

Bilaga 7

Luode Oy

Modellering av undervattensbuller i Blastr stålverksprojekt

AFRY Finland Oy är inte ansvarig för eventuella avvikelser mellan översättningen och originalet. Originalet kommer alltid att ha företräde.

Modellering av undervattensbuller i Blastr stålverksprojekt

Luode Oy

Toni Meriläinen och Antti Lindfors

Innehåll

1	Inledning	4
2	Undervattensbuller	4
2.1	Allmänt	4
2.2	Storheter och enheter	5
3	Beräkningsmetoder	6
3.1	Programvara	6
3.2	Djupmodell och akustisk miljö	6
4	Simuleringsobjekt	8
4.1	Undervattensbrytning	9
4.2	Landbrytning (AWT-terminal)	11
4.3	Borrpålning	12
4.4	Andra bullerkällor	13
5	Metoder för att bedöma effekterna av undervattensbuller	14
5.1	Marina däggdjur	14
5.2	Fiskar	17
5.3	Gränsvärden	17
6	Resultat och konsekvensbedömning	19
6.1	Undervattensbrytning	20
6.2	Landbrytning (AWT-terminal)	34
6.3	Borrpålning	40
6.4	Osäkerheter i samband med simuleringen	44
6.5	Lindrande åtgärder	45
	Slutsatser	48

1 Inledning

Blastr Green Steel Oy planerar en stålproduktionsanläggning och en integrerad vätgasproduktionsanläggning i Joddböle i Ingå i västra Nyland. I byggskedet av grundandet av stålverket genomförs arbetsskeden som också orsakar buller i vattendragen.

I detta arbete användes bullermodellering för att undersöka de potentiella effekterna av byggfaser under vatten eller från stranden till vattnet och exponeringsområden för marina däggdjur och fiskar.

Enligt genomförandeplanen för hamn- och kajkonstruktionerna var schaktning och pålning de mest betydande bullerkällorna. Båda arbetsskedena modellerades så att bullerkällorna var placerade på två olika ställen på byggområdet. Dessutom beräknades modellscenarier i två olika situationer med skiktning av vattentemperaturen. Därutöver modellerades schaktningen av AWT-terminalen som ska byggas i omedelbar närhet av strandlinjen, eftersom ljudet effektivt överförs från land till vatten under schaktningen på basis av resultaten från tidigare mätprojekt. Därtill modellerades en situation där ett undervattensområde omges av en bubbelridå för att minska bullerpåverkan.

Utifrån modelleringsresultaten genomfördes en konsekvensbedömning av marina däggdjur och fiskar. Utbredningsområdena för buller står i proportion till hörselkurvorna hos marina däggdjur och fisk och till gränsvärdena för skadliga effekter. Möjliga åtgärder för att minska undervattensbuller presenterades också.

2 Undervattensbuller

2.1 Allmänt

Undervattensbuller delas ofta in i impulsartat och kontinuerligt (icke-impulsartat) buller. Med impulsartat buller avses korta, distinkta toppar av buller som uppstår till exempel vid undervattenssprängning eller drivning av pålning. Effekterna av impulsartat buller kan vara betydande, särskilt för marina djur och fiskar. I värsta fall kan det leda till dödsfall, fysiska skador, hörselnedsättning eller att djuren flyr från området tillfälligt eller permanent.

Icke-impulsartat buller är kontinuerligt, mjukare ljud som alstras av till exempel fartygs- och båtmotorer, industriell verksamhet vid kusten eller till sjöss eller marina konstruktioner. Konstant buller kan störa de naturliga beteendena hos fisk och skaldjur, såsom kommunikation, predation och reproduktion. Det kan också störa livsmiljöerna för känsliga marina djur på lång sikt.

Bullrets impulsivitet påverkas inte bara av bullerkällans impulsivitet utan också av observationspunktens avstånd från bullerkällan. På nära håll kan brus vara stötliknande eller smalbandigt. Längre bort från bullerkällan minskar påverkan, eftersom intensiteten på toppljudet minskar i förhållande till resten av ljudnivån när ljudet fortskrider. Ett exempel på detta är borrhålning, som räknas som kontinuerligt buller.

2.2 Storheter och enheter

Vilka storheter som används beror på vilken typ av bullerhändelse det rör sig om. Vid slagpålning och schaktning mäts oftast ljudexponeringsnivån och den maximala ljudtrycksnivån, medan vid kontinuerligt buller även ljudtrycksnivån.

Ljudexponeringsnivån beskriver mängden ljudenergi i en bullerhändelse normaliserad till en sekund. Den kumulativa ljudexponeringsnivån (SELcum) kan också beräknas, till exempel under en 24-timmarsperiod. Den kumulativa ljudexponeringsnivån påverkas i betydande utsträckning endast av de högsta bullernivåer som uppmätts under mätperioden.

Toppvärdet för ljudtryck beskriver det maximala absoluta tillfälliga värdet av ljudtrycket under en tidsperiod. Även detta används ofta i samband med analys av en pålningshändelse eller explosion.

Det buller som orsakas av borrhålning ligger närmare kontinuerligt buller, vars storlek beskrivs inte bara av ljudexponeringsnivån utan också av ljudtrycksnivån.

Tabell 1 Storheter som används vid mätningar.

Kvantitet	Kod [enhet]	Vad betyder det
Ljudtrycksnivå	SPL eller Lp [dB re 1 μ Pa]	Ljudtrycksnivån är ett mått på det totala trycket för det momentana ljudet vid observationspunkten. Det används ofta för att beskriva nivå för en kontinuerlig ljudhändelse.
Ljudets exponeringsnivå	SEL eller Le [dB re 1 μ Pa ²]	Beskriver ljudenergin för en brushändelse normaliserad till en sekund. Det beror på amplituden för brushändelsen, såväl som dess varaktighet.
Toppvärde för ljudtryck	SPLpk eller LE,p [dB re 1 μ Pa]	Beskriver det maximala absoluta momentana värdet av ljudtrycket under en viss tidsperiod. Även detta används ofta i samband med analys av en pålningshändelse eller explosion.

3 Beräkningsmetoder

3.1 Programvara

Programvaran dBSea användes för att modellera utbredningsområdet för undervattensbuller, som beräknar ljudets utbredning och dämpning i modelleringsområdet. Programmet beräknar ljudfältets avstånd, djup och riktning som en funktion av ljudkällan. I modelleringen användes en kombination av två olika beräkningsmetoder. För högre frekvenser (>500 Hz) användes ray tracing-metoden, medan för låga frekvenser (<500 Hz) tillämpades en parabolisk utbredningsekvation.

Modelleringen utfördes som en tredimensionell beräkning. En exakt beräkningsmatris med 360 radiella sektioner, 1000 avståndsoorienterade beräkningsrutor och 250 djuporienterade beräkningsrutnät användes för beräkningen, vilket möjliggjorde detaljerad modellering av bullerspridningen på olika djup och avstånd.

3.2 Djupmodell och akustisk miljö

Flera faktorer bidrog till att minska avståndet till bullret, t.ex. havsbottnens sammansättning, djupförhållanden och vattnets ljudhastighetsprofil. Ingå hamns front mycket komplex. Små öar och grund ökar betydelsen av samspelet mellan vattenytan och havsbotten för reflektion, spridning och dämpning av ljud.

De sedimentära lagren på havsbotten påverkar hur ljud reflekteras eller absorberas. Till exempel reflekterar sten och hårdbottnade områden ljud mer effektivt, medan mjuka basmaterial förbättrar avståndsdämpningen. Uppgifterna om havsbottnens omständighet kombinerades med hjälp av akustiska seismiska undersökningar som genomfördes i projektområdet och GTK:s öppna data. I modelleringsområdet bestod havsbottnens lager av lera, lera, morän och sten. I modelleringen bestämdes sedimentlagrets tjocklek, seismisk hastighet, dämpningskoefficient och sedimentdensitet för varje lager.

På grunt vatten har havsbotten stor inverkan på ljudutbredningen, särskilt vid låga frekvenser, som dämpas mer effektivt. Djupmodellen baserar sig på öppna data och har gjorts genom att interpolera Traficoms djuppunkter och djupkurvor samt Lantmäteriverkets höjdmodell till en cellstorlek på 10 x 10 meter.

De uppmätta ljudhastighetsprofilerna ger information om möjlig skiktning eller säsongsbetonad termoklin. Speciellt den starka skiktningen som sker under hösten påverkar starkt ljudets utbredning och dämpning. I varje modelleringsscenario beaktades två olika vattenstratifieringssituationer (bild 1). Den första situationen är från april, då ljudhastighetsprofilen var mycket flack och ingen skiktning hade bildats. Den andra situationen var i september, då vattentemperaturen var 16 °C på ytskiktet och 9 °C på bottenvåningen.

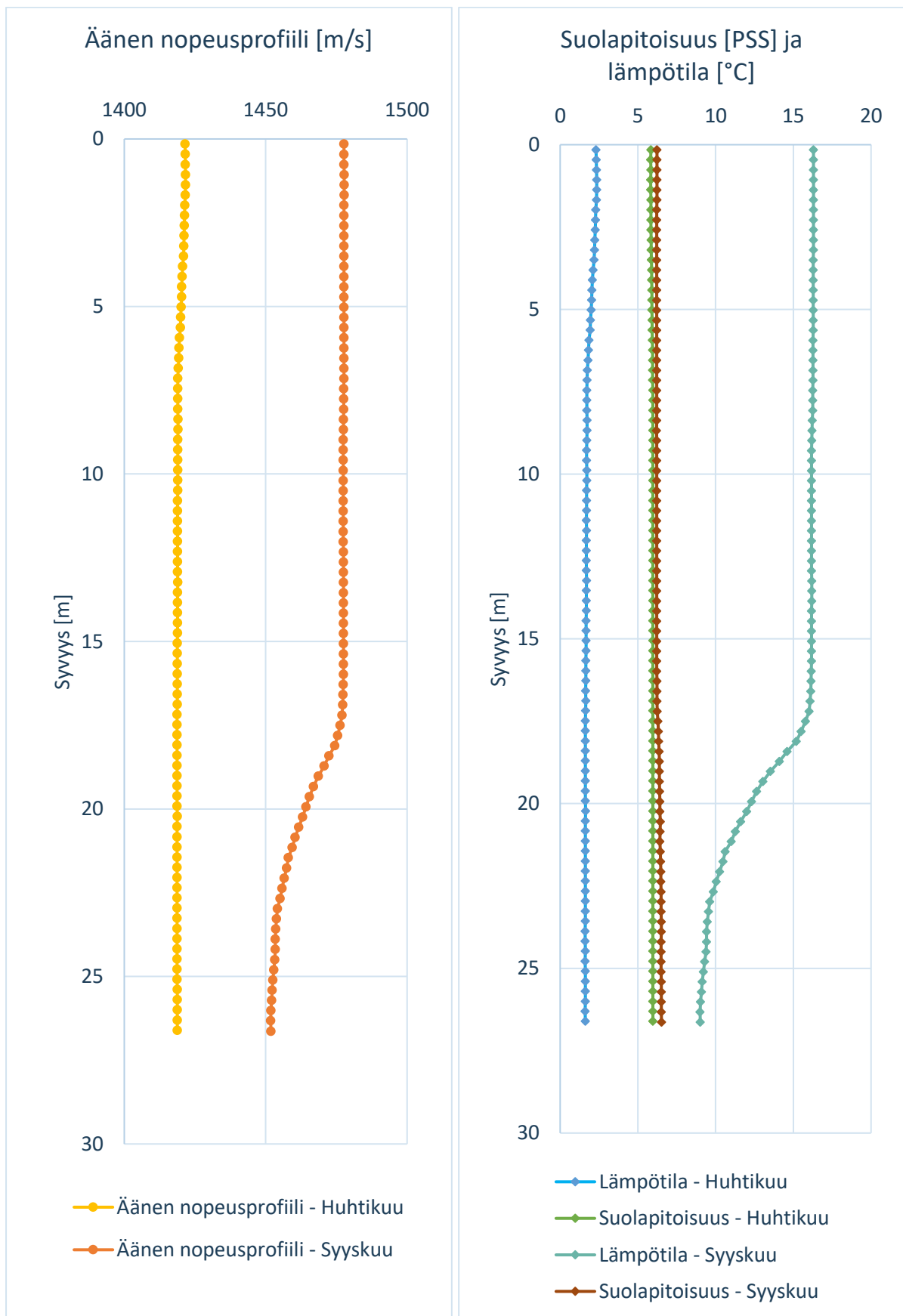


Bild 1 Ljudhastighetsprofiler (SSP) SSP 1 och SSP 2 som används vid modellering.

4 Simuleringsobjekt

De mest betydande bullerkällorna valdes ut på basis av genomförandeplanen för hamn- och kajkonstruktionerna samt tidigare mätningar och simuleringar. Schaktning och pålning valdes som modelleringskällor. Båda scenarierna utfördes vid två punkter och i två vattenstratifieringssituationer. Dessutom modellerades schaktning av AWT-terminalens landområde i vattnets omedelbara närhet.

Arbetsordningen är preliminärt utformad så att undervattensschaktning utförs med borr- och sprängmetoden innan borrhade pålar installeras så att det finns lager av jord på havsbotten. Ytjordslager muddras ut. Schaktbörning och laddning kan utföras genom moränlager med lämpliga arbetsmetoder. En flotte tas till platsen eller havet fylls tillfälligt för att ge en lämplig arbetsplattform för borrhings- och laddningsutrustning. Efter sprängningen monteras en borrhad pålvägg och schaktmassorna och landmassorna på havets botten schaktas bort.

Resultatet av modelleringen påverkas i hög grad av de baslinjer och frekvensspektra som används i modelleringen. Bedömningen av utgångsvärden har gjorts konservativt, så i verkligheten kan effekterna också vara betydligt mindre. Alla utgrävningar modellerades vid både genomsnittliga och maximala explosiva baslinjer. Projektområdet och modelleringsobjekten visas i bild 2. Koordinaterna för modelleringsobjekten och baslinjerna som används i modelleringen presenteras i tabell 2. Fastställandet av utgångsvärdena för de bullerkällor som presenteras i tabellen beskrivs i följande punkter (4.1, 4.2 och 4.3).

Tabell 2 Baslinjer för simulerade bullerhändelser

Scenario	ETRS-TM35FIN N	ETRS-TM35FIN E	Utgångsnivå för ljudkälla dB re 1 μPa^2 @ 1m
Schaktning 1	329427	6656897	244 (AV) och 248 (max)
Schaktning 2	328918	6656962	244 (AV) och 248 (max)
Schaktning vid AWT-terminalen	329422	6656930	225 (AV) till 227 (max)
Borrpålning 1	329483	6656902	218
Borrpålning 2	328901	6656979	218



- ✗ Louhinnan mallinnuspisteet
- ✗ Maa-alueen louhinnan mallinnuspiste
- ✗ Porapaalutuksen mallinnuspisteet
- Hankealue

100 200 300 400 500 m



Bild 2 Projektområde och modelleringspunkter för bullerhändelser.

4.1 Undervattensschaktning

De högsta nivåerna av undervattensbuller orsakas av undervattensschaktning. Bullret från schaktning är impulsivt, bredbandigt och kortlivat. En del av den ljudenergi som genereras av sprängning framskrider också längs botten.

Den totala uppskattade mängden undervattensschaktning är cirka 40 840 m³kr. Undervattensschaktningen beräknas pågå i cirka 6 månader. Vid schaktning är det förhållandena och den som utför schaktningen som avgör de tekniska aspekterna av schaktningen, som ändå påverkar mängden explosiv energi i sprängningarna.

I det initiala materialet uppskattades mängden explosiva varor och sprängämnen i genomsnitt vara 1500–4700 kg för ett fält och mängden explosiva ämnen i det största fältet 4200–13000 kg. Den uppskattade ljudexponeringsnivån och den maximala ljudtrycksnivån vid undervattensschaktning baseras på initiala data, där den uppskattade mängden explosiva ämnen i ett genomsnittligt fält är 4700 kg och den uppskattade mängden explosiva ämnen i det största fältet är 13000 kg. Mängden sprängämnen är dynamit, så kilogrammen omvandlades till TNT-ekvivalenter för beräkning av högsta ljudtrycksnivå.

Mätresultaten från undervattensbrytningen i Nordsjö 2020 utnyttjades för att uppskatta ljudnivån vid brytningen. Med hjälp av den uppskattade mängden sprängämnen valdes uppmätta ljudexponeringsnivåer och toppljudtrycksnivåer orsakade av schaktningshändelser av liknande storlek från mätmaterial. Efter detta bestämdes utgångsnivåerna för bullerhändelsen med hjälp av en befintlig bullermodell från Nordsjö.

Topptrycket för en undervattensexlosion i närområdet kan också uppskattas med hjälp av följande ekvation¹. I samband med undervattensbrytningen beräknades den högsta ljudtrycksnivån enligt formeln med hjälp av konstanter som tar hänsyn till att det explosiva ämnet har borrats in i berget².

$$(p^0(r) = Kp(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{r})^\alpha$$

där = $2,55 \times 10^6$, W = TNT-mängd (kg), R = Avstånd (m) och $\alpha = 1,13$

Med hjälp av modellering och litteratur uppskattades ljudexponeringsnivån för en genomsnittlig undervattensschaktning till 244 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ @ 1 m och den maximala ljudtrycksnivån till 274 dB re 1 μPa @ 1 m. Ljudexponeringsnivån för den största undervattensschaktningen uppskattades till 248 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ @ 1 m och den maximala ljudtrycksnivån till 278 dB re 1 μPa @ 1 m. Frekvensspektrumet för gruvbuller visas i bild 3.

¹ Cole, R.H. Underwater Explosions; Princeton Univ. Press: Princeton, NJ, USA, 1948..

² Nedwell, J.R.; Edwards, B. A Review of Measurements of Underwater Man-Made Noise Carried out by Subacoustech Ltd., 1993–2003; Subacoustech Ltd.: Hampshire, UK, 2004.

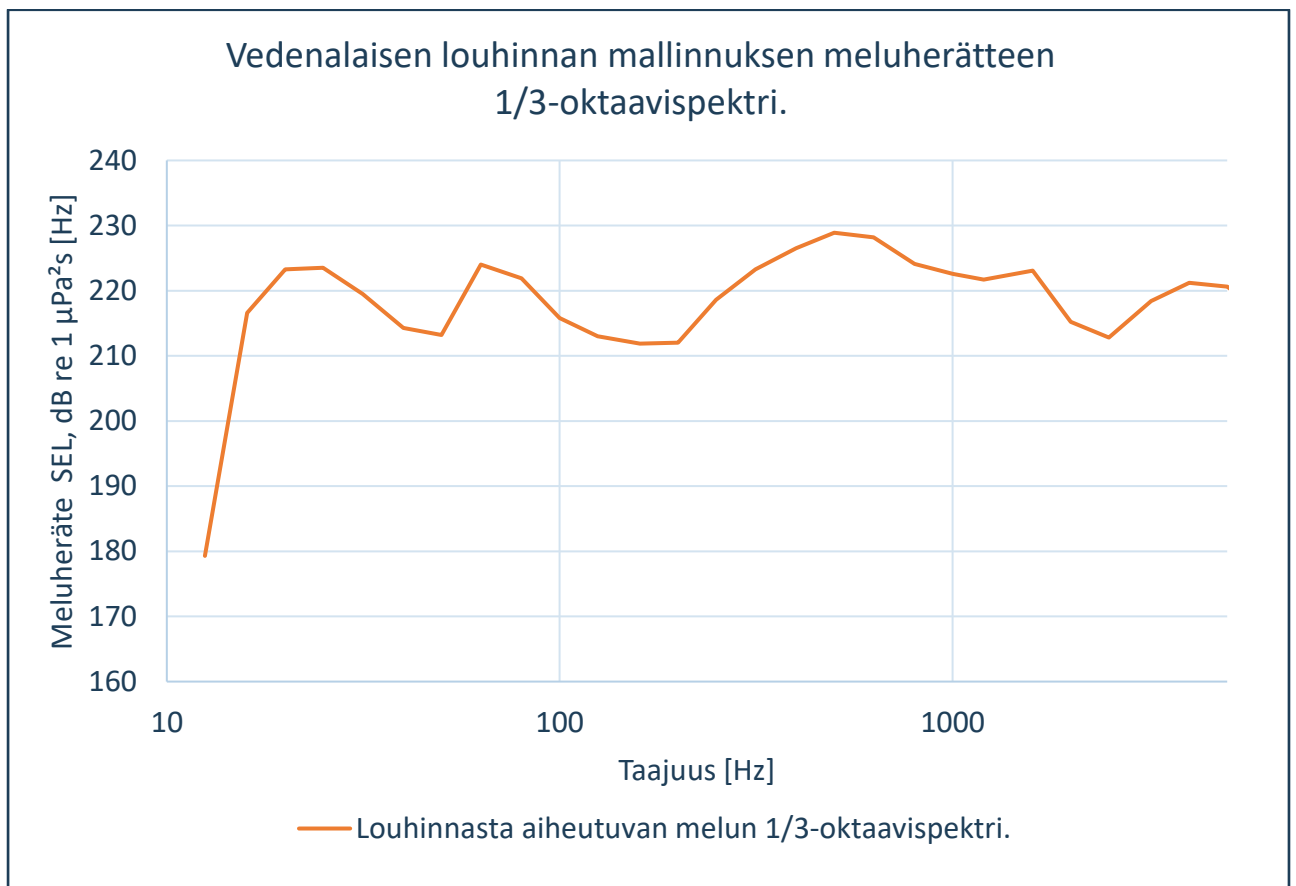


Bild 3 Spektrumet 1/3 oktav av buller från undervattensschaktning.

4.2 Schaktning på land (AWT-terminal)

Schaktningen utförs också vid AWT-terminalen som landbrytning, vilket innebär att bedömningen av buller från land till vatten inkluderades i modelleringen.

I de inledande uppgifterna uppskattades mängden explosiva ämnen i ett medelvärde vara 400–1350 kg och mängden explosiva ämnen i det största fältet 1100–3750 kg. Den uppskattade ljudexponeringsnivån och den maximala ljudtrycksnivån vid undervattensschaktning baseras på utgångsdata, där den uppskattade mängden explosiva ämnen i ett genomsnittligt fält är 1350 kg och den uppskattade mängden explosiva ämnen i det största fältet är 3750 kg. Mängden sprängämnen är dynamit, så kilogrammen omvandlades till TNT-ekvivalenter för beräkning av ljudtryckstoppsnivåer.

Beräkning av toppljudtrycksnivå på grund av utgrävning av mark i vatten:

1.

Den maximala ljudtrycksnivån P_{pk} (Pa) på grund av tunnelbrytning beräknades med hjälp av ekvationen från gruvindustrin ((MMS) 2004)³:

$$P_{pk} = 5.24 \times 10^7 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^\epsilon \left(\frac{a+b}{b} \right)^{\epsilon-\alpha}$$

W = TNT-mängd (kg), R = Avstånd (m), a = avståndet över havsbotten (m), b = explosivämnets djup under havsbotten (m), ϵ = Dämpningskoefficient på havsbotten, α = Dämpningsfaktor i vatten

2. Med hjälp av Snells brytningslag och Fresnel-ekvationen beräknades den effekt som reflekteras och är permeabel från ett medium (sten) till vatten, som är beroende av vinkel och impedans. För en plan våg beräknas reflektionskoefficienten från ekvationen:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

Där Z_1 och Z_2 är de akustiska impedanserna för de två medierna.

3. Ljudeffekten som överförs till ett annat medium ges av ekvationen $T = 1 - R^2$

4. Slutligen beräknas ljudtrycket utifrån intensiteten $I = \sqrt{\rho c}$

Med hjälp av modellering och litteratur uppskattades ljudexponeringsnivån för en genomsnittlig undervattensschaktning till 225 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ @ 1 m och den maximala ljudtrycksnivån till 255 dB re 1 μPa @ 1 m. Ljudexponeringsnivån för den största undervattensschaktningen uppskattades till 227 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ @ 1 m och den maximala ljudtrycksnivån till 257 dB re 1 μPa @ 1 m.

Frekvensspektrumet för schaktning på land kunde inte hittas i litteraturen, så spektrumet för undervattensschaktning användes som spektrum, vilket är en försiktig uppskattning, särskilt vid höga frekvenser.

4.3 Borrpålning

Efter schaktningen uppskattades pålning vara det näst största bullerutsläppet. I stället för slagpålning används borrpålning med lägre ljudnivå. Den är också klassificerad som

³ Minerals Management Service. Explosive Removal of Offshore Structures - Information Synthesis Report. s.l. : U.S. Department of the Interior Minerals Management Service, 2004

kontinuerligt buller i naturen. Storleken på den borrade pålen är 1000 mm och borrarpålningen utförs i cirka 4–5 timmar under dagen.

Det fanns också mätdata på borrarpålning från två olika brobyggen. Vid borrarning överförs ljudet som genereras av borrarningen från borrhålet till den omgivande havsbotten och, genom vibrationer från borrarverktygen, direkt till vattnet. Bruset är bredbandigt och består vanligtvis av en låg basfrekvens, men energi finns även vid högre frekvenser.

På basis av mätningen och de värden som finns i litteraturen uppskattades ljudtrycksnivån för borrarpålning till 175 dB, och om borrarning utförs under cirka 4–5 timmar under dagen är den kumulativa ljudexponeringsnivån för dagen 218 dB. Baslinjen kan variera mycket beroende på miljön, så de bullrigaste mätnivåerna valdes ut från de befintliga mätningarna enligt den konservativa principen.

4.4 Andra bullerkällor

Under byggandet orsakas undervattensbuller förutom av de bullerkällor som ska modelleras också av en eventuell ökning av fartygstrafiken och av muddringen. Den ökade fartygstrafiken kan öka bakgrundsljudnivån i området, och det är redan mycket trafik i området. Enligt projektets miljöprogram finns det en aktiv fartygstrafik i Ingå farled, och under åren 2019–2022 besökte 399–491 fartyg Ingå hamn årligen⁴. Till exempel går en av de livligaste båttrutterna i Finska viken från Helsingfors till Hangö nära området och är populär bland båtfolk särskilt på sommaren. Dessutom finns det många yrkesfiskare i Ingå skärgård⁵.

Muddring skapar lågfrekvent, konstant buller. Enligt mätningar genererar muddring också högre frekvenser när gripskopen lyfts upp med hjälp av vajrar. Tidigare mätningar visar att ljudtrycksnivåerna vid muddring är jämförbara med fartygsbuller.

Ökad fartygstrafik och muddringsbuller kan lokalt och tillfälligt öka bakgrundsbullernivåerna och öka riskerna för marina djur. Bakgrundsljudnivån i området är dock redan hög på grund av fartygstrafiken, vilket innebär att bullret från den ökande trafiken och muddringen snabbt sänks under bakgrundsljudnivån på kort avstånd från bullerkällorna. Sammanfattningsvis, även om ljudnivån tillfälligt ökar, uppskattas konsekvenserna vara små och tillfälliga.

⁴ Tilastokeskus 2023. Ulkomaan meriliikenne. <https://stat.fi/tilasto/uvliik> (Hänvisning 11.11.2024)

⁵Pöyry Finland 2015. Finngulf LNG, LNG-terminalin rakentaminen Suomeen – Ympäristövaikutusten arviointiselostus. Gasum Oy.

https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Gasum_Finngulf_LNG_YVA_23052013_pieni.pdf (Hänvisning 11.11.2024).

5 Metoder för att bedöma effekterna av undervattensbuller

Hur skadligt bullret är påverkas förutom av bullrets intensitet även av exponeringstiden, ljudenergins frekvensfördelning, bullrets impulsivitet eller kontinuitet samt artens individuella känslighet.

Buller har visat sig orsaka beteendeförändringar, fysiologiska stressreaktioner och till och med fysiska skador hos marina djur. Buller stör uppfattningen och produktionen av naturliga signaler, vilket försvårar predation och kommunikation. Konstant bakgrundsljud kan dölja signaler från marina djur och störa kommunikationen, särskilt under parnings- och lekperioder.

5.1 Marina däggdjur

I Finska viken finns tre arter av marina däggdjur: gråsäl (*Halichoerus grypus*), östersjövikare (*Pusa hispida botnica*) och tumlare (*Phocoena phocoena*). Antalet gråsäl ökar fortfarande något och beståndet i Finland är i gott skick. Kallbådans sälreservat ligger också cirka 25 km från projektområdet. På basis av detta är det möjligt att det finns sälar i projektområdet. Antalet östersjövikare i Östersjön ökar bara i Bottenviken, och beståndet är i gott skick förutom i Bottenviken bara i Kvarken. I Skärgårdshavet och Finska viken är tillståndet för bestånden av östersjövikare dåligt. Det är osannolikt att tumlare har förökats i Finland på årtionden, men tumlare rör sig fortfarande regelbundet på Finlands territorialvatten. Varje sommar får vi några visuella observationer i Finska viken och de södra delarna av Bottenviken. Arten är akut hotad i Östersjöområdet.⁶ På basis av tumlarens utbredningskartor⁷ och artdatacentralens observationer⁸ är det osannolikt att tumlare skulle förekomma i projektområdet.

Fysiska skador på marina däggdjur är ofta förknippade med skador på hörselorganen. Permanent skada på hörselorganen (Permanent Threshold Shift, PTS) kan leda till permanent hörselnedsättning. Hörselnedsättning kan också vara tillfällig (Temporary Threshold Shift, TTS), vilket innebär att djurets hörsel återgår till det normala efter en

⁶<https://www.ymparisto.fi/fi/luonto-vesistot-ja-meri/meri/suomen-meriympariston-tila-2024>. Hämtad 2024-11-20.

⁷ <https://metadata.helcom.fi>. Hämtad 2024-11-20

⁸ www.laji.fi. Hämtad 2024-11-20

återhämningsperiod. Southall et al. (2007) rekommenderar ett TTS-gränsvärde också för att uppskatta flyktreaktioner orsakade av en enda impulsiv ljudhändelse⁹.

Faktorer som försämrar hörseln är bland annat volym, frekvens och exponeringstid. Hörselkänsligheten hos marina däggdjur är inte enhetlig vid alla frekvenser, utan varierar. Detta tas med i beräkningen i modelleringen med standardkurvor för ljudstyrka, som efterliknar känsligheten hos ett marint däggdjurs hörselsinne vid olika frekvenser. Hos tumlare är hörseln mycket skarp och täcker ett brett frekvensområde från 300 Hz upp till 160 kHz (bild 4). Tumlarens hörseltröskel sjunker under 80 dB från 1000 Hz vid de högsta frekvenserna, och är känsligast mellan 10 och 160 kHz. Tumlare producerar korta ultraljudsklick under lodning. Klick används också för kommunikation, men vid en lägre ljudtrycksnivå.

Gråsälens hörselområde sträcker sig från 1,4 kHz till 100 kHz och knubbsälens hörselområde från mindre än 100 Hz till 79 kHz (bild 5). Sälars hörseltrösklar ligger i intervallet 80 dB från 200 Hz.¹⁰

⁹ Southall, Brandon & J. Finneran, James & Reichmuth, Colleen & Nachtigall, Paul & Ketten, Darlene &. Marine Mammal Noise Exposure. Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects. s.l. : Aquatic Mammals. 2019. DOI 10.1578.

¹⁰ HELCOM. WP 4.1 Deliverable 3: Report on noise sensitivity of animals in the Baltic. s.l. : HELCOM Baltic Sea Environment Proceedingd series, 2017.

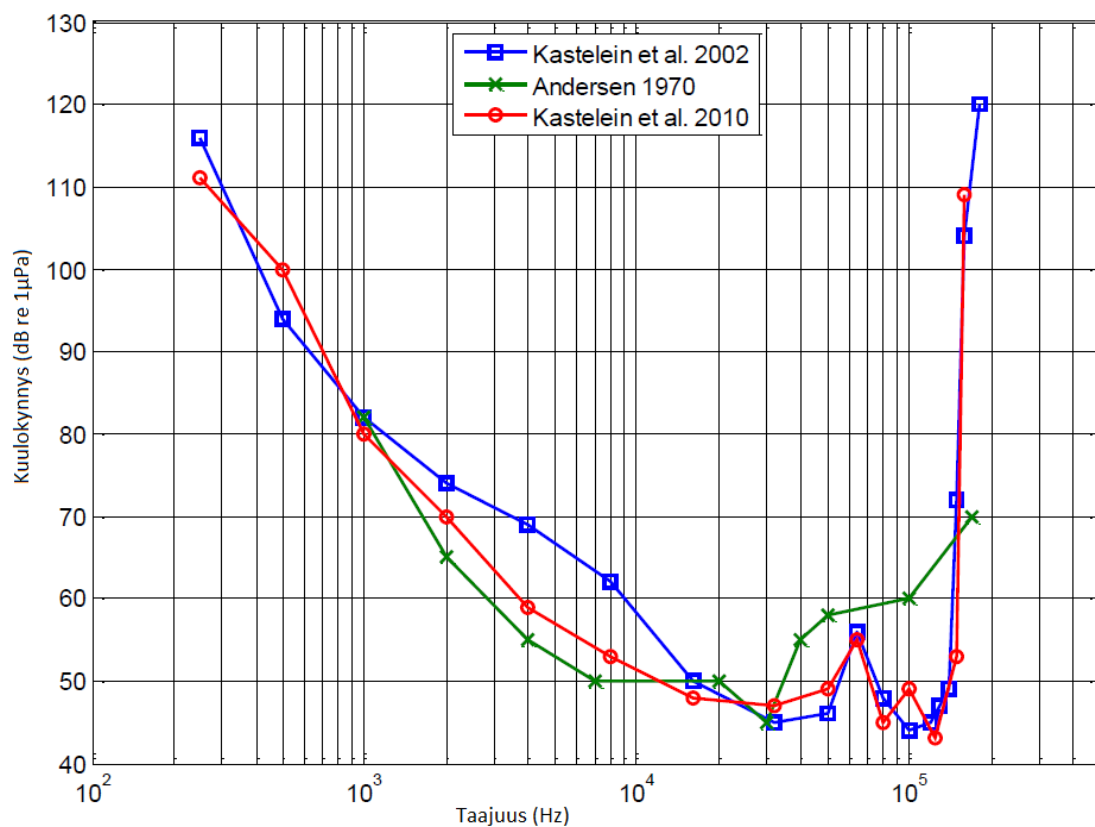


Bild 4 Hörseltröskel för tumlare (HELCOM 2017)

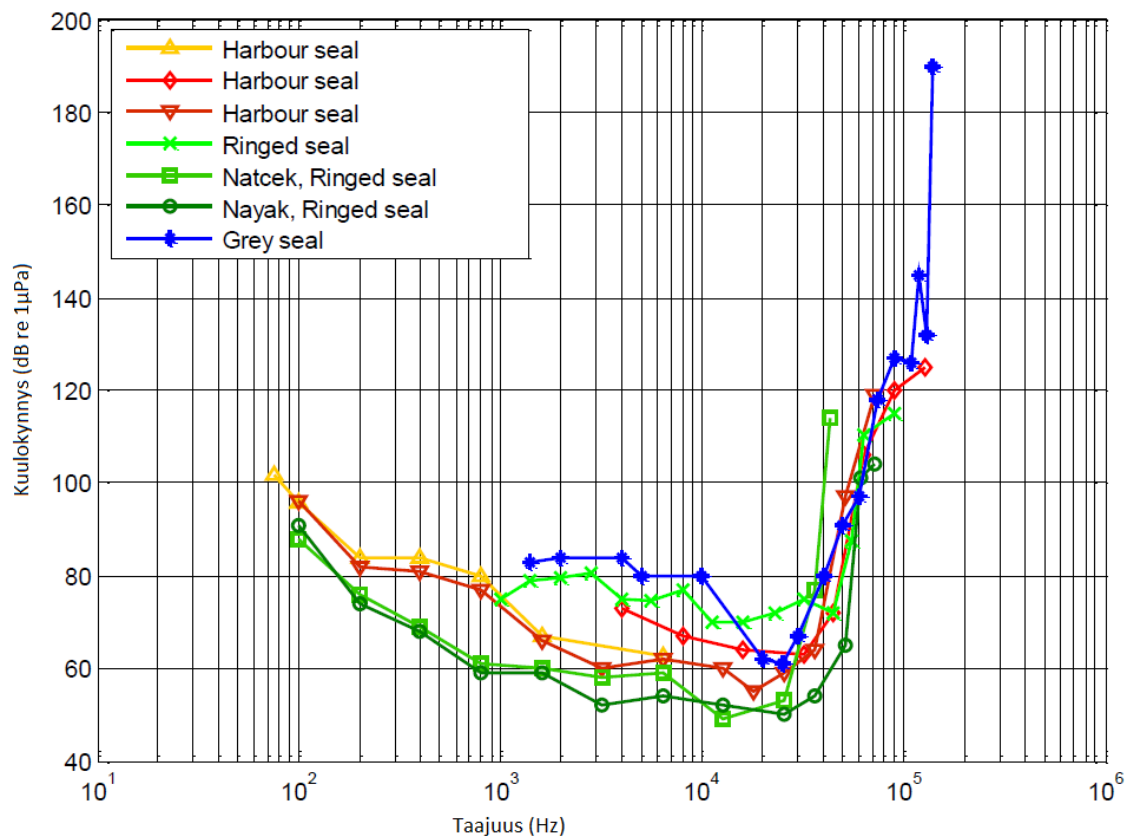


Bild 5 Hörseltrösklar för sälar (HELCOM 2017)

5.2 Fiskar

Fiskar kan känna inte bara förändringar i ljudtrycket utan också partikelrörelser med hjälp av sidolinjen och otoliterna i innerörat. Att känna av partikelrörelser är särskilt användbart nära ljudkällan och vid låga frekvenser¹¹. Fiskar med simblåsa kan upptäcka förändringar i trycket och överföra dessa vibrationer och känna av dem i innerörat. Karpfiskar har utvecklat en särskilt känslig hörsel tack vare Webers ben som förbinder den främre delen av simblåsan med innerörat, vilket ger dem ett bredare hörselområde och en bättre hörseltröskel än många andra fiskar¹². Det finns betydande artspecifika skillnader i hörselsinnet hos fiskar och de kan delas in i fyra kategorier baserat på ljuduppfattning:

1. Fiskar utan simblåsa som huvudsakligen känner av partikelrörelser (t.ex. flundra, kackerlacka).
2. Fiskar vars simblåsa inte påverkar hörseln och som huvudsakligen känner av partikelrörelser (t.ex. lax, havsöring, abborre, sik, siklöja).
3. Fiskar där simblåsan är involverad i hörseln och som känner av både partiklars rörelser och tryckvåg (t.ex. karpfiskar, sillfiskar).
4. Fiskrom och fiskyngel.

Effekterna på fisk fokuserar på fysiska skador. Fysiska skador på hörselorganen leder sällan till permanent hörselnedsättning, eftersom epitelvävnaden som är förknippad med sensorisk perception regenereras med tiden. Oviktade frekvensers toppvärden för ljudtryck används för att modellera exponeringsområdet för fisk.¹³

5.3 Gränsvärden

Gränsvärdena för bullrets skadlighet varierar beroende på vilken typ av buller det rör sig om (impulsivt eller icke-impulsivt) och artens individuella känslighet. För marina däggdjur användes de gränsvärden för bullerexponering som rekommenderas av US Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) baserat på hörselvägda kumulativa ljudexponeringsnivåer för marina däggdjur som gränsvärden vid schaktning (tabell 3).

¹¹ The contribution of lateral line to 'hearing' in fish. Higgs D.M., Radford C.A. 216: 1484-1490, s.l. : The Journal of Experimental Biology, 2013.

¹² Hearing in eight species of northern Canadian freshwater fishes. Mann, D.A., Cott, P.A, Hanna, B.W. & Popper. 70: 109–120, s.l. : Journal of Fish Biology, 2007.

¹³ Popper, A. N., Hawkins, A. D., Fay, R. R., Mann, D. A., Bartol, S., Carlson, T. J., Coombs, S., Ellison, W. T., Gentry, R. I., Halvorsen, M. B., Løkkeborg, S., Rogers, P. H., Southall, B. L., Zeddis, D. G. & Tavolga, W. N. Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI. s.l. : Springer International Publishing, 2014. ASA S3/SC1. 4

Hörfrekventa HF-vägda tröskelvärden gäller för tumlare och PW-vägda tröskelvärden gäller för sälar.¹⁴

Tabell 3 Gränsvärden för impulsivt buller (NOAA)

Art, NOAA:s hörandegrupp	Gränsvärde för TTS - Kortvarig hörselnedsättning och flyktreaktionen inträder.	PTS-gränsvärde - Permanent hörselnedsättning möjlig.
Sälar, PW	170 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	185 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$
Tumlare, HF	140 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	155 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$

Tabell 4. Gränsvärden för icke-impulsivt buller (NOAA)

Art, NOAA:s hörandegrupp	TTS-tröskel - Kortvarig hörselnedsättning och flyktreaktionen inträder.	PTS-tröskel - Permanent hörselnedsättning möjlig.
Sälar, PW	181 SELcum, PW-betoning	201 SELcum, PW-betoning
Tumlare, HF	153 SELcum, HF-betoning	173 SELcum, HF-betoning

Gränsvärdena för påverkan på fisk baserar sig på expertgranskade forskningsresultat om fisk och havssköldpaddor som en internationell arbetsgrupp sammanställde 2014. För undervattenssprängning föreslogs en gräns för dödlig skada på 229–234 SPLpk, dB re 1 μPa för alla typer av fisk (tabell 5). För impulsivt buller riktat mot fisk baseras gränsvärdena på oviktade topp ljudtrycksnivåer och för icke-impulsivt buller på oviktade ljudtrycksnivåer.¹⁵

Tabell 5 Gränsvärden för impulsivt brus (Popper 2014)

Ljudkälla	Typ av fisk	Dödsfall eller dödlig skada
Explosion	Fisk utan simblåsa (som främst känner av partiklars rörelser, t.ex. flundra)	229 - 234 SPLpk, dB re 1 μPa

¹⁴ NOAA. Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0): Underwater Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts. s.l. : U.S. Dept. of Commer., 2018. NMFS-OPR-59

¹⁵ Popper, A. N., Hawkins, A. D., Fay, R. R., Mann, D. A., Bartol, S., Carlson, T. J., Coombs, S., Ellison, W. T., Gentry, R. I., Halvorsen, M. B., Løkkeborg, S., Rogers, P. H., Southall, B. L., Zeddies, D. G. & Tavolga, W. N. Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI. s.l. : Springer International Publishing, 2014. ASA S3/SC1. 4.

Explosion	Fiskar vars simblåsa inte deltar i hörseln (känner främst av partiklarnas rörelser, t.ex. lax och torsk)	229 - 234 SPLpk, dB re 1μPa
Explosion	Fiskar där simblåsan deltar i hörseln (känner även av tryckvågor, t.ex. karpfiskar, sillfiskar)	229 - 234 SPLpk, dB re 1μPa
Explosion	Rom och fiskyngel	229 - 234 SPLpk, dB re 1μPa

Tabell 6. Gränsvärden för icke-impulsivt buller (Popper 2014)

Typ av fisk	Dödsfall eller dödlig skada	Reversibel vävnadsskada	Tillfällig hörselnedsättning	Maskeringseffekt
Fiskar där simblåsan deltar i hörseln (känner även av tryckvågor, t.ex. karpfiskar, sillfiskar)	Låg sannolikhet	170 SPL 48 h	158 dB SPL 12 h	Hög

6 Resultat och konsekvensbedömning

Områden för bullerexponering visas på kartor som ytkartor, så att djuplagret med den högsta ljudexponeringsnivån visas vid varje punkt. Tabellerna visar genomsnittet av exponeringsavstånden och det maximala avståndet.

Av resultaten kan man i allmänhet tolka att bullerpåverkan dämpas mycket snabbare väster om projektområdet på grund av att det är så grunt. I östlig och sydöstlig riktning är bullerpåverkan klart större, men även där kvarstår exponeringsområdena på Stora Fagerö.

I allmänhet är exponeringsområdena mindre i en situation med stark stratifiering (SSP2) än i en situation där ljudhastighetsprofilen var enhetlig från yta till botten (SSP1). En situation där ljudets hastighet minskar med djupet leder till att ljudet bryts nedåt. En sådan negativ ljudgradient leder till en ökning av bottendämpningen och även till mindre exponeringsområden. Djupförhållandena i projektområdet är dock så grunda att språngskiktet inte dämpade ljudutbredningen i det område som påverkades av bullret. Detta motsvarar den verkliga situationen där vattnet nära kusten i grunda områden är väl blandat.

Baserat på modelleringsresultaten var de drabbade områdena i SSP2-scenarierna större än i SSP1-scenarierna eftersom ljudhastigheten var högre i SSP2-scenariet på grund av vattentemperaturen. Större exponeringsområden syntes dock främst i områden med

exponering för tumlare, där högre frekvenser är viktigare. För säl och fisk låg exponeringsavstånden i båda scenarierna nära varandra.

6.1 Undervattensschaktning

De exponeringsområden som orsakas av schaktningen var de största. Exponeringsavstånden för tillfällig hörselnedsättning och flyktrespons anges i tabell 7 och exponeringsintervallen för permanent hörselnedsättning anges i tabell 8.

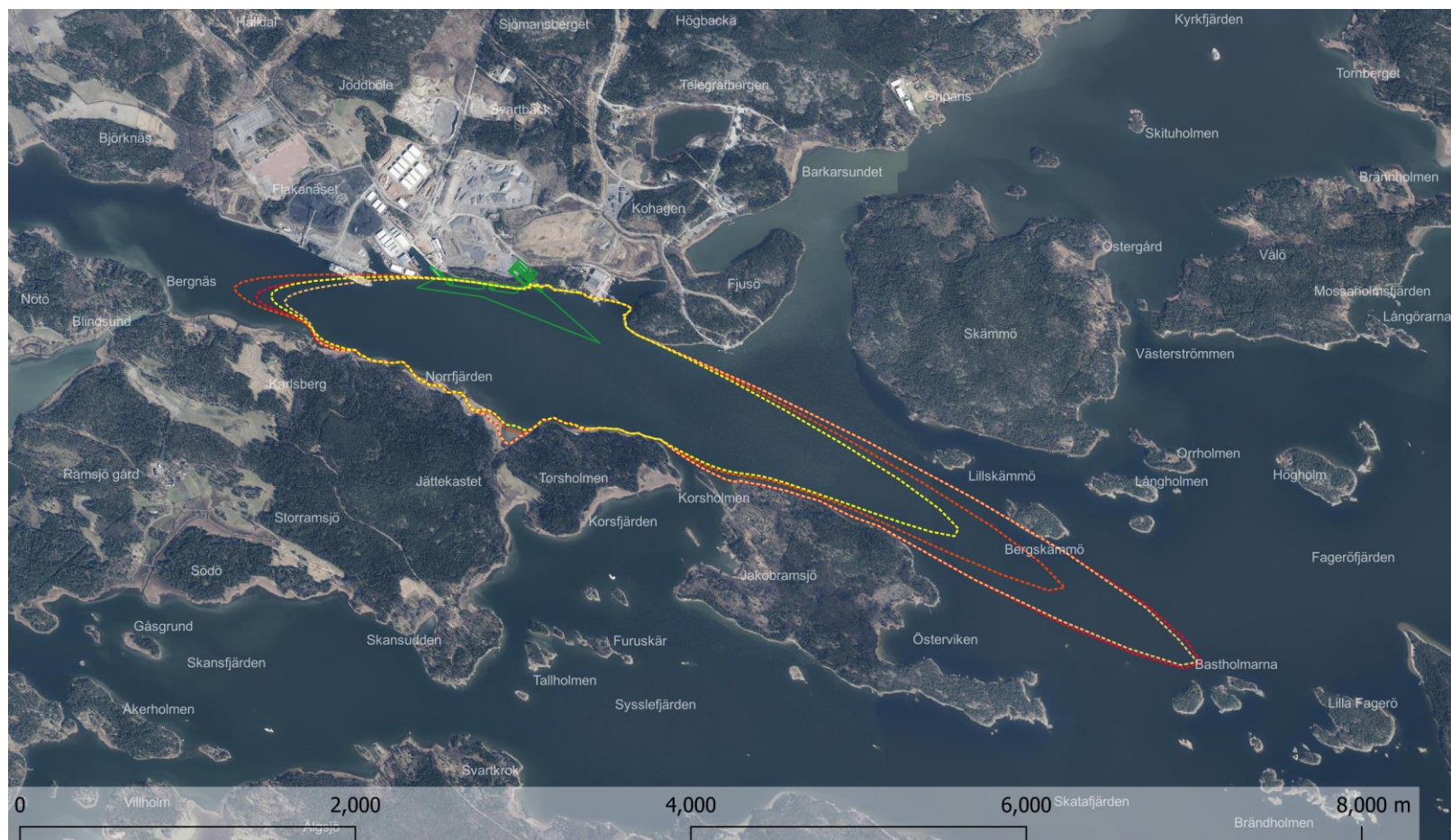
Det genomsnittliga exponeringsavståndet mellan tillfällig hörselnedsättning och flyktrespons hos tumlare var 696 m med ett maximalt avstånd på 4734 m (figur 6 och 7). För sälar var det genomsnittliga exponeringsavståndet för tillfällig hörselnedsättning eller flyktreaktion 715 m och det maximala avståndet var 4510 m (bilder 8 och 9).

Exponeringsavståndet för permanent hörselnedsättning hos tumlare nådde en topp på 4198 m, med ett genomsnittligt exponeringsavstånd på 608 m (bilder 10 och 11). För sälar varierade exponeringsavstånden för permanent hörselnedsättning till i genomsnitt 576 m, med ett maximalt avstånd på 1983 m (bilder 12 och 13).

Den genomsnittliga exponeringsarean för maximal ljudtrycksnivå 229 SPLpk, dB re 1 μ Pa för fiskdöd eller dödlig skada modellerades till 284 m och det maximala avståndet till 690 m (tabell 9, bilder 14 och 15).

Tabell 7 Exponeringsområden för kortvarig hörselnedsättning och flyktrespons vid undervattensschaktning.

Vedenalainen louhinta - Lyhytaikainen kuulontarkkuuden heikkeneminen ja pakenemisreaktion alkaminen - Merinisäkkäät					
Skenaario	SSP	Kuuloryhmä	Kynnysarvo	Altistusalueen maksimi [m]	Altistusalueen keskiarvo [m]
Louhinta 1 KA	1	NOAA HF TTS Pyöriäinen	140 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	2900	654
Louhinta 1 KA	2	NOAA HF TTS Pyöriäinen	140 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	4560	697
Louhinta 1 MAKS	1	NOAA HF TTS Pyöriäinen	140 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	3629	683
Louhinta 1 MAKS	2	NOAA HF TTS Pyöriäinen	140 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	4563	703
Louhinta 2 KA	1	NOAA HF TTS Pyöriäinen	140 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	3311	674
Louhinta 2 KA	2	NOAA HF TTS Pyöriäinen	140 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	4733	728
Louhinta 2 MAKS	1	NOAA HF TTS Pyöriäinen	140 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	3640	698
Louhinta 2 MAKS	2	NOAA HF TTS Pyöriäinen	140 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	4734	732
Louhinta 1 KA	1	NOAA HF TTS Hylje	170 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	4114	704
Louhinta 1 KA	2	NOAA HF TTS Hylje	170 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	3905	699
Louhinta 1 MAKS	1	NOAA HF TTS Hylje	170 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	4205	717
Louhinta 1 MAKS	2	NOAA HF TTS Hylje	170 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	4388	715
Louhinta 2 KA	1	NOAA HF TTS Hylje	170 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	3941	708
Louhinta 2 KA	2	NOAA HF TTS Hylje	170 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	4252	724
Louhinta 2 MAKS	1	NOAA HF TTS Hylje	170 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	4247	725
Louhinta 2 MAKS	2	NOAA HF TTS Hylje	170 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	4510	732



Pyöriäisen lyhytaikaisen kuulontarkkuuden heikkenemisen ja pakenemisreaktion altistusalue

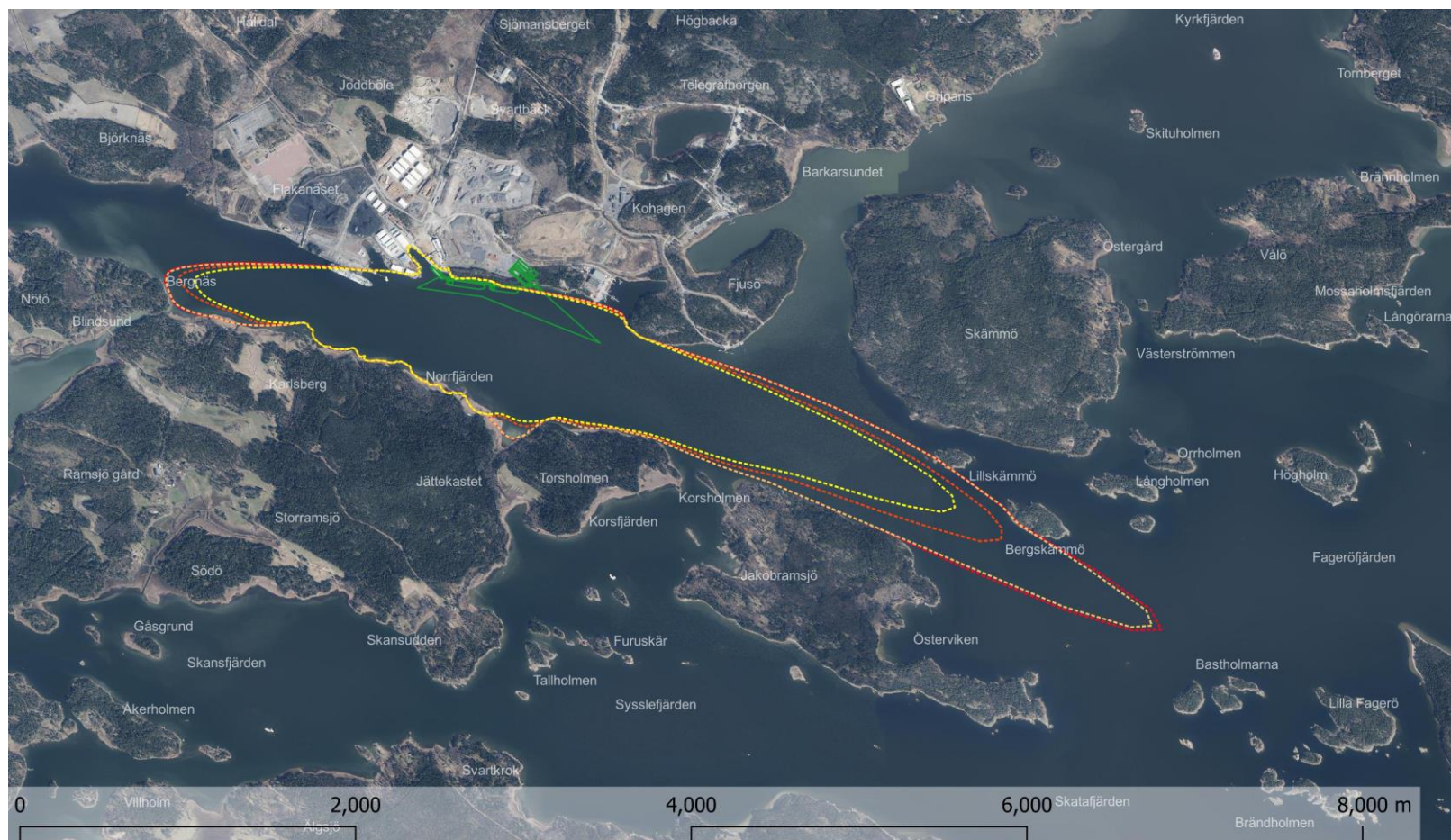
- Keskimääräinen räjähdelainemäärä - SSP1
- Keskimääräinen räjähdelainemäärä - SSP2
- Suurin yksittäinen räjähdelainemäärä - SSP1
- Suurin yksittäinen räjähdelainemäärä - SSP2



— Hankealue

Taustakartta © Maanmittauslaitos

Bild 6 Exponeringsområden för tillfällig hörselnedsättning och flyktreaktion för tumlare vid schaktning – Schaktning 1. SSP = Ljudhastighetsprofil



Pyöriäisen lyhytaikaisen kuulontarkkuuden heikkenemisen ja pakenemisreaktion altistusalue

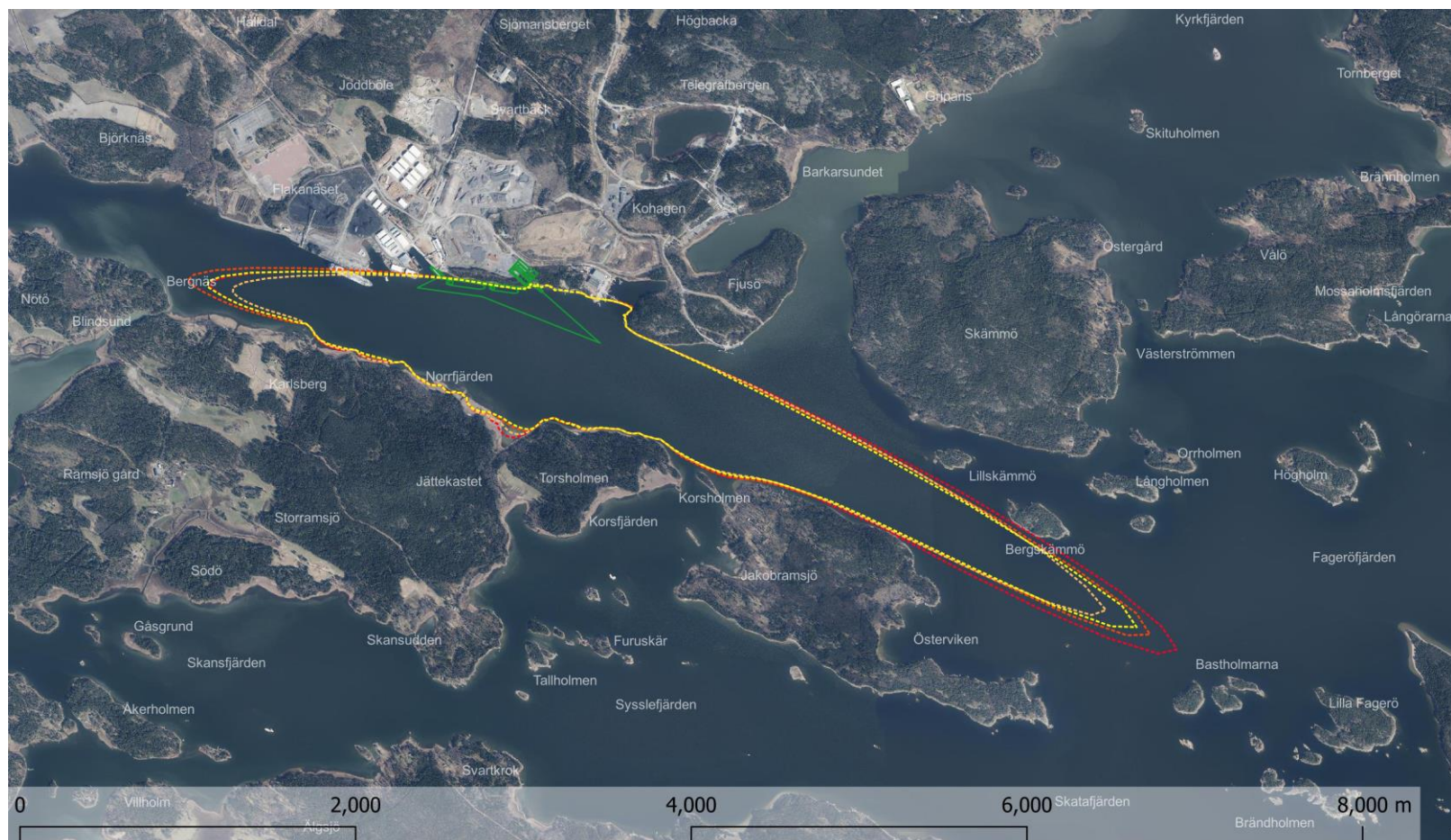
- Keskimääräinen räjähdeainemäärä - SSP1
- Keskimääräinen räjähdeainemäärä - SSP2
- Suurin yksittäinen räjähdeainemäärä - SSP1
- Suurin yksittäinen räjähdeainemäärä - SSP2



— Hankealue

Taustakartta © Maanmittauslaitos

Bild 7 Exponeringsområden för tillfällig hörselnedsättning och flyktreaktion för tumlare vid schaktning – Schaktning 2. SSP = Ljudhastighetsprofil



Hylkeen lyhytaikaisen kuulontarkkuuden heikkenemisen ja pakenemisreaktion altistusalue

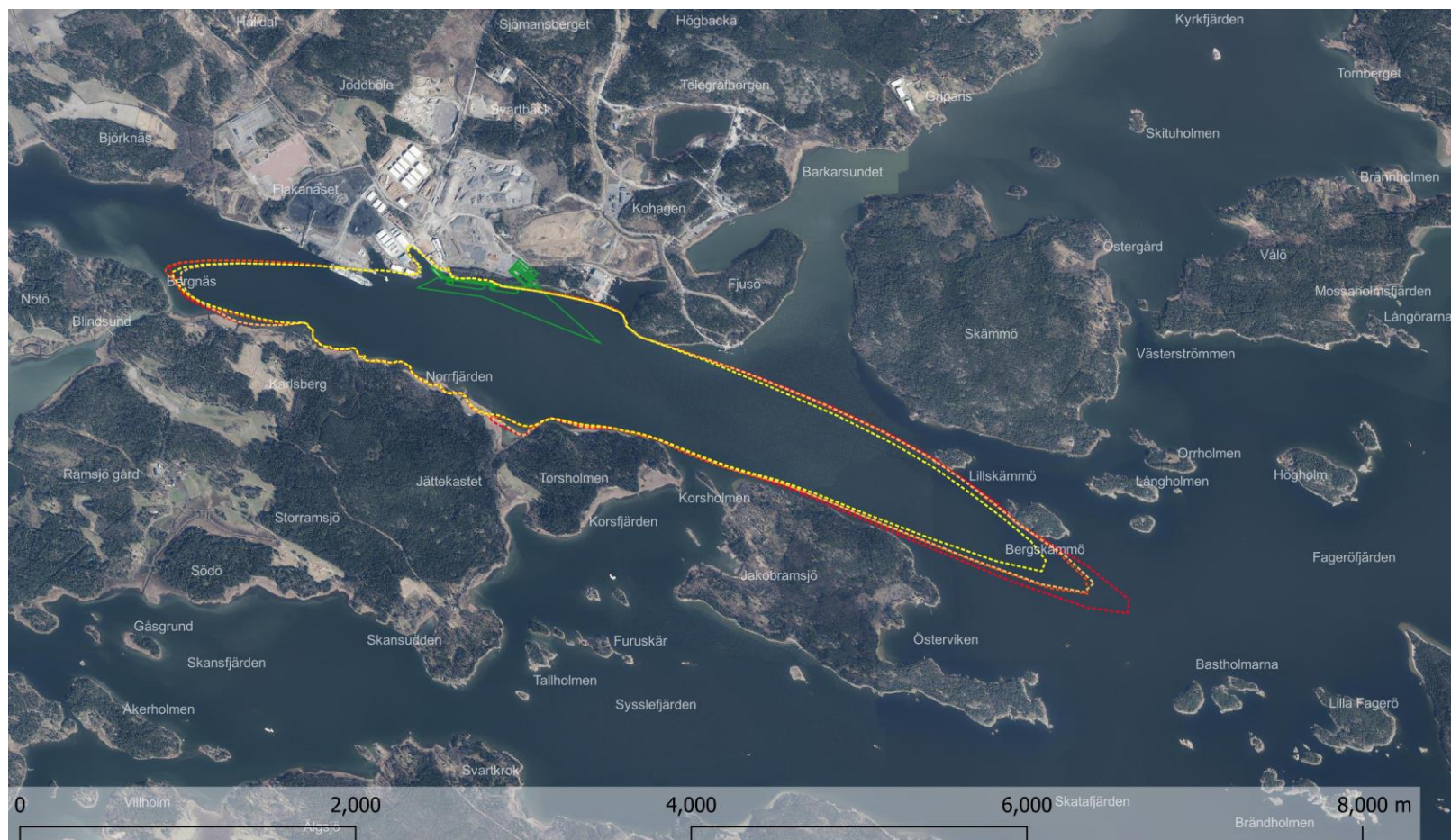
- Keskimääräinen räjähdelainemäärä - SSP1
- Keskimääräinen räjähdelainemäärä - SSP2
- Suurin yksittäinen räjähdelainemäärä - SSP1
- Suurin yksittäinen räjähdelainemäärä - SSP2



— Hankealue

Taustakartta © Maanmittauslaitos

Bild 8 Exponeringsområden för tillfällig hörselnedsättning och flyktreaktion för sälar vid schaktning– Schaktning 1. SSP = Ljudhastighetsprofil



Hylkeen lyhytaikaisen kuulontarkkuuden heikkenemisen ja pakenemisreaktion altistusalue

- Keskimääräinen räjähdelainemäärä - SSP1
- Keskimääräinen räjähdelainemäärä - SSP2
- Suurin yksittäinen räjähdelainemäärä - SSP1
- Suurin yksittäinen räjähdelainemäärä - SSP2



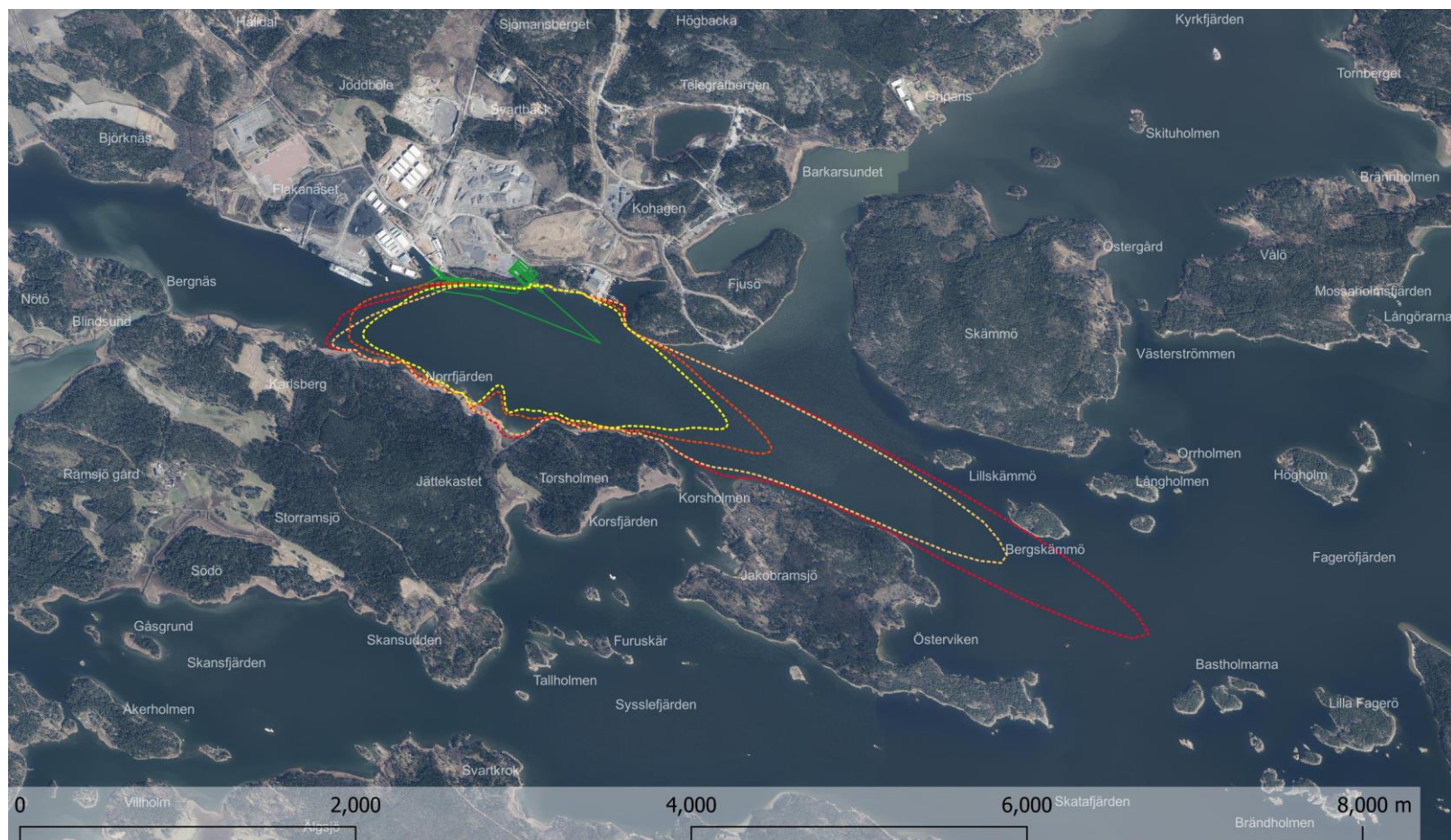
— Hankealue

Taustakartta © Maanmittauslaitos

Bild 9 Exponeringsområden för tillfällig hörselnedsättning och flyktreaktion för sälar vid schaktning- Schaktning 2. SSP = Ljudhastighetsprofil

Tabell 8 Områden med permanent hörselnedsättning vid exponering för undervattensschaktning.

Vedenalainen louhinta - Pysyvän kuulonaleneman altistusalue - Merinisäkkäät					
Skenaario	SSP	Kuuloryhmä	Kynnysarvo	Altistusalueen maksimi [m]	Altistusalueen keskiarvo [m]
Louhinta 1 KA	1	NOAA HF PTS Pyöriäinen	155 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	1406	527
Louhinta 1 KA	2	NOAA HF PTS Pyöriäinen	155 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	3230	628
Louhinta 1 MAKS	1	NOAA HF PTS Pyöriäinen	155 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	1702	563
Louhinta 1 MAKS	2	NOAA HF PTS Pyöriäinen	155 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	4198	657
Louhinta 2 KA	1	NOAA HF PTS Pyöriäinen	155 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	1493	529
Louhinta 2 KA	2	NOAA HF PTS Pyöriäinen	155 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	3037	684
Louhinta 2 MAKS	1	NOAA HF PTS Pyöriäinen	155 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	1819	563
Louhinta 2 MAKS	2	NOAA HF PTS Pyöriäinen	155 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	3776	712
Louhinta 1 KA	1	NOAA HF PTS Hylje	185 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	1516	553
Louhinta 1 KA	2	NOAA HF PTS Hylje	185 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	1369	534
Louhinta 1 MAKS	1	NOAA HF PTS Hylje	185 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	1927	609
Louhinta 1 MAKS	2	NOAA HF PTS Hylje	185 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	1809	597
Louhinta 2 KA	1	NOAA HF PTS Hylje	185 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	1455	550
Louhinta 2 KA	2	NOAA HF PTS Hylje	185 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	1365	548
Louhinta 2 MAKS	1	NOAA HF PTS Hylje	185 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	1983	610
Louhinta 2 MAKS	2	NOAA HF PTS Hylje	185 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	1876	606



Pyöriäisen pysyvän kuulonaleneman altistusalue

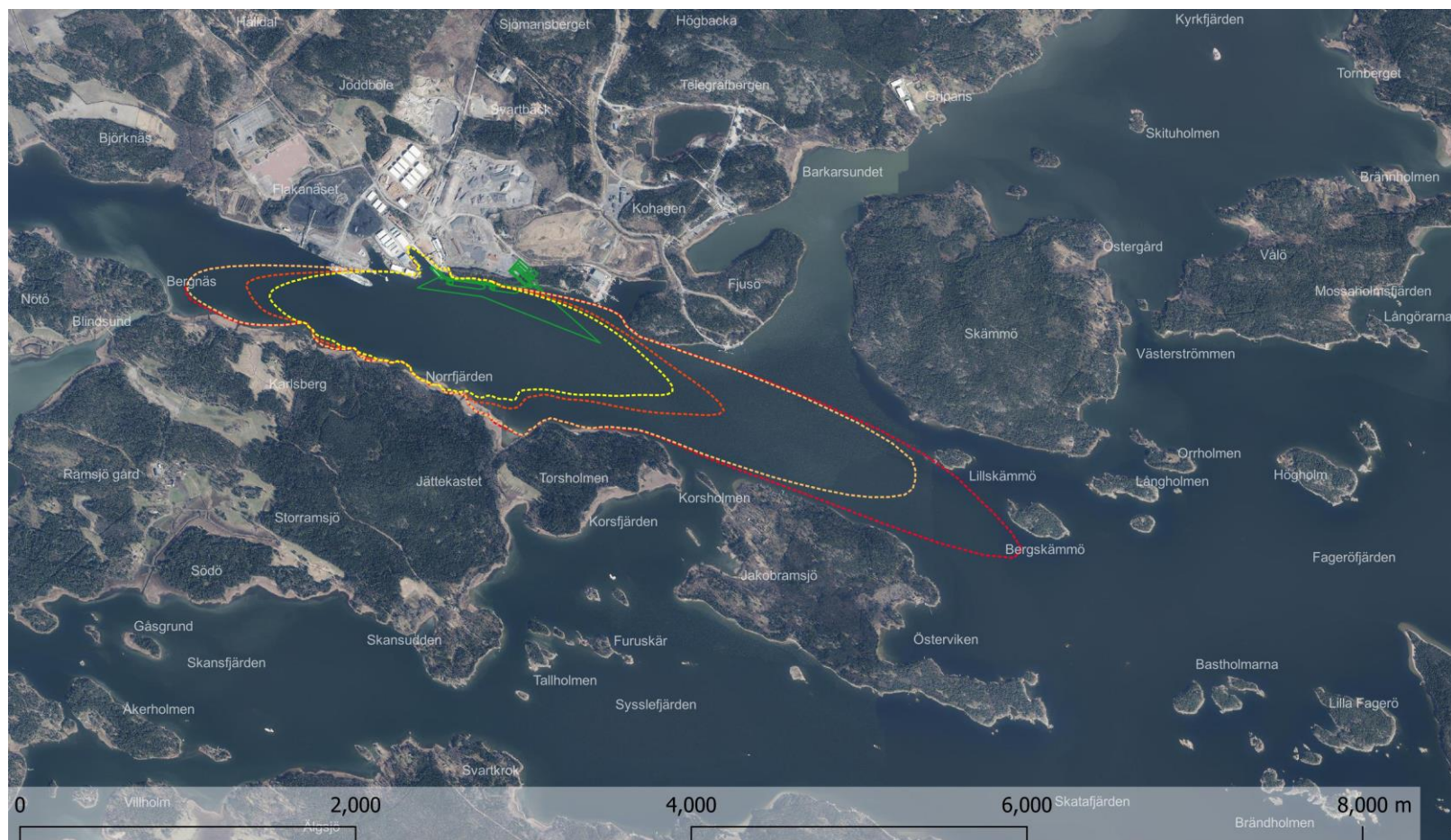
- Keskimääräinen räjähdelainemäärä - SSP1
- Keskimääräinen räjähdelainemäärä - SSP2
- Suurin yksittäinen räjähdelainemäärä - SSP1
- Suurin yksittäinen räjähdelainemäärä - SSP2



— Hankealue

Taustakartta © Maanmittauslaitos

Bild 10 Exponeringsområden för permanent hörselnedsättning för tumlaren vid schaktningshändelser - Schaktning 1. SSP = Ljudhastighetsprofil



Pyöriäisen pysyvän kuulonaleneman altistusalue

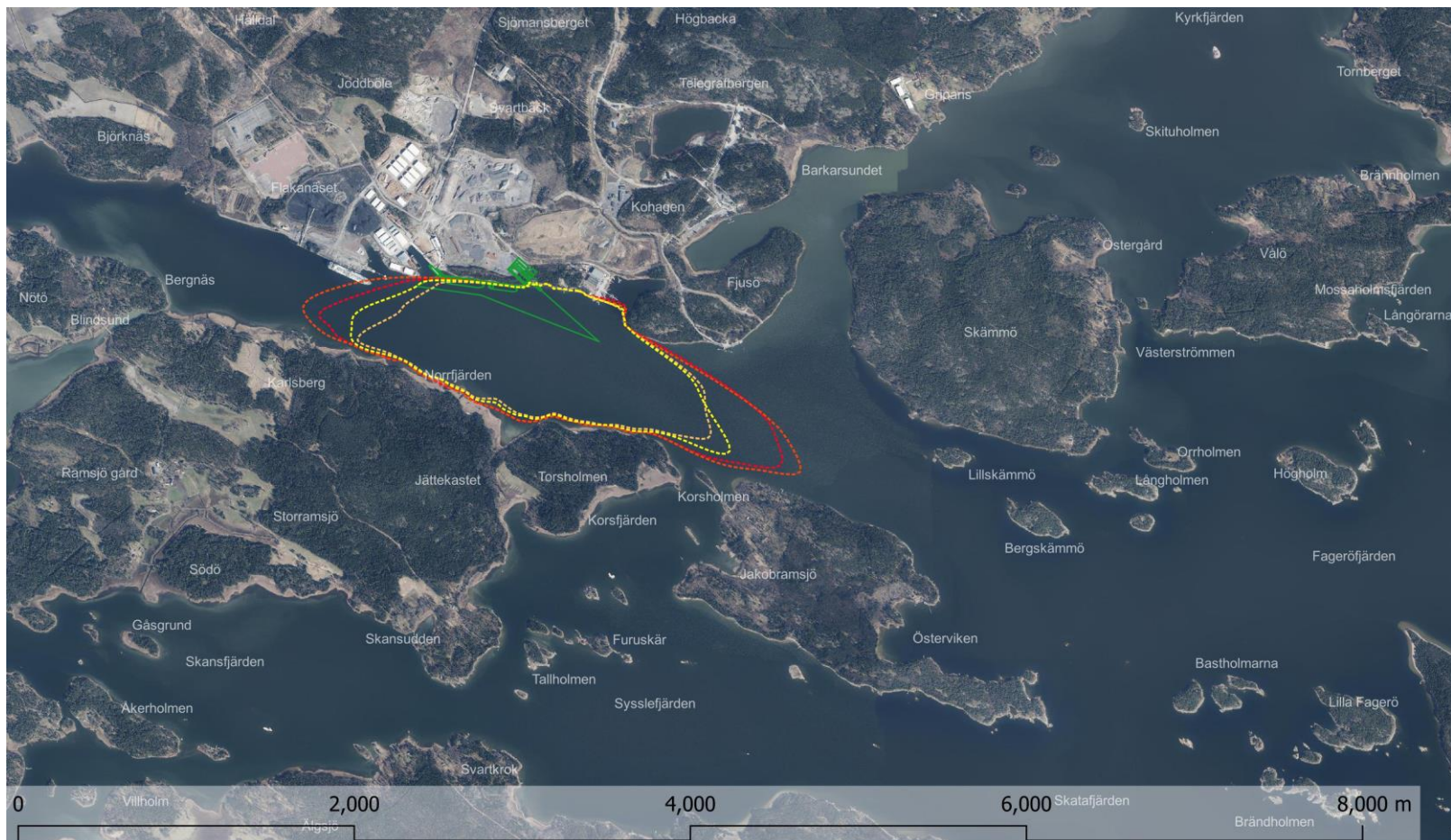
- Keskimääräinen räjähdelainemäärä - SSP1
- Keskimääräinen räjähdelainemäärä - SSP2
- Suurin yksittäinen räjähdelainemäärä - SSP1
- Suurin yksittäinen räjähdelainemäärä - SSP2



— Hankealue

Taustakartta © Maanmittauslaitos

Bild 11 Exponeringsområden för permanent hörselnedsättning för tumlare vid schaktningshändelser – Schaktning 2. SSP = Ljudhastighetsprofil



Hylkeen pysyvän kuulonäenneman altistusalue

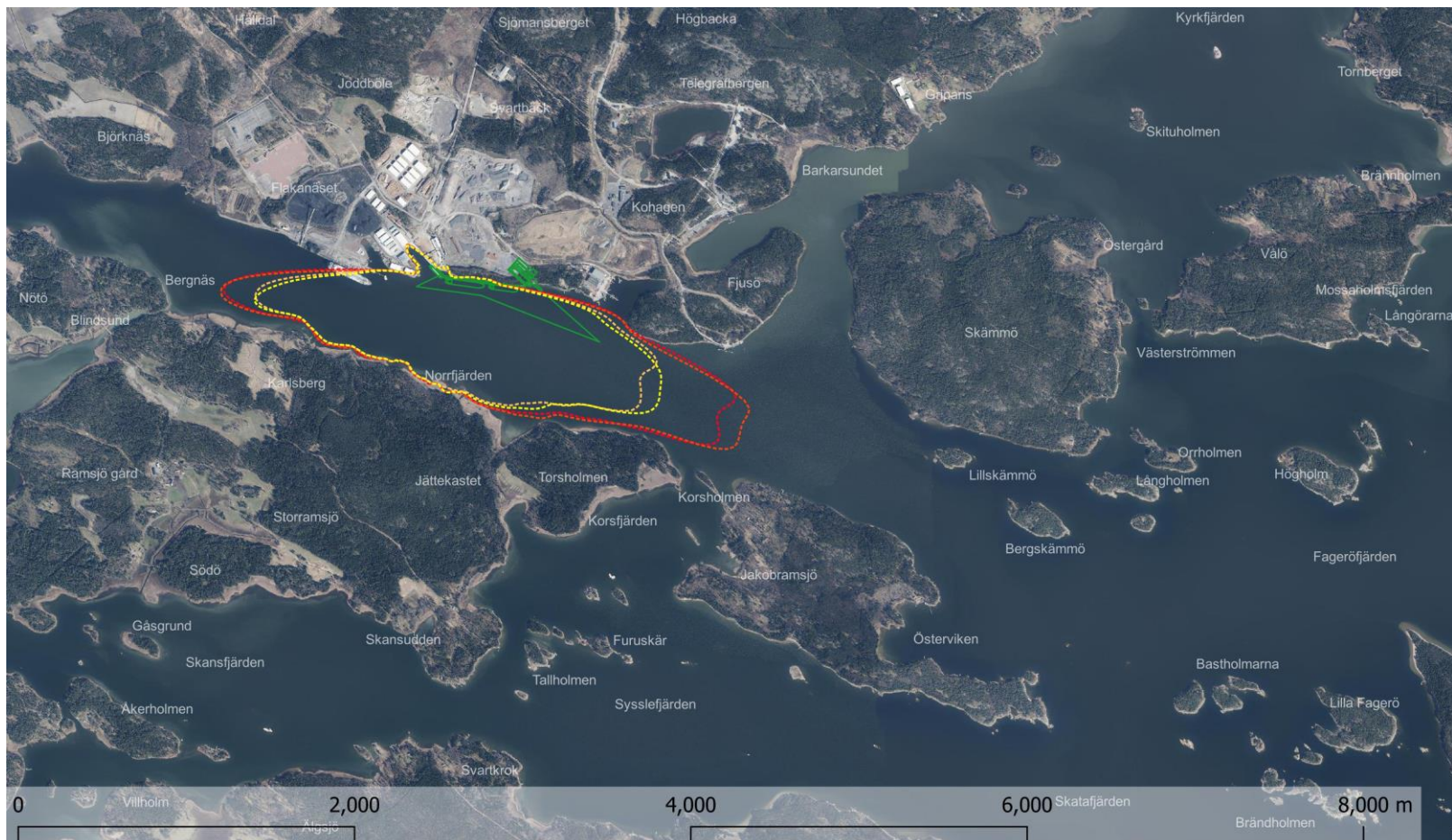
- Keskimääräinen räjähdemäärä - SSP1
- Keskimääräinen räjähdemäärä - SSP2
- Suurin yksittäinen räjähdemäärä - SSP1
- Suurin yksittäinen räjähdemäärä - SSP2



— Hankealue

Taustakartta © Maanmittauslaitos

Bild 12 Exponeringsområden för permanent hörselnedsättning för sälar vid schaktning- Schaktning 1. SSP = Ljudhastighetsprofil



Hylkeen pysyvän kuulonaleneman altistusalue

- Keskimääräinen räjähdelainemäärä - SSP1
- Keskimääräinen räjähdelainemäärä - SSP2
- Suurin yksittäinen räjähdelainemäärä - SSP1
- Suurin yksittäinen räjähdelainemäärä - SSP2



— Hankealue

Taustakartta © Maanmittauslaitos

Bild 13 Exponeringsområden för permanent hörselnedsättning för sälar vid schaktning- Schaktning 2. SSP = ljudhastighetsprofil

Tabell 9 Områden där fisk riskerar att dö eller utsättas för dödlig skada på grund av undervattensschaktning.

Kalojen kuoleman tai kuolettavan vamman altistusalueet					
Skenaario	SSP	Kuuloryhmä	Kynnysarvo	Altistusalueen maksimi [m]	Altistusalueen keskiarvo [m]
Louhinta 1 KA	1	Kalat, painottamaton	229 SPLpk, dB re 1 µPa	406	217
Louhinta 1 KA	2	Kalat, painottamaton	229 SPLpk, dB re 1 µPa	337	193
Louhinta 1 MAKS	1	Kalat, painottamaton	229 SPLpk, dB re 1 µPa	660	339
Louhinta 1 MAKS	2	Kalat, painottamaton	229 SPLpk, dB re 1 µPa	560	306
Louhinta 2 KA	1	Kalat, painottamaton	229 SPLpk, dB re 1 µPa	391	245
Louhinta 2 KA	2	Kalat, painottamaton	229 SPLpk, dB re 1 µPa	333	218
Louhinta 2 MAKS	1	Kalat, painottamaton	229 SPLpk, dB re 1 µPa	690	383
Louhinta 2 MAKS	2	Kalat, painottamaton	229 SPLpk, dB re 1 µPa	655	368



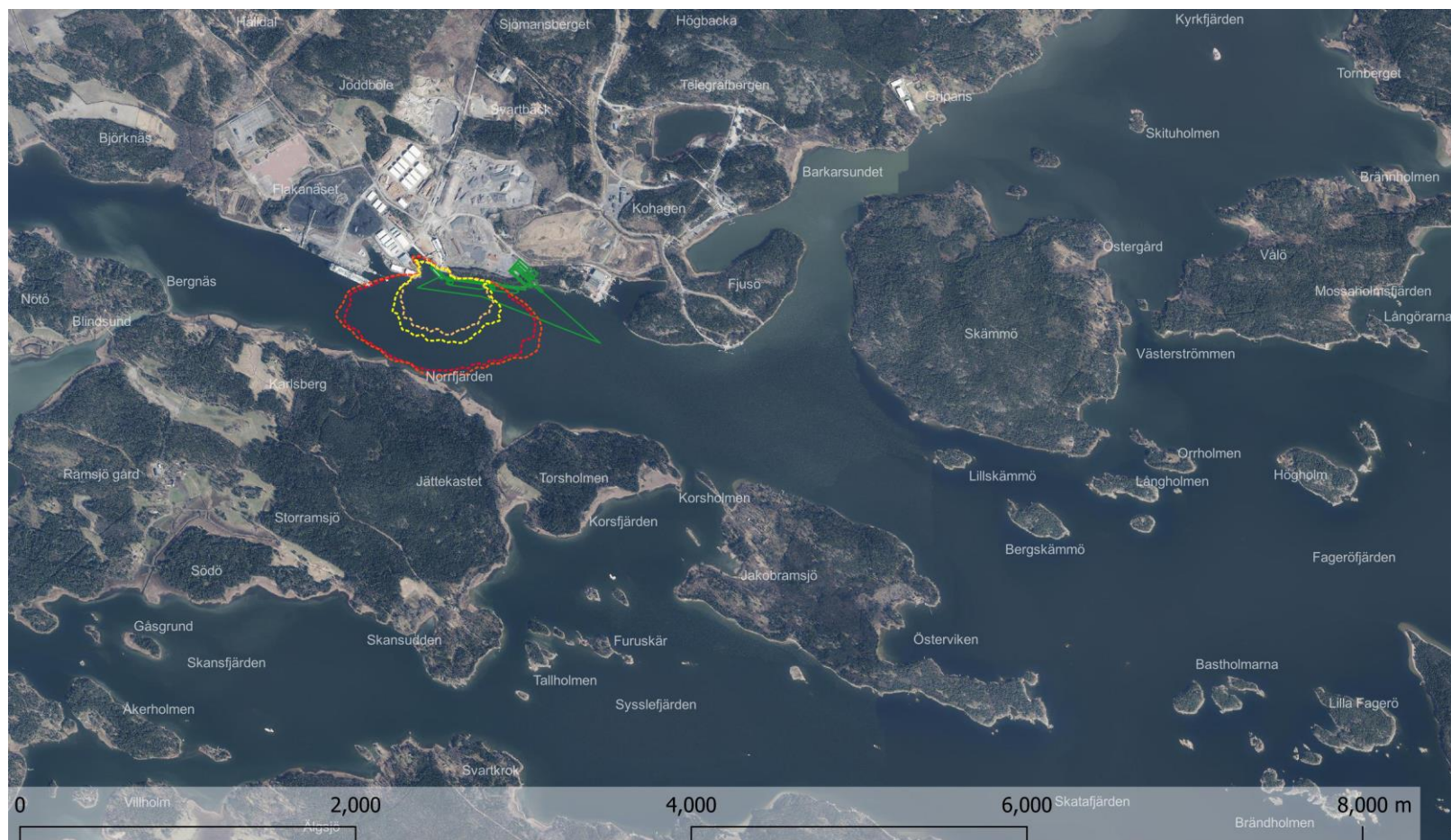
Kalojen kuoleman tai kuolettavan vamman altistusalue

- Keskimääräinen räjähdelainemäärä - SSP1
- Keskimääräinen räjähdelainemäärä - SSP2
- Suurin yksittäinen räjähdelainemäärä - SSP1
- Suurin yksittäinen räjähdelainemäärä - SSP2



— Hankealue
Taustakartta © Maanmittauslaitos

Bild 13 Områden där fisk riskerar att dö eller utsättas för dödlig skada - Schaktning 1. SSP = Ljudhastighetsprofil



Kalojen kuoleman tai kuolettavan vamman altistusalue

- Keskimääräinen räjähdelainemäärä - SSP1
- Keskimääräinen räjähdelainemäärä - SSP2
- Suurin yksittäinen räjähdelainemäärä - SSP1
- Suurin yksittäinen räjähdelainemäärä - SSP2



— Hankealue
Taustakartta © Maanmittauslaitos

Bild 14 Områden där fisk riskerar att dö eller utsättas för dödlig skada – Schaktning 2. SSP = Ljudhastighetsprofil

6.2 Schaktning på land (AWT-terminal)

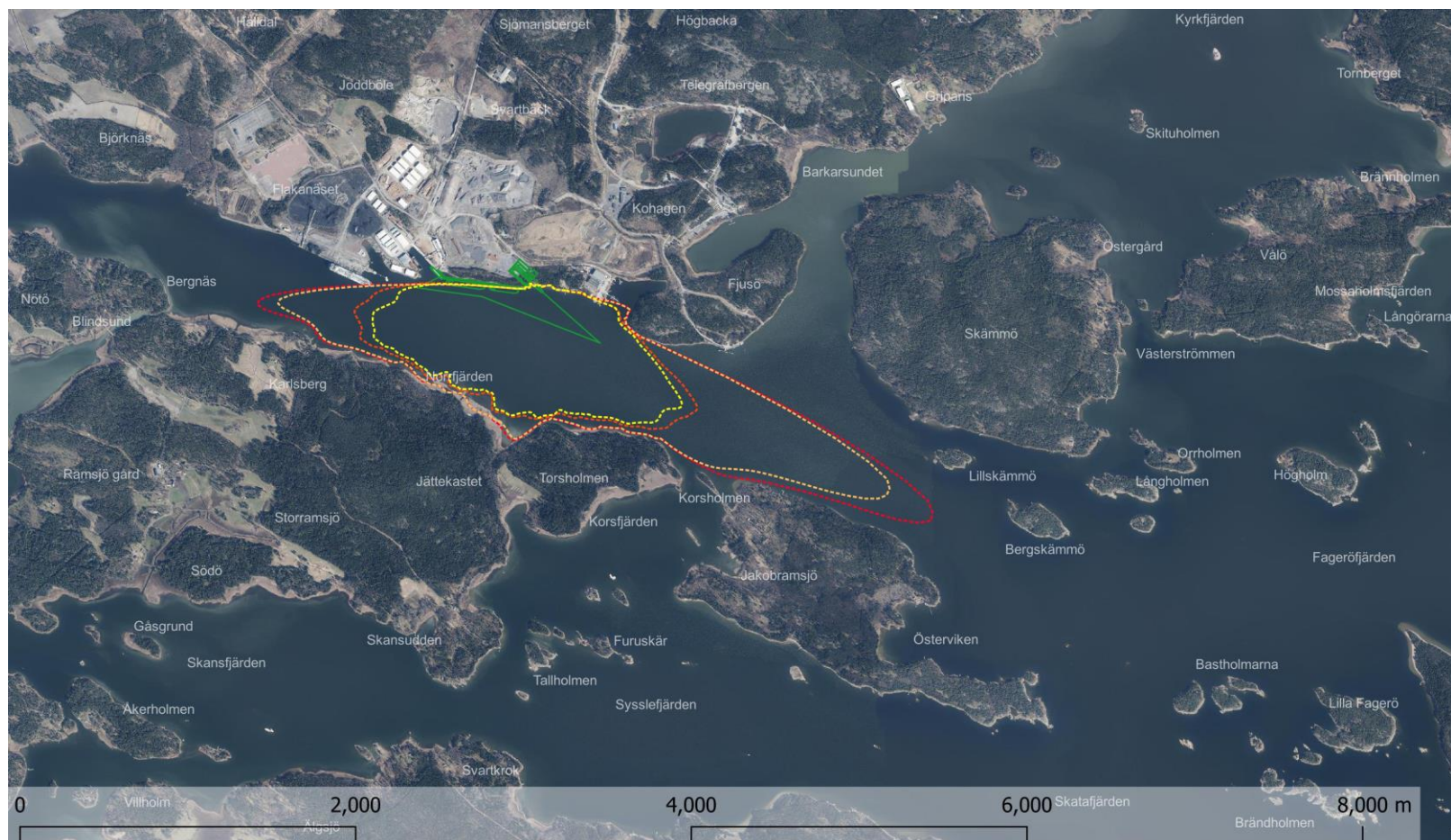
Exponeringsområdena för markschaktning visas i tabell 10. Det genomsnittliga exponeringsavståndet för tillfällig hörselnedsättning och flyktreaktion var 571 m för tumlare med ett maximalt avstånd på 2748 meter (bild 16). För sälar var det genomsnittliga exponeringsavståndet för tillfällig hörselnedsättning eller flyktreaktion emellertid 487 meter och det maximala avståndet var 1161 meter (bild 17).

Exponeringsavståndet för permanent hörselnedsättning hos tumlare nådde en topp på 903 m, med ett genomsnitt på 363 m (bild 18). För sälar varierade exponeringsavstånden för permanent hörselnedsättning från i genomsnitt 135 meter, med ett maximalt avstånd på 295 meter (bild 19).

Exponeringsområdet för maximal ljudtrycksnivå 229 SPLpk, dB re 1 μ Pa på grund av att fisk dött eller skadats med dödlig utgång var mindre än 50 meter från modelleringspunkten i all modellering.

Tabell 10 Alla modellerade exponeringsområden för markschaktning.

Maa-alueen louhinta - AWT-terminaali					
Skenaario	SSP	Kuuloryhmä	Kynnysarvo	Altistusalueen maksimi [m]	Altistusalueen keskiarvo [m]
Louhinta AWT KA	1	NOAA HF TTS Pyöriäinen 140	140 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	1130	515
Louhinta AWT KA	2	NOAA HF TTS Pyöriäinen 140	140 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	2443	607
Louhinta AWT MAX	1	NOAA HF TTS Pyöriäinen 140	140 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	1217	540
Louhinta AWT MAX	2	NOAA HF TTS Pyöriäinen 140	140 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	2748	623
Louhinta AWT KA	1	NOAA PW TTS Hylje 170	170 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	938	474
Louhinta AWT KA	2	NOAA PW TTS Hylje 170	170 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	941	450
Louhinta AWT MAX	1	NOAA PW TTS Hylje 170	170 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	1161	525
Louhinta AWT MAX	2	NOAA PW TTS Hylje 170	170 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	1158	499
Louhinta AWT KA	1	NOAA HF PTS Pyöriäinen 155	155 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	658	313
Louhinta AWT KA	2	NOAA HF PTS Pyöriäinen 155	155 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	720	378
Louhinta AWT MAX	1	NOAA HF PTS Pyöriäinen 155	155 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	701	336
Louhinta AWT MAX	2	NOAA HF PTS Pyöriäinen 155	155 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	903	428
Louhinta AWT KA	1	NOAA PW PTS Hylje 185	185 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	262	122
Louhinta AWT KA	2	NOAA PW PTS Hylje 185	185 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	220	121
Louhinta AWT MAX	1	NOAA PW PTS Hylje 185	185 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	295	150
Louhinta AWT MAX	2	NOAA PW PTS Hylje 185	185 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	271	146
Louhinta AWT KA	1	Kalat, painottomaton	229 SPLpk, dB re 1 μPa	<50	<50
Louhinta AWT KA	2	Kalat, painottomaton	229 SPLpk, dB re 1 μPa	<50	<50
Louhinta AWT MAKS	1	Kalat, painottomaton	229 SPLpk, dB re 1 μPa	<50	<50
Louhinta AWT MAKS	2	Kalat, painottomaton	229 SPLpk, dB re 1 μPa	<50	<50



Pyöriäisen lyhytaikaisen kuulontarkkuuden heikkenemisen ja pakenemisreaktion altistusalue

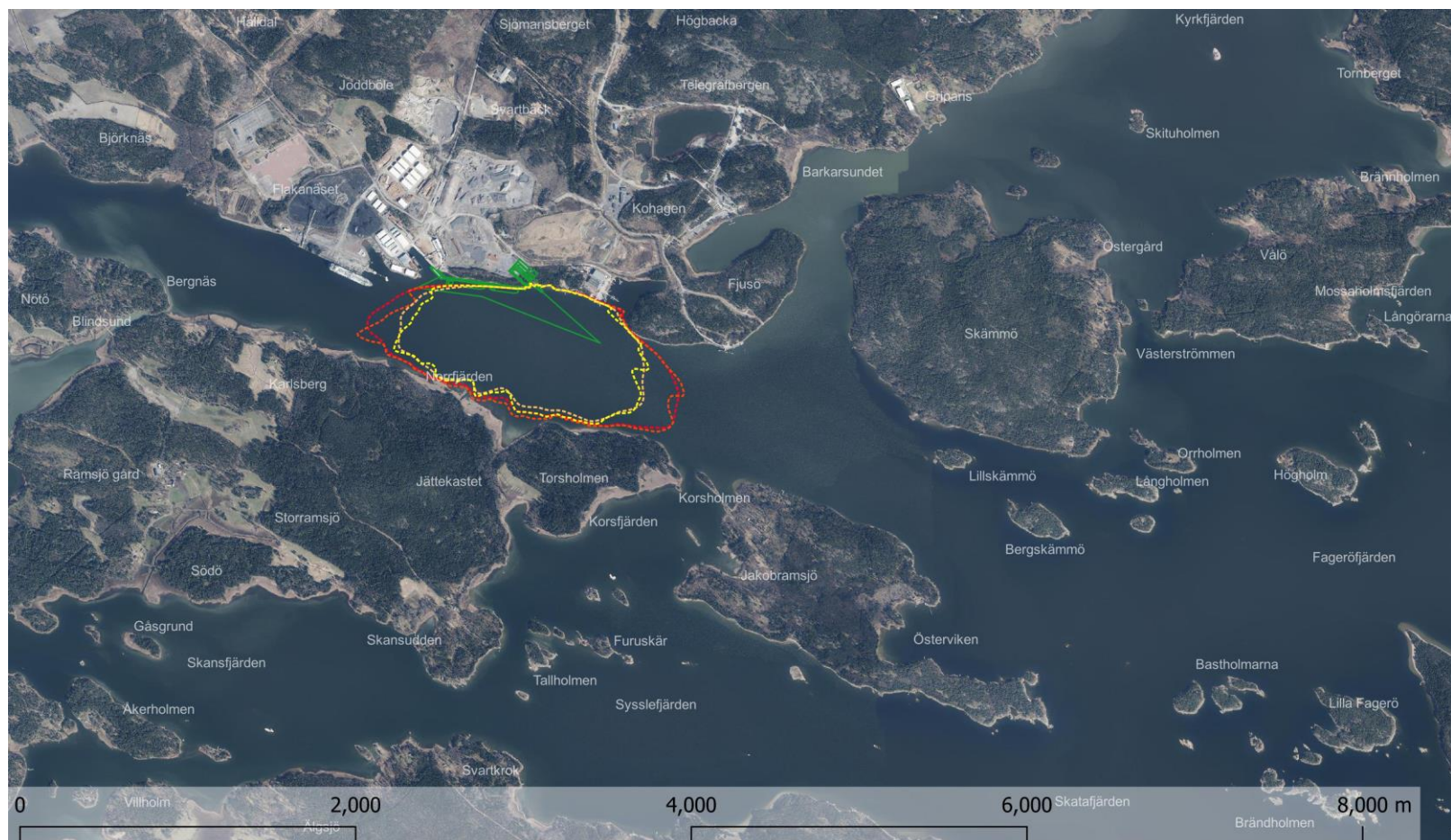
- Keskimääräinen räjähdeainemäärä - SSP1
- Keskimääräinen räjähdeainemäärä - SSP2
- Suurin yksittäinen räjähdeainemäärä - SSP1
- Suurin yksittäinen räjähdeainemäärä - SSP2



— Hankealue

Taustakartta © Maanmittauslaitos

Bild 15 Exponeringsområden för tillfällig hörselnedsättning och flyktreaktion för tumlare i samband med schaktning. SSP = ljudhastighetsprofil



Hylkeen lyhytaikaisen kuulontarkkuuden heikkenemisen ja pakenemisreaktion altistusalue

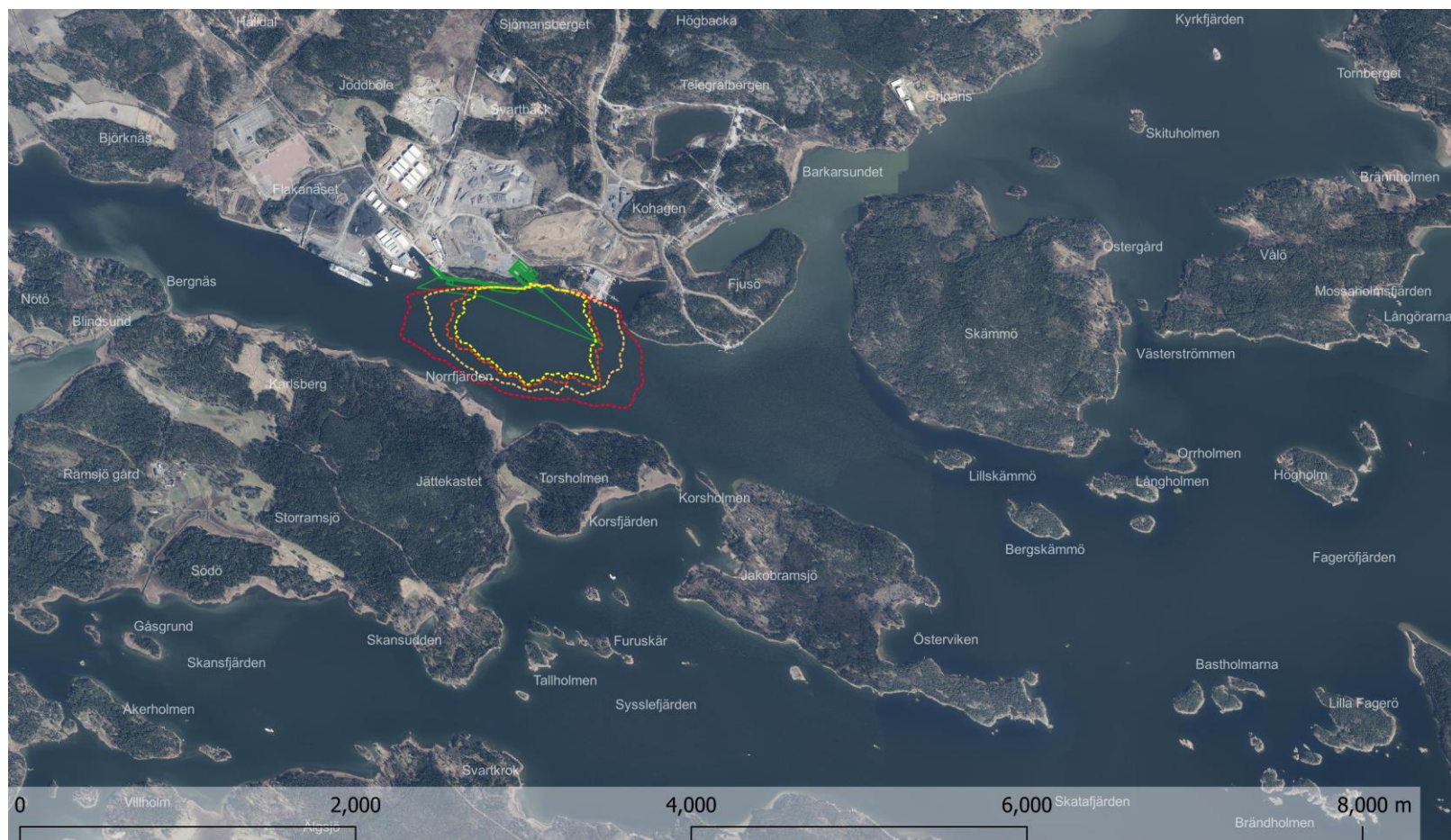
- Keskimääräinen räjähdeainemäärä - SSP1
- Keskimääräinen räjähdeainemäärä - SSP2
- Suurin yksittäinen räjähdeainemäärä - SSP1
- Suurin yksittäinen räjähdeainemäärä - SSP2



— Hankealue

Taustakartta © Maanmittauslaitos

Bild 16 Exponeringsområden för tillfällig hörselnedsättning och flyktreaktion i samband med schaktning. SSP = Ljudhastighetsprofil



Pyöriäisen pysyvän kuulonaleneman altistusalue

- Keskimääräinen räjähdeainemäärä - SSP1
- Keskimääräinen räjähdeainemäärä - SSP2
- Suurin yksittäinen räjähdeainemäärä - SSP1
- Suurin yksittäinen räjähdeainemäärä - SSP2



— Hankealue
Taustakartta © Maanmittauslaitos

Bild 17 Exponeringsområden för permanent hörselnedsättning för tumlare vid schaktning. SSP = ljudhastighetsprofil



Hylkeen pysyvän kuulonaleneman altistusalue

- Keskimääräinen räjähdelainemäärä - SSP1
- Keskimääräinen räjähdelainemäärä - SSP2
- Suurin yksittäinen räjähdelainemäärä - SSP1
- Suurin yksittäinen räjähdelainemäärä - SSP2



— Hankealue
Taustakartta © Maanmittauslaitos

Bild 18 Exponeringsområden för permanent hörselnedsättning för tumlare vid schaktning. SSP = Ljudhastighetsprofil

6.3 Borrpålning

Exponeringsområdena i modelleringen baserar sig på antagandet att borrpålning utförs cirka 4–5 timmar per dygn. De exponerade områdena visas i tabell 11.

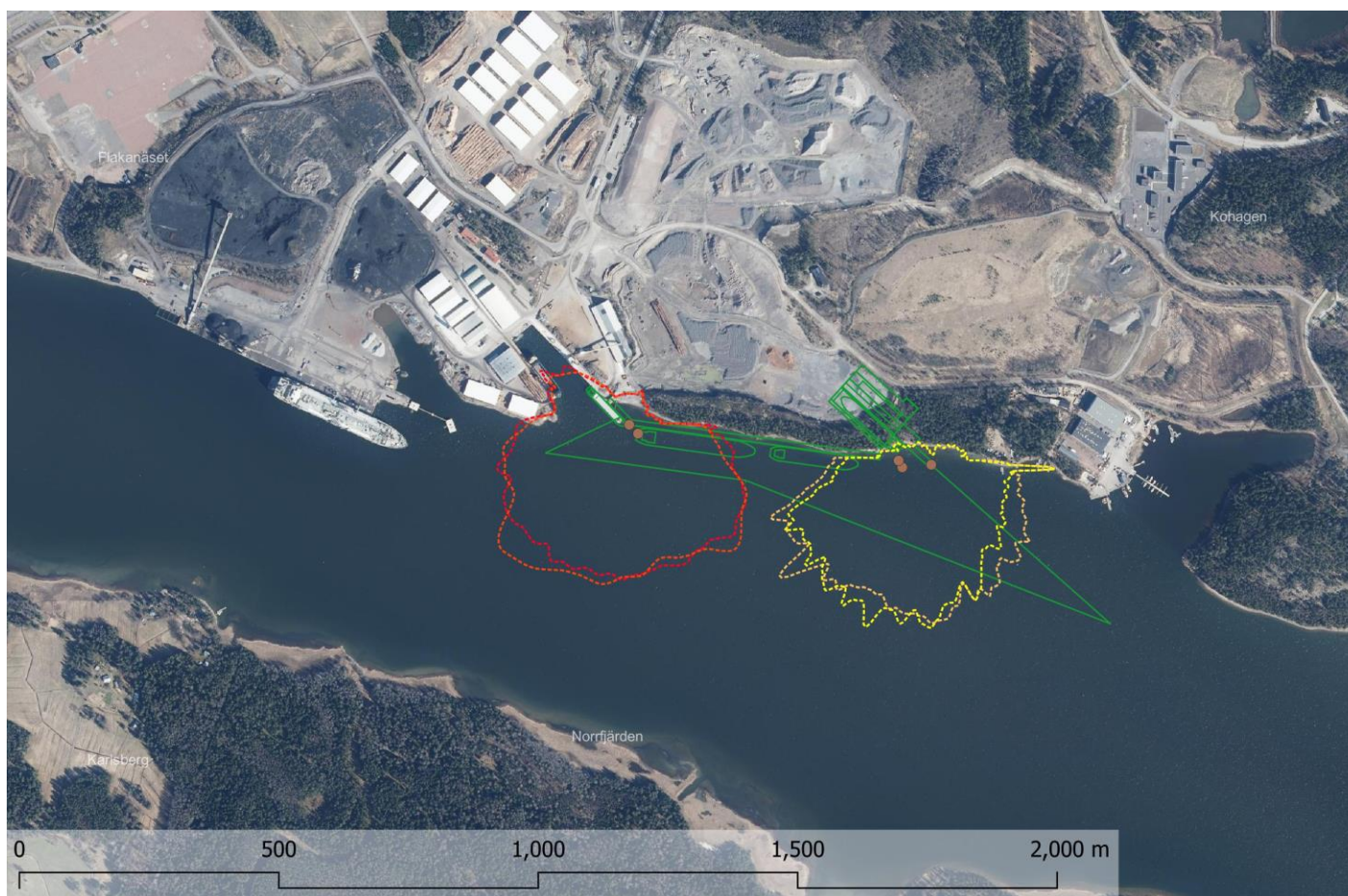
I modelleringen av borrpålning var det genomsnittliga exponeringsavståndet för tillfällig hörselnedsättning eller flyktreaktion hos tumlare 187 meter med ett maximalt avstånd på 407 meter (bild 20). För sälar var det genomsnittliga exponeringsavståndet för tillfällig hörselnedsättning eller flyktreaktion emellertid 101 meter och det maximala avståndet var 232 meter (bild 21).

Exponeringsavståndet för permanent hörselnedsättning hos tumlare nådde en topp på 337 m, med ett genomsnitt på 64 m (bild 22). För sälar sträckte sig exponeringsavstånden för permanent hörselnedsättning vid borrpålar till mindre än 50 meter från modelleringspunkten.

Exponeringsområdet för den tillfälliga hörselnedsättningens ljudtrycksnivå på 158 dB SPL hos fisk modellerades under 50 meter under alla scenarier. Dessutom har gränsvärdet fastställts utifrån antagandet att fisk kommer att utsättas för buller under 12 timmar. Det är troligt att fisken kommer att fly från området innan dess.

Tabell 11 Alla modellerade exponeringsområden för borrhålning.

Porapaalutus					
Skenaario	SSP	Kuuloryhmä	Kynnysarvo	Altistusalueen maksimi [m]	Altistusalueen keskiarvo [m]
Porapaalutus 1	1	NOAA HF TTS Pyöriäinen 153	153 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	337	177
Porapaalutus 1	2	NOAA HF TTS Pyöriäinen 153	153 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	362	188
Porapaalutus 2	1	NOAA HF TTS Pyöriäinen 153	153 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	353	191
Porapaalutus 2	2	NOAA HF TTS Pyöriäinen 153	153 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	407	191
Porapaalutus 1	1	NOAA PW TTS Hylje 181	181 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	232	92
Porapaalutus 1	2	NOAA PW TTS Hylje 181	181 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	231	97
Porapaalutus 2	1	NOAA PW TTS Hylje 181	181 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	216	106
Porapaalutus 2	2	NOAA PW TTS Hylje 181	181 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	225	109
Porapaalutus 1	1	NOAA HF PTS Pyöriäinen 173	173 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	260	59
Porapaalutus 1	2	NOAA HF PTS Pyöriäinen 173	173 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	259	57
Porapaalutus 2	1	NOAA HF PTS Pyöriäinen 173	173 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	337	69
Porapaalutus 2	2	NOAA HF PTS Pyöriäinen 173	173 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	302	69
Porapaalutus 1	1	NOAA PW PTS Hylje 201	201 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<50	<50
Porapaalutus 1	2	NOAA PW PTS Hylje 201	201 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<50	<50
Porapaalutus 2	1	NOAA PW PTS Hylje 201	201 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<50	<50
Porapaalutus 2	2	NOAA PW PTS Hylje 201	201 SEL, dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	<50	<50
Porapaalutus 1	1	Kalat, painottomaton	153 SPL, dB re 1 μPa	<50	<50
Porapaalutus 2	1	Kalat, painottomaton	153 SPL, dB re 1 μPa	<50	<50
Porapaalutus 1	2	Kalat, painottomaton	153 SPL, dB re 1 μPa	<50	<50
Porapaalutus 2	2	Kalat, painottomaton	153 SPL, dB re 1 μPa	<50	<50



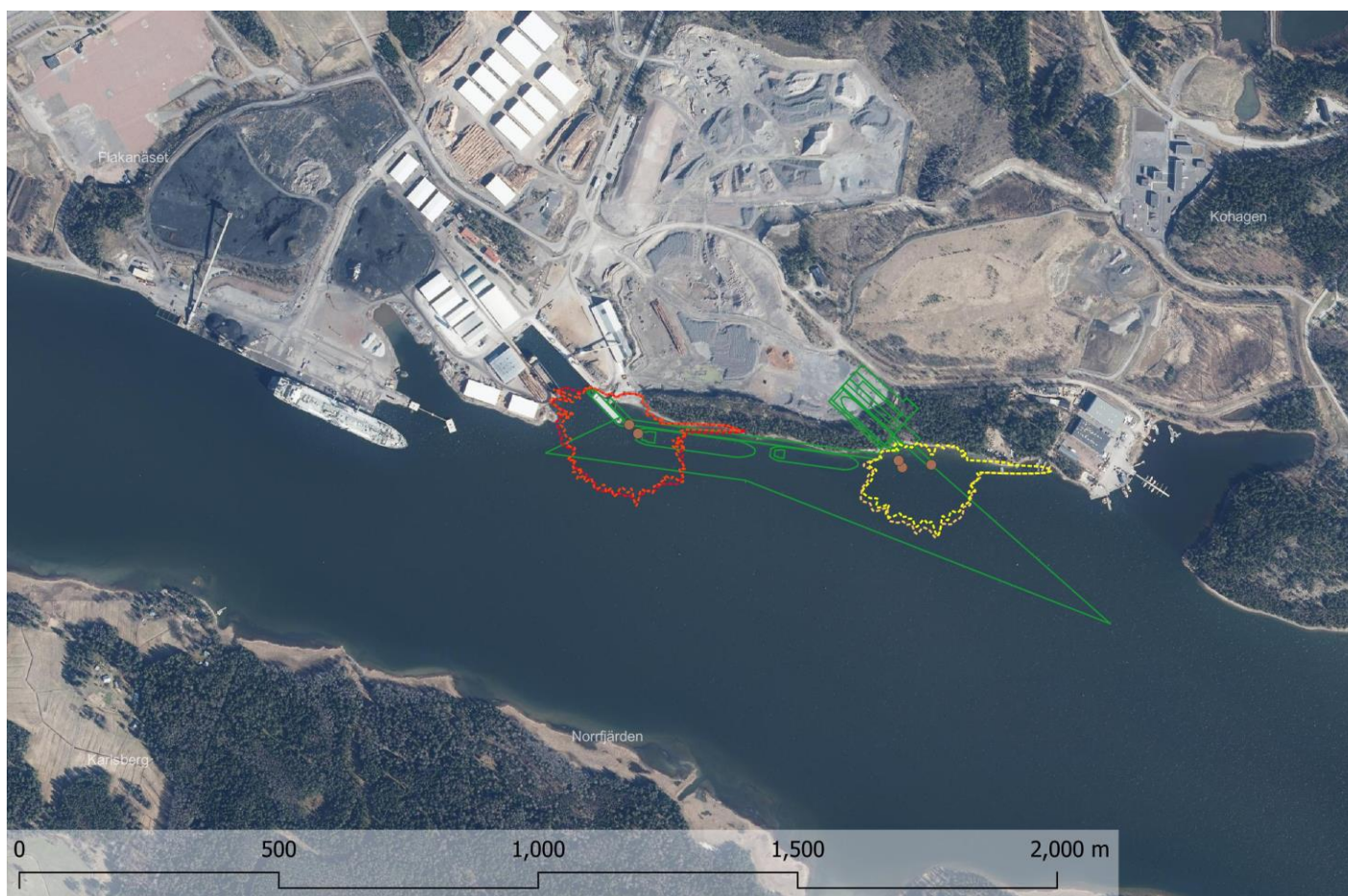
Pyöriäisen lyhytaikaisen kuulontarkkuuden heikkenemisen ja pakenemisreaktion

- Porapaalutus 1 SSP1
- Porapaalutus 1 SSP2
- Porapaalutus 2 SSP1
- Porapaalutus 2 SSP2



Bild 19 Exponeringsområden för tillfällig hörselnedsättning och flyktreaktion för turnlare vid borrhålning. SSP = Ljudhastighetsprofil

— Hälsö
Taustakar



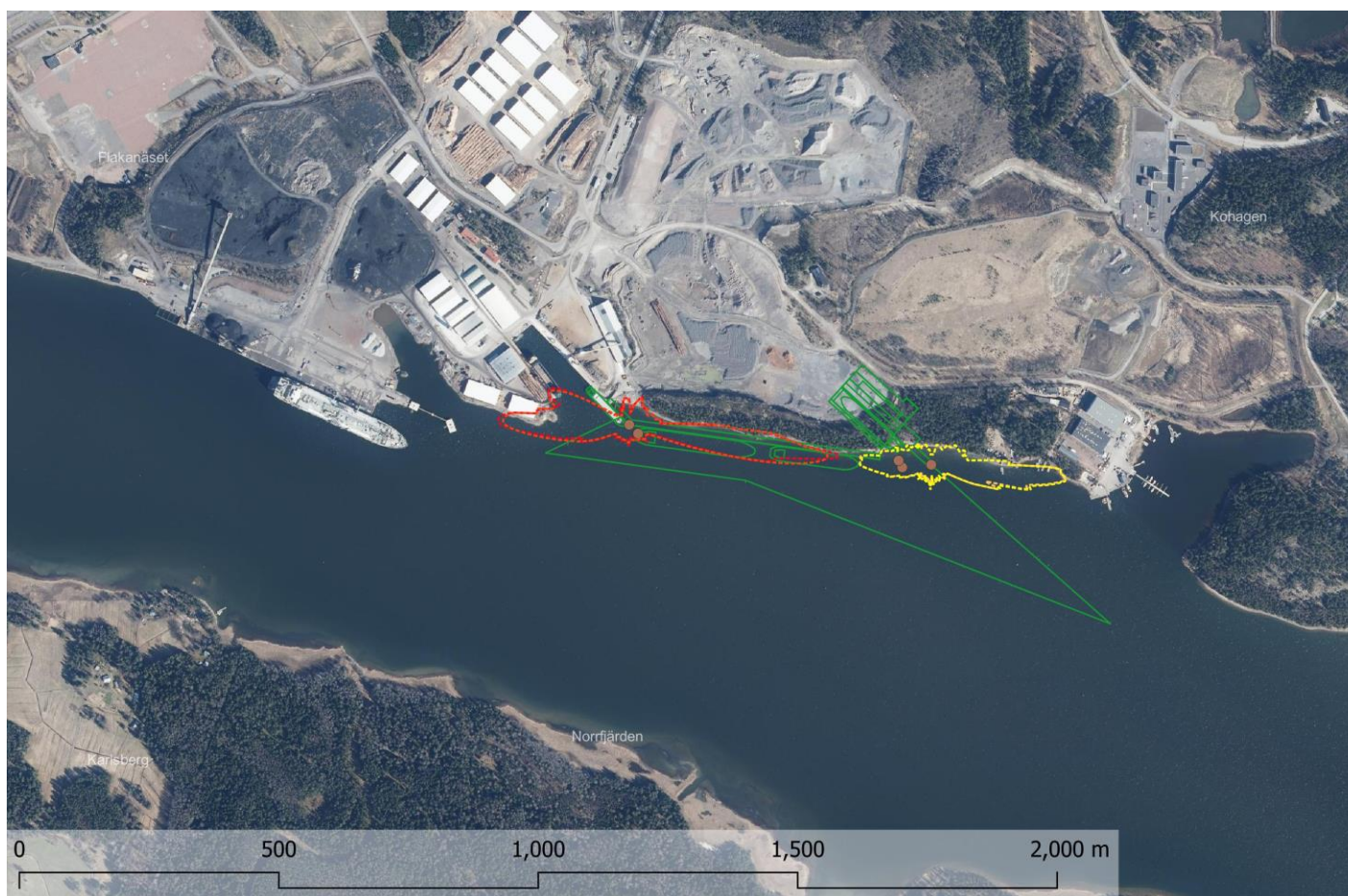
Hylkeen lyhytaikaisen kuulontarkkuuden heikkenemisen ja pakenemisreaktion altti

- Porapaalutus 1 SSP1
- Porapaalutus 1 SSP2
- Porapaalutus 2 SSP1
- Porapaalutus 2 SSP2



Bild 20 Exponeringsområden för tillfällig hörselnedsättning och flyktreaktion för sälar vid borrhålning. SSP = Ljudhastighetsprofil

— Ha
Taustakar



Pyöriäisen pysyvän kuulonalaneneman altistusalue

- Porapaalutus 1 SSP1
- Porapaalutus 1 SSP2
- Porapaalutus 2 SSP1
- Porapaalutus 2 SSP2



Bild 21 Exponeringsområden för permanenta hörselnedsättning för tumlare vid borrpålning. SSP = Ljudhastighetsprofil

Haustakar
Taustakar

6.4 Osäkerheter i samband med simuleringen

Utgångsvärdena för de bullerkällor som användes i modelleringen baserades på beräkningsmetoder och uppmätt data. Mätresultaten kommer dock från lite olika miljöer och det finns felmarginaller i bakräkningen av de uppmätta nivåerna till utgångsnivåerna. För att säkerställa konservatism användes en större mängd av det uppskattade explosiva ämnet i modelleringen, vilket minskade risken för underskattning. Det bör också noteras att vid undervattensschaktning kan de tekniska detaljerna kring sprängningen och den person som utför sprängningen ha en betydande inverkan på den slutliga mängden explosionsenergi.

I modelleringen användes öppna data i djupmodellen, som delvis var generella i det modellerade området. Korrekt information om sedimentlagren erhöles dock med hjälp av lågfrekventa sonderingar, vilket förbättrade noggrannheten i modelleringen vad gäller

botteneffekterna. Ljudhastighetsprofilerna bestämdes utifrån tidigare mätdata, vilket gjorde vattenutbredningsegenskaperna realistiska i modellen.

De beräkningsmetoder som används i modelleringen används i stor utsträckning och är etablerade beräkningsmetoder inom området undervattensakustik. Metoderna ger god noggrannhet, särskilt i utmanande akustiska miljöer.

Sammanfattningsvis kan konstateras att de största osäkerheterna var relaterade till definitionen av bullerkällornas utgångsnivåer och djupdata. Ett konservativt tillvägagångssätt vid uppskattningen av utgångsnivåer minskade emellertid effekterna av dessa osäkerheter. Sedimentdatans noggrannhet och ljudhastighetsprofilen stärkte modellens tillförlitlighet vad gäller miljöeffekter.

6.5 Lindrande åtgärder

Miljöpåverkan av undervattensbuller kan minskas genom proaktiv planering. Bullerbekämpningsåtgärder kan delas in i åtgärder som syftar antingen till att minska det buller som uppstår, kontrollera dess utveckling eller till att begränsa bullerolägenheter i tid eller rum.

I proaktiv planering vid undervattensbrytning kan intensiteten på den stötvåg som genereras av en explosion potentiellt påverkas av olika tekniska lösningar, till exempel reglering av laddningsstorlekar. Dessutom kan till exempel det mindre avståndet mellan borrhålen tillåta användning av mindre mängder sprängämnen. Dessutom kan man med val av sprängämne reglera explosionens spridningshastighet. Vid pålning kan man välja mindre bullriga tekniker, såsom borrpålning, i stället för traditionell pålning baserad på slagkraft.

Utbredningen av buller från undervattensschaktning kan dämpas med hjälp av en bubbelgardin, särskilt vid stora mängder sprängämnen eller explosioner som utförs i känsliga miljöer. Bubbeldgardiner är en av de vanligaste reduktionsmetoderna som används, och deras dämpningsfrekvensområde beror på bubbeldgarden. Effekten av bubbeldgardiner kan ökas genom att skapa bubblor av olika storlekar och öka luftflödet. Förutom bubbeldgarden beror dämpningens effektivitet på strömmarna och vattendjupet¹⁶. I modelleringen jämfördes det område som påverkades av den största enskilda brytningen om en bubbeldridå användes (Big Bubble Curtain, BBC). Dämpningen som används vid modelleringen av bubbeldridån visas i bild 23¹⁷.

¹⁶ Andersson, M.H., Andersson, S., Ahlsén, J., Andersson, B.L., Hammar, J., Persson, L.K.G., Pihl, J., SigrayP., Wikström, A. A framework for regulating underwater noise during pile driving. s.l.: Swedish Environmental Protection Agency, 2016. ISBN 978-91-620-6775-5.

¹⁷ D. Clorennec, P. Billand, C. Bois and T. Folegot. Characterisation of the efficiency of a bubble curtain in the context of the assessment of underwater explosions in Ålesund. s.l.: Quiet-Oceans, 2019. QO.20190523.10.RAP.001.05A.

Baserat på de modellerade exponeringsområdena (Figur 24) är effekten av bubbelridån betydande. Jämfört med den största enskilda utgrävningen minskade det genomsnittliga exponeringsavståndet för initial tillfällig hörselnedsättning eller skenande reaktion med 9 % (64 m) hos tumlare och 27 % (194 m) hos sälar. Det maximala avståndet minskades med 43 % (2030 m) för tumlare och med upp till 97 % (4181 m) för sälar. Det genomsnittliga exponeringsavståndet för permanent hörselnedsättning minskade med 39 % (275 m) hos tumlare och 74 % (444 m) hos sälar. Det maximala avståndet minskades med 76 % (2940 m) för tumlare och 85 % (1573 m) för sälar.

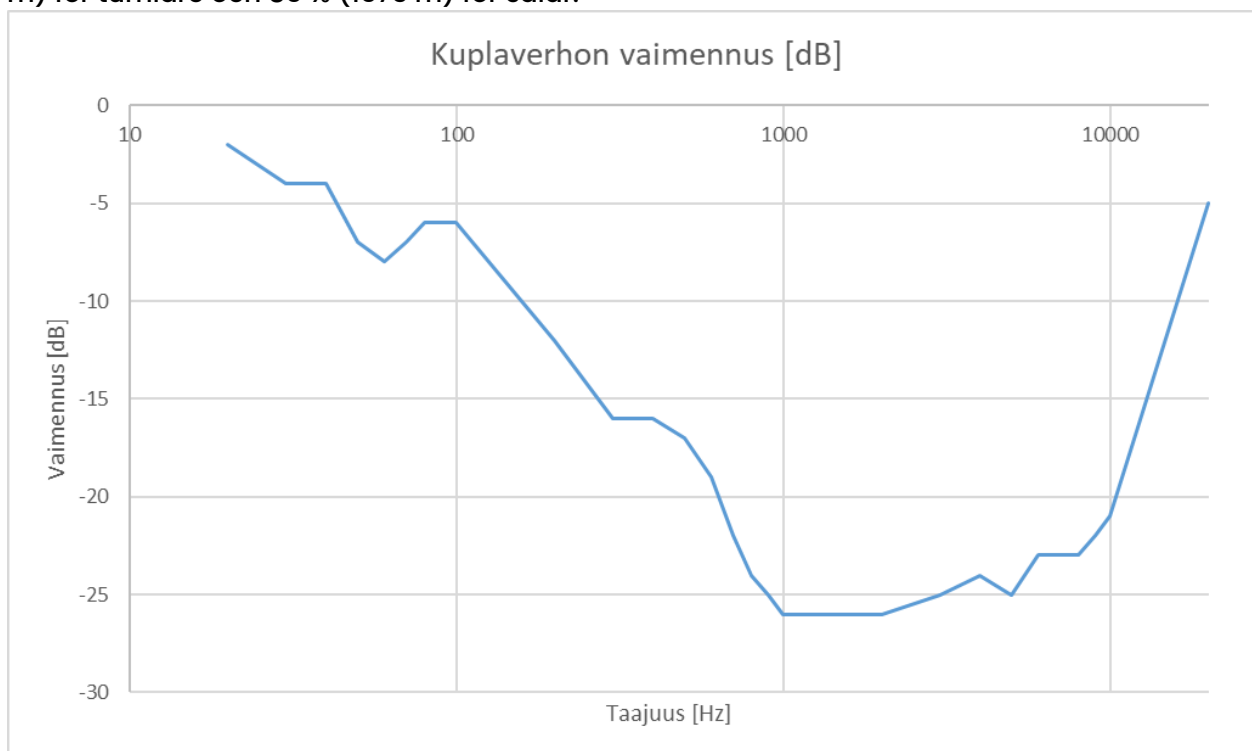
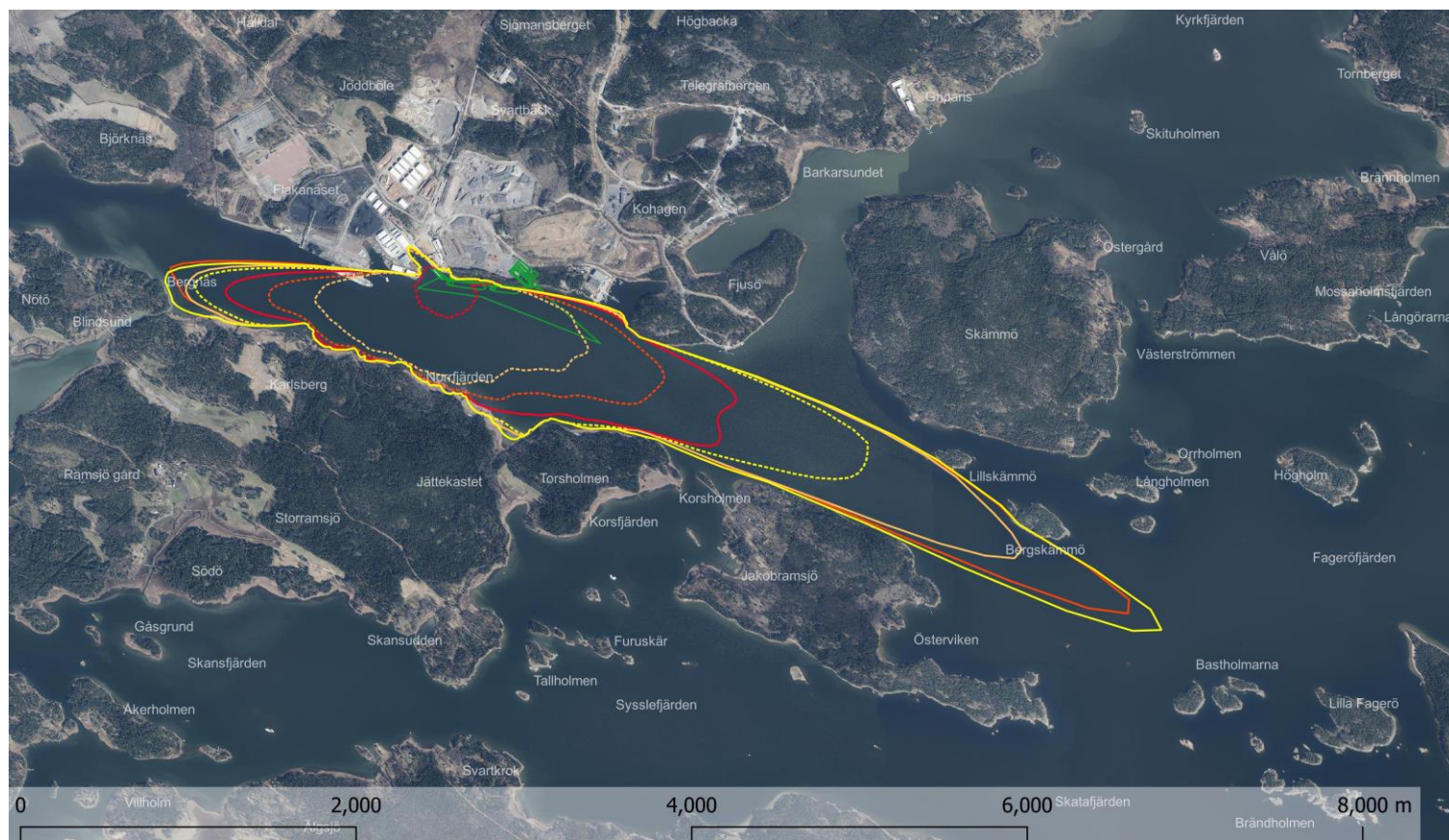


Bild 22 Bubbelgardindämpning i 1/3 oktavband.

Bullerstörningar kan minskas tidsmässigt eller områdesmässigt genom att begränsa schemat för de mest bullriga arbetsfaserna, särskilt under parnings- eller lekperioden.

Det kan också göras försök att driva ut fisk och marina däggdjur från arbetsområdet före ett bullrigt arbetsskede. Akustiskt avvisande anordningar kan användas för att hålla marina däggdjur borta från schaktningsområdet innan undervattensschaktningen äger rum. I samband med undervattensschaktning kan även den så kallade "soft start"-metoden övervägas, där marina däggdjur drivs bort från schaktningsområdet med mindre insats före den egentliga schaktningen.

I början av projektet kan även uppföljande mätningar göras för att bestämma vilka ljudtrycksnivåer i vatten som orsakas av de metoder som används. Detta kommer också att säkerställa behovet av eventuella minskningsåtgärder. Modelleringen är dock konservativ och bullereffekterna kan vara mycket mindre.



— Hankealue

Taustakartta © Maanmittauslaitos

Kuplaverhon kanssa

- TTS Pyöriäinen
- PTS Pyöriäinen
- TTS Hylje
- PTS Hylje

Ilman kuplaverhoa

- TTS Pyöriäinen
- PTS Pyöriäinen
- TTS Hylje
- PTS Hylje

Bild 23 Sälar och tumlare, tillfälliga och permanenta exponeringsområden för hörselnedsättning med och utan bubbelgardin (BBC). TTS cut-off = Kortvarig förlust av hörselskärpa och uppkomst av flyktreaktion. PTS gränsvärde = Permanent hörselnedsättning möjlig.

Slutsatser

Brytningsvolymerna och explosionsmängderna orsakar de största exponeringsområdena för marina däggdjur och fiskar, men stränder och grunda områden begränsar effektivt spridningen av buller. I nordost fortsätter bullret ytterligare, och som längst sträcker sig exponeringsområdena till Bastholmarna mot sydost.

Vid schaktning var det genomsnittliga exponeringsavståndet för tillfällig hörselnedsättning och flyktreaktion 696 meter för tumlare, med ett maximalt avstånd på 4734 meter. Det maximala exponeringsavståndet för permanent hörselnedsättning hos tumlare var 4198 m, med ett genomsnitt på 608 m. För sälen var det genomsnittliga exponeringsavståndet för tillfällig hörselnedsättning eller flyktreaktion 715 meter och det maximala avståndet var 4510 meter. Exponeringsavstånden för permanent hörselnedsättning var i genomsnitt 576 meter, med ett maximalt avstånd på 1983 meter. På basis av modelleringen var fiskens exponeringsområde för död eller dödlig skada i genomsnitt 284 meter, med ett maximalt avstånd på 690 meter.

Vid schaktning var det genomsnittliga exponeringsavståndet för tillfällig hörselnedsättning och flyktreaktion 571 meter för tumlare, med ett maximalt avstånd på 2748 meter. Exponeringsavståndet för permanent hörselnedsättning hos tumlare nådde en topp på 903 m, med ett genomsnittligt exponeringsavstånd på 363 m. För sälen var det genomsnittliga exponeringsavståndet för tillfällig hörselnedsättning eller flyktreaktion 487 meter och det maximala avståndet var 1161 meter. Exponeringsavstånden för permanent hörselnedsättning varierade från i genomsnitt 135 meter, med ett maximalt avstånd på 295 meter. I all modellering var exponeringsområdet för fiskdöd eller dödlig skada hos fisk mindre än 50 meter från modelleringspunkten.

I modelleringen av borrhålning var det genomsnittliga exponeringsavståndet för tillfällig hörselnedsättning eller flyktreaktion 187 meter för tumlare, med ett maximalt avstånd på 407 meter. Exponeringsavståndet för permanent hörselnedsättning hos tumlare nådde en topp på 337 meter, med ett genomsnittligt exponeringsavstånd på 64 meter. För sälar var det genomsnittliga exponeringsavståndet för tillfällig hörselnedsättning eller flyktreaktion emellertid 101 meter och det maximala avståndet var 232 meter. Exponeringsavstånden för permanent hörselnedsättning vid borrhålning sträckte sig till mindre än 50 meter från modelleringspunkten. Exponeringsområdet för tillfällig hörselnedsättning hos fisk modellerades också under 50 meter i alla scenarier.

Baserat på modelleringsresultaten var de drabbade områdena i SSP2-scenarierna större än i SSP1-scenarierna eftersom ljudhastigheten var högre i SSP2-scenariot på grund av vattentemperaturen. Större exponeringsområden syntes dock främst i områden med exponering för tumlare, där högre frekvenser är viktigare. För säl och fisk låg exponeringsavstånden i båda scenarierna nära varandra.

Som ett sätt att minska bullret kan man överväga att använda en bubbelgardin under schaktningen. Fiskar och marina däggdjur kan också drivas bort från arbetsområdet med akustiska avstöttningsapparater före en bullrig arbetsfas. Bullerstörningar kan minskas tidsmässigt eller områdesmässigt genom att begränsa schemat för de mest bullriga arbetsfaserna, särskilt under parnings- eller lekperioden. I början av projektet kan även uppföljande mätningar göras för att bestämma vilka ljudtrycksnivåer i vatten som orsakas av de metoder som används.