, ettersom disse sprer seg gjennom frittflytende larver i vannet, på samme måte som lakselus. Disse studiene har vist at dersom en piezoelektrisk transducer brukes, vil en frekvens på rundt 20 kHz være effektiv, og vi anser derfor 20 kHz som et godt utgangspunkt dersom piezoelektriske transducere skal brukes i en videre studie av lakselus og ultralyd. Studiene på sebramuslinger har imidlertid vist at gnist-transducere også kan være svært effektive. Slike transducere kan være et interessant alternativ i en eventuell studie.

Man kan se for seg forskjellige måter å anvende ultralyd på for å bekjempe lakselus.

3.3.1 Fjerning av lakselus som allerede har etablert seg på fisken.

Dette vil mest sannsynlig kreve en behandling med høye lydtrykk, slik at det oppstår kavitasjon i vannet og man får en direkte mekanisk belastning på lakselusa, som beskrevet i f.eks. Guo et al. (2013). Ettersom man kun kan oppnå slike lydtrykk innen en avstand på noen titalls centimeter fra transduceren, vil en slik behandling kreve at laksen plasseres i et lite kar eller at den tvinges til å svømme i nærheten av transduceren. Det er selvfølgelig mulig å bruke flere transducere for å effektivisere behandlingen, men det vil ikke være mulig å behandle en hel fiskemerd på denne måten.

Det er også sannsynlig at det høye lydtrykket og kavitasjonen i vannet kan virke negativt inn på fiskens helse, selv om fisken ikke er i stand til å høre lyden. I hvilken grad dette er tilfelle er vanskelig å vurdere uten videre studier.

3.3.2 Preventiv bruk av ultralyd for å forhindre påslag av lakselus

I studien beskrevet i Guo (2012) blir det vist at man kan hindre påslag av rurlarver også ved intensiteter under kavitasjonsterskelen, ved eksponering over lengre tid. Det skyldes sannsynligvis at rurlarvene blir forstyrret av ultralyden slik at de «velger» å slå seg ned på et annet sted. Guo (2012) beskriver hvordan rurlarvene kan teste og forkaste flere aktuelle overflater før de finner den de slår seg ned på. Rurlarver benytter to antennuler (antenneliknende utvekster ved munnåpningen som er utstyrt med smak- og trykksensorer) til å utforske og bevege seg på overflatene. Bevegelsen skjer ved at den ene antennulen først fester seg til overflaten ved hjelp av et protein som sekreres og virker som et midlertidig lim. Ved skiftesvis å feste antennulene og løse opp det midlertidige limet kan rurlarvene «gå» på overflaten inntil de finner et egnet sted for å slå seg ned. Da sekrerer larvene et permanent lim som danner en base som ruren vil sitte på resten av livet.

En slik trinnvis prosess for påslag finner en også hos lakselus (Bron et al., 1991). I første fase, når kopepoditten får kontakt med en vertsfisk, gjennomføres en søkeprosedyre der kopepoditten først griper tak i overflaten på vertsfisken ved hjelp av mexillipedene (griperedskap som krepsdyr bruker til å holde på maten), og deretter benytter første og andre antennepar (antennene har smak- og trykksensorer) til å sondere overflaten. I denne fasen kan kopepoditten fortsatt slippe seg, eller bli revet løs fra vertsfisken. I den neste fasen brukes klørne på det andre antenneparet til å sikre et mer solid feste. Klørne blir da presset dypt inn i epidermis på vertsfisken. I den tredje og siste fasen fester kopepoditten seg til lakseoverflaten ved å utsondre en form for lim gjennom frontal filamentet (en rørformet utvekst på fremre del av «hodet» rostrum). Dette limet sprøytes inn i fiskens hud mellom

basalmembranen og epidermis og danner en basalplate som virker som et mer permanent anker for kopepoditten.

Denne likheten i påslagsmetode mellom rur og lakselus gir håp om at man kan hemme lakselus og hindre påslag på fisken gjennom å sende kontinuerlig eller pulsert ultralyd med moderat intensitet inn i laksemerden. Et viktig spørsmål blir da hvor høyt lydtrykk som er nødvendig for å hemme lakselusa? I Guo (2012) ble det benyttet et lydtrykk på 194 dB re 1µPa, som var tilstrekkelig til å gi en betydelig reduksjon i påslag av rur. Som vist i avsnitt 1.7 kan man med en relativ kraftig transducer (100 W) oppnå ca. 192,5 dB lydtrykk på 3 meters avstand, dvs. et sammenlignbart lydtrykk. 3 meters rekkevidde er imidlertid veldig kort for en praktisk installasjon i en laksemerd. En praktisk anvendelse vil antakelig forutsette at ultralyden har en preventiv effekt også ved lavere lydtrykk enn dette, slik at hver transducer har en større effektiv rekkevidde. Det bør gjennomføres en separat studie for å fastslå om lakselus-larver påvirkes av ultralyd på samme måte som rur-larver, og hvor høyt lydtrykk som i så fall kreves for at metoden skal være effektiv.

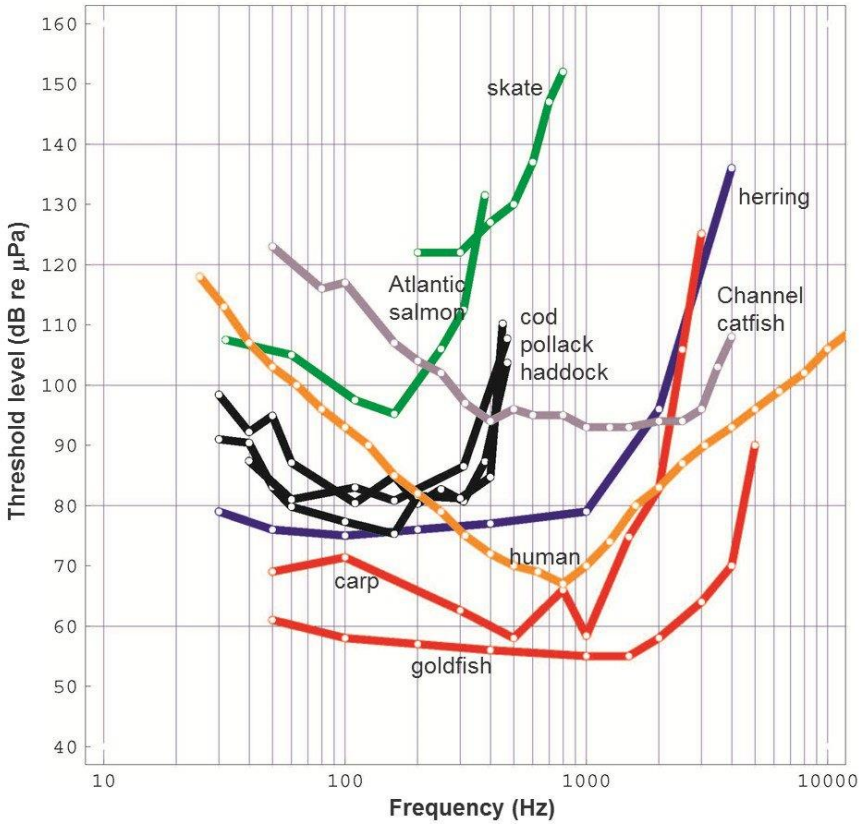
Dersom metoden beskrevet her (kontinuerlig bruk av ultralyd med lavere intensitet) er effektiv, anser vi denne som både den praktisk enkleste og den mest skånsomme for fisken. Kostnadenvil også bli svært lav sammenliknet med andre metoder. Hvis hver transducer bruker 100 W vil strømregningen bli på 876 kr/år, forutsatt en strømpris på 1 kr/kWh. Prisen på transducere på denne størrelsen ligger i dag på drøye 100.000 kr, men de vil trolig bli langt billigere dersom de blir masseprodusert til oppdrettsnæringen.

4 Effekten av ultralyd på fisk og andre marine dyr

Marine dyr bruker lyd for å kommunisere, navigere og detektere andre dyr, men evnen til å høre lyder med forskjellige frekvenser varierer sterkt mellom forskjellige dyregrupper (Slabbekoorn et al., 2010).

4.1 Effekter på fisk

Fisk kan detektere lyd ved hjelp av både sidelinjeorganet og det indre øret. De fleste fisk kan imidlertid ikke høre lyder over 1000 Hz men det fins noen unntak. Karpefisk (for eksempel gullfisk) og maller kan høre lyder opp mot 4000 Hz (Figur 10). De artene som kan høre lyder over 1000 Hz, og som ofte kalles hørselsspesialister, kjennetegnes ved at de har utviklet spesielle morfologiske strukturer som forbinder svømmeblæren med det indre øret. Hos karper og maller består dette i beinstrukturer som kalles weberian ossicles, mens det hos andre arter er en direkte kontakt mellom svømmeblæren og det indre øret. Betydningen av svømmeblæren for hørsel hos fisk illustreres ved at bruskfisk (for eksempel skate) som mangler svømmeblære har dårlig hørsel. Det gjelder også fisk som har stor avstand fra svømmeblære til det indre øret, for eksempel laksefisk (Popper and Fay, 2011).



Figur 10 Audiogram for forskjellige fiskearter.

Det generelle bildet er at fisk ikke kan høre ultralyd, men det finnes unntak: Clupeide fisk (sildefisk) kan høre lyder opptil 180 kHz (fremkommer ikke i figur 10), og er derfor i stand til å høre de høyfrekvente sonarlydene som delfiner bruker til å lokalisere byttet (Popper et al., 2004). Det er også vist at torsk kan reagere på ultralyd opptil 50kHz når lydstyrken er svært høy – over det som normalt forekommer i naturen (Astrup, 1999).

Det er vist at ultralyd av svært høy intensitet kan skade eksternt epitel hos fisk (Frankel et al., 1999) og øke diffusjon for forskjellige stoffer gjennom hud og gjeller. Blant annet er det vist at sonikering kan øke effekten av badvaksine hos regnbueørret *(Oncorhynchus mykiss*) uten betydelige bieffekter (Cobo et al., 2014), og det er vist at ultralyd kan brukes til å øke opptak av calcein (som brukes til merking) hos plommesekklarver av regnbueørret (Bart et al., 2001).

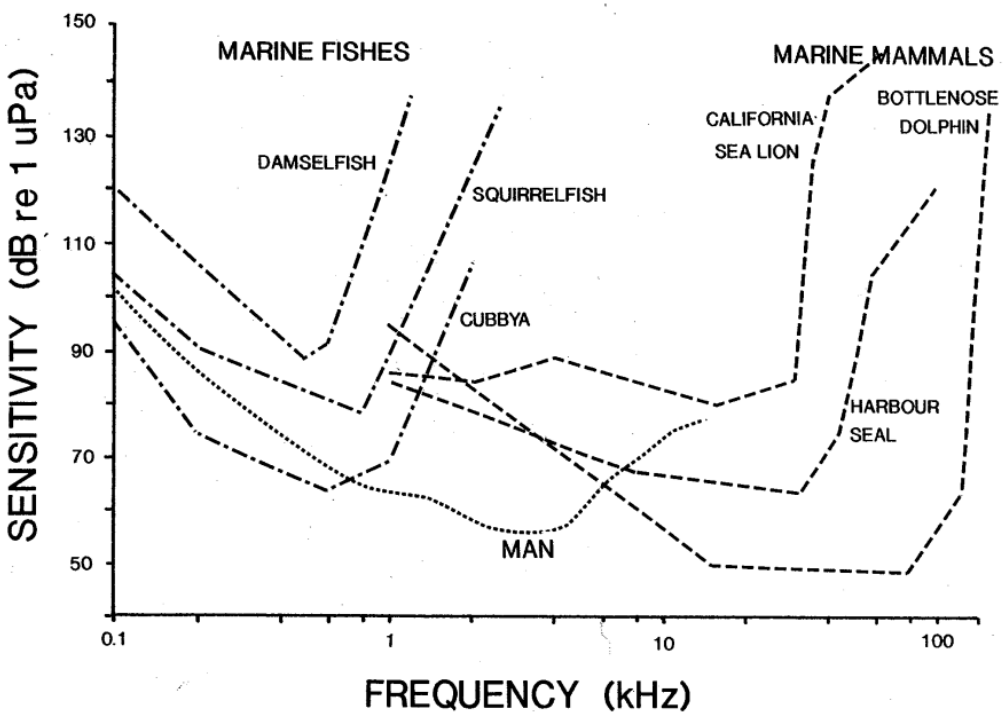
Vi har ikke vært i stand til å finne vitenskapelig dokumentasjon på at kontinuerlig ultralyd med lydstyrker som er relevant for lusbekjempelse har negative effekter på fisk. Vi har heller ikke funnet dokumentasjon på at selskremmere, som sender ut korte pulser av lyd med frekvens nær ultralydnivået og høy lydstyrke (11 – 17 kHz, 187 – 195 dB re 1 µPa), påvirker fisk negativt (Fjälling et al., 2006). Selskremmere har vært brukt i stort omfang av lakseoppdrettere i blant annet Norge og Skottland (Quick et al., 2004), og det ville med stor sannsynlighet blitt oppdaget dersom selskremmerne hadde hatt negativ effekt på oppdrettsfiskens vekst, overlevelse eller sykdomsresistens. Selskremmere brukes også til å holde sel unna elvemunninger og faststående fangstredskaper for villfisk. I en undersøkelse av Fjälling et al. (2006) fant man at bruk av selskremmer økte fangsten i kilnotfiske etter laks i Bottenviken til det dobbelte. Det tyder på at laksen ikke var i stand til å oppfatte lyden av selskremmerne, eller i det minste ikke reagerte negativt på den. I karforsøk er det heller ikke påvist negative effekter av selskremmere på fisk (G.V. Jensen, Lofitech AS, *pers med*).

4.2 Effekter på krepsdyr

Mange marine evertebrater har statolittorganer som har stor likhet med otolitter hos fisk. Disse fungerer som treghetsbaserte likevektsorganer, og kan trolig også reagere på lyd). Krepsdyr som mysider og hoppekreps er svært følsomme for lavfrekvent lyd (Dalen et al., 2008), og det er vist at lakseluskopepoditter reagerer med angrepsadferd når de opplever vibrasjon eller infralyd med en frekvens på 1 – 5 Hz (infralyd er lyd med frekvens under 20 Hz) (Heuch & Karlsen, 1997). Hørselsområdet for hoppekreps ligger mellom 30 og 3000 Hz (Dalen et al., 2008). Dette er i det samme området som for reken *Palaemon serratus* (Lovell et al., 2005), og antyder at krepsdyr kan detektere lyd innenfor omtrent samme frekvensområde som hørselspesialistene blant fisk, men ikke ultralyd.

4.3 Effekter på marine pattedyr

Både sel og hval hører utmerket under vann innenfor et bredt frekvensområde som strekker seg fra infralyd til høyfrekvent ultralyd (Figur 11). Forskjellige selarter kan detektere ultralyd til omkring 100 kHz (Turl, 1982), mens enkelte hvalarter kan høre ultralyd helt opp til 280 kHz (Wood & Evans, 1980). Det er derfor ikke tvil om at sel og hval kan høre ultralyd på rundt 20 kHz, som er det som er mest aktuelt for lusbekjempelse. Det er også svært sannsynlig at ultralyd vil kunne ha en skremselseffekt på disse dyrene, på samme måte som selskremmere. I arbeidet til Fjälling et al. (2006) ble det påvist at havert ganske fort vente seg til lyden fra selskremmeren, og stakk hodet over vann for å unngå lyden når de forventet at selskremmeren «pinget». Tatt i betraktning at lydstyrken avtar relativt fort med økende avstand fra transduceren (jfr avsnitt 2.5) er det derimot lite sannsynlig at bruk av ultralyd til lusbekjempelse vil påføre disse dyrene fysisk skade.



Figur 11 Audiogram for fisk og marine pattedyr (fra Myrberg, 1980).

4.4 ASC-sertifisering

Bruk av ultralyd til lusbekjempelse kan komme i konflikt med regelverket for ASC-sertifisering (Aquaculture Stewardship Council) av lakseoppdrettsanlegg. Ifølge dette regelverket tillates ikke «acoustic herassment devices» som har som mål å holde predatorer borte fra oppdrettsanlegget. Det er grunn til å tro at ultralyd vil ha samme virkning på sel og andre marine pattedyr som tradisjonelle selskremmere. Dersom ultralyd viser seg å være effektiv mot lakselus og en ikke får lempet på ASC-regelen om selskremmere oppstår et dilemma der en må velge mellom ASC-sertifisering og lusbekjempelse.

5 HMS

På grunn av stor tetthetsforskjell mellom luft og vann overføres lyd meget dårlig mellom disse mediene. Det betyr at transducere som sender ut ultralyd under vann med lydstyrke som er aktuell for lakselusbekjempelse ikke vil ha noen negative effekter av helse- eller miljømessig karakter for personell som befinner seg i nærheten. Ved dykking er det kanskje nødvendig å slå av ultralyden.

6 Sammendrag og konklusjoner

I denne rapporten er det gjort rede for fysiske aspekter ved ultralyd i vann: Hvordan det dannes, hvordan det forplanter seg i vann og hvordan lydstyrken svekkes med avstanden til lydkilden, avhengig av frekvensen. Generelt gjelder at lyden svekkes raskere med økende frekvens. Rapporten forklarer også hvordan kavitasjon oppstår, og hvilke fysiske og kjemiske reaksjoner det utløser. I rapporten blir det gitt eksempler på at ultralyd har effekt på forskjellige begroingsorganismer.

Med utgangspunkt i de opplysningene vi har klart å skaffe til veie er det ikke mulig å fastslå om ultralyd kan brukes som metode i bekjempelsen av lakselus. Vi finner det lite sannsynlig at ultralyd vil kunne ta livet av lus som sitter på laksen. Derimot er det ikke usannsynlig at ultralyd kan virke preventivt ved å hindre eller redusere påslaget av kopepoditter. Ultralyd er vist å kunne hindre eller redusere påslag av rurlarver på skipsskrog og andre overflater. Påslagsprosessen for rurlarver har sterke likhetstrekk med den prosessen lakseluskopepoditter går gjennom når de slår seg på vertsfisken. Det er derfor håp om at det som virker på rur også virker på lakselus, men det kan bare bekreftes gjennom kontrollerte forsøk. I første omgang vil det være nødvendig å dokumentere hvorvidt ultralyd overhodet har noen effekt på påslaget av lakselus. Det kan gjøres i form av karforsøk, og dersom en oppnår positive resultater åpner det for en rekke spørsmål som også krever forsøk under kontrollerte betingelser. Eksempler på slike spørsmål er: Hvilken frekvens er mest effektiv? Hvilken lydstyrke kreves? På hvor lang avstand virker metoden i ei merd? Må ultralyden være kontinuerlig på eller holder det med pulser av ultralyd, og i så tilfelle: Hvor lange må pulsene være og hvor lang pause kan tolereres? Er kavitasjon nødvendig, eller virker det like bra uten? Kan flere transdusere i samme merd skape interferens som øker effektiviteten?

Dersom ultralyd skal kunne brukes som bekjempelsesmetode mot lakselus er det en forutsetning at metoden ikke medfører uakseptable effekter på oppdrettslaksen eller andre organismer i miljøet. Ultralyd ligger langt utenfor hørselsområdet for laks og de fleste andre fiskeartene som naturlig befinner seg nær lakseoppdrettsanlegg. Vi har ikke funnet noe som tilsier at ultralyd vil påføre oppdrettslaksen problemer av helse- eller velferdsmessig karakter, men heller ikke det er det mulig å fastslå med sikkerhet uten å gjennomføre forsøk. Det bør påpekes at vi ikke har sett studier der fisk har vært utsatt for ultralyd med høy lydstyrke over lang tid.

Ultralyd vil sannsynligvis virke skremmende på hval og sel. Spørsmålet er om det er akseptabelt dersom ultralyden samtidig har en god virkning mot lakselusa. Siden ultralyd har relativt kort rekkevidde betyr det at skremselseffekten på de marine pattedyrene nok vil være begrenset til et mindre område. Siden lydoverføring mellom vann og luft er svært dårlig vil ultralyd neppe skape noen HMS-messige problemer for driftspersonell som holder seg over vannflaten.

Dersom ultralyd viser seg å ha en god effekt på lakselusa tilfredsstiller denne metoden flere av kriteriene for den ideelle bekjempelsesmetoden enn dagens metoder. Den krever ikke fysisk handtering av laksen, den har trolig ingen negativ effekt på laksens helse og velferd, den har liten negativ effekt på det marine miljøet, den er økonomisk svært fordelaktig, den medfører trolig ingen økt fare for rømming og den har neppe noen HMS-messige utfordringer. I tillegg har den en bonus som de fleste andre metodene mangler: Den kan medføre mindre begroing av nøtene, og på den måten faktisk bidra til et bedre miljø for laksen i merdene.

7 Referanser

Aabling, T. & Henze, A. (2010). Ultralyd mod alger. Teknisk rapport utgitt av Naturstyrelsen, Miljøministeriet, Danmark.

Anon. (2015). Status for norske laksebestander i 2015. Rapport fra Vitenskapelig råd for lakseforvaltning nr 8, 300 s.

Astrup, J. (1999). Ultrasound detection in fish – a parallel to the sonar-mediated detection of bats by ultrasound-sensitive insects? *Comp. Biochem. Physiol.* **A 124**: 19-27.

Bart, A.N., Kindschi, G.A., Ahmed, H., Clark, J., Young, J. & Zohar, Y. (2001). Enhanced transport av calcein into rainbow trout , *Oncorhynchus mykiss,* larvae using cavitation level ultrasound. *Aquaculture,* **196**: 189-197.

Brennen, C. E. (2005). Fundamentals of multiphase flow. Cambridge University Press.

Bron, J.E., Sommerville, C. & Jones, M. (1991). The settlement and attachment of early stages of the salmon louse, *Lepeoptheirussalmonis* (Copepoda: Caligidae) on the salmon host, *Salmo salar*. J.Zool., London, **224**: 201-212.

Collins, A.R. (2015). Underwater sound pressure levels. Nettside aksessert 18. Juni 2015. http://www.arc.id.au/SoundLevels.html

Cramer, E. og Lauterborn, W. (1982). Acoustic cavitation noise spectra. *Appl. Sci. Res.*, **38** (1): 209–214.

Daken, J., Hovem, J.M., Karlsen, H.E., Kvadsheim, P.H., Løkkebord, S., Mjelde, R., Pedersen, A. & Skiftesvik, A.B. (2008). Kunnskapsnivå og forskningsbehov med hensyn til skremmeeffekter og skadevirknigner av seismiske lydbølger på fisk og sjøpattedyr. Rapport til Oljedirektoratet, Fiskeridirektoratet og Forurensningstilsyn fra spesielt nedsatt forskergruppe. 69 sider.

Fjälling, A., Wahlberg, M. & Westerberg, H. (2006). Acoustic harassment devices reduce seal interaction in the Baltic salmon-trap, net fishery. *ICES Journal of Marine Science,* **63**: 1751-1758.

Frankel, V., Kimmel, E. & Igor, Y. (1999). Ultrasound-induced cavitation damage to external epithelia of fish skin. *Ult. Med. Biol.* **25** (8): 1295-1303.

Grøntvedt, R. (2011). Kan Gjerde av elektrisk strøm I sjøvann brukes som et tiltak mot ekstern smitte av lakselus? Norsk Fiskeoppdrett, 8: 78.

Guo, S. F., Lee, H.P., Chaw, K.C., Miklas, J., Teo, S.L.M., Dickinson, G. H., Birch, W. R., og Khoo, B.C. (2011). Effect of ultrasound on cyprids and juvenile barnacles. *Biofouling*, **27** (2): 185-192.

Guo, S., Lee, H. P., Teo, S. L. M., & Khoo, B. C. (2012). Inhibition of barnacle cyprid settlement using low frequency and intensity ultrasound. *Biofouling*, **28**(2): 131-141.

Guo, S., Khoo, B. C., Teo, S. L. M., & Lee, H. P. (2013). The effect of cavitation bubbles on the removal of juvenile barnacles. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, **109**: 219-227.

Hamre, L.A., Eichner, C., Caipang, C.M.A., Dalvin, S.T., Bron, J.E., Nilsen, F., Boxshall, G. & Skern-Mauritzen, R. (2013). The salmon louse *Lepeophtheirus salmonis* (Copepoda: Calligidae) life cycle has only two chalimus stages. DOI: 10.1371/journal.pone.0073539.

Heuch, P.A. & Karlsen, H.E. (1997). Detection of infrasonic water oscillations by copepodids of *Lepeophetherus salmonis* (Copepoda: Caligida). *Journal of plankton research*, **19**: 735-747.

Johannesson, K.A. og Mitson, R.B. (1983). Fisheries Acoustics - A Practical Manual for Aquatic Biomass Estimation. *FAO Fisheries Technical Paper* 240, FIRM/T240. Tilgjengelig online: http://www.fao.org/docrep/x5818e/x5818e00.htm

Kinsler, L.E., Frey, Coppens, A. B., og Sanders, J. V. (1999). Fundamentals of acoustics. John Wiley & Sons, Inc.

Kitamura, H., Takahashi, K., & Kanamaru, D. (1995). Inhibitory Effect of Ultrasonic Waves on the Larval Settlement of the Barnacle, Balanus amphitrite in the Laborator, *Marine Fouling*, **12**(1): 9-13.

Legg, M., Yücel, M.K., Garcia de Carellan, I., Kappatos, V., Selcuk, C. & Gan, T.K. (2015). Acoustic methods for biofouling control: A review. *Ocean Engineering,* **103**: 237-247.

Lofitech (2015). "Selskremmer". Nettside aksessert 18.juni 2015. http://www.lofitech.no/no/selskremmer.html

Lovell, J.M., Findlay, M.M., Moate, R.M. & Yan, H.Y. (2005). The hearing abilities of the prawn *Palaemon serratus. Comp. Biochem. Physiol.,* **A 140**: 89-100.

Lucke, K., Lepper, P. A., Blanchet, M.-A., og Siebert, U. (2011). The use of an air bubble curtain to reduce the received sound levels for harbor porpoises (Phocoena phocoena). *J. Acoust. Soc. Am*., **130 (**5): 3406–3412

Mackie, G.L, Lowery, P., Cooper, C. (2000). Plasma pulse technology to control zebra mussel biofouling. *Zebra Mussel Technical Notes Collection* (ERDC TN-ZMR-2-22) U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. Tilgjengelig online: http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA386654

Mugaas Jensen, P. (2015). Fem lusebahandlinger per anlegg i snitt. Norsk Fiskeoppdrett. **4**: 41.

Myrberg, A.A., Jr. (1980). Ocean noise and the behaviour of marine animals: relationships and implications. In Diemer, F.P.., Vernberg, F.J. & Mirkes, D.Z. (Eds.), *Advanced concepts in ocean measurement for marine biology*: 461-491. Columbia, S.C.: University of South Carolina Press.

Nova Sea Transport (2010). Eindrapportage AA Project Nova Cura. Tilgjengelig online: www.ultrasoundinfo.nl/images/downloads/Eindrapportage_Ultrasound_Nova_Cura_Email.pdf

Parvin, S. J. og Nedwell, J. R. (1995). Underwater Sound Perception and the Development of an Underwater Noise Weighting Scale. *Underw. Technol.,* **21** (1): 12–19

Pecha, R. og Gompf, B. (2000). Microimplosions: Cavitation Collapse and Shock Wave Emission on a Nanosecond Time Scale. *Phys. Rev. Lett.,* **84 (**6): 1328–1330.

Popper, A.N., Fewtrell, J., Smith, M.E. & McCauley, R.D. (2004). Anthropogenic sound: Effects on the behavior and physiology of fishes. *Marine Technology Society Journal*. **37:** 35-40.

Popper, A.N., & Fay, R.R. (2011). Rethinking sound detection by fishes. *Hearing research*, **273**: 25-36.

Quick, N.J., Middlems, S.J. & Armstrong, J.D. (2004). A survey of antipredator control at marine salmon farms in Scotland. *Aquaculture*, **230** (1-4): 169-180.

Santos, H. M., Lodeiro, C., & Capelo-Martínez, J. L. (2009). The power of ultrasound in Ultrasound in chemistry: analytical applications. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 6

Schaefer, R., Claudi, R., & Grapperhaus, M. (2010). Control of zebra mussels using sparker pressure pulses. *Journal (American Water Works Association)*, 113-122.

Sheherbakov, P.S., GriGoryan, F.Y., Pogrebnyak, N.V. (1972). Distribution of high-frequency vibration in hulls of Krasnograd-class ships equipped with ultrasonic antifouling protection systems, *Transactions. Technical operations of the maritime fleet. Thermochemical studies. Control of corrosion and fouling. Central scientific research institute of the maritime fleet. Naval intelligence support center, Washington, D.C.* 160 sider.

Sjøthun Røen, Ø. (2015). Status for ikke medikamentelle metoder. Norsk Fiskeoppdrett, **5**: 16–28.

Slabbehoorn, H., Bourton, N., Van Opzeeland, I., Coers, A., Ten Cate, C. & Popper, A.N. (2010). A noisy spring: The impact of globally rising underwater sound levels on fish. *Trends in Ecology and Evolution,* **25** (7): 419-427.

Turl, C.W. (1982). Possible effects of noise from offshore oil and gas drilling activities on marine mammals – a survey of the literature. Technical Report 776. San Diego CA: Naval Oceans Systems Center.

Vitenskapelig råd for lakseforvaltning (2015). Status for norske laksebestander I 2015. Rapport nr 8, 300 sider.

ISBN 978-82-8296-315-2 (trykt)
ISBN 978-82-8296-316-9 (pdf)
ISSN 1890-579X