



FOI MEMO

Projekt/Project
Expertstöd HaV 2025

Sidnr/Page no
1 (44)

Projektnummer/Project no Kund/Customer
E86366 Havs och vattenmyndigheten

Författare/Author
Frida Thörn
Christophe Mattei
Mathias Andersson

Datum/Date
2026-03-09

Memo nummer/Number
FOI Memo 9236

Utredning av detektionsavstånd av pingers för tumlare

Sammanfattning

Pingers i fiskenät är en effektiv åtgärd för att minska bifångst av tumlare. Det råder en viss osäkerhet om pingers utsända ljudsignal samt på vilka avstånd dessa är detekterbara för ett hydrofonsystem. Denna studie syftar till att öka kunskapen om just detta via mätningar i FOI:s tanklabb och modellering av detektionsavståndet i fyra typmiljöer i svenska vatten. Fyra olika pingers från två tillverkare ingick i studien och visade på skillnader både mellan exemplar av samma modell och mellan olika modeller, gällande både frekvensinnehåll och källnivå. Signalerna från Fishteks PB-FR (Gul) och PB-FR High Power (Röd) har ett varierat frekvensinnehåll med frekvenssvop över frekvensintervallet 50–150 kHz. Signalerna från Future Oceans Netguard (Vit) och Netshield (Röd) innehåller mindre tonvariationer, men starka övertoner bidrar till ett bredare frekvensinnehåll (50–200 kHz). Uppmätt bredbandig källnivå visar på en variation på upp till 2 dB. För alla modeller är det 63 kHz tersbandet som har mest energi. Detektionsavståndet blir olika beroende på rådande ljudutbredningsförhållande. För de valda typmiljöerna görs ett flertal beräkningar som visar på en variation på upp till 20 dB, främst påverkad av mottagardjup, ljudhastighetsprofil och absorption. Som exempel kan en Gul Fishtek PB-FR detekteras av mätsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF på ca 760–2200 m i en typmiljö som kan förekomma i Norra Östersjön jämfört med ca 390–940 m i Kattegatt. Både det längsta och kortaste avståndet bedöms realistiskt och beror på var i miljön som mätsystemet befinner sig. För mätsystem med lägre elektroniskt brus kan längre detektionsavstånd fås.

1 Inledning

I svenska vatten förekommer tumlare (*Phocena phocena*) främst i västerhavet, Öresund och i södra Östersjön [1]. I västerhavet och Öresund är populationen livskraftig men i södra Östersjön är den akut hotad. Ett av de stora hoten mot tumlare är oavsiktliga fångster i fiskenät, kallat bifångst, där tumlaren drunknar. För att förhindra detta, har det föreslagits i åtgärdsprogrammet för tumlare att fiskenäten, främst bottengarn, ska utrustas med s.k. pingers [1]. Pingers har visats effektiva i att varna tumlaren om att det finns något i vattnet som de ska undvika [2]. Med pingers avses i denna rapport sändare som genererar ljud med den huvudsakliga energin över 50 kHz.

Rekommendationen att använda pingers för minskad bifångst beskrivs även i Europaparlamentets och rådets förordning (EU) 2019/1241. Inom avgränsningar för försvarsmaktens riksintressen i marin miljö avstyrker försvarsmakten utan undantag pingersreglering som föreslås av Havs- och vattenmyndigheten (HaV). Genomförandet av rekommendationen i Sverige har därför endast nått begränsad framgång. I dessa miljöer återstår övriga former av fiskeregleringar, till exempel begränsningar av vissa redskap, viss utformning av redskap eller regleringar i tid och rum.

Det finns ett antal olika pingers på marknaden som sänder olika pulstyper med olika frekvens och källstyrka, se exempel i [3]. Den tekniska informationen från tillverkare kan dessvärre i vissa fall vara kortfattad, och om man vill räkna på vilket avstånd en pinger kan detekteras av mottagare (såsom ett mätsystem eller en tumlare) behöver de tekniska specifikationerna kvantifieras genom mätningar. Detta har demonstrerats i en studie från Australien, där både mätningar av ett par pingers genomfördes samt modellering av deras räckvidd i relation till olika djurs hörsel [4].

Tumlares hörselområde sträcker sig från omkring 1 kHz upp till över 150 kHz. Den lägsta ovägda ljudtrycksnivån som tumlaren kan uppfatta är cirka 45–57 dB re 1 μ Pa i frekvensintervallet 32–100 kHz när 50–1500 ms långa smalbandiga pulser har spelats upp [5]. Pingers designas därför att ha mest energi i tumlarens bästa hörselområde men över de frekvenser som säl hör (>50 kHz) för att inte signalera till dem att det finns mat i närheten. På vilket avstånd en pinger kan detekteras beror på var, och på vilket djup, den placeras samt var mottagaren befinner sig. Detta då ljudutbredningen i svenska havsområden är starkt beroende på bland annat salthalt, temperatur, batymetri och bottenotyp.

1.1 Syfte

Syftet med denna studie är att utreda hur långt vanligt förekommande pingers går att detektera vid olika platser i svenska vatten. Resultatet är ett tekniskt underlag som kan användas i dialogen mellan myndigheter gällande möjligheten att använda pingers för att minska bifångsten av tumlare.

1.2 Övergripande metodbeskrivning

Beräkning av detektionsavstånd görs i fyra steg. Det första steget är en karakterisering av ett antal olika pingers utsända signaler (frekvensinnehåll och källnivå) vilka uppskattas genom mätningar. I det andra steget modelleras ljudutbredningsförluster för fyra olika typmiljöer som inspirerats av platser föreslagna av HaV

och Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU). De valda platserna kopplar till områden där pingers kan komma att användas. I det tredje steget uppskattas brusets (naturligt och elektroniskt) som den utsända signalen från pingern måste överrösta för att vara detekterbar. För att uppskatta det elektroniska brusets används ett kommersiellt hydrofonsystem. Till sist, utifrån de tidigare stegen, kan detektionsavståndet beräknas för alla pingermodeller i de olika miljöerna.

2 Karakterisering av pingers som ljudkällor

Källnivån är ett mått på styrkan hos en undervattensljudkälla, oberoende av avståndet till källan. Uttryckt som funktion av frekvens, utgör den indata vid uppskattningen av detektionsavståndet för en pinger. Källnivån ger däremot ingen information om de specifika signaltyper som källan utstrålar, vilket också kan vara av intresse för att identifiera en pinger. Inledningsvis genomförs en karakterisering av fyra modeller i FOI:s tanklabb, med syftet att beskriva utstrålade signaler och uppskatta källnivån. Mätuppställningen beskrivs i detalj i Bilaga A.

2.1 Modeller som ingår i studien

Studien innefattar fyra olika modeller som presenteras i tabell 2.1 och ses i figur 2.1. Av dessa är Gul Fishtek vanligast förekommande på fiskenät idag enligt SLU medan Röd Netshield är idag inte tillåten i svenska vatten. Specifikationerna anger en bredbandig källnivå, vilket är otillräckligt för att uppskatta detektionsavståndet vilket motiverar en mätning.

Tabell 2.1: Specifikationer från tillverkarna för de pingers som ingår i studien.

Tillverkare	Modell	Frekvens (kHz)	Källnivå (dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{m}^2$)	Benämning
Fishtek	BP-FR	50-120	145 \pm 5	Gul Fishtek
Fishtek	BP-FR High Power	50-120	155 \pm 5	Röd Fishtek
Future Oceans	Netguard	50-120	145	Vit Netguard
Future Oceans	Netshield	50-120	175	Röd Netshield



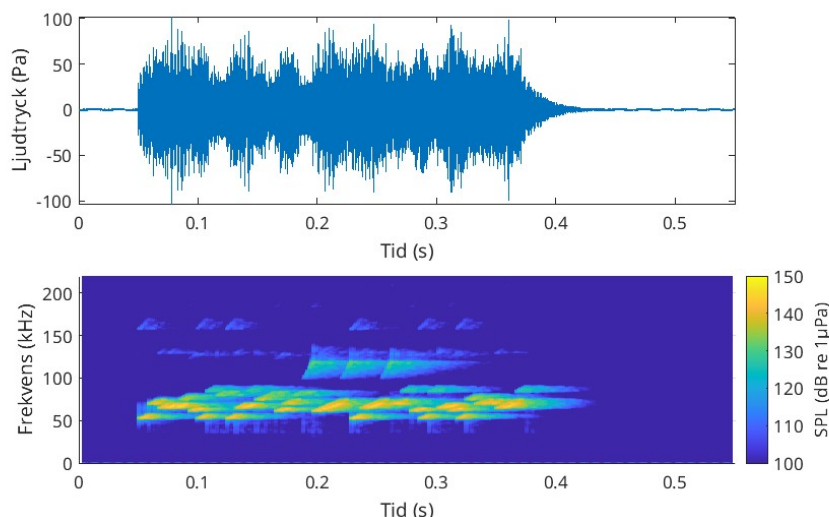
Figur 2.1: Pingers som ingår i studien (från topp till botten): Gul Fishtek, Röd Fishtek, Vit Netguard, Röd Netshield. Till höger syns själva pingern och till vänster dess plastskydd.

2.2 Signalkaraktär

När en pinger befinner sig i vattnet sänder den ut en serie med väldefinierade signaler, så kallade ping, med varierande tidslängd och tidsintervall. Dessutom varierar signalen något från ping till ping i både form och frekvensinnehåll.

Fishtek och Future Oceans använder olika processer för signalgenerering. Signalen från Fishteks pingers uppvisar ett komplext frekvensinnehåll med tydliga frekvenssvop över ett brett frekvensintervall mellan 50-150 kHz. När frekvensen sänks till mänskligt hörbart område uppfattas en sådan signal som ett kort, fågelliknande kvitter. Ett exempel på ett enskilt ping, med dess tidssignal och frekvensspektrum, s.k. spektrogram, illustreras i figur 2.2.

Signalerna från Future Oceans pingers innehåller mindre tonvariationer både i form av färre variationer över tid och få toner inom ett smalare frekvensband, men starka övertoner bidrar till att bredda frekvensinnehållet upp till 200 kHz. Signalen från en Future Oceans pinger som nedtransponerad till för människan hörbara frekvenser, karakteriseras av ett distinkt artificiellt och alarmerande ljud. Typiska ping för alla fyra modeller visas i Bilaga A (figurer A.5 - A.8).



Figur 2.2: Ping från en Gul Fishtek. Övre figuren visar tidsignalen av ljudtrycket. Nedre figuren visar SPL mot tid och frekvens, s.k. spektrogram.

Signallängden, beräknad för den del av signalen som överstiger en tröskelnivå på 5 Pa, är konstant från ping till ping för en given modell. Tidsintervallet mellan efterföljande ping uppvisar däremot slumpmässiga variationer för samtliga modeller. En sammanställning av uppmätta signallängder och tidsintervall mellan varje ping för de olika modellerna, presenteras i tabell 2.2.

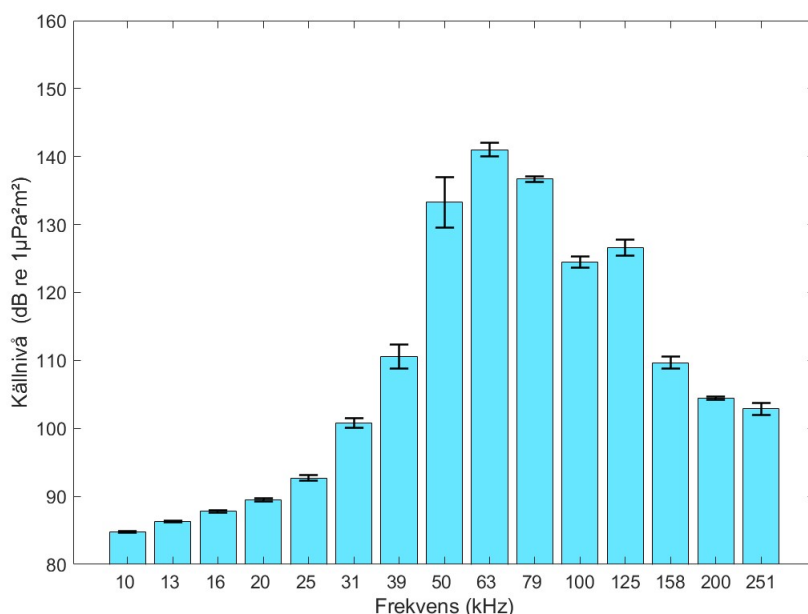
Tabell 2.2: Uppmätt signallängd och tid mellan ping för de olika modellerna.

	Gul Fishtek	Röd Fishtek	Vit Netguard	Röd Netshield
Signallängd (s)	$0,35 \pm 0,0$	$0,35 \pm 0,0$	$0,35 \pm 0,0$	$0,12 \pm 0,0$
Tid mellan ping (s)	$9,1 \pm 2,8$	$7,2 \pm 3,2$	$4,8 \pm 0,2$	$5,0 \pm 1,2$

2.3 Källnivå

För att uppskatta källnivån som funktion av frekvens utförs en mätning i FOI:s tanklabb där varje pinger sänks ner i en vattentank och signalerna mäts med en hydrofon (se figur A.1 i Bilaga A). Mätmetoden tar hänsyn till variationer mellan signalerna och ljudkällans eventuella direktivitet. Tankens storlek och dess effekt på ljudfältet kompenseras för i dataanalys (se Bilaga A). Processen leder till en uppskattning av källnivån som funktion av frekvens för varje pingermodell. Den presenteras i ett tersbandspektrum där nivån i varje tersband utgörs av ett aritmetiskt medelvärde med respektive standardavvikelse.

Huvudbidraget av den akustiska energin förekommer för samtliga pingers kring 63 kHz tersbandet. Detta kan ses i källnivåspektrumet för Gul Fishtek i figur 2.3, där medelvärdet visas som staplar, medan standardavvikelsen anges med felstaplar. Gul Fishtek uppvisar en relativt jämn energifördelning kring 63 kHz tersbandet, vilket även gäller för Röd Fishtek. Future Ocean-pingers kännetecknas däremot av en tydlig ökning av energin i 200 kHz bandet, vilket kan relateras till övertoner från grundtonen. För en sammanställning av samtliga pingers, se figurer A.9 - A.11 i Bilaga A.



Figur 2.3: Källnivå i tersband för Gul Fishtek. Staplarna motsvarar det aritmetiska medelvärdet och strecken standardavvikelsen över 35 ping.

Beräknad källnivå, medel och standardavvikelse över 35 ping, jämförs med specificerade nivåer från tillverkare för de fyra modellerna i tabell 2.3. Den beräknade källnivån är inom tillverkarens angivna intervall för båda Fishtek-modellerna och Vit Netguard. Däremot är Future Oceans Netshield uppmätta källstyrka mycket lägre (nästan 20 dB) än tillverkarens specifikation. Dock är detta baserat på endast ett exemplar.

Tabell 2.3: Bredbandig källnivå som beräknats i denna studie jämfört med specificerad källnivå från tillverkarna.

Modell	Källnivå enligt tillverkare (dB re 1 μ Pa ² m ²)	Beräknad källnivå (dB re 1 μ Pa ² m ²)
Gul Fishtek	145 \pm 5	143 \pm 1,6
Röd Fishtek	155 \pm 5	150 \pm 0,6
Vit Netguard	145	145 \pm 1,8
Röd Netshield	175	156 \pm 1,2

Källnivåerna för de fyra modellerna, vilka utgör indata till utbredningsstudien, redovisas i tabell 2.4.

Tabell 2.4: Källnivå (medel) i tersband för de fyra olika modellerna i dB re 1 μ Pa²m².

Frekvens (kHz)	Gul Fishtek	Röd Fishtek	Vit Netguard	Röd Netshield
10	85	85	85	85
13	86	87	86	87
16	88	89	87	88
20	90	92	89	91
25	93	98	91	97
31	101	105	95	104
40	111	114	105	114
50	133	136	122	130
63	141	149	145	155
79	137	141	135	148
100	124	125	114	125
125	126	125	117	116
158	110	111	108	110
200	104	110	120	129
251	103	106	97	104

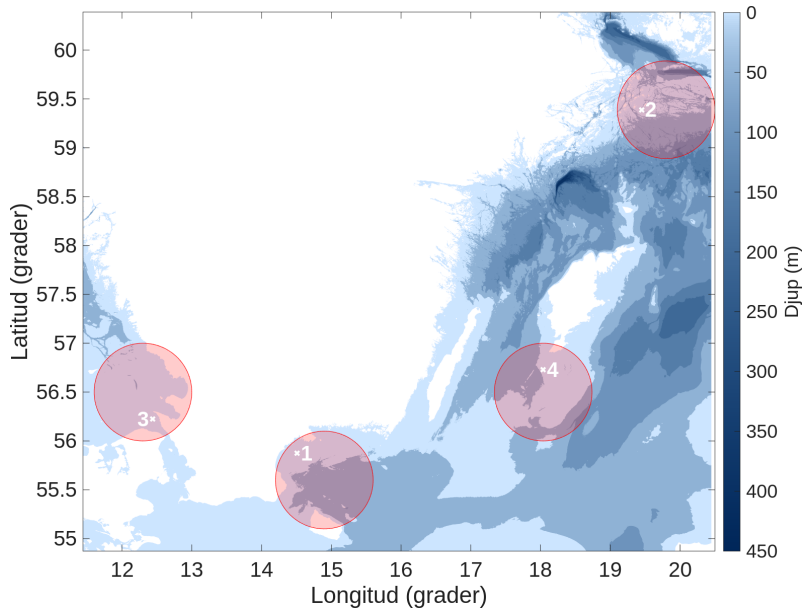
3 Ljudutbredningsförlust

Efter att källnivåer i tersband har erhållits för de pingermodeller som ingår i studien, är nästa steg att uppskatta ljudutbredningsförlusten i olika havsmiljöer. Här används fyra typiska miljöer med ett antal olika kombinationer av frekvenser, månader, mottagardjup, bäringar och salthalter för varje miljö. Därefter presenteras minimal, median och maximal utbredningsförlust för de olika typmiljöerna och månaderna över avstånd och frekvens.

3.1 Typmiljöer

Typmiljöerna inspireras av ett antal intresseområden som presenteras i figur 3.1 och tabell 3.1. Position 1 (Hanöbukten) valdes i ett område med relativt hög förekomst av tumlare och där det bedrivs garnfiske som i framtiden kan komma att omfattas av regler som gör användning av pingers obligatorisk. Position 2 (norra Östersjön) har låg tumlarnärvaro, men valdes för att få variation i salthalt och djup i analysen. Position 3 (södra Kattegatt) ligger i ett område med hög tumlarnärvaro, där det redan bedrivs garnfiske med krav på att använda pingers. Salthalten i detta område skiljer sig också markant från de andra typmiljöerna i Östersjön.

Position 4 (södra Östersjön) är i ett område som pekats ut som ett viktigt habitat för tumlare i Östersjön. Det är också ett speciellt område eftersom det finns stora kontraster i djupförhållandena på grund av de stora utsjöbankarna. Platserna samt intresseområdena visas i figur 3.1. Uppskattade miljöparametrar för varje typmiljö ges i tabell 3.1. Notera att ljudutbredningen kan variera även inom dessa valda områden.

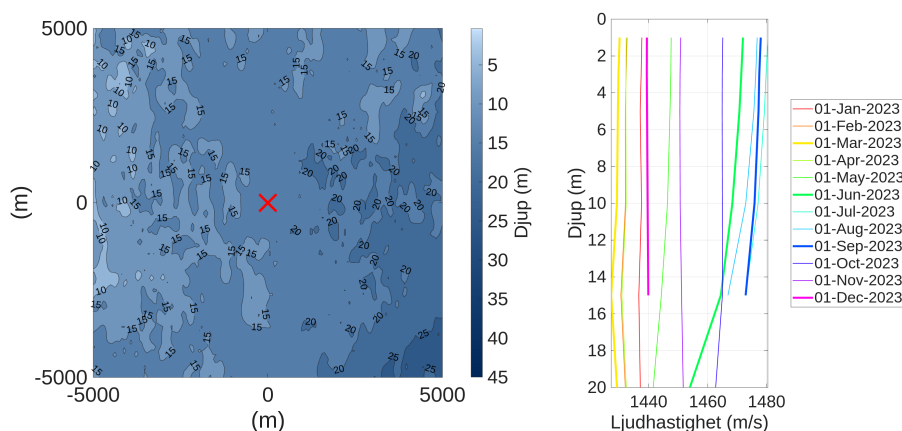


Figur 3.1: Intresseområden (röda cirklar) med valda representativa positioner (siffror) för typmiljöerna på en bakgrund av batymetri.

Tabell 3.1: Typmiljöer med uppskattade miljöparametrar.

Typmiljö	Salinitet (psu)	Djup (m)	Bottentyp	Område som efterliknas
1	7,5–8,1	18,9	Morän	Hanöbukten
2	6,3–7,3	22,7	Kristallin berggrund	Norra Östersjön
3	17,5–31,9	23,6	Sand	Södra Kattegatt
4	8,1–9,9	43,4	Glacial lera	Södra Östersjön

Batymetrin hämtas från EMODnet [6] och har en upplösning på ca 115×115 meter. Salthalt och temperatur hämtas från Coriolis Ocean Dataset [7] och räknas om till ljudhastighet med hjälp av en ekvation från [8]. Ljudhastighetsprofilerna och närliggande batymetri för varje position ges i Bilaga B. Ett exempel för typmiljö 1 som ska efterlikna miljön vid Hanöbukten ses även i figur 3.2. Notera att data för ljudhastighetsprofilerna finns i ett rutnät med en upplösning på ca 30 km, vilket innebär att datan inte hämtas exakt vid den angivna koordinaten. Datan hämtas istället från den närmaste punkten i rutnätet, vilket medför att det exakta djupet vid positionen inte stämmer överens med djupet i profilen. I de fall där ljudhastighetsprofilens djup understiger det faktiska djupet används konstant extrapolation. I simuleringarna flyttas även den översta mätpunkten på en meters djup upp till vattenytan.



Figur 3.2: Batymetri (vänster) och ljudhastighetsprofiler (höger) vid typmiljö 1 (Hanöbukten). De ljudhastighetsprofiler med större linjetjocklek är de som används i studien och motsvarar de valda månaderna. Det röda krysset anger den valda representativa positionen som presenteras i figur 3.1.

För att beräkna ljudutbredningsförlusten på de olika platserna behöver botten-typerna översättas till akustiska parametrar. Antagna parametrar för de olika botten-typerna ses i tabell B.1 i Bilaga B och är hämtade från tabell 1.3 i [9]. Tjockleken på sedimentet för varje botten modelleras som oändligt djupt, vilket anses vara ett rimligt antagande för höga frekvenser då ljudet dämpas effektivt i översta sedimentlagrena.

3.2 Beräkning av ljudutbredningsförlust

För att beräkna utbredningsförlusten används strålgångskoden Rev3D som är utvecklad av FOI [10]. Strålgång är en approximation som är giltig enbart för höga frekvenser. Hur hög frekvensen bör vara vid användning av strålgång beror på vad man modellererar, men från erfarenhet används vanligen 1 kHz som undre gräns för när strålgång bedöms ge realistiska resultat. För att ge generella uppskattningar av utbredningsförlusten inom varje tersband används inkoherent strålgång med en stokastisk volymsspridning som ska motsvara förhållanden i Östersjön och Kattegatt.

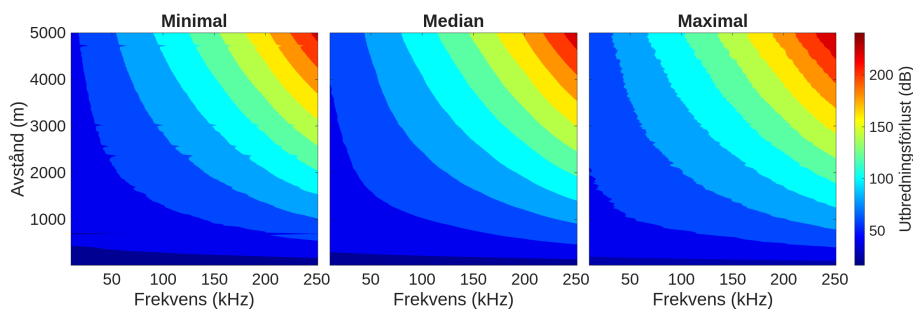
Ljudkällan, i detta fall en pinger, modelleras som en omnidirektionell punktkälla tre meter ovanför botten. Mottagarna modelleras med 50 jämnt fördelade punkter i djupled från det maximala djupet upp till vattenytan, vilket innebär mer än en punkt per meter i samtliga typmiljöer. Då djupet varierar kommer därmed några mottagarpunkter hamna i sedimentet. Dessa tas inte med i analysen. I avståndsled (horisontellt avstånd) används punkter var 25:e meter upp till fem kilometer från källan.

Utbredningsförlusten räknas för följande kombinationer:

- Typmiljöer: Hanöbukten, Norra Östersjön, Södra Kattegatt, Södra Östersjön enligt tabell 3.1.
- Frekvenser: 10–250 kHz tersbanden (enligt tabell 2.4).
- Ljudhastighetsprofiler för månader: mars, juni, september, december.
- Mottagardjup: 50 punkter från maximalt djup inom området till vattenytan.

- Bärningar: nord, nordost, ost, sydost, syd, sydväst, väst, nordväst.
- Salthalter: den, i djupled, lägsta och högsta salthalten.

Utbredningsförlusterna beräknas därefter över avstånd för varje typmiljö, frekvens och månad med median, minimal och maximal förlust över djup, bäring och salthalt. Ett exempel på beräknad utbredningsförlust för typmiljö 1 (Hanöbukten) för mars månad ses i figur 3.3. Från figuren kan vi notera att utbredningsförlusten ökar med både frekvens och avstånd med lokala variationer.



Figur 3.3: Utbredningsförlust för typmiljö 1 (Hanöbukten) i mars när ljudkällan befinner sig 3 m över botten. Från vänster till höger: minimal, median och maximal förlust för olika mottagardjup, bärningar och salthalter.

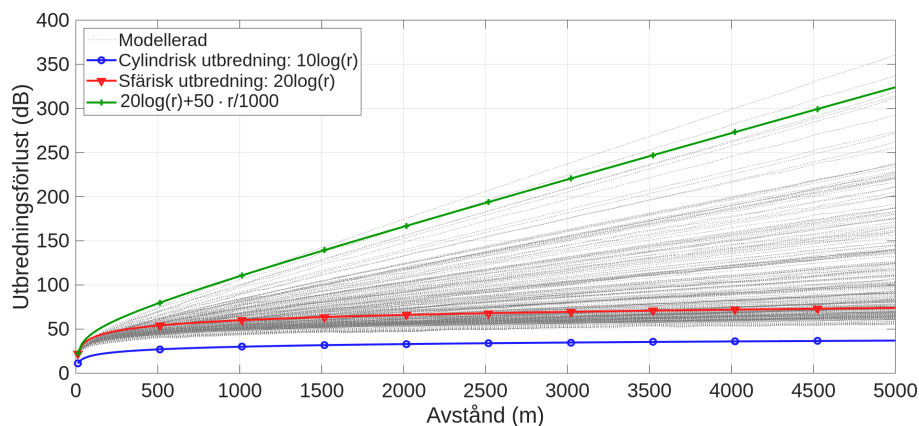
Utbredningsförlusterna används därefter för att uppskatta hur långt de olika pingersen detekteras i de olika typmiljöerna. Då ljudutbredningsförlusten varierar till följd av de olika parametrarna som beskrivits ovan, kommer det leda till olika detektionsavstånd baserat på var i området den tänkta mottagaren befinner sig.

3.3 Enkel validering av modellerad utbredningsförlust

För att, på ett enkelt sätt, få en indikation om den modellerade utbredningsförlusten är realistisk jämförs denna med den förenklade modellen

$$TL = A \cdot \log_{10}(r) + \alpha \cdot r/1000, \quad (1)$$

där TL (eng. Propagation loss) anger utbredningsförlusten i decibel, A är en konstant (vanligen mellan 15-20), r avståndet mellan källan och mottagaren i meter och α absorptionen i decibel per kilometer. En jämförelse mellan mediannivåerna av den modellerade datan för samtliga typmiljöer och olika förenklingar ses i figur 3.4. Förenklingarna som väljs motsvarar cylindrisk utbredning ($A = 10$, $\alpha = 0$), sfärisk utbredning ($A = 20$, $\alpha = 0$) samt sfärisk utbredning med absorption ($A = 20$, $\alpha \neq 0$). Absorptionen som illustreras är satt till 50 dB/km och motsvarar den som fås för den högsta frekvensen (250 kHz) och salthalten (31,9 psu).



Figur 3.4: Jämförelse mellan den modellerade utbredningsförlusten och enkla modeller. För den modellerade datan används medianvärdet över djup, bäring och salthalt för varje plats, månad och frekvens.

I figuren ses en stor spridning i den modellerade utbredningsförlusten. Anledningen till detta är att de olika frekvenserna absorberas olika mycket. Den modellerade utbredningsförlusten verkar överlag följa de förenklade uttrycken bra, och begränsas av den högsta absorptionen. Att vissa kurvor överstiger de förenklade kurvan med den högsta absorptionen beror mest sannolikt på ljudhastighetens djupvariation, vilket inte fångas av de förenklade uttrycket. Liknande figurer för varje enskild typmiljö presenteras i Bilaga C.

4 Uppskattning av bakgrundsbrus

Bakgrundsbruset i havet byggs upp av flera olika bruskaällor. Oftast talar man om brus från vind och vågor, så kallat sjöbrus, men för väldigt höga frekvenser dominerar ofta det termiska bruset, se figur 4.1. Det termiska bruset relaterar till rörelser hos vattenmolekylerna. Elektroniska mottagare (som ett hydrofonsystem) har ett elektroniskt brus som sätter gränsen för vilka ljudnivåer som det kan detektera. Det är därför ofta inte realistiskt att i praktiska exempel använda det termiska bruset som en lägsta nivå som är detekterbar, då det elektroniska bruset ofta är högre och således kan ses som den begränsande faktorn för på vilket avstånd ett ljud är detekterbart. se figur 4.1.

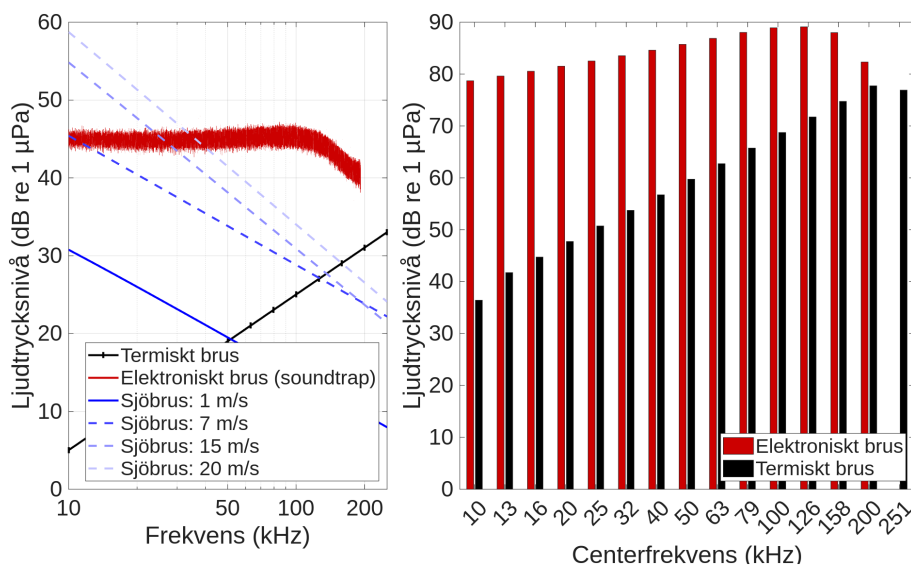
För att uppskatta de olika brusnivåerna finns ett flertal etablerade modeller. Sjöbruset beräknas via en sjöbrusmodell bestående av extrapolerade bruskurvor från mätningar som utförts av FOI vid Norra Midsjöbanken [11]. Det termiska bruset beräknas via en teoretisk härledning som gjordes på 1950-talet presenterade i [12]. Som referens för ett realistiskt elektroniskt brus i denna studie har känsligheten i det kommersiella hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF uppmätt se figur 4.1. Det finns dock mottagare med lägre elektroniskt brus.

I modellerna för sjöbrus respektive termiskt brus anges det i 1 Hz bandbredd (smalband) och summerat över tersband. För tersband summeras de smalbandiga nivåerna enligt

$$NL = 10 \log_{10} \left(10^{NL_1/10} + 10^{NL_2/10} + 10^{NL_3/10} + \dots \right), \quad (2)$$

där NL är brusnivån i tersband och NL_1 , NL_2 , o.s.v. brusnivån för smalbanden inom tersbandet. Exempelvis för 10 kHz tersbandet, som sträcker sig från 8909-

11225 Hz, skulle det innebära en summering av 2316 termer, där NL_1 är nivån vid 8909 Hz, NL_2 nivån vid 8910 Hz, ... och NL_{2316} är nivån vid 11225 Hz (givet en frekvensupplösning på 1 Hz). De uppskattade brusnivåerna för både smalband och tersband ses i figur 4.1. Figuren visar att det elektroniska bruset är dominerande i det aktuella frekvensintervallet (50-200 kHz) med undantag för förhållanden med extremt hård vind. Den visar även att det termiska bruset över en viss frekvens överstiger sjöbruset för samtliga vindhastigheter.



Figur 4.1: Modeller för sjöbrus och termiskt brus samt uppmätt elektroniskt brus för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF i 1 Hz smalband (vänster) och tersband (höger). Notera att det inte finns data i 251 kHz tersbandet för det elektroniska bruset.

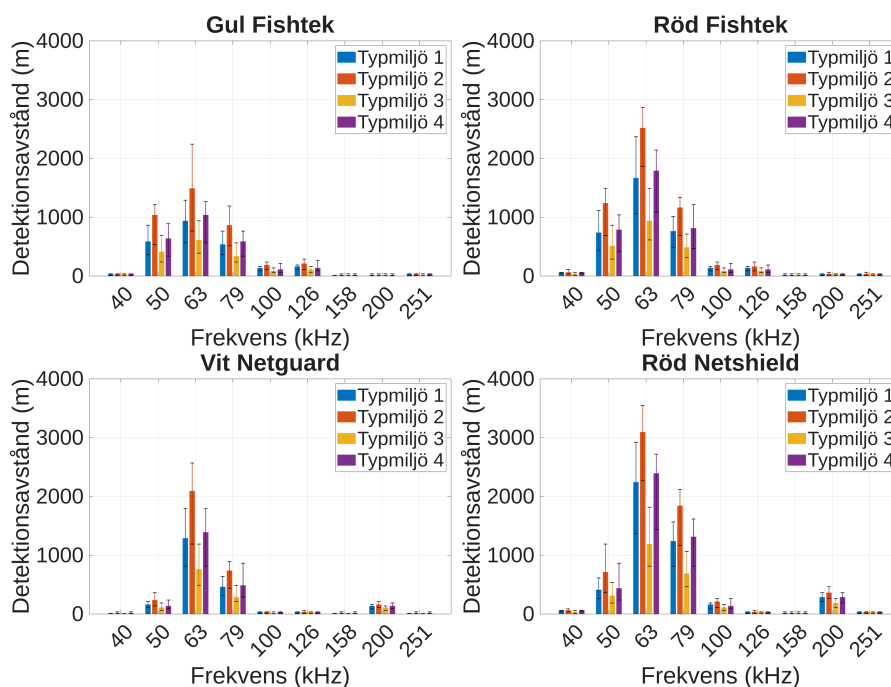
5 Detektionsavstånd

Detektionsavståndet, d.v.s. det avstånd en pinger är detekterbar av ett hydrofonsystem, beräknas med hjälp av den framtagna källmodellen, den beräknade ljudutbredningsförlusten och bakgrundsbrusmodellen. Den signal som mottas beräknas genom att dra bort ljudutbredningsförlusten (TL) från källstyrkan (SL). För att ljudkällan ska vara detekterbar behöver signalen överskrida bakgrundsbruset (NL). Därmed kan de avstånd där signalen är detekterbar beskrivas av att

$$SL - TL(r) \geq NL. \quad (3)$$

I ekvation (3) är r avståndet mellan pinger och hydrofon, och det minsta avstånd som uppfyller ekvationen är detektionsavståndet. För andra hydrofonsystem, med flera hydrofonelement, kan signalen behandlas så att den blir detekterbar på kortare avstånd. För dessa system används en mer utförlig variant av sonarekvationen, se Bilaga D.

De beräknade detektionsavstånden för de olika modellerna visas i figur 5.1. Detektionsavstånden presenteras tillsammans med felstaplar för att visa på variationen i ljudutbredningen. Därmed går det inte att avfärda varken det kortaste eller längsta avståndet som något slags extremfall.



Figur 5.1: Beräknade detektionsavstånd för olika pingers för en mottagare med brusnivå motsvarande hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF (för tersband över 40 kHz). Varje stapel markerar detektionsavståndet med mediannivån av utbredningsförlusten (mediannivå över de olika mottagardjupen, bäringarna och salthalterna) för den månad som ger längst avstånd. Felstaplarna anger det kortaste och längsta avståndet (från minimal och maximal utbredningsförlust). Typmiljö 1 Hanöbukten, 2 Norra Östersjön, 3 Södra Kattegatt, 4 Södra Östersjön.

För alla pingers och typmiljöer är det 63 kHz tersbandet som ger längst detektionsavstånd. För de två Fishtek-modellerna kan även 50 och 79 kHz tersbanden detekteras men endast på cirka halva avståndet jämfört med 63 kHz. Röd Fishtek har cirka dubbelt så långt avstånd som Gul Fishtek. Future Oceans modeller har samma dominant 63 kHz tersband och betydligt kortare avstånd för 79 respektive 50 kHz. Båda modellerna har övertoner i 200 kHz tersbandet vilket ger ett visst detektionsavstånd om än betydligt kortare än övriga tersband. Röd Netshield har högst källnivå vilket avspeglas även i längst detektionsavstånd jämfört med de tre andra modellerna. Men som tidigare nämnts inte är denna modell tillåten i Sverige.

För samtliga modeller fås längst detektionsavstånd i typmiljö 2 (norra Östersjön) vilket bedöms bero på den låga salthalten och hårda botten. I typmiljö 3 (södra Kattegatt) fås i sin tur kortast detektionsavstånd, vilket beror främst på betydligt högre salthalt.

För 63 kHz tersbandet presenteras detektionsavstånden även i tabell 5.1, där exakta avstånd kan läsas av. Notera att spannet av detektionsavstånd även här fås p.g.a. variation i ljudutbredningsförlust och därmed går det inte att avfärda varken det kortaste eller längsta avståndet som något slags extremfall.

Titel/Title
Utredning av detektionsavstånd av pingers för tumlareMemo nummer/Number
FOI Memo 9236

Tabell 5.1: Detektionsavstånd vid 63 kHz tersbandet för mottagare med brusnivå motsvarande de för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.

	Gul Fishtek	Röd Fishtek	Vit Netguard	Röd Netshield
Typmiljö 1	564–1291 m	1065–2368 m	815–1792 m	1366–2920 m
Typmiljö 2	764–2243 m	1867–2870 m	1190–2569 m	2268–3546 m
Typmiljö 3	388–940 m	614–1491 m	489–1190 m	815–1817 m
Typmiljö 4	564–1266 m	1090–2143 m	815–1792 m	1441–2719 m

Vad som får utbredningsförlusten att variera är inte trivialt då flera aspekter vägs in. För att illustrera hur stor skillnad det är i utbredningsförlust på grund av de olika miljöparametrarna har variationer räknats ut för 63 kHz tersbandet. I tabell 5.2 visas hur mycket den beräknade utbredningsförlusten varierar som mest om man enbart varierar den angivna miljöparametern inom intervallet angivet i punktlistan i avsnitt 3.2. Från tabellen kan man exempelvis utläsa att salinitetskillnaden har särskilt stor effekt i typmiljö 3, men nästintill försumbar effekt på typmiljö 1, 2 och 4. För typmiljö 2 varierar bottendjupet kraftigt. På grund av att den miljön även har en hårdare bottentyp, ger detta stora skillnader i utbredningsförlust beroende på bäring. För samtliga typmiljöer är det även stor skillnad beroende på mottagardjup och månad.

Tabell 5.2: Variation i ljudutbredningsförlust för olika miljöparametrar för 63 kHz tersbandet. Den nivå som anges motsvarar den största skillnaden i ljudutbredningsförlust från modellkörningarna när enbart den angivna miljöparametern ändras. Typmiljö 1 Hanöbukten, 2 norra Östersjön, 3 södra Kattegatt, 4 södra Östersjön.

	Salinitet	Bäring	Mottagardjup	Månad
Typmiljö 1	1,5 dB	5 dB	17,4 dB	8,9 dB
Typmiljö 2	2,5 dB	10 dB	18,8 dB	5,3 dB
Typmiljö 3	38,0 dB	2 dB	16,6 dB	8,7 dB
Typmiljö 4	5,0 dB	5 dB	13,7 dB	7,8 dB

6 Slutsatser

Studien resulterar i följande erfarenheter och slutsatser:

- Mätmetodiken för att bestämma källnivå hos pingers från mätningar i FOI:s tanklabb fungerar väl vilket inkluderar en statistisk analys av den varierade signalstyrkan och en kompensation för effekten av det diffusa fält som uppstod i tanken med de upp till 0,35 s långa signalerna.
- Källnivåerna, i form av tersbandspektra, för Gul (PB-FR) och Röd (PB-FR High Power) Fishtek och Future Oceans Vit Netguard och Röd Netshield skattas och visar på skillnad både mellan exemplar av samma modell och mellan olika modeller gällande frekvensinnehåll och källnivå. Den bredbandiga källnivån avvek från tillverkarnas tekniska specifikation till viss del, främst för de modellerna med högst specificerade nivåer (Röd Fishtek och Röd Netshield).
- Högst källnivå uppmäts i 63 kHz tersbandet hos alla fyra modeller.
- Ljudutbredningsförlusten har en naturlig variation på uppemot 20 dB, vilket leder till ett intervall av detektionsavstånd.

- Sjöbruset kan dominera upp till 150 kHz (beroende på vindhastighet) var- efter det termiska bruset tar över. Däremot är det elektroniska bruset från mätsystemet, i detta fall hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF, högre vid dessa frekvenser vilket är den be- gränsande faktorn i denna studie. Det finns dock system med lägre brus- nivåer.
- Detektionsavståndet för de olika modellerna varierar flera hundra meter beroende på i vilken miljö de placeras. Generellt är det längst avstånd i miljöer som efterliknar norra Östersjön och kortast i Kattegatt. Detta beror delvis på ökad absorption (dämpning) vid högre salthalter i Kattegatt och hårdare botten i norra Östersjön.
- Olika mottagardjup ger olika långa detektionsavstånd (relaterar främst till ljudhastighetsprofilen).
- Resultaten kan användas till att uppskatta detektionsavståndet för andra mätsystem än det som används i denna studie.

Referenser

- [1] Havs- och vattenmyndigheten, “Åtgärdsprogram för tumlare”, Rapport 2021:11, 2021. URL: <https://www.havochvatten.se/download/18.764c2cb917a6c5c85b03c106/1625648670494/rapport-2021-atgardsprogram-for-tumlare-v2.pdf>.
- [2] S. Königson, R. Naddafi, M. Hedgarde m. fl., “Will harbor porpoises be de- terred by a pinger that cannot be used as a dinner bell by seals?”, *Marine Mammal Science*, årg. 38, nr 2, s. 469–485, 2022. DOI: 10.1111/mms. 12880.
- [3] B. Phillips, A. Roberts, L. Buckland m. fl., “Evidence base for application of Acoustic Deterrent Devices (ADDs) as marine mammal mitigation (Ver- sion 5)”, Joint Nature Conservation Committee (JNCC), 615, version 5, 2025.
- [4] V. E. Warren, T. J. Stephen, S. C. Connell och C. R. McPherson, “Dolp- hin Acoustic Device Characterisation: Quantifying the Technical Specifi- cations, and Modelling the Usage, of Two Acoustic Devices in New Zealand’s Coastal Waters”, JASCO Applied Sciences (Australia) Pty Ltd, Technical Report, version 2, 2025. URL: [https://www.doc.govt.nz/globalassets/ documents/conservation/marine-and-coastal/marine-conservation- services/reports/non-csp-reports/snz-pinger-characterisation-study- 2025-final-report.pdf](https://www.doc.govt.nz/globalassets/documents/conservation/marine-and-coastal/marine-conservation-services/reports/non-csp-reports/snz-pinger-characterisation-study-2025-final-report.pdf).
- [5] R. A. Kastelein, L. Hoek, C. A. F. de Jong och P. J. Wensveen, “The ef- fect 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 Ame- rica*, årg. 128, nr 5, s. 3211–3222, 2010. DOI: 10.1121/1.3493435.
- [6] EMODnet Bathymetry Consortium, *EMODnet Digital Bathymetry (DTM 2024)*, 2024. DOI: [https://doi.org/10.12770/cf51df64-56f9-4a99-b1aa- 36b8d7b743a1](https://doi.org/10.12770/cf51df64-56f9-4a99-b1aa-36b8d7b743a1). (hämtad 2025-10-14).
- [7] S. Tanguy, G. Jerome, P. Sylvie och R. Gilles, *CORA, Coriolis Ocean Da- taset for Reanalysis*, 2025. URL: <https://doi.org/10.17882/46219> (häm- tad 2025-10-14).

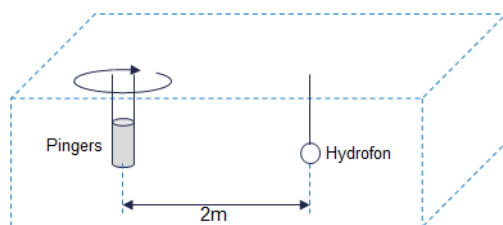
Titel/Title
Utredning av detektionsavstånd av pingers för tumlareMemo nummer/Number
FOI Memo 9236

- [8] K. V. Mackenzie, "Nine-term Equation for Sound Speed in the Oceans", *The Journal of the Acoustical Society of America*, årg. 70, nr 3, 1981.
- [9] F. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter och H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics* (AIP series in modern acoustics and signal processing). American Institute of Physics, 1994.
- [10] Y. L. Rydin, E. Alenius och F. Thörn, "An Overview of the Models in the Acoustic Ray-Tracing Code Rev3D", FOI-D-1406-SE, 2025.
- [11] R. L. Nordström, E. Lalander, I. Skog och M. Andersson, "Maximum likelihood separation of anthropogenic and wind-generated underwater noise", *The Journal of the Acoustical Society of America*, årg. 152, nr 3, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1121/10.0013887>.
- [12] R. H. Mellen, "The Thermal-Noise Limit in the Detection of Underwater Acoustic Signals", *The Journal of the Acoustical Society of America*, årg. 24, nr 5, 1952.
- [13] ISO18405, *Underwater Acoustics - Terminology*, ISO 18405-2017-04. Vernier, Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2017.
- [14] V. Trinh, L. Chen och J. Forrest, "Free-field Acoustic Source Levels from Measurements conducted in a water tank", i *Proceedings of Acoustics 2018, Adelaide, Australia*, 2018. URL: https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2018/papers/p51.pdf.
- [15] Försvarets Materielverk, *Hydroakustik och sonarteknik för marinen 2.2*. 2014.

Bilaga A Skattning av källnivå från mätning i FOI:s tanklabb

A.1 Mätuppställning

FOI:s tanklabb innefattar bland annat en 8 x 4 x 4 meter (längd x bredd x höjd) stor vattentank. Mätobjektet (pingern) sänks ner i vattnet och är anslutet till ett rotationsbord så att det kan rotera framför en kalibrerad hydrofon (Reson TC4034, SN 1514032) placerad 2 m från pingern, se figur A.1. Valet av avstånd motiveras av att tanken har kameror som möjliggör noggrann positionering av källan och hydrofonen i vattnet vid dessa positioner. Ett valbart antal pingsignaler samlas in per mätposition, med hög samplingsfrekvens (4 MHz). Signallängd samt tid mellan varje ping registreras vid varje insamling.



Figur A.1: Mätuppställning i FOI:s vattentank som har måtten 8 m x 4 m x 4 m (längd x bredd x höjd).

A.2 Mätobjekt som ingår i studien

Tre exemplar av Gul Fishtek, Vit Netguard och Röd Netshield och ett exemplar av Röd Fishtek utlånas av SLU för studien. Alla pingers mäts och sorteras enligt bredbandiga ljudtrycksnivåer vid 2 m, utan korrektion för det diffusa fältet i tanken. En viss spridning i ljudtrycksnivåer mellan olika exemplar av samma modell kan observeras, se tabell A.1. Enbart exemplar med den högsta ljudnivån ingår i analysen av källnivå på grund av begränsad tid, markerade med serienumret i fetstil i tabell A.1.

Tabell A.1: Ljudtrycksnivåer uppmätta vid 2 m för samtliga exemplar av samma pingermmodell. Exemplar i fetstil ingår i analysen av källnivå och detektionsavstånd.

Pingermmodell	ID	Bredbandig ljudtrycksnivå vid 2 m (dB re 1 μ Pa)
Gul Fishtek	SN42608	146
	SN42621	148
	SN42588	148
Röd Fishtek	SN0351	153
Vit Netguard	NG32589	148
	NG14527	144
	NG32242	148
Röd Netshield	NG21920	159
	NG21910	Icke-fungerande
	NG21956	159

A.3 Metodik för uppskattning av källnivå hos pingers baserad på mätningar i tank

Källnivån är en karakteriserande storhet hos en källa och definieras i [13], som ”det kvadratiske medelvärdet av ljudtrycksnivån på ett avstånd av 1 m från en hypotetisk punktkälla, placerad i ett (hypotetiskt) oändligt, homogent och förlustfritt medium”. Av praktiska skäl baseras uppskattningen av pingers källnivå på mätningar utförda i FOI:s tanklab. Mätmetodiken måste därför kompensera för de avvikelser från ISO-definitionen som uppstår i mätupställningen. Dessutom är en pinger en mycket specifik typ av ljudkälla med inbyggda variationer som måste tas i beaktande. Analysprocessen för att uppskatta pingers källnivå från mätningar i tanken innefattar följande steg:

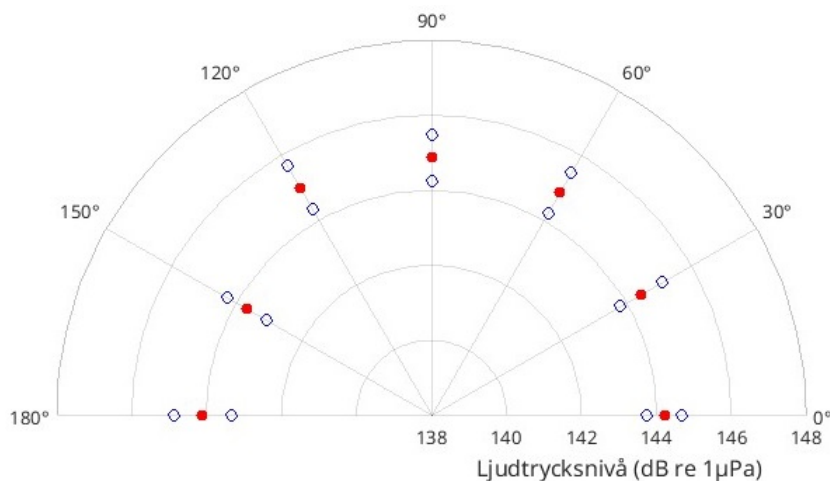
- Medelvärdesbilda variationer mellan enskilda ping.
- Beakta potentiella variationer relaterade till direktiviteten.
- Kompensera för effekten av det diffusa fältet i tanken.

A.3.1 Statistisk analys av ljudtrycksnivåer

Variationer mellan enskilda ping för en bestämd mätposition hanteras genom att beräkna ett aritmetiskt medelvärde och standardavvikelse över 35 ping. Tersbandspektrum beräknas för varje ping och statistiska värden på uppmätta ljudtrycksnivåer (medel och standardavvikelse) skattas i varje tersband för den mätpositionen.

A.3.2 Statistisk analys av variationer relaterade till direktivitet

För att minimera direktivitetens inverkan genomförs en rumslig medelvärdesbildning genom att pingern roteras framför mäthydrofonen i såväl vertikal som horisontell riktning. Figur A.2 visar de typiska variationerna av den bredbandiga ljudtrycksnivån över olika vinklar för Gul Fishtek i vertikal riktning framför hydrofonen.



Figur A.2: Vinkelvariation i ljudtrycksnivå, medel i rött och standardavvikelse i blått, för vertikalt orienterad Gul Fishtek.

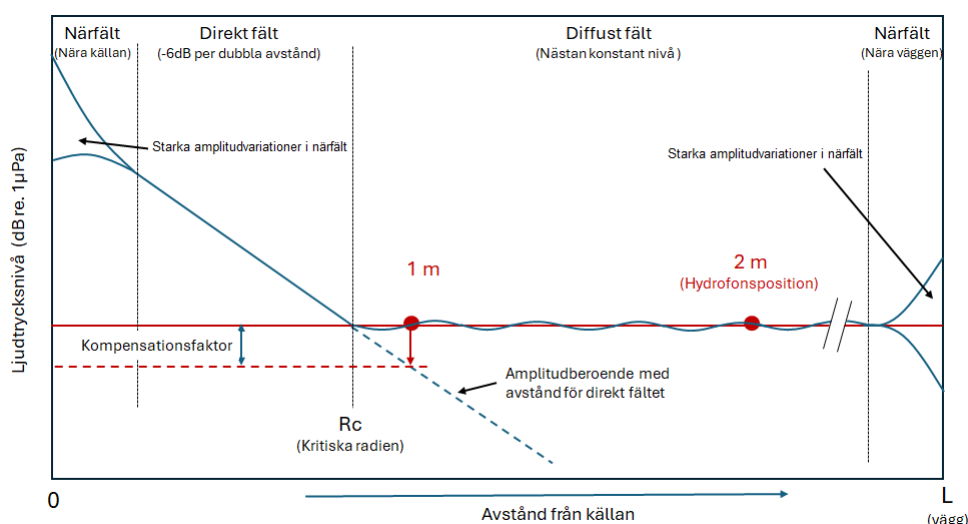
Standardavvikelsen beräknad över samtliga riktningar uppgår till 1 dB. Detta motiverar användningen av medelvärdet för den bredbandiga ljudtrycksnivån (144 dB re 1 μ Pa) och ljudtrycksnivån per tersband, för uppskattningen av källnivån.

A.3.3 Uppskattning av källnivå från mätningar i ett diffust fält

Vid mätningar i en tank uppfylls inte kravet på att ljudkällan ska befinna sig i ett oändligt och förlustfritt medium. Dämpningen i tanken uppskattas till 0,023 dB/m vid 200 kHz och bedöms därför vara försumbar. Däremot är pinglängden för samtliga pingers av samma storleksordning som tankens reverberationstid, vilket innebär att mätningen utförs i ett diffust fält där reflektioner mot väggarna blandas med bidraget av den direkta vägen. Detta leder till en relativt konstant amplitud efter ett visst avstånd från källan, vilket i sin tur innebär att effekten av det diffusa fältet måste kompenseras för.

I [14] presenteras en metod för att beräkna källnivån hos en undervattensljudkälla i en tank, baserad på principer från luftakustik. Figur A.3 visar hur ljudtrycksnivån varierar med avståndet från källan i en tank. Metoden utgår från tankens reverberationstid för att beräkna avståndet från källan där det direkta ljudfältet har samma amplitud som det diffusa ljudfältet i tanken, den så kallade kritiska radien, R_c . Om faktisk mätposition (2 m) och önskad mätposition (1 m för källnivå) är placerad bortom R_c kan en kompensering för effekten av det diffusa fältet härledas genom ett enkelt geometriskt resonemang. Förhållandet mellan ljudtrycket på 1 m avstånd (det vill säga källnivån) och det uppmätta ljudtrycket i det diffusa fältet är då:

$$L_p(1m) = L_p(R > R_c) + 20 \log \left(\frac{R_c}{1} \right).$$



Figur A.3: Förhållandet mellan direkt (streckade linjen) och diffust fält (heldragna linjen) i en vattentank. Det relativa avståndet mellan önskad mätposition (1 m för källstyrka) och den kritiska radien bestämmer kompensationsfaktorn för diffust fält. Från [14].

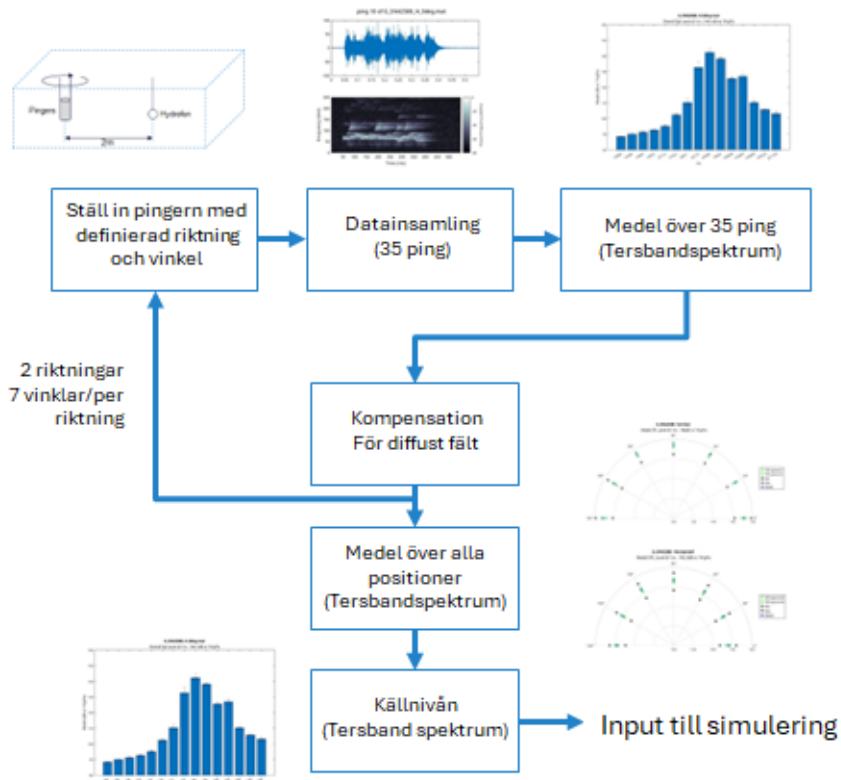
Den kritiska radien, R_c , är relaterad till efterklangstiden i vattentanken, T_{60} genom:

$$R_c = \sqrt{\frac{55,26}{16\pi} \frac{V}{cT_{60}}}$$

där V är tankvolymen och c är ljudhastigheten i vatten. Efterklangstiden i vattentanken uppmäts till 0,16 s vid 50 kHz, 0,15 s vid 100 kHz och 0,14 s vid 150 kHz, vilket leder till $R_c = 0,74 \pm 0,02$ m och en kompensationsfaktor på $-2,6 \pm 0,2$ dB inom frekvensintervallet 50-150 kHz. En kompensationsfaktor på $-2,6$ dB används för att uppskatta källstyrkan från mätningar i tanken.

A.3.4 Arbetsflöde för dataanalys

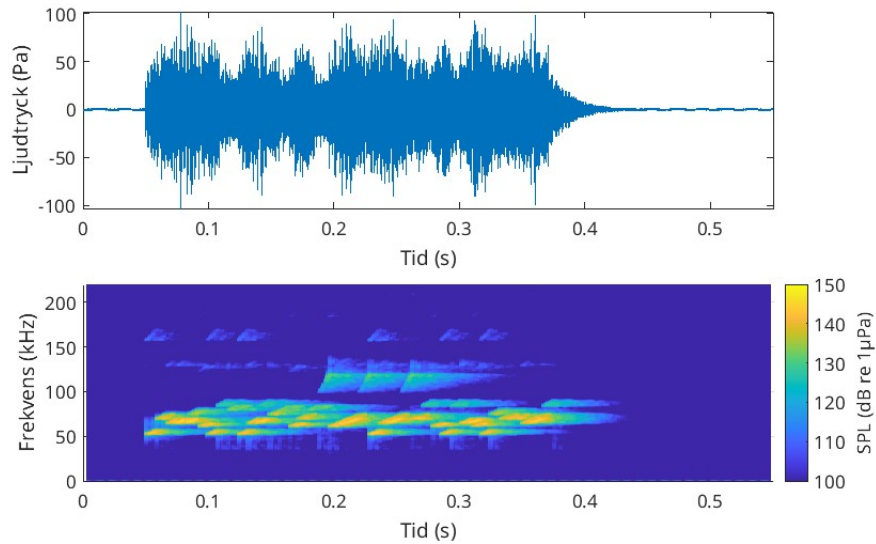
En sammanfattning av arbetsprocessen för datainsamling och analys illustreras i figur A.4. För en given position, d.v.s. för en given riktning och vinkel enligt beskrivningen i A.3.2, av pingern samlas 35 ping in, och beräknas slutligen till ett medelvärdesbildat tersbandspektrum över alla ping. Detta spektrum kompenseras sedan för effekten av det diffusa fältet. Slutligen beräknas källnivån i form av ett tersbandspektrum genom ett medelvärde över alla riktningar och vinklar. Detta spektrum utgör ingångsdata till simuleringen av utbredningen.



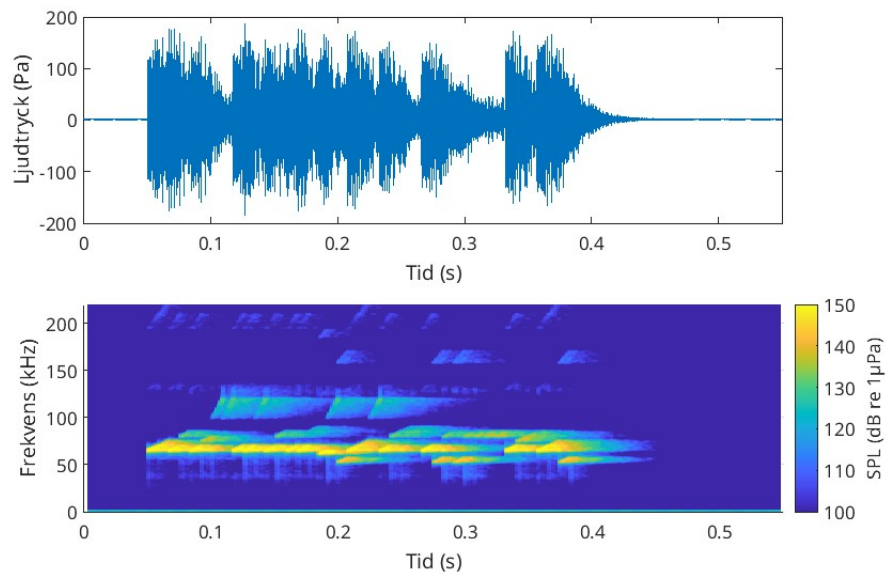
Figur A.4: Beskrivning av processen för uppskattning av källnivå från mätning i tanken.

A.4 Signalkaraktär för alla pingers i studien

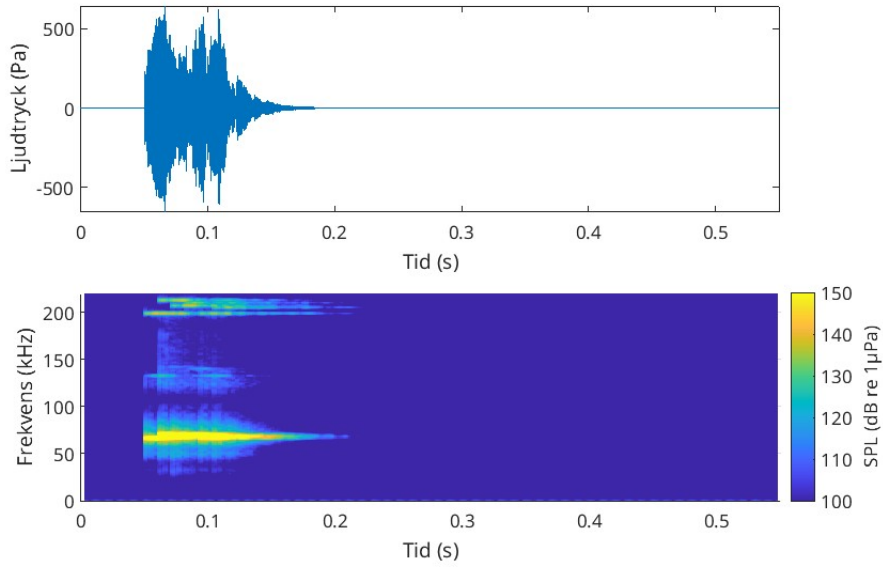
Nedan visas exempel på uppmätta tidssignaler och spektrogram från de fyra studerade pingermodellerna.

Titel/Title
Utredning av detektionsavstånd av pingers för tumlareMemo nummer/Number
FOI Memo 9236

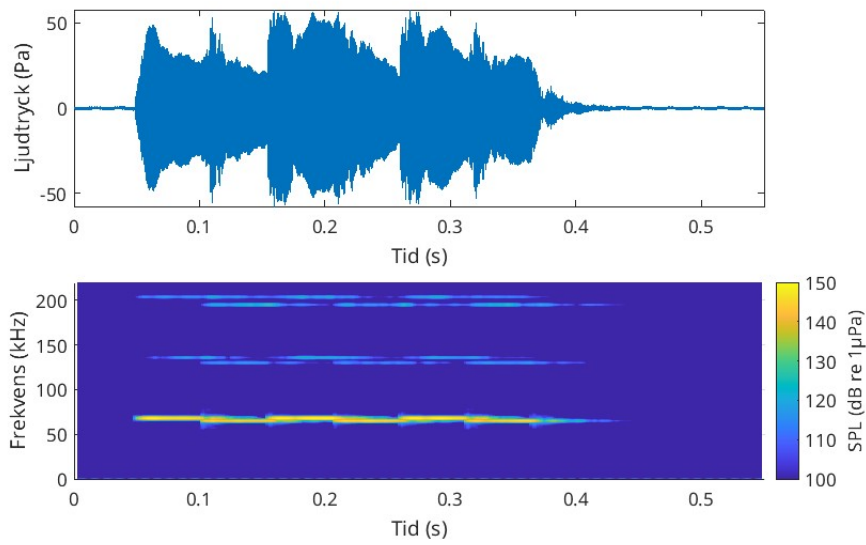
Figur A.5: Ping från en Gul Fishtek: Överst visas tidsignalen av ljudtrycket, och nerst spektrogrammet.



Figur A.6: Ping från en Röd Fishtek: Överst visas tidsignalen av ljudtrycket, och nerst spektrogrammet.



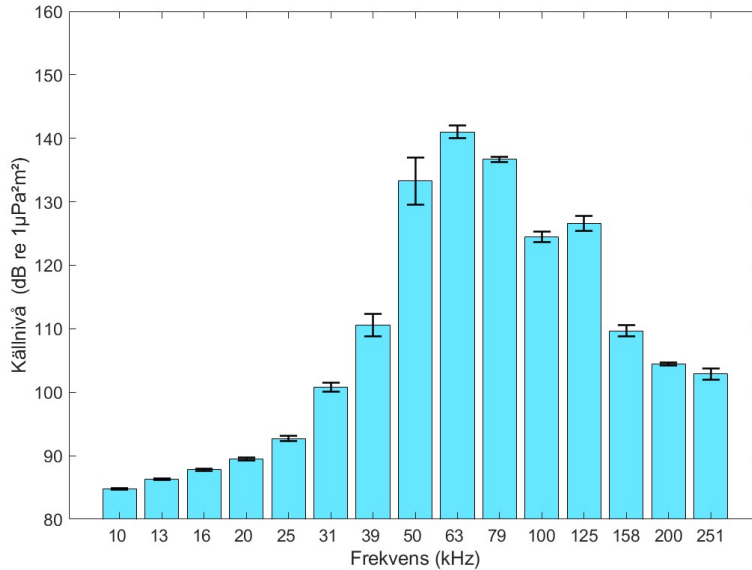
Figur A.7: Ping från en Röd Netshield: Överst visas tidsignalen av ljudtrycket, och nederst spektrogrammet.



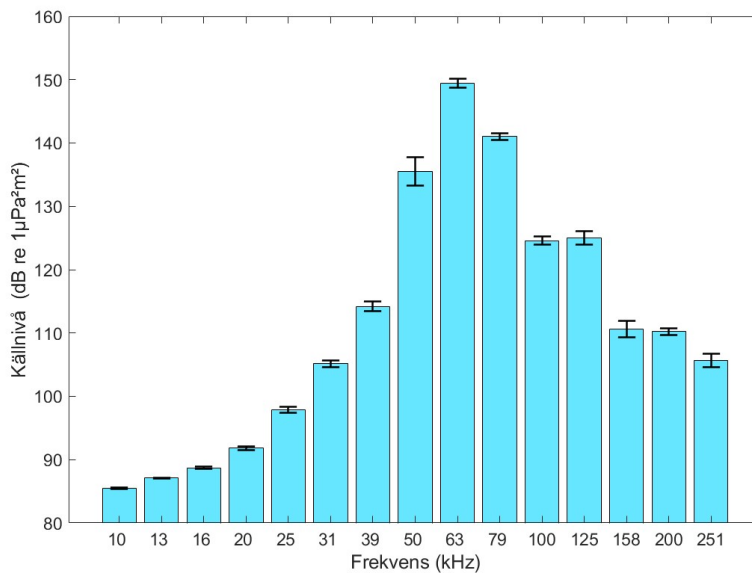
Figur A.8: Ping från en Vit Netguard: Överst visas tidsignalen av ljudtrycket, och nederst spektrogrammet.

A.5 Källnivå per tersband

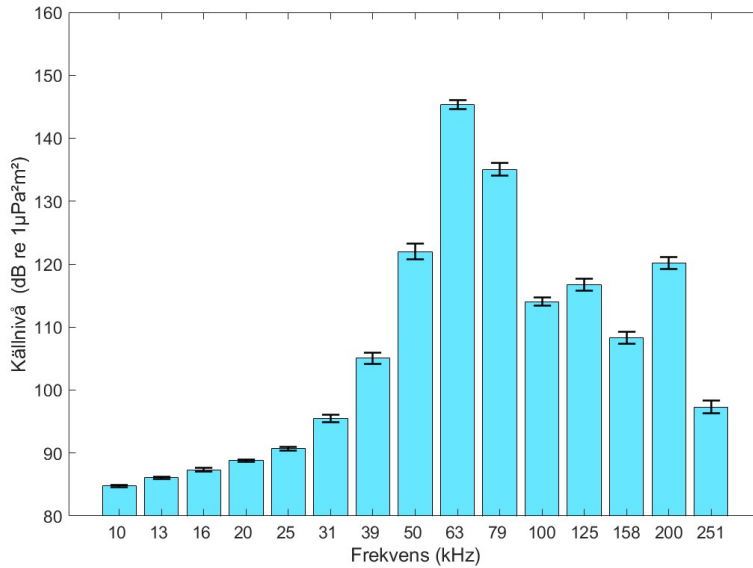
Nedan visas uppmätt källnivåer för de fyra studerade pingermodellerna.



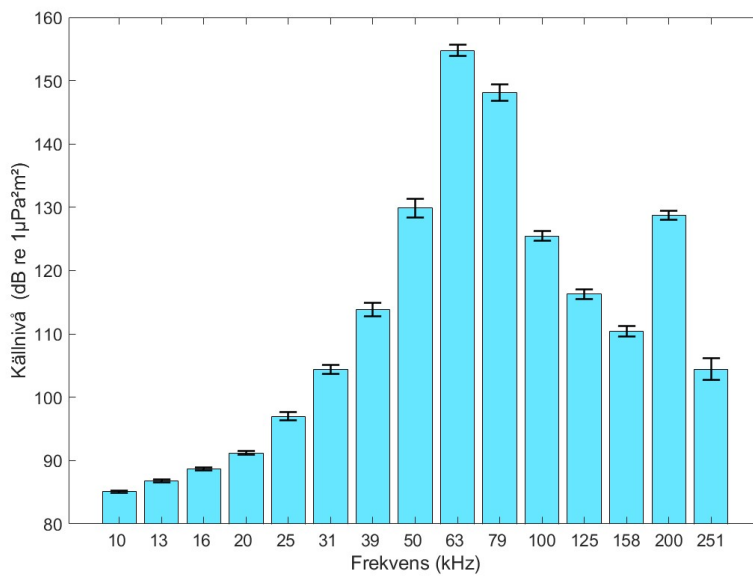
Figur A.9: Källnivå i tersband för Gul Fishtek. Staplarna motsvarar det aritmetiska medelvärdet och strecken standardavvikelsen över 35 ping. Den bredbandiga källnivån är 143 dB re. 1 μPa²m².



Figur A.10: Källnivå i tersband för Röd Fishtek. Staplarna motsvarar det aritmetiska medelvärdet och strecken standardavvikelsen över 35 ping. Den bredbandiga källnivån är 150 dB re. 1 μPa²m².



Figur A.11: Källnivå i tersband för Vit Netguard. Staplarna motsvarar det aritmetiska medelvärdet och strecken standardavvikelsen över 35 ping. Den bredbandiga källnivån är 145 dB re. 1 μPa²m².



Figur A.12: Källnivå i tersband för Röd Netshield. Staplarna motsvarar det aritmetiska medelvärdet och strecken standardavvikelsen över 35 ping. Den bredbandiga källnivån är 156 dB re. 1 μPa²m².

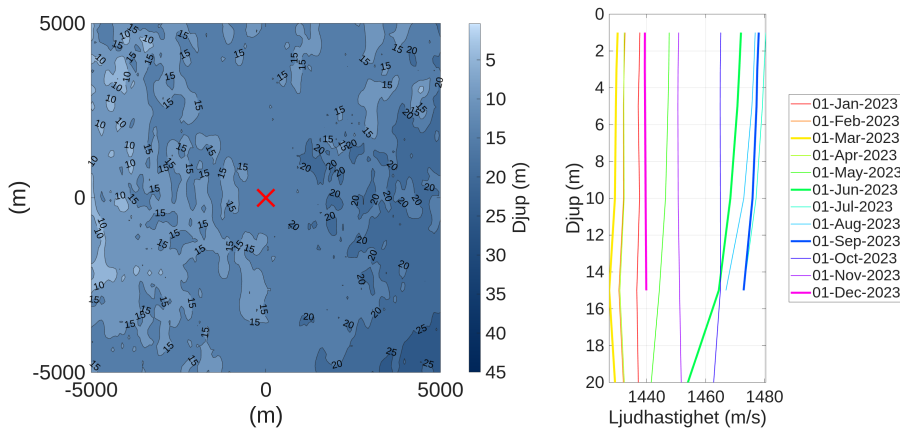
Bilaga B Miljödata för beräkning av utbredningsförluster

I denna bilaga presenteras miljödata i form av akustiska bottenparametrar, ljudhastighetsprofiler och batymetri för samtliga typmiljöer. De akustiska bottenparametrarna, se tabell B.1, ansätts utifrån tabell 1.3 i [9] för att efterlikna områdena som beskrivs i tabell 3.1. Batymetrin och ljudhastighetsprofilerna hämtas från öppna dataset ([6] och [7]) och används för att uppskatta utbredningsförlusten för några valda bäringar och månader. De visas i figur B.1-B.4.

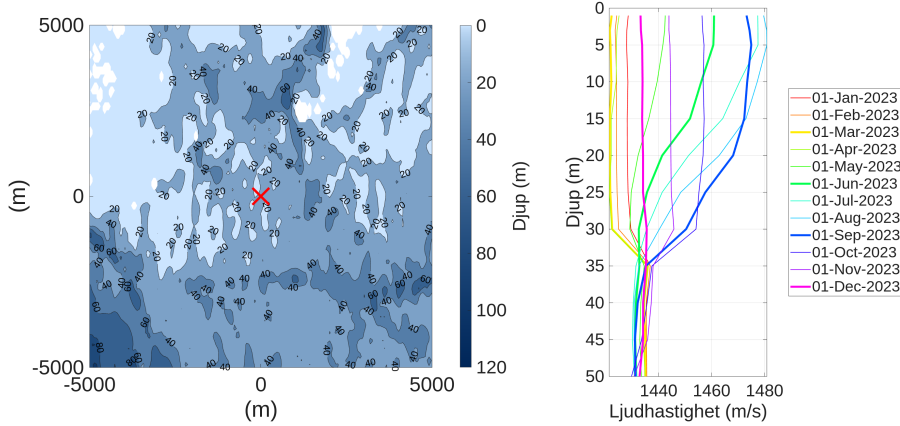
Notera att data för ljudhastighetsprofilerna finns i ett rutnät med en upplösning på ca 30 km, vilket innebär att datan inte hämtas exakt vid den angivna koordinaten. Datat hämtas istället från den närmaste punkten i rutnätet, vilket medför att det exakta djupet vid positionen inte stämmer överens med djupet i profilen.

Tabell B.1: Akustiska bottenparametrar för de olika botten typerna som ansätts utifrån tabell 1.3 i [9].

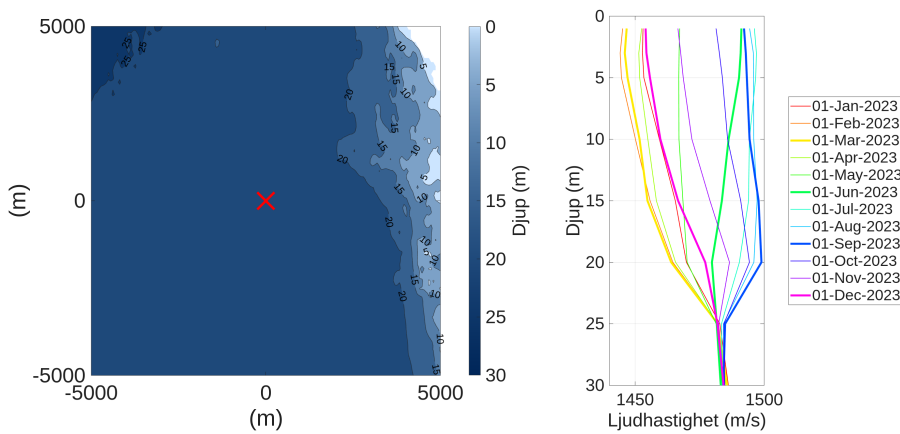
	Morän	Kristallin berggrund	Sand	Glacial lera
Ljudhastighet (m/s)	1950	5250	1650	1575
Dämpning (dB/λ)	0,4	0,1	1,0	1,0
Densitet (kg/m ³)	2100	2700	1900	1700
Skjuvvågshastighet (m/s)	600	2500	200	150
Skjuvvågsdämpning (dB/λ)	1,0	0,2	2,5	1,5



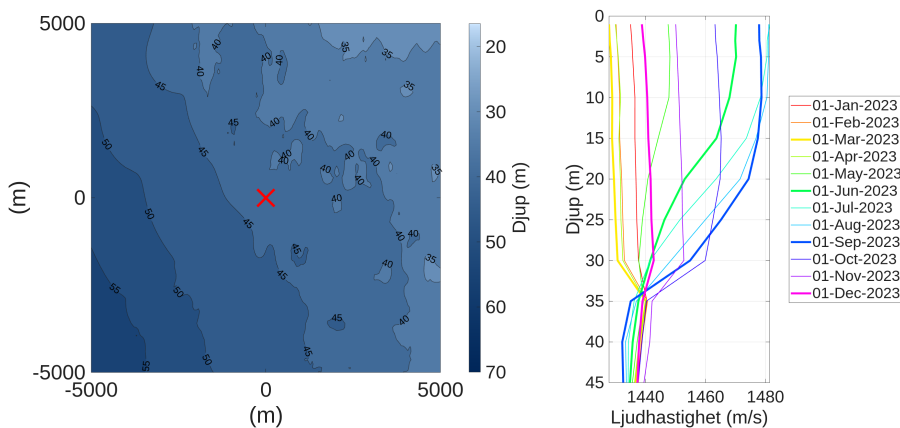
Figur B.1: Batymetri (vänster) och ljudhastighetsprofiler (höger) vid typmiljö 1 (Hanöbukten). Det röda krysset anger den valda representativa positionen som presenteras i figur 3.1.



Figur B.2: Batymetri (vänster) och ljudhastighetsprofiler (höger) vid typmiljö 2 (norra Östersjön). Det röda krysset anger den valda representativa positionen som presenteras i figur 3.1.



Figur B.3: Batymetri (vänster) och ljudhastighetsprofiler (höger) vid typmiljö 3 (södra Kattegatt). Det röda krysset anger den valda representativa positionen som presenteras i figur 3.1.



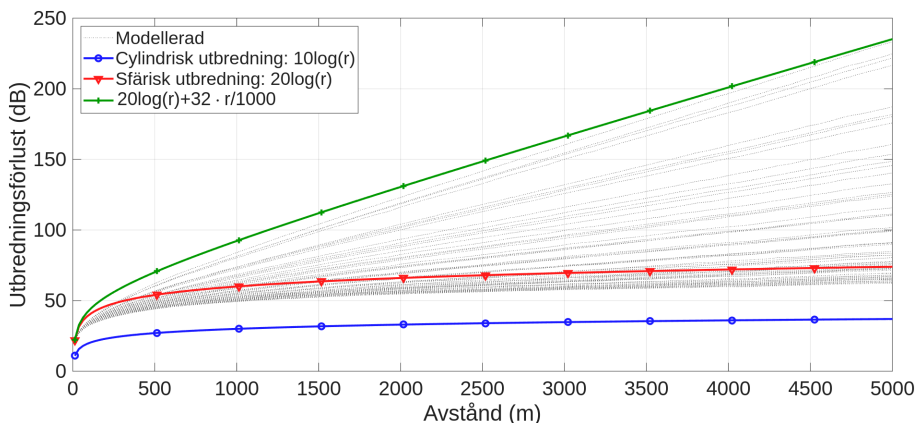
Figur B.4: Batymetri (vänster) och ljudhastighetsprofiler (höger) vid typmiljö 4 (södra Östersjön). Det röda krysset anger den valda representativa positionen som presenteras i figur 3.1.

Bilaga C Utbredningsförlust

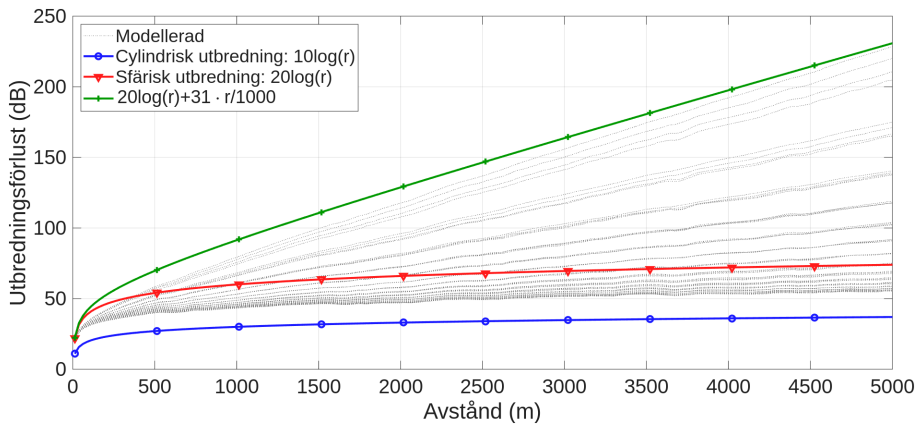
Den modellerade utbredningsförlusten, i form av medianvärdet över djup, bäring och salthalt, har beräknats per typmiljö, månad och frekvens. I figur C.1-C.4 presenteras hur medianvärdet av den modellerade utbredningsförlusten ökar med avstånd. I figuren visas en bild per typmiljö, och en linje per månad och frekvens. Utbredningsförlusten beräknad med den förenklade modellen i ekvation (1) visas även för några olika val av A och α .

För samtliga miljöer varierar utbredningsförlusten kraftigt över olika frekvenser och månader. Den främsta variationen ses över frekvens där höga frekvenser utsätts för en mycket högre absorption och därmed får en mycket högre utbredningsförlust. Den högsta absorptionen (för den högsta frekvensen och salthalten) visas i grönt för varje typmiljö. Det går att se att utbredningsförlusten för varje typmiljö tycks begränsas av den.

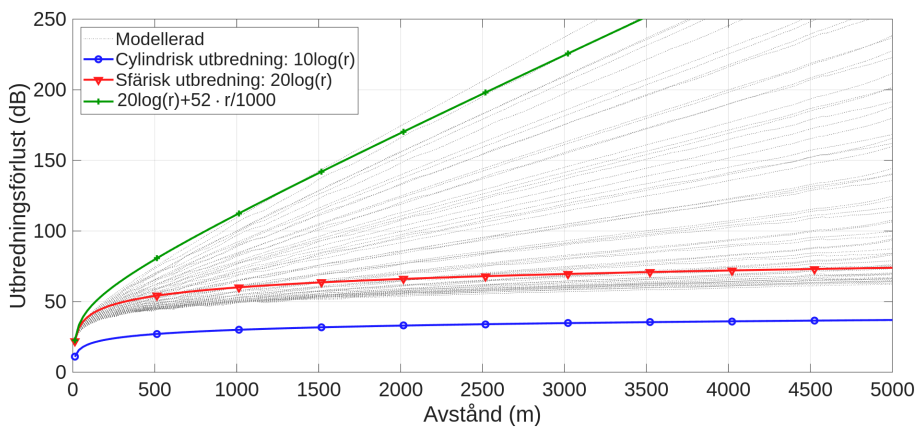
För de lägre frekvenserna, som svarar mot de lägsta förlusterna, ses en skillnad mellan olika typmiljöer, där typmiljö 2 har lägst förlust. Detta beror på att typmiljö 2 har en hårdare botten vilket gör att mindre ljud absorberas av botten än för de mjukare bottenarna.



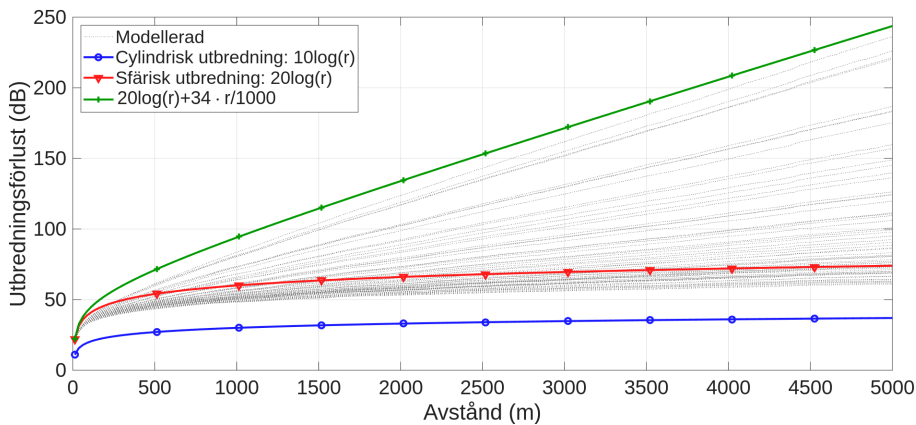
Figur C.1: Jämförelse av den modellerade utbredningsförlusten (gråa linjer) och enkla modeller för typmiljö 1 (Hanöbukten). För den modellerade datan används medianvärdet över djup, bäring och salthalt för varje månad och frekvens.



Figur C.2: Jämförelse av den modellerade utbredningsförlusten och enkla modeller för typmiljö 2 (norra Östersjön). För den modellerade datan används medianvärdet över djup, bäring och salthalt för varje månad och frekvens.



Figur C.3: Jämförelse av den modellerade utbredningsförlusten och enkla modeller för typmiljö 3 (södra Kattegatt). För den modellerade datan används medianvärdet över djup, bäring och salthalt för varje månad och frekvens.



Figur C.4: Jämförelse av den modellerade utbredningsförlusten och enkla modeller för typmiljö 4 (södra Östersjön). För den modellerade datan används medianvärdet över djup, bäring och salthalt för varje månad och frekvens.

Bilaga D Sonarekvationen

För att avgöra hur långt en ljudkälla går att detektera behöver flera delar kopplas ihop. En vanlig förenkling är att använda sonarekvationen som beskriver hur olika ljudkällor upptäcks i vatten [15]. Sonarekvationen för passiv spaning, som är relevant i detta fall för pingers och mottagarhydrofoner, beskrivs enligt ekvation (4).

$$SE = SL - TL - NL + DI - DT \quad (4)$$

Här beskriver SE signalöverskott, SL källstyrka, TL utbredningsförlust, NL bakgrundsbrus, DI direktivindex och DT detektionströskel. Ett positivt signalöverskott innebär att ljudkällan går att urskilja från bakgrunden. Det avstånd där det beräknade signalöverskottet är lika med noll kallas för detektionsavstånd och motsvarar det kortaste avståndet där källan går att detektera av en viss mottagare. I denna studie antas både pinger och mottagare vara omnidirektionella ($DI = 0$) och detektionströskeln är satt till 0 dB. För mer avancerade hydrofonsystem används ofta lobbildning vilket ger ett nollskildt direktivindex och längre detektionsavstånd.

Bilaga E Mottagna ljudnivåer och detektionsavstånd

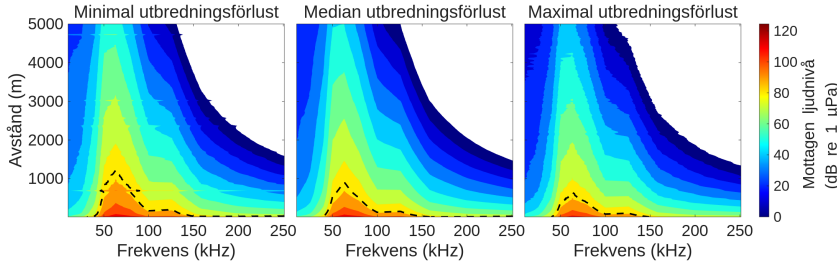
Nedan presenteras mottagna ljudnivåer för samtliga pingers, typmiljöer och årstider som omfattas av studien. Nivåerna beräknas genom att dra bort ljudutbredningsförlusten från källstyrkan ($SL - TL$). Den mottagna ljudnivån kan därefter användas för att exempelvis beräkna signalöverskottet för ett specifikt mät-system eller sonar, alternativt för att frekvensväga signalen och beräkna den ljudnivån som tumlarna uppfattar.

För att uppskatta ljudnivån används de tre olika ljudutbredningsförlusterna som beskrivs i avsnitt 3.2, med minimalt, median och maximalt värde över mottagardjup, bäring och salthalt. Samtliga fall anses vara realistiska för platsen och beror till stor del på var i området mottagaren befinner sig.

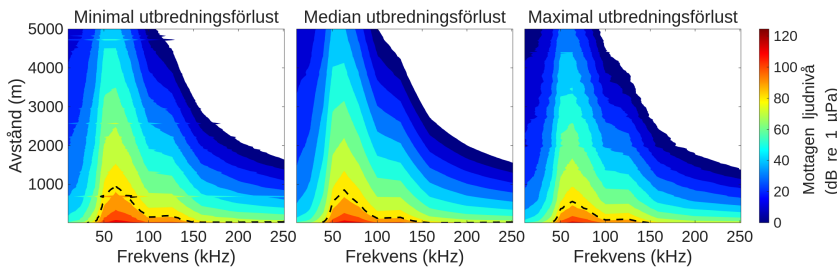
Utöver de uppskattade ljudnivåerna presenteras även en svart linje som motsvarar det avstånd där ljudnivån överstiger det uppmätta elektroniska bruset från hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF, där

$$SL - TL - NL = 0 \text{ dB}. \quad (5)$$

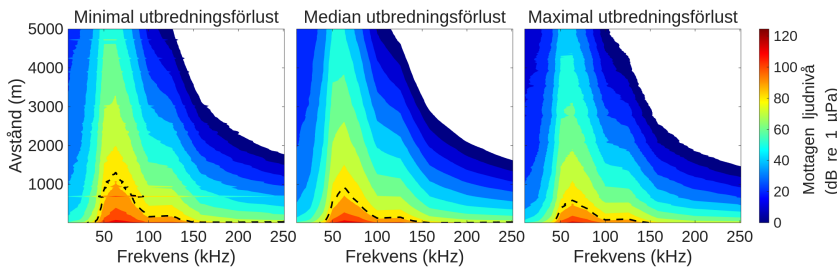
E.1 Gul Fishtek



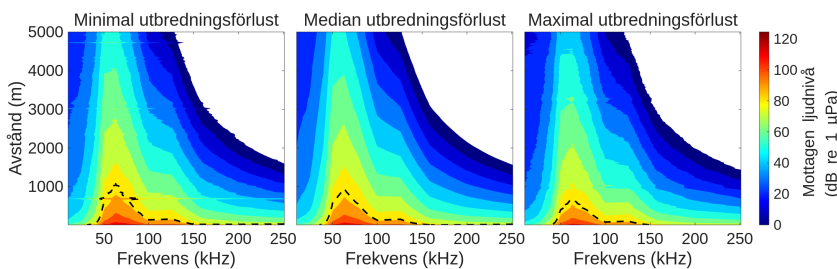
Figur E.1: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 1 (Hanöbukten), månad 3, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



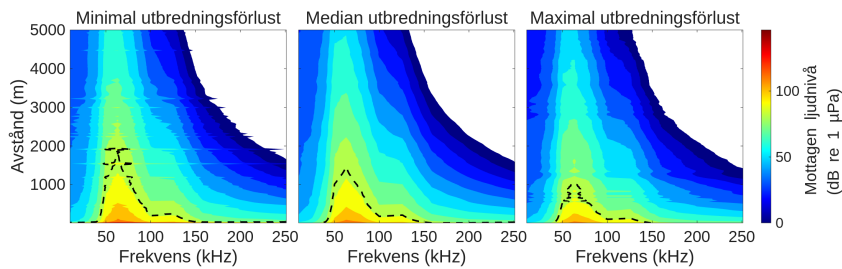
Figur E.2: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 1 (Hanöbukten), månad 6, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



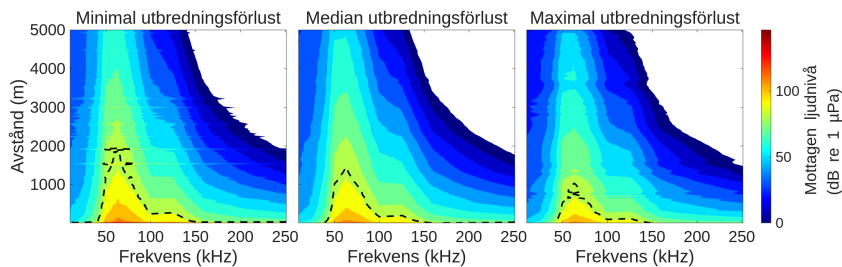
Figur E.3: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 1 (Hanöbukten), månad 9, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



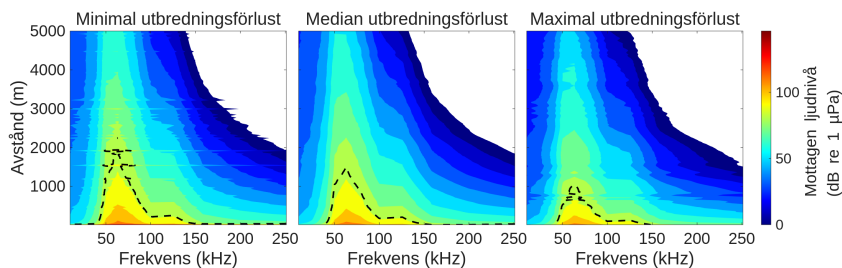
Figur E.4: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 1 (Hanöbukten), månad 12, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



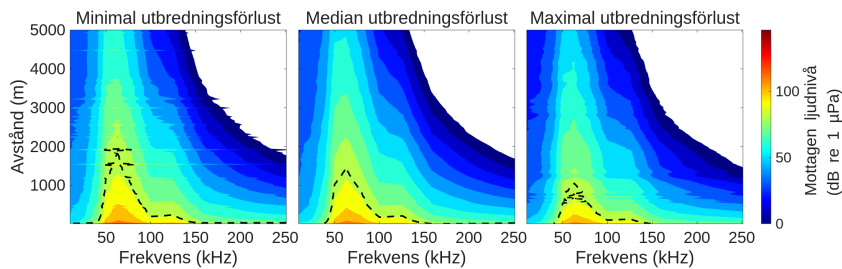
Figur E.5: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 2 (norra Östersjön), månad 3, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



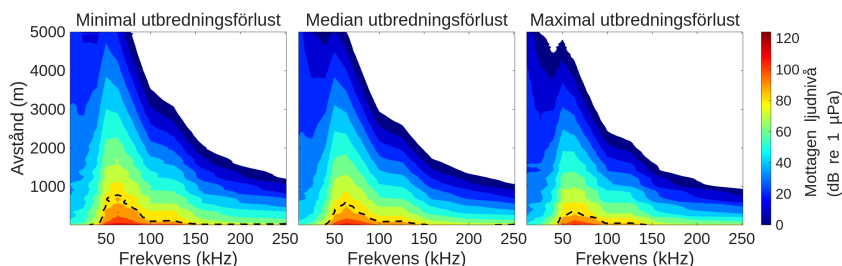
Figur E.6: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 2 (norra Östersjön), månad 6, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



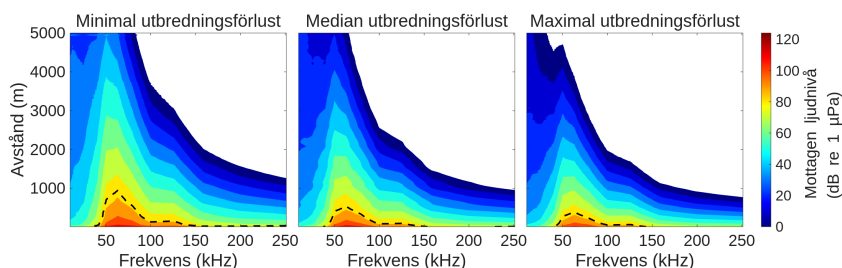
Figur E.7: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 2 (norra Östersjön), månad 9, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



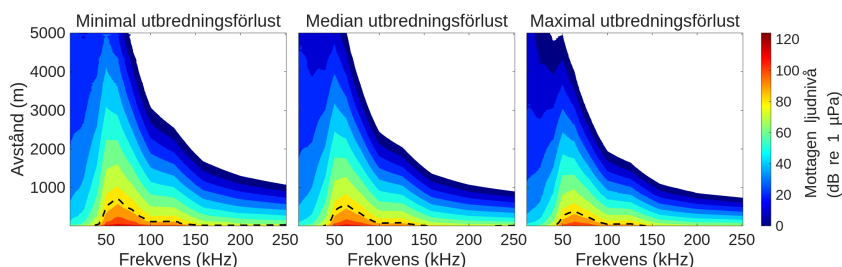
Figur E.8: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 2 (norra Östersjön), månad 12, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



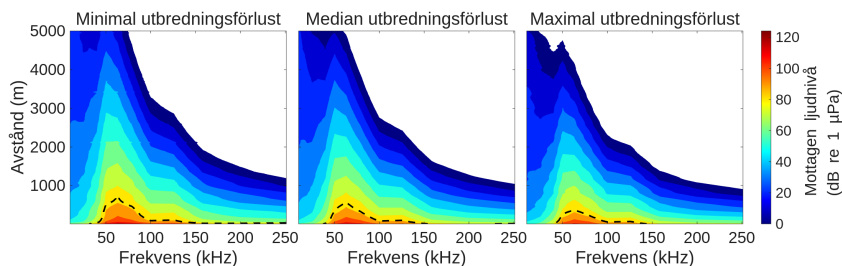
Figur E.9: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 3 (södra Kattegatt), månad 3, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



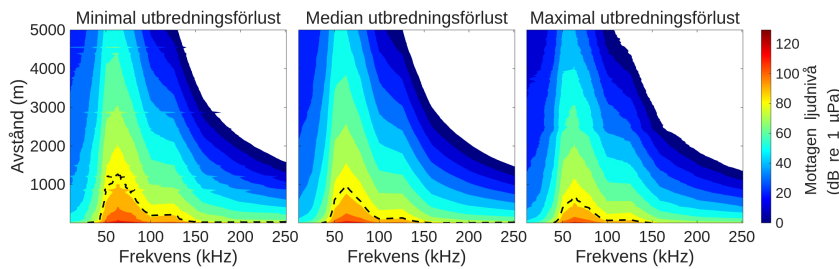
Figur E.10: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 3 (södra Kattegatt), månad 6, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



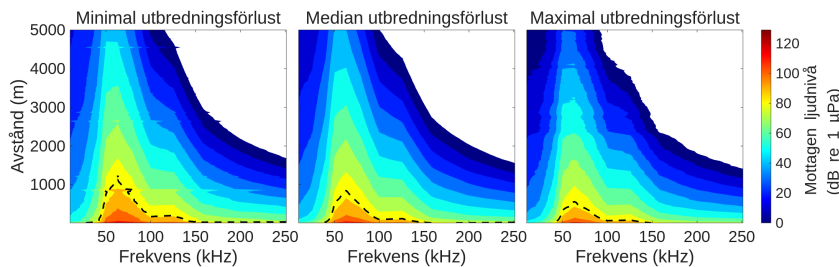
Figur E.11: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 3 (södra Kattegatt), månad 9, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



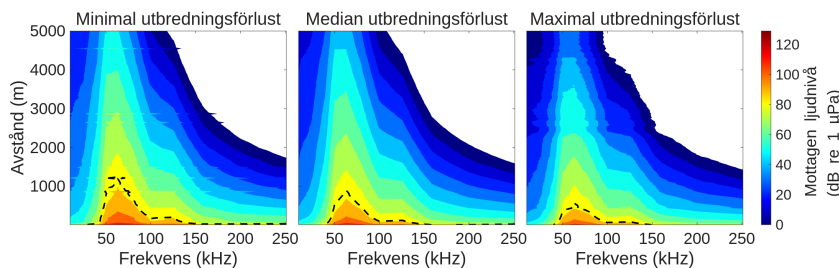
Figur E.12: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 3 (södra Kattegatt), månad 12, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



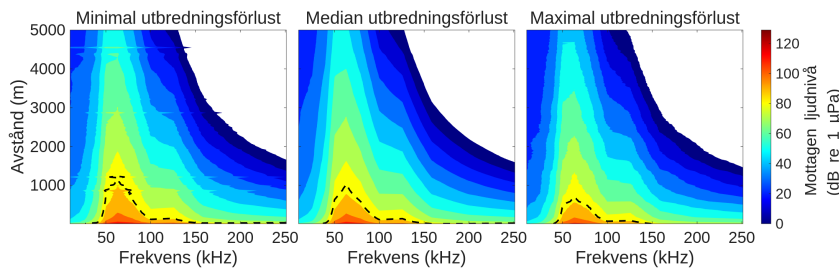
Figur E.13: Uppskattad ljudnivå för tympilj 4 (södra Östersjön), månad 3, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



Figur E.14: Uppskattad ljudnivå för tympilj 4 (södra Östersjön), månad 6, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.

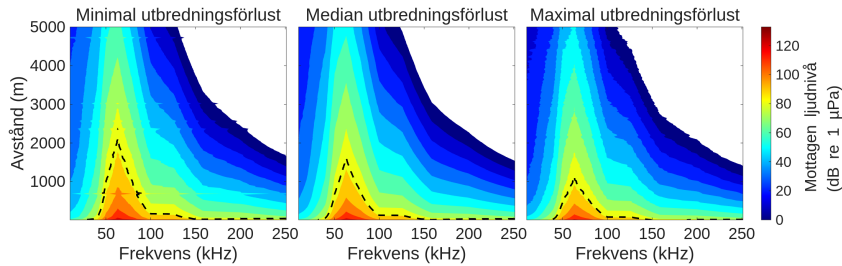


Figur E.15: Uppskattad ljudnivå för tympilj 4 (södra Östersjön), månad 9, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.

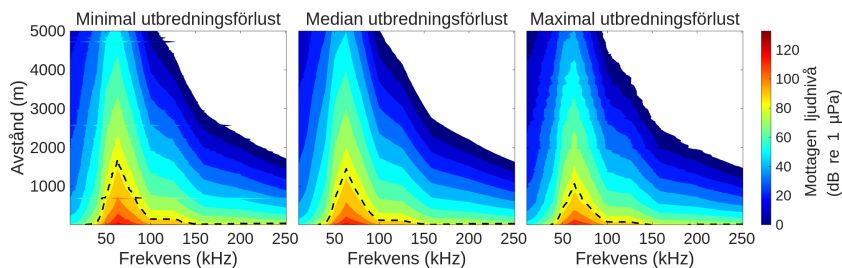


Figur E.16: Uppskattad ljudnivå för tympilj 4 (södra Östersjön), månad 12, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.

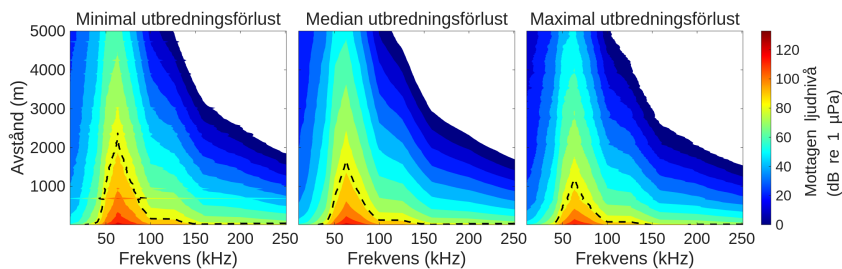
E.2 Röd Fishtek



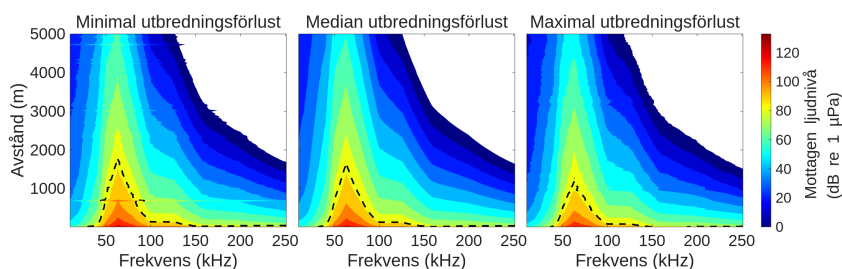
Figur E.17: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 1 (Hanöbukten), månad 3, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



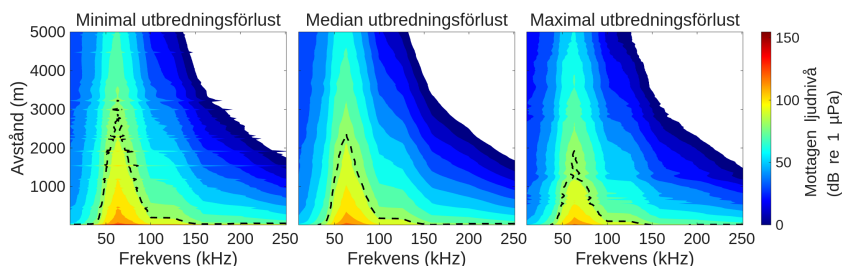
Figur E.18: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 1 (Hanöbukten), månad 6, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



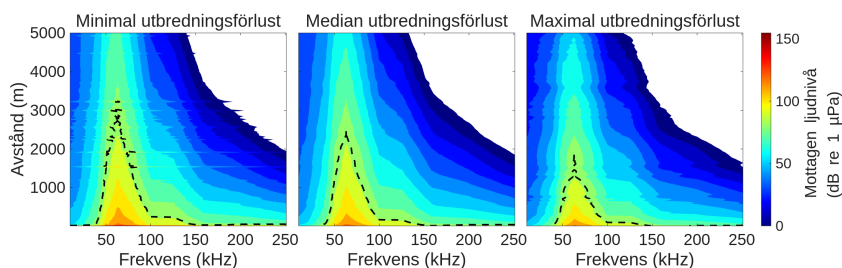
Figur E.19: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 1 (Hanöbukten), månad 9, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



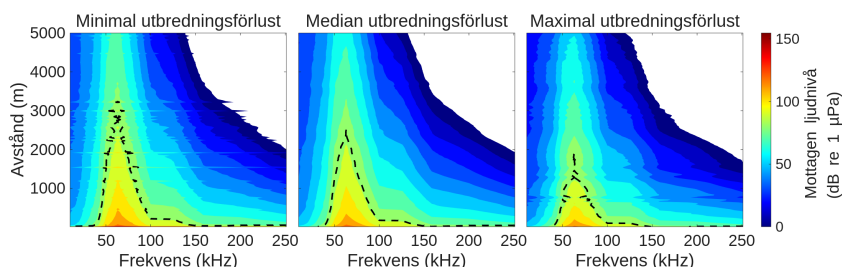
Figur E.20: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 1 (Hanöbukten), månad 12, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



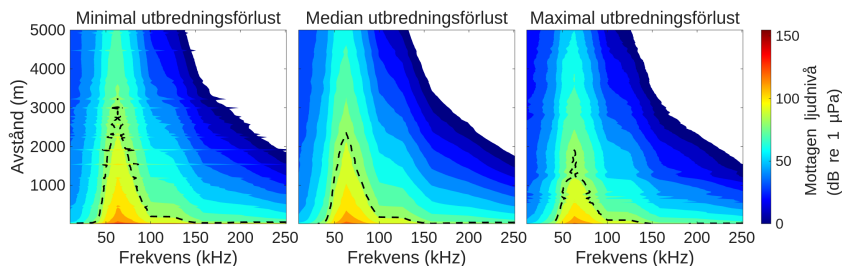
Figur E.21: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 2 (norra Östersjön), månad 3, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



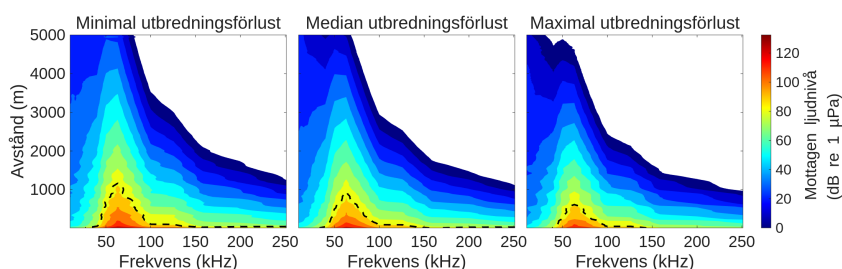
Figur E.22: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 2 (norra Östersjön), månad 6, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



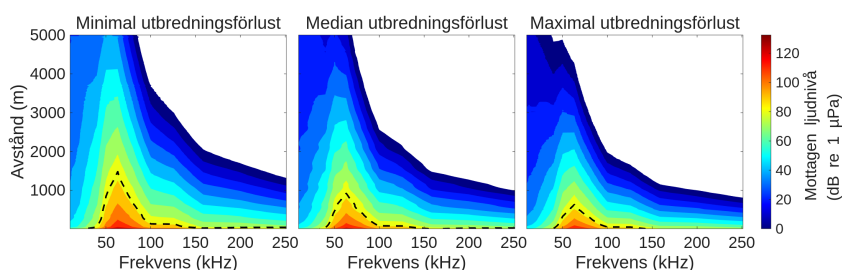
Figur E.23: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 2 (norra Östersjön), månad 9, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



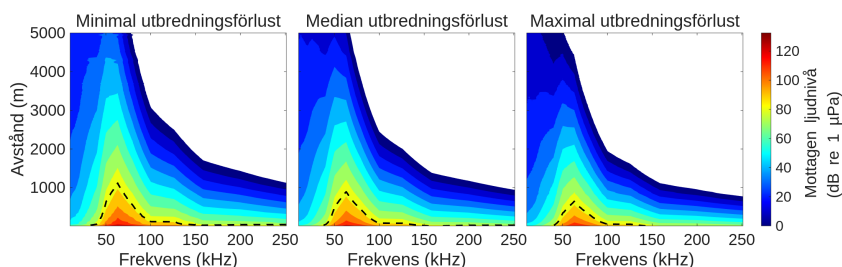
Figur E.24: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 2 (norra Östersjön), månad 12, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



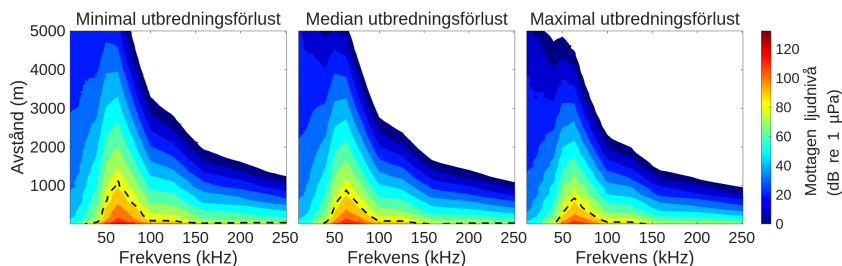
Figur E.25: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 3 (södra Kattegatt), månad 3, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



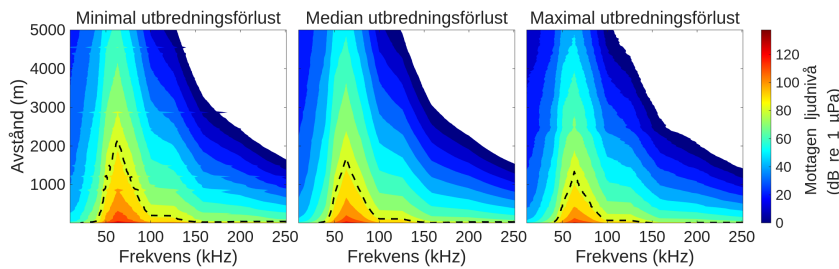
Figur E.26: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 3 (södra Kattegatt), månad 6, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



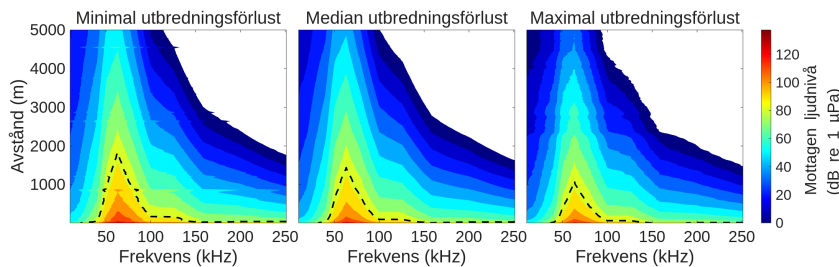
Figur E.27: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 3 (södra Kattegatt), månad 9, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



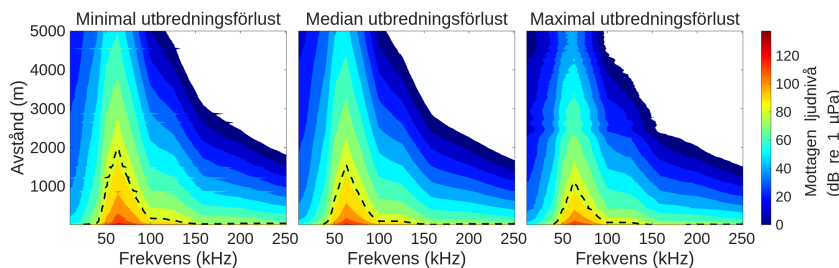
Figur E.28: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 3 (södra Kattegatt), månad 12, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



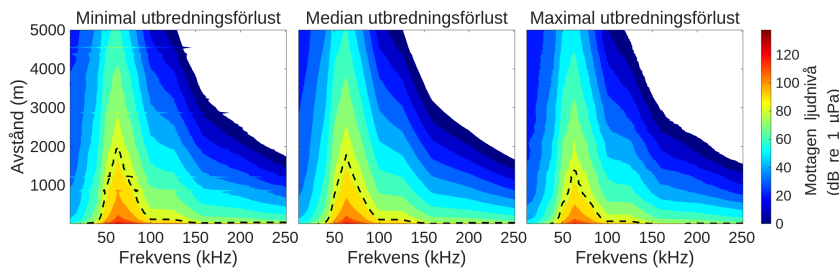
Figur E.29: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 4 (södra Östersjön), månad 3, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



Figur E.30: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 4 (södra Östersjön), månad 6, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.

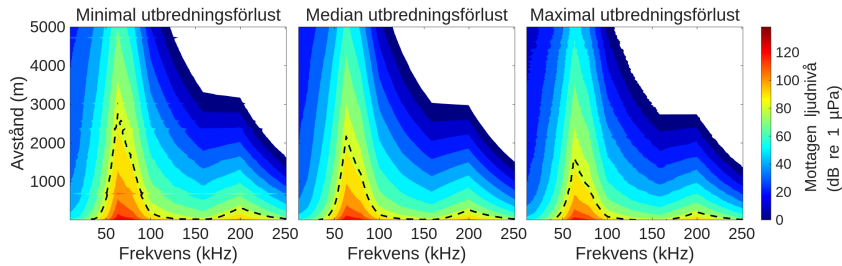


Figur E.31: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 4 (södra Östersjön), månad 9, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.

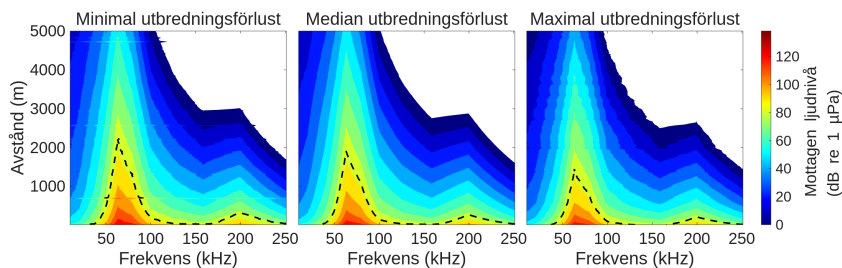


Figur E.32: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 4 (södra Östersjön), månad 12, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.

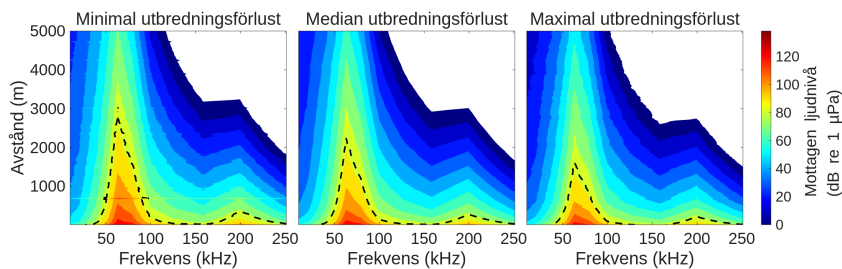
E.3 Röd Netshield



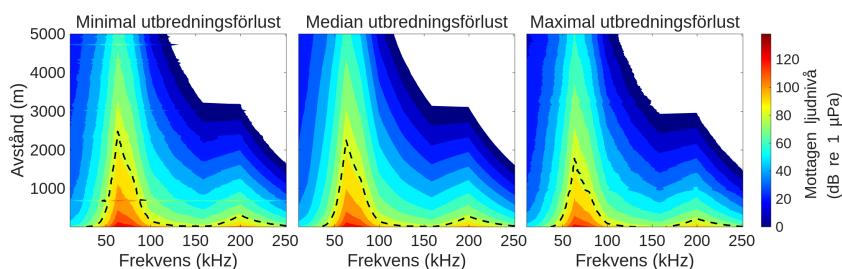
Figur E.33: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 1 (Hanöbukten), månad 3, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



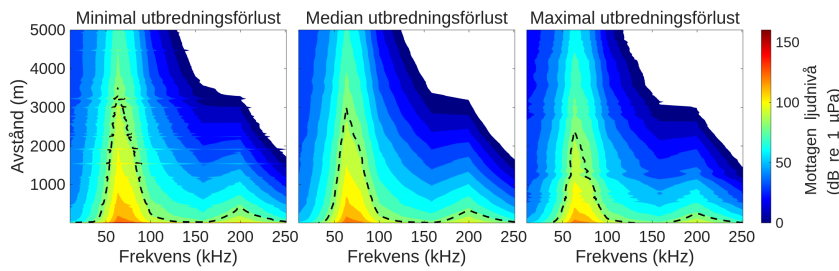
Figur E.34: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 1 (Hanöbukten), månad 6, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



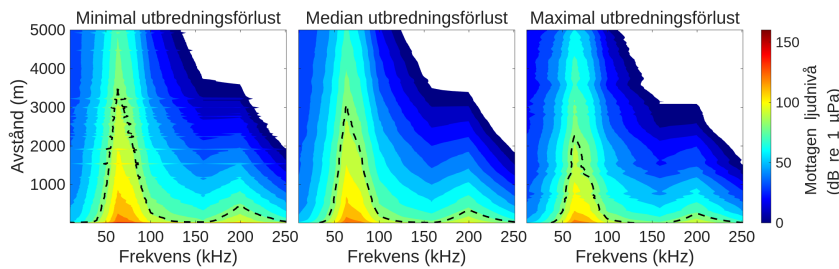
Figur E.35: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 1 (Hanöbukten), månad 9, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



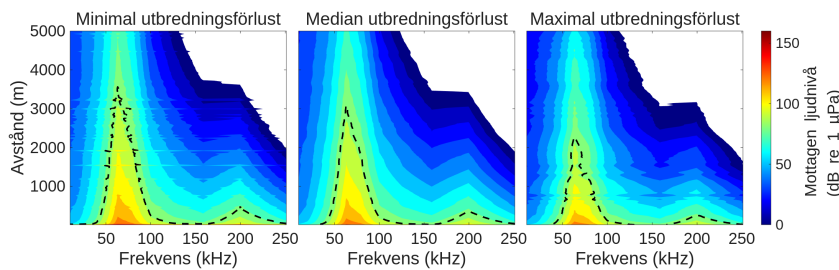
Figur E.36: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 1 (Hanöbukten), månad 12, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



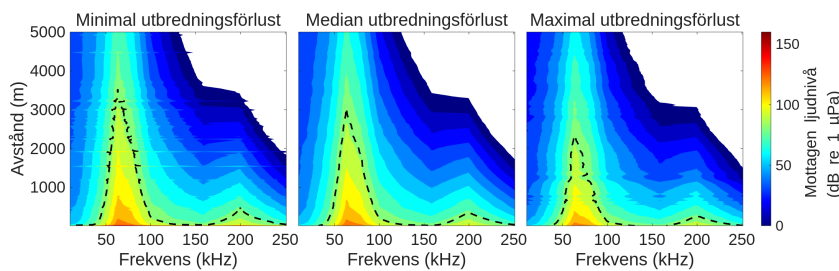
Figur E.37: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 2 (norra Östersjön), månad 3, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



Figur E.38: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 2 (norra Östersjön), månad 6, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



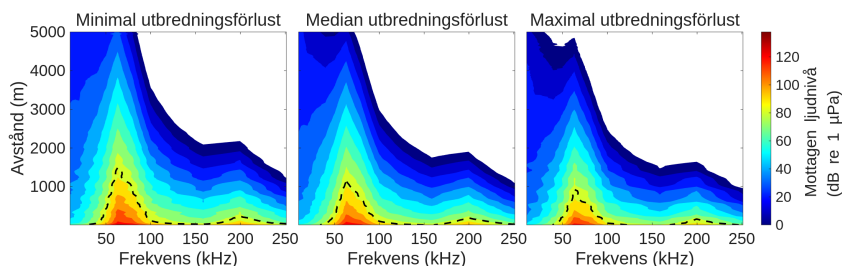
Figur E.39: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 2 (norra Östersjön), månad 9, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



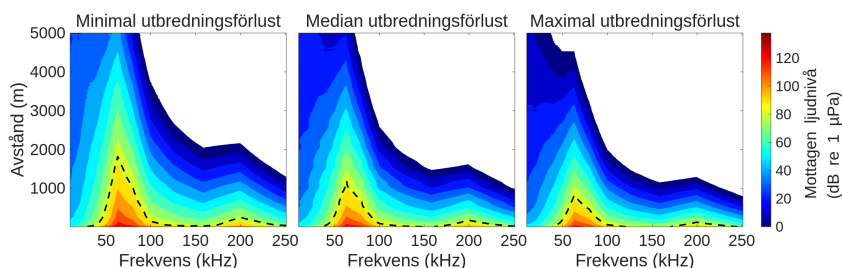
Figur E.40: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 2 (norra Östersjön), månad 12, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.

Titel/Title
Utredning av detektionsavstånd av pingers för tumlare

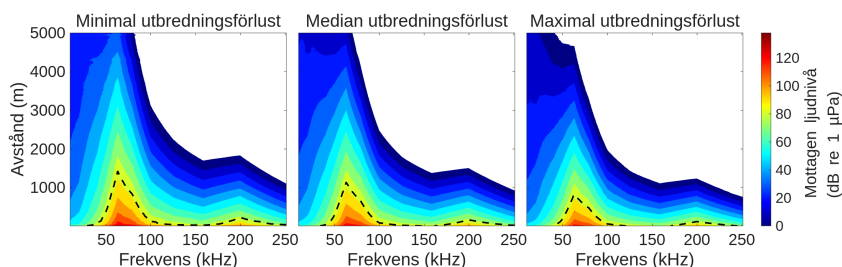
Memo nummer/Number
FOI Memo 9236



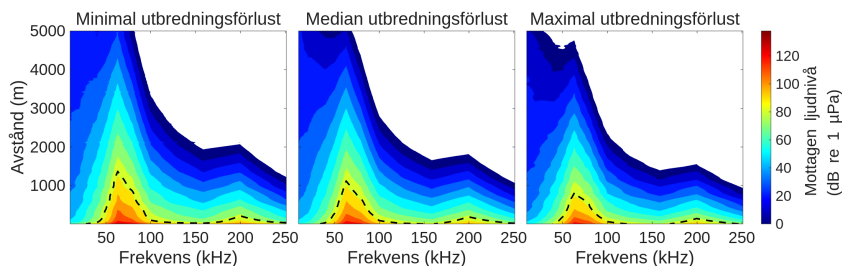
Figur E.41: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 3 (södra Kattegatt), månad 3, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



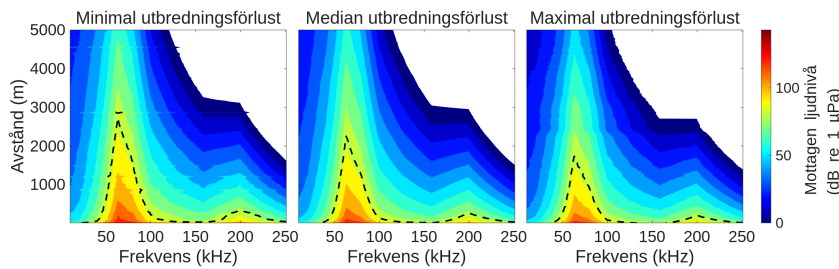
Figur E.42: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 3 (södra Kattegatt), månad 6, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



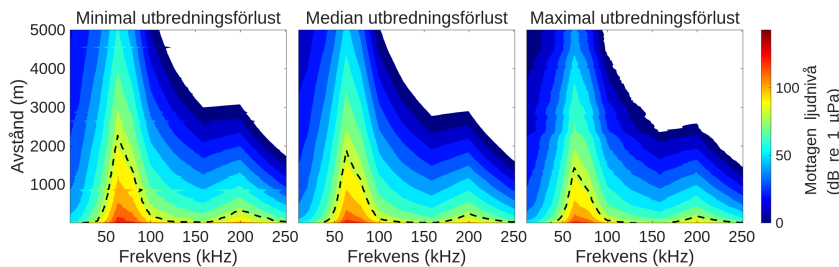
Figur E.43: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 3 (södra Kattegatt), månad 9, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



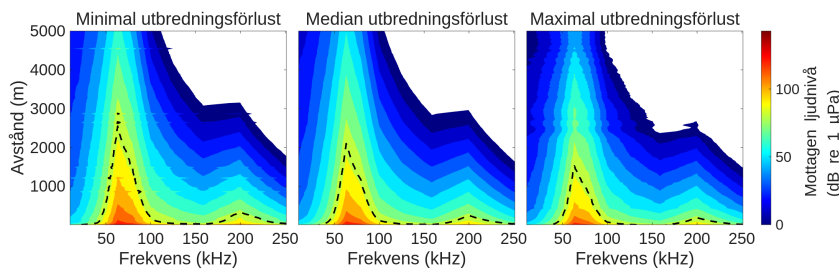
Figur E.44: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 3 (södra Kattegatt), månad 12, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



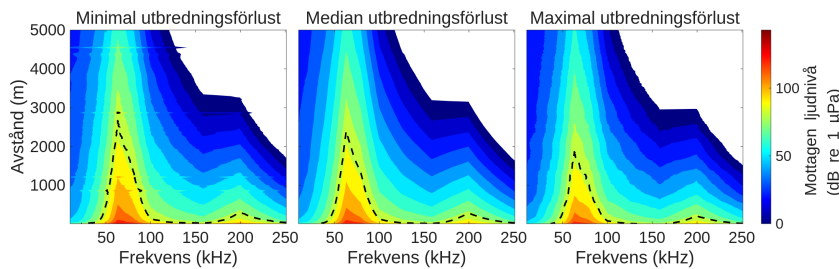
Figur E.45: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 4 (södra Östersjön), månad 3, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



Figur E.46: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 4 (södra Östersjön), månad 6, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.

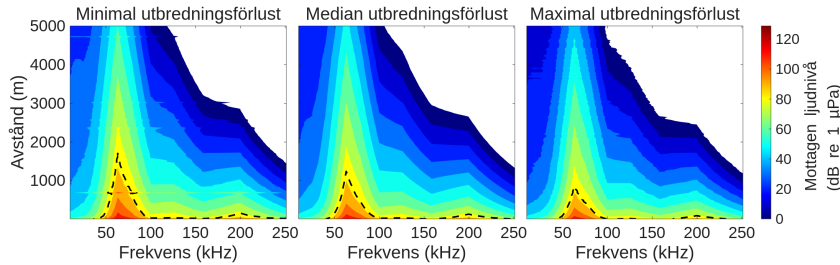


Figur E.47: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 4 (södra Östersjön), månad 9, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.

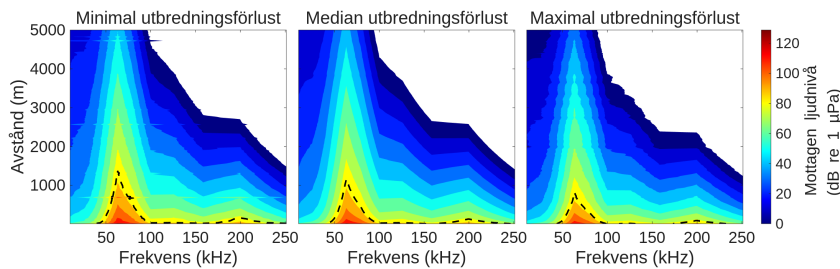


Figur E.48: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 4 (södra Östersjön), månad 12, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.

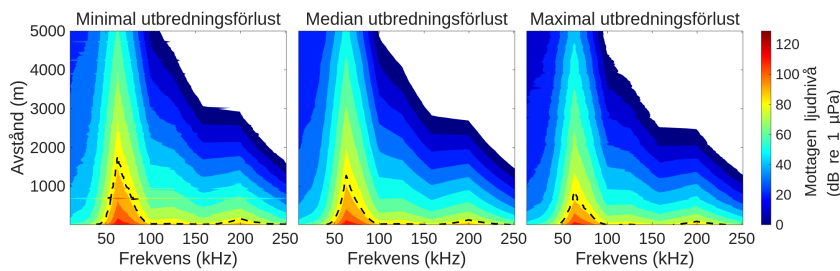
E.4 Vit Netguard



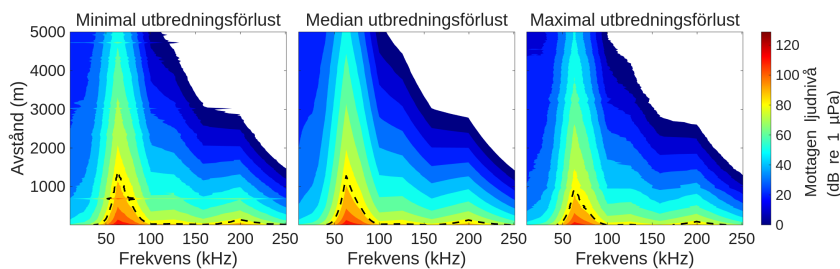
Figur E.49: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 1 (Hanöbukten), månad 3, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



Figur E.50: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 1 (Hanöbukten), månad 6, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



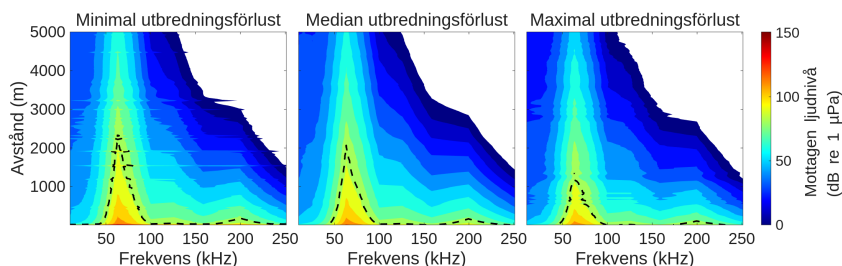
Figur E.51: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 1 (Hanöbukten), månad 9, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



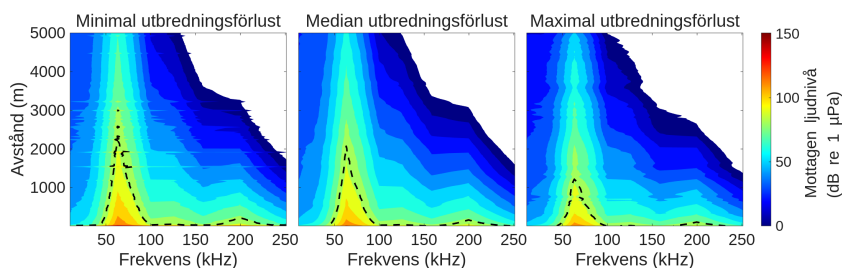
Figur E.52: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 1 (Hanöbukten), månad 12, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.

Titel/Title
Utredning av detektionsavstånd av pingers för tumlare

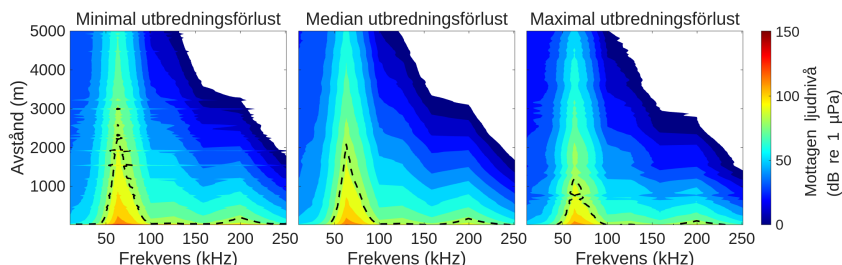
Memo nummer/Number
FOI Memo 9236



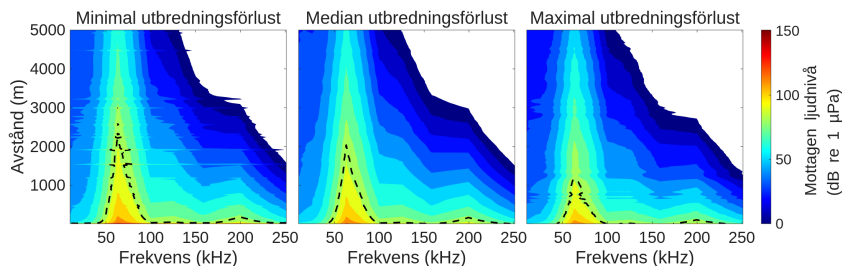
Figur E.53: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 2 (norra Östersjön), månad 3, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



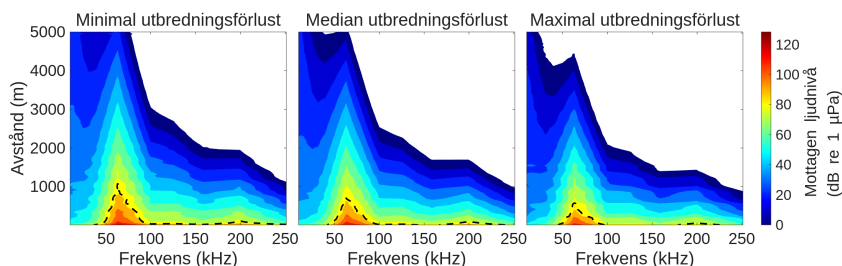
Figur E.54: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 2 (norra Östersjön), månad 6, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



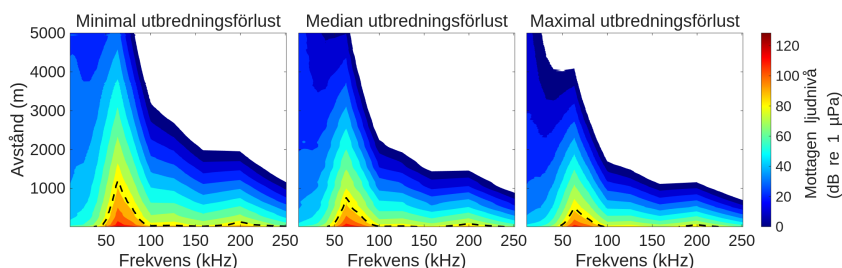
Figur E.55: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 2 (norra Östersjön), månad 9, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



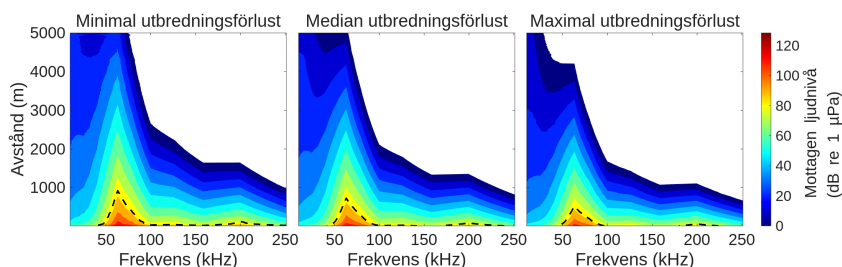
Figur E.56: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 2 (norra Östersjön), månad 12, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



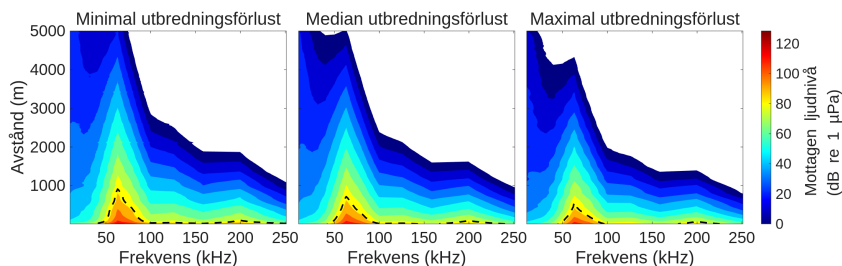
Figur E.57: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 3 (södra Kattegatt), månad 3, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



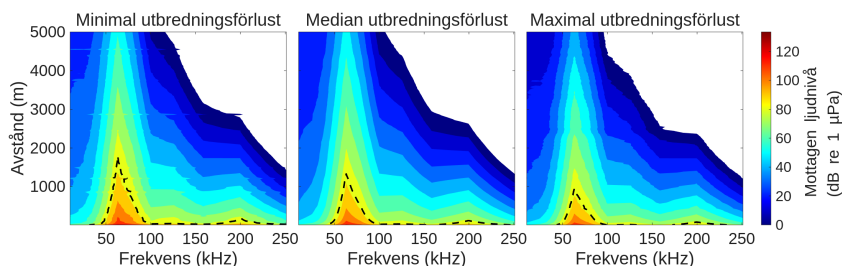
Figur E.58: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 3 (södra Kattegatt), månad 6, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



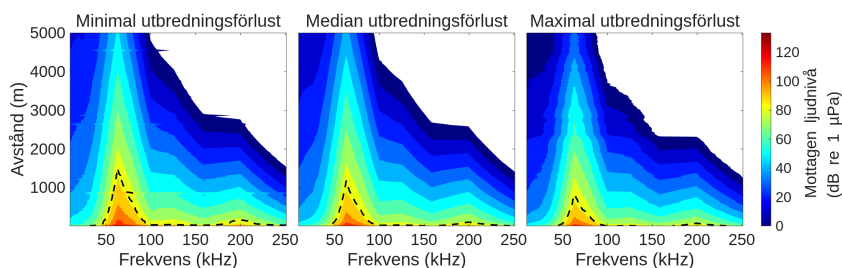
Figur E.59: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 3 (södra Kattegatt), månad 9, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



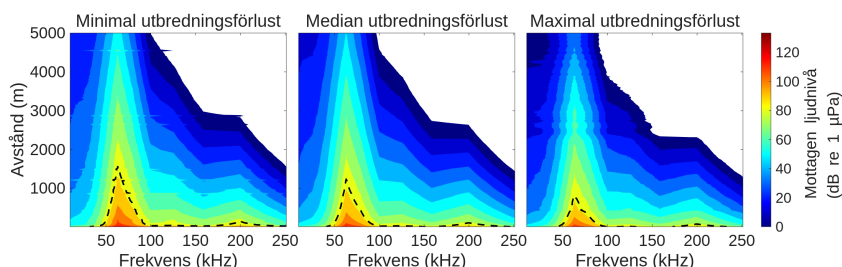
Figur E.60: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 3 (södra Kattegatt), månad 12, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



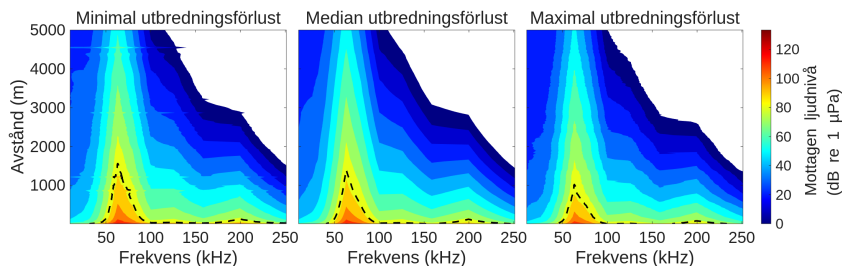
Figur E.61: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 4 (södra Östersjön), månad 3, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



Figur E.62: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 4 (södra Östersjön), månad 6, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



Figur E.63: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 4 (södra Östersjön), månad 9, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.



Figur E.64: Uppskattad ljudnivå för typmiljö 4 (södra Östersjön), månad 12, samt detektionsavstånd för hydrofonsystemet SoundTrap ST640 HF med en hydrofon av typ HTI-99-UHF.