

Liite 7. Selvitys vedenalaisen melun leviämisestä sekä virtausolosuhteiden muutoksesta.

**KOVERHARIN SATAMAN LAAJENNUKSEN AIHEUTTAMAT MUUTOKSET
VEDENALAISEN MELUN LEVIÄMISEEN JA SEDIMENTIN KERTYMISEEN
LUODE OY**

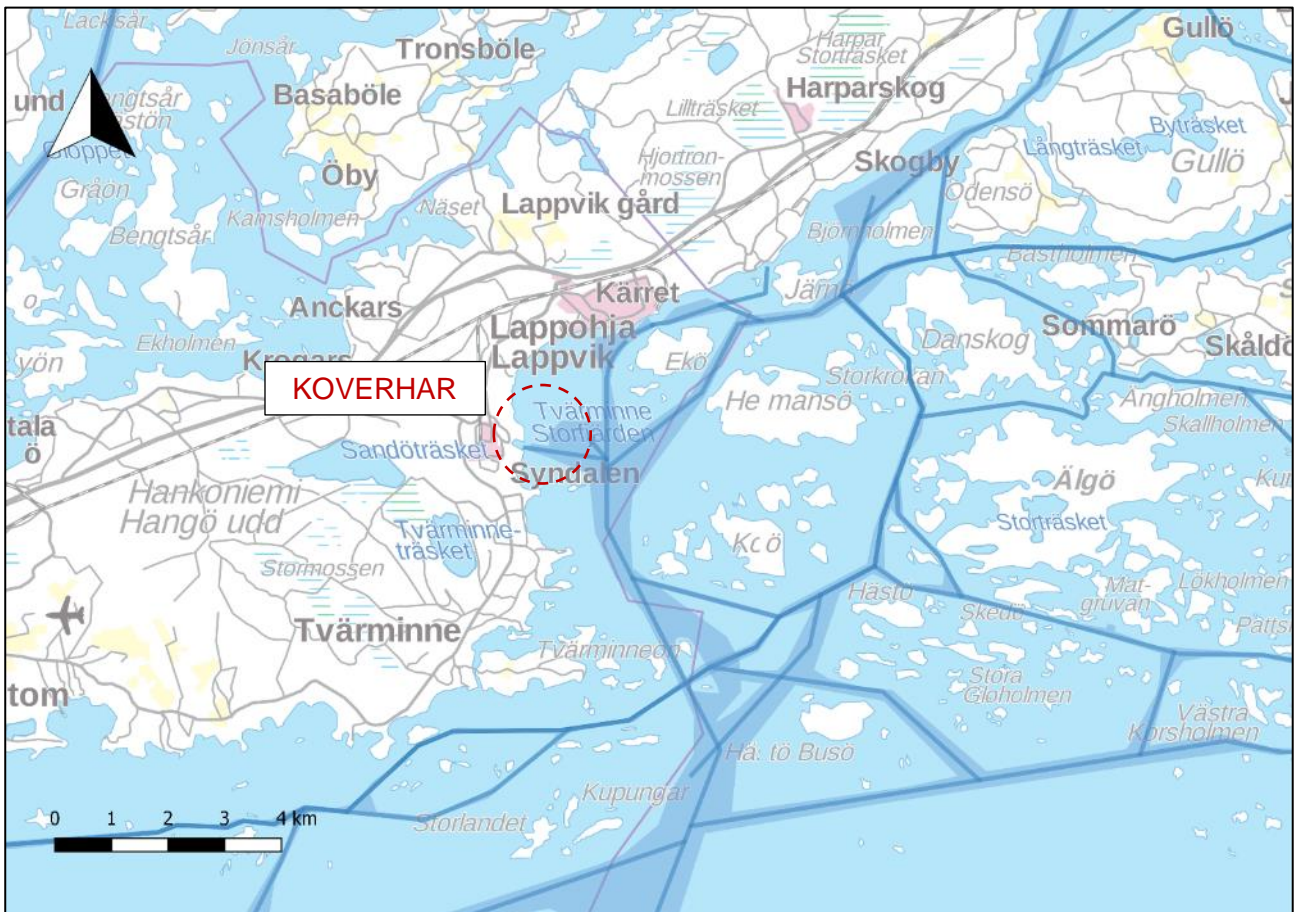
Toni Meriläinen, Antti Lindfors ja Kai Rasmus

01	4.1.2018	Versio kommenteille	TM	MK	APL
Ver.	Pvm.	Kuvaus	Laatija	Tarkistaja	Hyväksyjä
			Luode Consulting Oy		
			Dokumentti: KOVERHARIN SATAMAN LAAJENNUKSEN AIHEUTTAMAT MUUTOKSET VEDENALAISEN MELUN LEVIÄMISEEN JA SEDIMENTIN KERTYMISEEN LUODE OY		
Asiakas	:	Hangon satama ja Ecobio Oy			
Asiakaan yhteyshenkilö	:	Björn Peltonen ja Masi Mailammi			
Luode Consulting Oy:n yhteyshenkilö	:	Antti Lindfors	Dokumentin numero: Koverhar melu ja sedimenttimallinnus- 04012018-Luode-01.pdf		Ver. 01
Työn suorittaja	:	Luode Consulting Oy			

Versiot:		KOVERHARIN SATAMAN LAAJENNUKSEN AIHEUTTAMAT MUUTOKSET VEDENALAISEN MELUN LEVIÄMISEEN JA SEDIMENTIN KERTYMISEEN LUODE OY			
Ver.	Laatija:	Pvm.	Kuvaus	Tarkistaja	Hyväksyjä
01	Toni Meriläinen	4.1.2018	Versio kommentteille	Mikko Kuirikki	APL

Johdanto

Hangon Satama Oy suunnittelee Koverharin sataman laajentamista Hankoniemellä Koverharin alueella (kuva 1). Satamaa tullaan laajentamaan rakentamalla satama-alueelle yksi tai useampia laitureita lisää. Sataman laajentamisen myötä myös laivaliikenteen määrä lisääntyy huomattavasti. Tässä raportissa käsitellään Koverharin sataman laajennustöiden aiheuttaman vedenalaisen melun vaikutuksia sekä laiturirakentamisesta aiheutuvia muutoksia sedimentin kertymiseen ja eroosioon sataman pohjoispuolella sijaitsevan Lappohjan hiekkarannan alueella.



Kuva 1 Alueen yleiskartta

Melumallinnus

Laajennuksen myötä lisääntyvä alusliikenne kasvattaa jatkuvaa pitkäkestoista taustamelua väylän ja sataman ympäristössä, kun taas vesistö rakentaminen aiheuttaa väliaikaisesti suuria hetkellisiä melutasoja. Tässä työssä simuloitiin dBSea -melumallilla ruoppaus-, louhinta- ja paalutustoiminnan

aiheuttamaa melutasoa sekä alusliikenteen lisääntymisestä aiheutuvan melun määrää sekä rakennustöiden aikana kuin myös sataman valmistumisen myötä alusliikenteen kasvaessa.

Mallinuksissa kuvataan melun leviämistä, äänenpainetasoja sekä arvioidaan töistä mahdollisesti aiheutuvien pysyvien ja väliaikaisien kuulovaurioiden laajuutta kaloille sekä merinisäkkäille. Mallinnusalue kattaa Koverharin satama-alueen ja sitä ympäröivät merialueet niin kauas ettei meluvaikutuksia enää havaita.

Vedenalaisen melun mallinnuksen lisäksi tehtiin sarja melun mittauksia Koverharin ja Hangon sataman edustalla. Mittauksilla kerättiin äänidataa Koverharin alueelta jatkuvalla tallennuksella aikavälillä 12.10 – 2.11.2017 neljästä eri mittauspisteestä. Hangon sataman alueelta äänidataa kerättiin jatkuvalla tallennuksella aikavälillä 16.11 – 30.11.2017 kahdesta mittauspisteestä.

Sedimenttimallinnus

Melumallinnuksen lisäksi alueelle laadittiin sedimenttien kulkeutumista ja kertymistä kuvaava malli, jonka avulla arvioitiin sataman laajennustyön eri vaihtoehtojen vaikutuksia alueen pohjoisosassa sijaitsevan Lappohjan hiekkarannan alueeseen.

Eri rakennevaihtoehtojen mallinnuksessa käytettiin Delft3D–mallinnuspakettia, joka on rannikko-, estuaari- ja jokiympäristöihin kehitetty ohjelmisto veden fysikaalisten ominaisuuksien laskemiseen. Ohjelmisto laskee mallin reunaehtojen ja fysikaalisten pakotteiden mukaan vesialueen virtausnopeudet, pinnankorkeuden, aallonkorkeuden sekä erilaisten aineiden kulkeutumisen mallialueella. Tässä mallinnustyössä keskeisimpänä olivat sedimenttien liikkeeseen ja kertymiseen liittyvät prosessit Lappohjan hiekkarannan alueella. Raportin toisessa osassa on esitetty mallilla lasketut sedimenttipaksuuden muutokset eri rakennusvaihtoehdoilla.

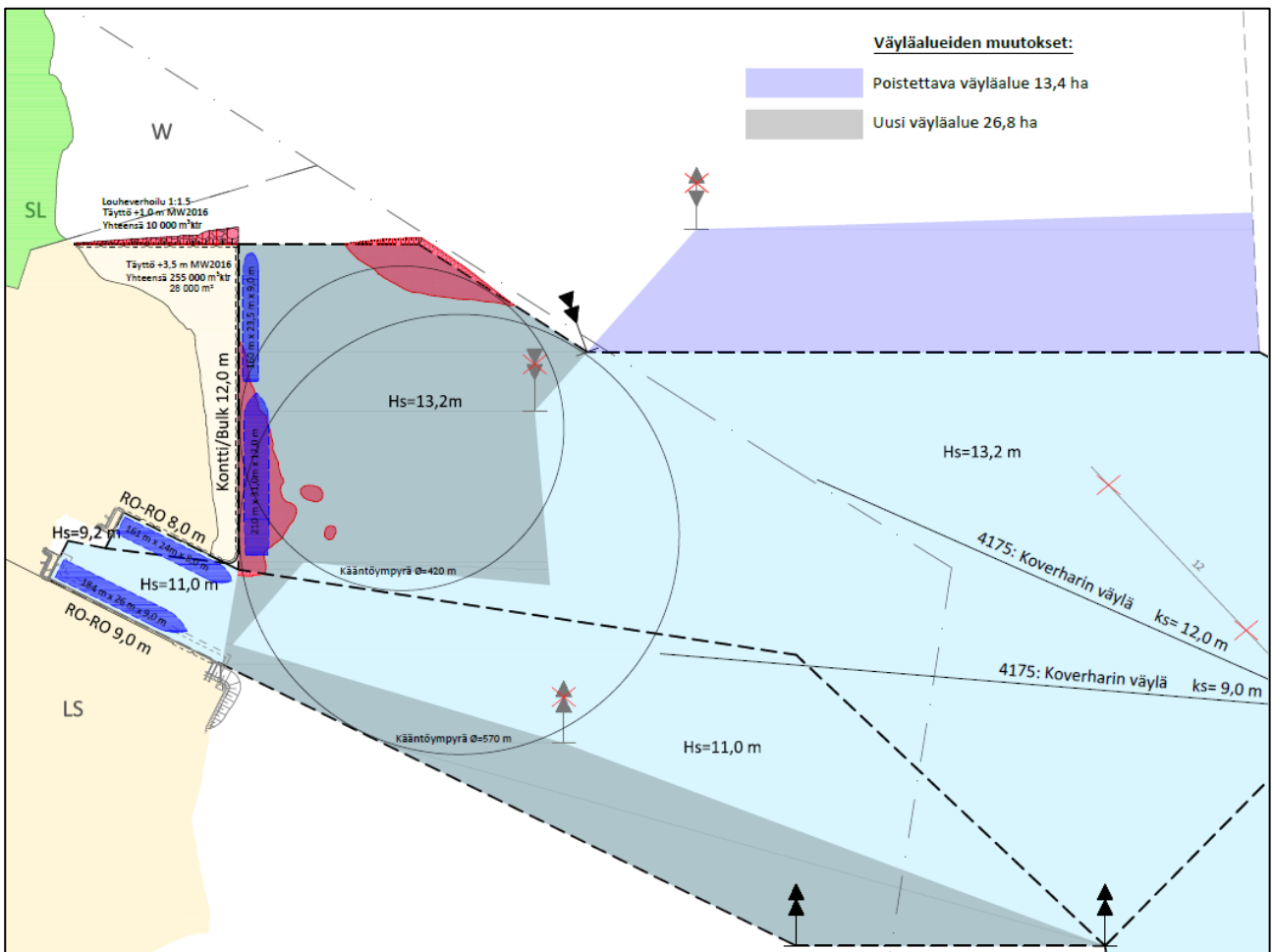
Koverharin sataman laajentamishanke

Tässä raportissa käsitellään Koverharin sataman laajentamiselle kolmea eri vaihtoehtoa. Hankkeen suunnitteluvaiheessa on lisäksi ollut ns. nollavaihtoehto, jossa vain satama-altaalle olisi tehty kunnossapitoruoppaus sekä laiturisaneeraus sekä vaihtoehto 3, jossa väylän kulkusyvyyttä olisi kasvatettu 15,3 metriin. Tästä vaihtoehdosta on luovuttu. Laiturisaneeraus ja ylläpitoruoppaus on jo toteutettu.

VE1 Ruoppaus ei louhintaa, yksi laituri (paalutus)

Vaihtoehdossa 1 tarkastellaan tilannetta, missä Koverharin satamaan rakennetaan uusi bulkki- tai konttilaituri nykyisen satama-altaan pohjoispuolelle (kuva 2). Uuteen laituriin voivat kiinnittyä alukset, joiden syväys on 12 metriä.

Itse väylään ei kohdistu muutoksia, mutta väyläaluetta muutetaan kattamaan uuden laituralueen edusta, sekä supistetaan hieman pohjoisesta ympäristövaikutusten pienentämiseksi. Uutta väyläaluetta muodostuu yhteensä noin 27 hehtaaria. Laituralueen edustalta ruopataan yhteensä 31 000 m³ ktr ja vesialuetta täytetään noin 28 000 m². Alusliikenne on laskettu perustuen TEU-määriin ja aluskäyntejä on arvioitu syntyvän noin 415 per vuosi (0+ -vaihtoehtoon lisätty bulkki/konttilaiturin liikennemäärä).



Kuva 2 Vaihtoehto 1. Punaisella on merkitty ruopattavat alueet, tummansinisellä poistettava väyläalue ja harmaalla uusi väyläalue.

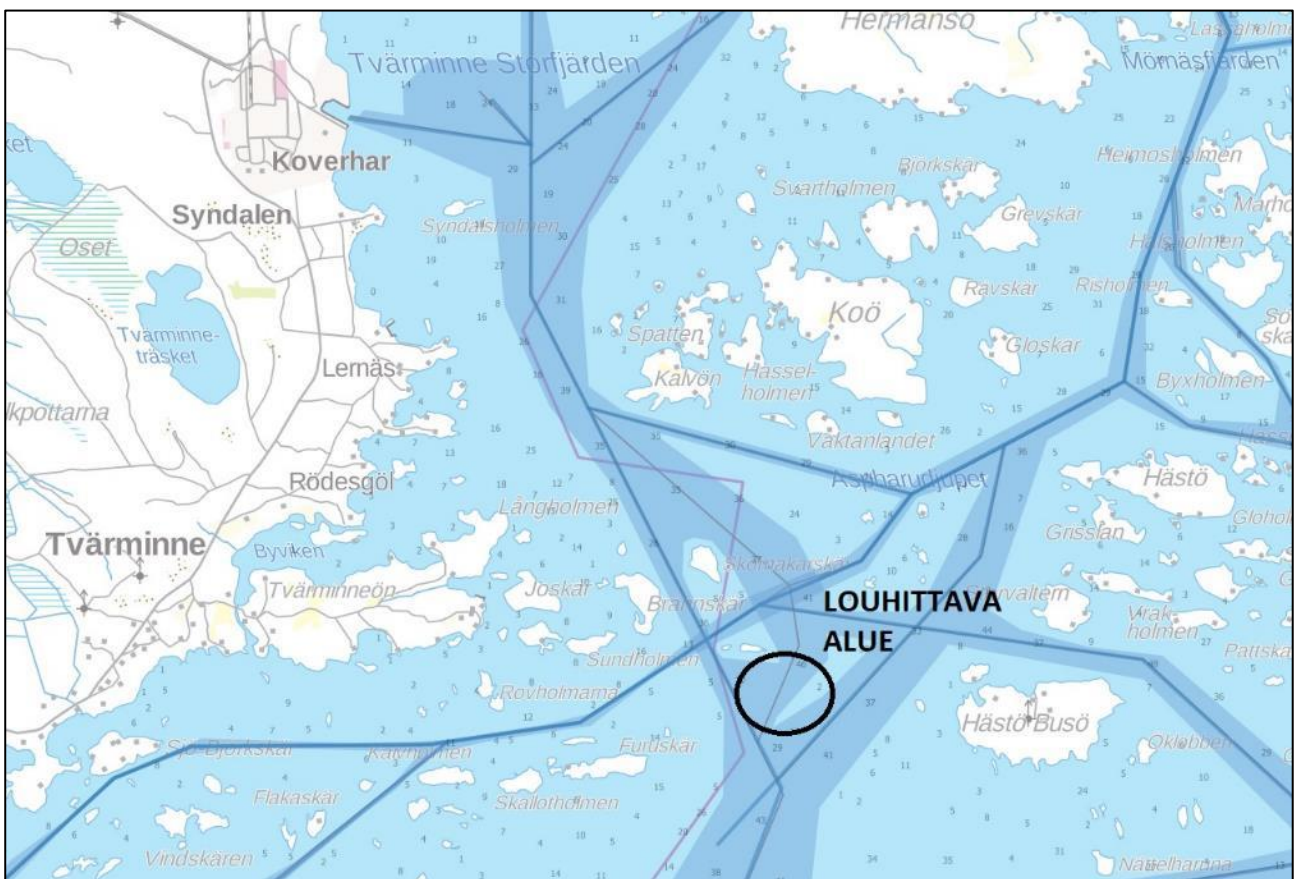
VE2 Ruoppaus, louhinta ja 2+1 laituria (paalutus)

Vaihtoehdossa 2 tarkastellaan tilannetta, missä Koverharin nykyisen satama-altaan etelä- ja pohjoispuolelle rakennetaan rannan suuntainen laituri ja pohjoispuolelle lisäksi pistolaituri (kuva 4). Rannansuuntaisesti oleviin laitureihin kiinnittyvät alukset ovat satama-altaan pohjoispuolella bulkki/konttialuksia ja eteläpuolella ROPAX-aluksia, eli niissä on myös hyttipaikkoja matkustajille. Pistolaituria käyttävät alukset ovat ro-ro-aluksia. Pohjoispuolen pistolaituri rakennetaan yksipuoleisena suojaamaan sataman pohjoispuolen luonnonsuojelualuetta melun, potkurivirtojen ja aaltoeroosion vaikutuksilta.

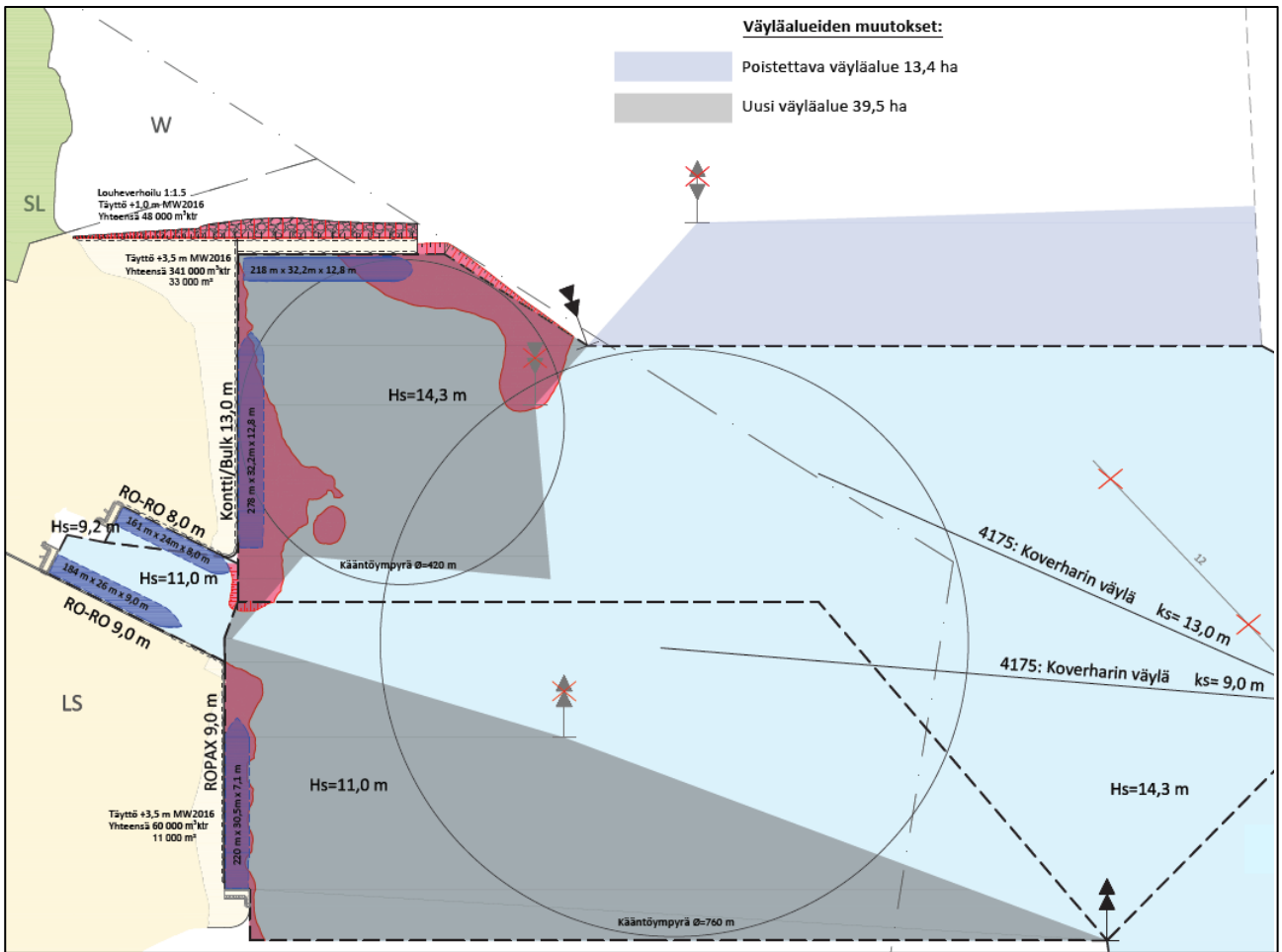
Väyläaluetta muutetaan kattamaan uusien laituralueiden edustat, sekä supistetaan hieman pohjoisesta ympäristövaikutusten pienentämiseksi. Uutta väyläaluetta muodostuu yhteensä noin 40 hehtaaria. Laituralueiden edustalta ruopataan yhteensä 96 000 m³ ktr ja vesialuetta täytetään noin 44 000 m².

Lisäksi tuloväylä syvennetään 13 metrin kulkusyvyyteen, mikä edellyttää ruoppauksia myös Hästö Busö/Tvärminneön läheisyydessä. Väylää tulee levittää ruoppaamalla/louhimalla kalliota noin 6 000 m³ ktr. Louhittava alue on merkitty karttaan kuvassa 3.

Alusliikenteen arvio on uusien laitureiden myötä noin 770 aluskäyntiä per vuosi.



Kuva 3 Vaihtoehdossa 2 ja 2+ louhittava alue merkittynä karttaan

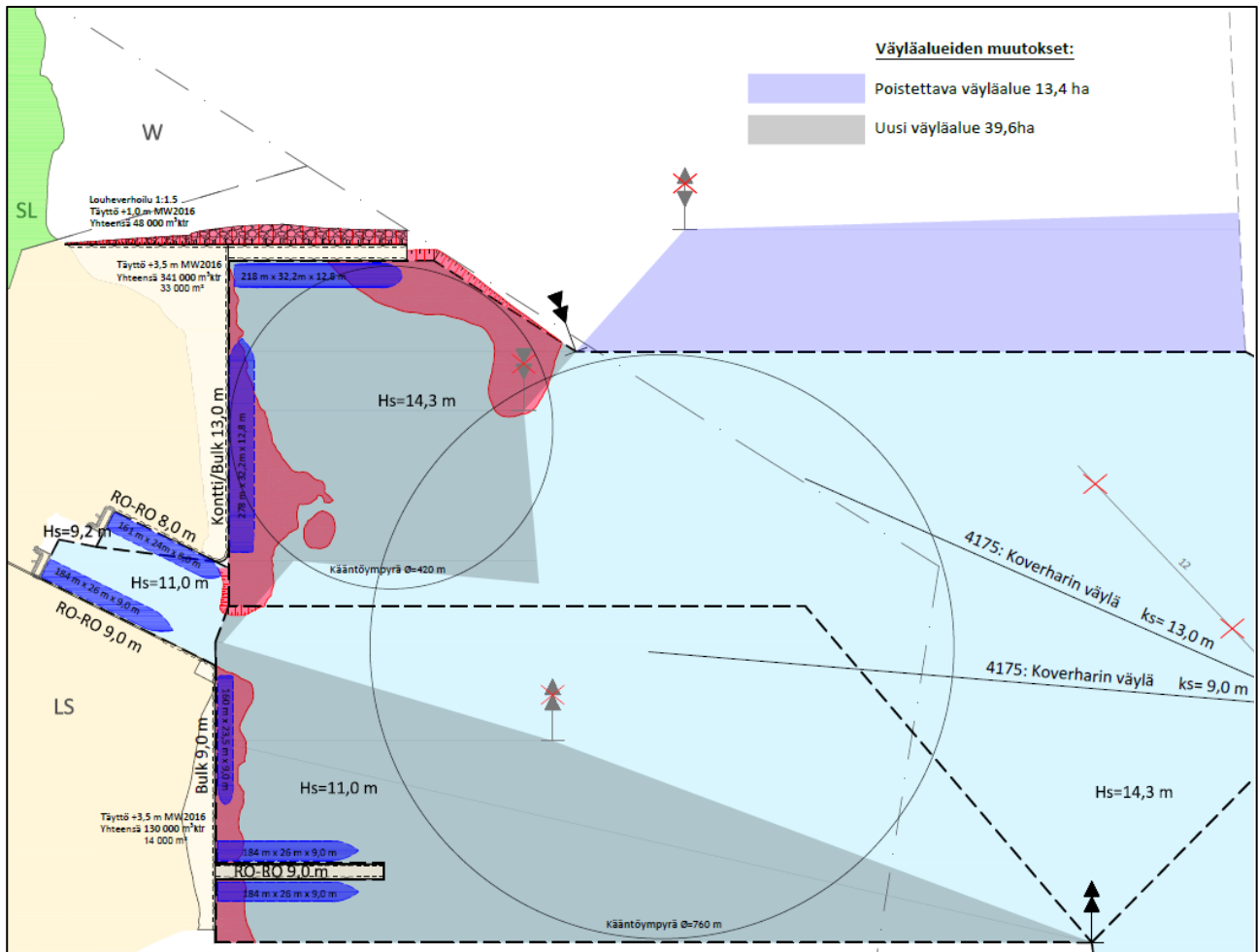


Kuva 4 Vaihtoehto 2. Punaisella on merkitty ruopattavat alueet, tummansinisellä poistettava väyläalue ja harmaalla uusi väyläalue.

VE2+ Ruoppaus, louhinta ja 2+2 laituria (paalutus)

Vaihtoehto on muuten samanlainen kuin VE2, mutta satama-altaan eteläpuolella oleva rannansuuntainen laituri on bulkki-laituri (syvyys 9 m), jonka eteläpuolella on pistolaituri, jossa on laivapaikat molemmilla puolilla (kuva 5). Vaihtoehto vaatii ruoppausta 6000 m³tr enemmän kuin VE2, eli yhteensä 102 000 m³tr. Myös vesialuetta täytetään enemmän, yhteensä 47 000 m². Louhintamäärä pysyy samana kuin VE2:ssa.

Alusliikenteen arvio on uusien laitureiden myötä noin 1070 aluskäyntiä per vuosi suuremman ro-ro-liikenteen vuoksi.



Kuva 5 Vaihtoehto 2+. Punaisella on merkitty ruopattavat alueet, tummansinisellä poistettava väyläalue ja harmaalla uusi väyläalue.

Vedenalaisen melun käsitteet ja suuret

Melumittauksissa käytetään yleisesti logaritmiin perustuvia tasosuureita. Vedenalaista melua mitatessa logaritmin vaativa vertailuarvo (p_0) on $1 \mu\text{Pa}$, kun ilmassa se on $20 \mu\text{Pa}$. Tasosuureet eivät siis ole suoraan verrattavissa ilmassa mitattuihin dB-arvoihin. Käytettävä suure riippuu äänilähteen luonteesta.

Äänenpainetasolla (Sound Pressure Level, **SPL**, yksikkö dB re $1 \mu\text{Pa}$) kuvataan usein jatkuvakestoisia äänitapahtumia, kuten laivaliikenne, poraaminen, ruoppaus tai taustamelu. Äänenpainetaso ilmaisee äänen voimakkuuden tietyssä pisteessä desibeleinä (dB) mitattuna.

Äänialtistustaso (Sound Exposure Level, **SEL**) kuvaa yksittäisen impulssimaisen tapahtuman (esim. räjähdys tai paalutus) äänienergiaa. Se on riippuvainen melutapahtuman amplitudista sekä kehosta. Sitä voidaan pitää melutapahtuman meluannoksen mittana. Yleisesti kesto lasketaan yhden pulssin yli pulssin keskiosasta, joka sisältää 90 % energiasta.

Kumulatiivinen äänialtistustaso SEL(cum) edustaa kertyvää äänienergiaa, kun määritettynä ajanjaksona (esimerkiksi 24 tunnin aikana) on useita melutapahtumia.

Huippupainetaso (PEAK) edustaa tutkittavan tapahtuman maksimiäänepainetta mitattuna nolasta huippuun tietynä ajankohtana. Tätä käytetään usein myös paalutustapahtuman tai räjähdysten analysoinnin yhteydessä.

Leq (5 min) on **keskimääräinen tuotettu energia** 5 minuutin välein koko tarkastelujakson aikana. Leq (1 h) on keskimääräinen tuotettu energia 1 tunnin välein koko tarkastelujakson aikana. Tilastollinen Ln-taso osoittaa mittausten prosenttiosuuden (5 %, 50 % ja 95 %) jolla äänenpainetaso on korkeampi kuin Ln-taso. Toisin sanoen L5 määrittää melupiikkejä, L50 keskimääräistä melutasoa tarkastelun kohteena olevana aikana ja L95 taustamelua.

Mittaustulosten esittämisessä käytetään välillä ns. taajuuspainotusta eli painotussuodinta, jonka tarkoituksena on jäljitellä kuuloaistin herkkyyttä erikorkuisille äänille. Joiltain kalalajeilta painotuskäyrät puuttuvat eikä esimerkiksi pyöriäisten kohdalla menetelmää ole vielä standardoitu, joten tässä raportissa kaikki tasot ovat painottamattomia arvoja.

Toistuva altistus melulle tai altistuminen liian voimakkaalle melulle voi aiheuttaa **kuulon tilapäisen heikkenemisen (TTS, temporary threshold shift)**, joka on siis ensioire siitä, että äänenpainetasot ovat olleet liian korkeat. Tilapäinen kuulonalenema voi olla havaittavissa jo melualtistuksen ensimmäisten tuntien aikana. Rasisustilanteesta alkanut tilapäinen kuulon heikentyminen saattaa jäädä pysyväksi, jolloin kyseessä on palautumaton, **pysyvä kuulonalenema (PTS, permanent threshold shift)**.

Vedenalaisen melun etenemismalli

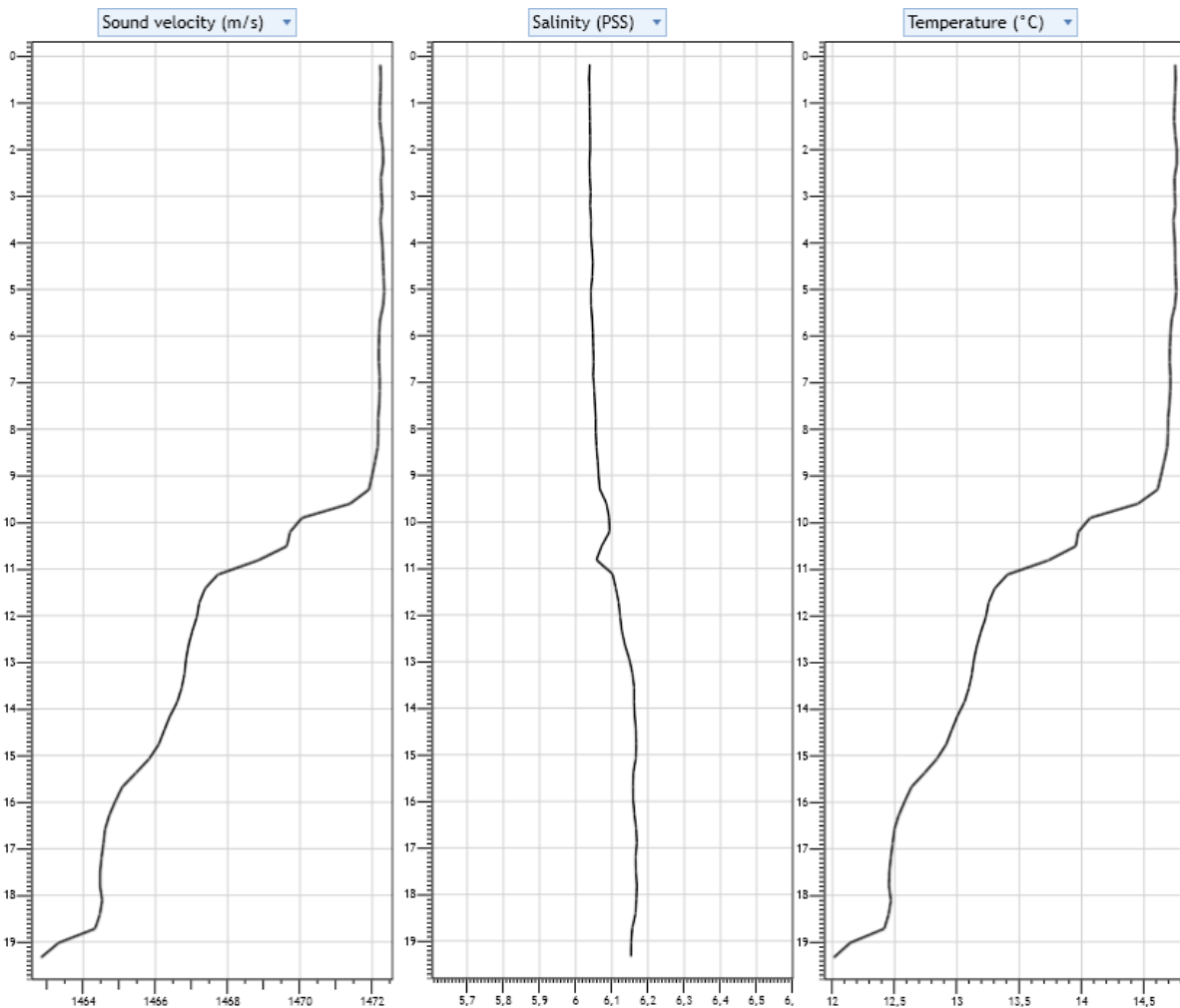
Vedenalaisen melun vaikutusalueen arviointiin käytettiin dBSea-ohjelmistoa, jolla voidaan laskea äänen etenemistä ja vaimenemista mallinnusalueella sekä arvioida vedenalaisen melun alueellista ja ajallista vaikutusta kaloille tai merinisäkkäille.

Mallia varten määritettiin jokaisesta melutapahtumasta melulähteen voimakkuuden lähtötaso eli melupäästö. Mitattujen äänenpainetasojen ja tunnettujen mittaustäisyyksien perusteella pystyttiin ohjelman avulla määrittämään melupäästö referenssitasossa (yhden metrin päässä lähteestä).

Ohjelma laskee äänikentän etäisyyden, syvyyden ja äänilähteen suunnan funktiona. Mallissa käytettiin kahden eri laskentamenetelmän yhdistelmää. Korkeammilla taajuuksilla käytettiin sädemenetelmää (engl. ray-tracing). Matalilla taajuuksilla käytössä oli dBSeaModes ja parabolinen etenemisyhtälö. Melutasot mallinnettiin 1/3-oktaavin taajuusalueille välillä 20–20000 Hz.

Melun etäisyysvaimenemiseen vaikuttaa mm. merenpohjan fysikaaliset ominaisuudet ja materiaalin laatu, veden äänennopeusprofiili sekä syvyysolosuhteet. Ääni etenee myös eri taajuuksilla eri tavalla. Pohjan sedimenttityyppi vaikuttaa äänen absorboitumiseen. Pehmeä pohja vaimentaa äänen heijastumista, mutta kova kivinen pohja heijastaa ääntä vaimentaen sitä vain vähän. Koverharin satama-altaassa oleva ruoppauskohde on tehtyjen tutkimusten perusteella siltistä hiekkaa.

Alueen syvyysmalli tehtiin yhdistämällä Liikenneviraston avoin syvyysaineisto paikallisesti tehtyihin havaintoihin. Äänennopeusprofiili (kuva 6) mitattiin Cast Away-laitteella, jonka avulla voidaan määrittää lämpötila-, suolaisuus- ja äänennopeusprofiilit.



Kuva 6 Mitattu äänennopeus, suolaisuus ja lämpötila (59 52' 44.78"N, 023 14'27.81"E)

Mallitulosten perusteella arvioitiin mahdolliset vaikutusetäisyydet merkittävistä melulähteistä alueen merieliöstölle. Taulukkoon 1 on kerätty eri lähteistä paalutukselle ja louhinnalle arvioituja altistusajoja. On huomioitavaa, että useissa tapauksissa melutason tulee olla suurempi kuin ilmoitettu raja-arvo, jotta tapahtuma aiheuttaisi vaurion. Siksi myös mallinnettavat altistusalueet ovat eräänlaisia teoreettisia pahimpia mahdollisia tilanteita.

Eri tapahtumien kestot ja siten altistusajat vaihtelevat, joten desibelitasoja ei voi suoraan verrata toisiinsa. Tässä kappaleessa esitetään melulähteen vaikutusalue verrattuna kalojen ja merinisäkkäiden eri altistusetäisyyksiin. Seuraavassa kappaleessa kunkin melutapahtuman eri ryhmien altistusalueet on yhdistetty samaan kuvaan sekä verrattu myös kutualueiden sijaintiin.

Kalojen luokittelu äänenaistimisominaisuuksien mukaan (Popper ym. 2014):

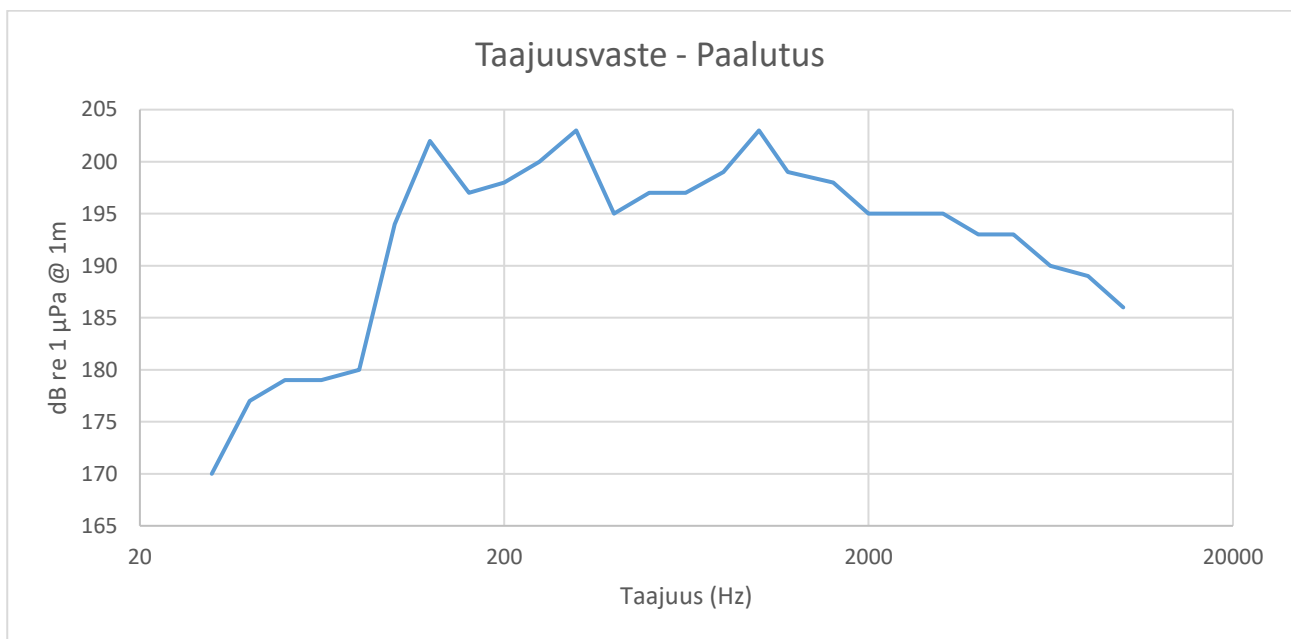
1. Kalat, joilla ei ole uimarakkoa (aistivat pääosin partikkelien liikettä, mm. kampela)
2. Kalat, joiden uimarakko ei osallistu kuulemiseen (aistivat pääosin partikkelien liikettä, mm. lohi ja turska)
3. Kalat, joilla uimarakko osallistuu kuulemiseen (aistivat myös paineaallon, mm. särkikalat, sillikalat)
4. Kalojen mäti ja poikaset.

Taulukko 1. Raja-arvot paalutus- ja louhintatyöstä aiheutuvan melun vaikutuksista eri kalalajeille sekä hylkeille ja pyöriäisille.

Melulähde	Kalan tyyppi	Kuolema tai kuolettava vamma	Pysyvä kuulonäenema	Palautuva kudosaaurio	Väliaikainen kuulonäenema	Peitevaikutus	Käyttäytyminen
Paalutusmelu	1	>219 dB SELcum ¹ >213 dB peak ¹ 174 dB SELss ²		>216 dB SELcum ¹ >213 dB peak ¹	>>186 dB SELcum ¹	(N) Moderate (I) low (F) low	(N) High (I) Moderate (F) low
	2	>210 dB SELcum ¹ >207 dB peak ¹ 174 dB SELss ²		>203 dB SELcum ¹ >207 dB peak ¹	>186 dB SELcum ¹	(N) Moderate (I) low (F) low	(N) High (I) Moderate (F) low
	3	>207 dB SELcum ¹ >207 dB peak ¹ 174 dB SELss ²		>203 dB SELcum ¹ >207 dB peak ¹	186 dB SELcum ¹	(N) High (I) High (F) Moderate	(N) High (I) High (F) Moderate
	4	>210 dB SELcum ¹ >207 dB peak ¹ 187 dB SELss ² 217 SPL dB peak ²		(N) Moderate (I) low (F) low	(N) Moderate (I) low (F) low	(N) Moderate (I) low (F) low	(N) Moderate (I) low (F) low
	Pyöriäinen		200 SPL dB peak ² 190 dB SELcum1h ²		194 SPL dB peak ² 164 dB SELss ² 175 dB SELcum1h ²		
	Hylje		179 dB SELss ² >203 dB SEL24h >232 dB p-p		164 dB SELss ² >188 dB SEL24h >226 dB p-p		
Louhinta	1	207 dB SEL (single event) 229 - 234 dB peak ¹		(N) High (I) low (F) low	(N) High (I) Moderate (F) low		(N) High (I) Moderate (F) low
	2	207 dB SEL (single event) 229 - 234 dB peak ¹		(N) High (I) High (F) Low	(N) High (I) Moderate (F) low		(N) High (I) High (F) Low
	3	207 dB SEL (single event) 229 - 234 dB peak ¹		(N) High (I) High (F) Low	(N) High (I) High (F) Low		(N) High (I) High (F) Low
	4	207 dB SEL (single event) 229 - 234 dB peak ¹		(N) High (I) low (F) low	(N) High (I) low (F) low		(N) High (I) low (F) low
	Pyöriäinen		179 dB SELcum (single event) ³		164 dB SELcum (single event) ³		
	Hylje		179 dB SELcum (single event) ³		164 dB SELcum (single event) ³		

Paalutus

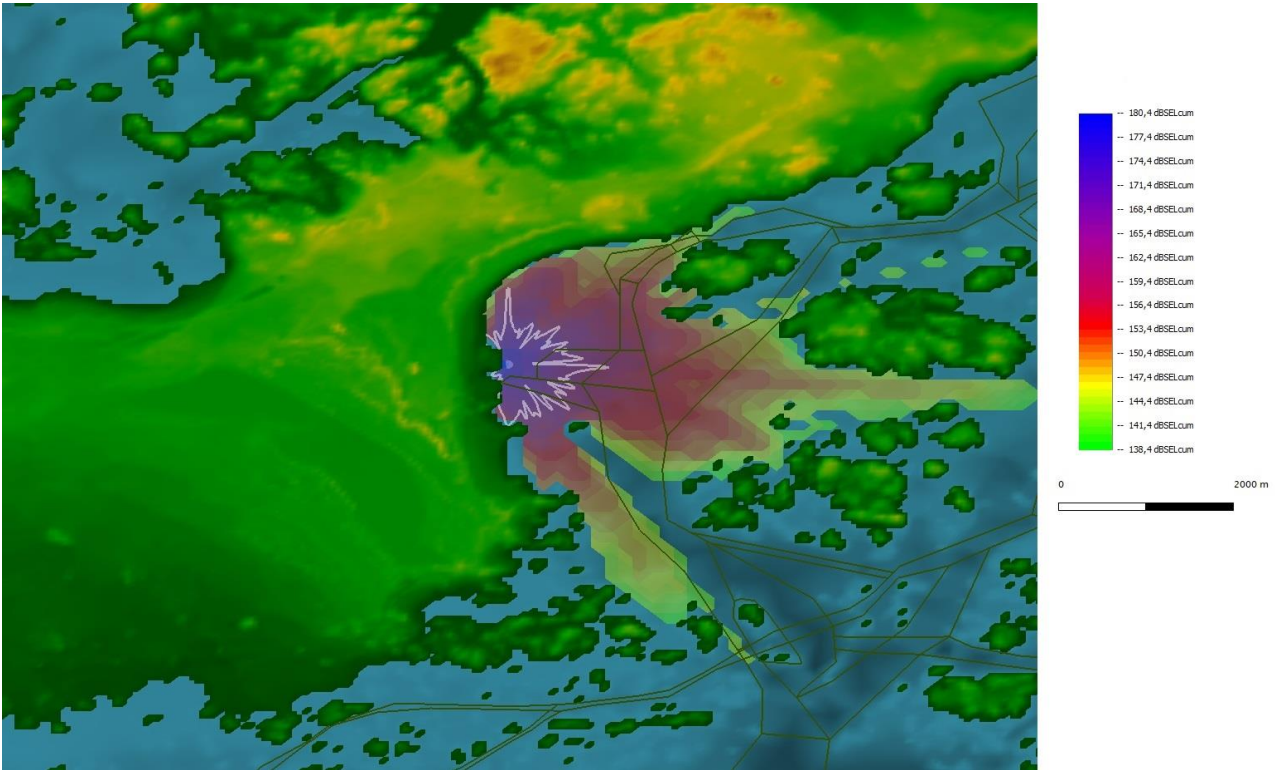
Paalutuksesta aiheuttaa hetkellisesti voimakkaita äänenpainetasoja ja siitä aiheutuu rakennusvaiheen aikana hyvin paljon laajakaistaista vedenalaista melua. Paalutusmelun voimakkuuteen vaikuttavat paalutustekniikka, pohjan koostumus, iskuvoimakkuus ja paalukoko. Paalutuksen aiheuttama äänialtistustaso yhdelle iskulle vaihtelee tyypillisesti välillä 170–225 dB re 1 $\mu\text{Pa}2\text{s}$ @ 1m. Huippuarvot ovat välillä 190–245 dB re 1 μPa . Suuri osa uudemmissa tutkimuksista on tehty paalukoon ollessa 2-6 metriä. Tämän hankkeen aikana paalutuskoko on todennäköisesti noin 1 metri. Mallin laajakaistaiseksi melutapahtuman äänialtistustasoksi SEL (Single strike) valittiin 201,2 dB re 1 $\mu\text{Pa}2\text{s}$ @ 1m ja huipputasoksi määritettiin 220 dB re 1 μPa @ 1m. Kyseisillä lähtötasoilla mallissa lasketut äänialtistustasot 750 metrin päässä lähteestä vastasivat aikaisempia tutkimuksia. Altistusaika arvioitiin vastaamaan 1000 paalutusiskua vuorokaudessa.



Kuva 7 Mallinnuksessa käytetyn paalutuserätteen taajuusvaste

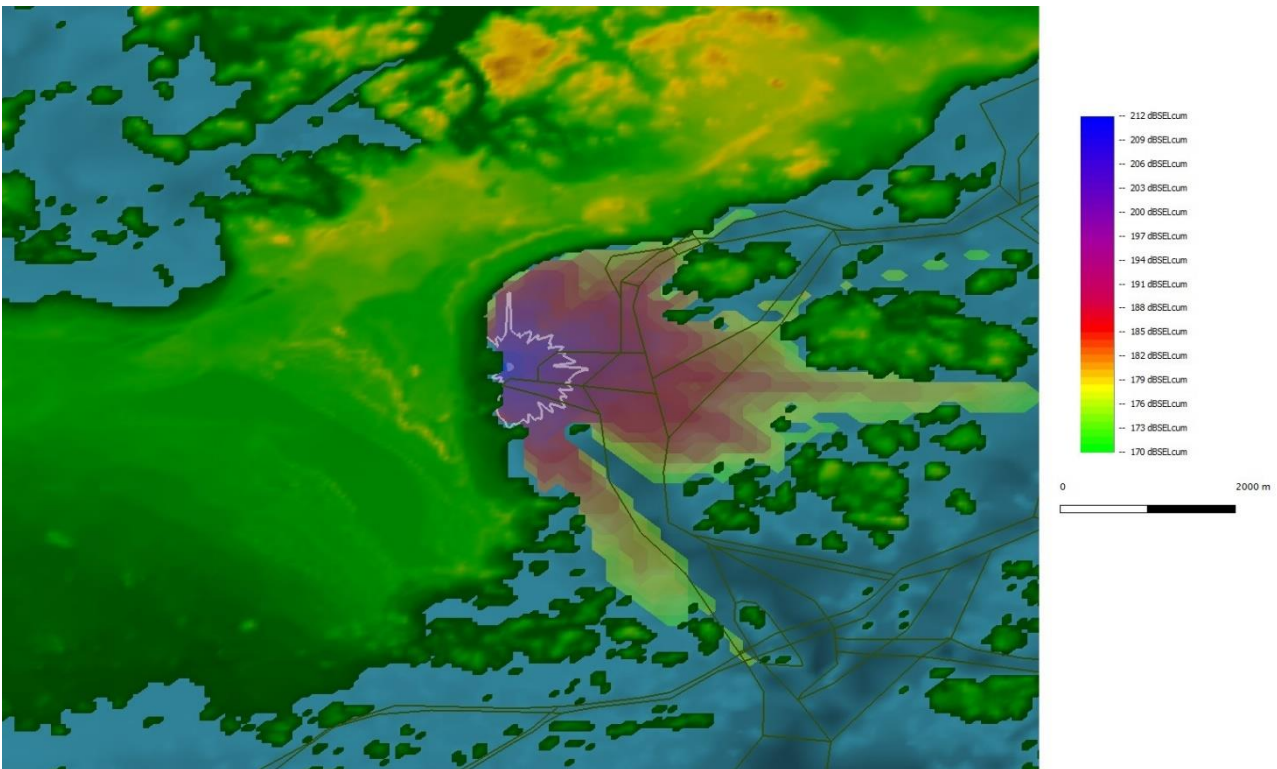
Ruotsin ympäristönsuojeluviraston selvityksen (Andersson ym. 2016) mukaan tällä hetkellä ei voida ehdottaa kalojen pakenemiselle tai tilapäiselle kuulon alenemalle tarkkaa raja-arvoa. Lajikohtaisessa käyttäytymisessä on huomattavia eroja, kuin myös herkkyydessä eri taajuuksille ja äänen intensiteetille. Myöskään olemassa olevien tutkimusten avulla ei ole mahdollista määrittää, vaikuttaako pakenemiskäyttäytyminen negatiivisesti lajin kantaan vai liittyykö vaikutus alueeseen ja ajankohtaan. Tästä syystä mallinnustyössä kaloille käytettiin rajoja, jonka ulkopuolella ei ole havaittu kuoleman tai kuolettavan vamman aiheuttavia kumulatiivisia äänialtistustasoja (taulukko 2). Tässä kappaleessa arvioiduissa vaikutusalueissa ei ole huomioitu mahdollisia melun vähentämiskeinoja. Kuplaverhon avulla tehdyn vaimennuksen vaikutusta on vertailtu myöhemmin kuvassa 26.

Kaloille, joilla ei ole uimarakkoa (Kalaryhmä 1) kumulatiivinen altistusalue 219 dB SELcum jäi aivan melutapahtuman lähikenttään, joten alueen piirtäminen ei onnistunut. Kalaryhmille 1, 2 ja 3 arvioitu yksittäisen tapahtuman altistusalue 174 dB SELss on esitetty kuvassa 8. Altistusalue ulottuu keskimäärin 516 metrin etäisyydelle, maksimietäisyyden ollessa 1173 metriä. Kalaryhmien 2-4 altistustasot olivat hyvin saman kokoiset.



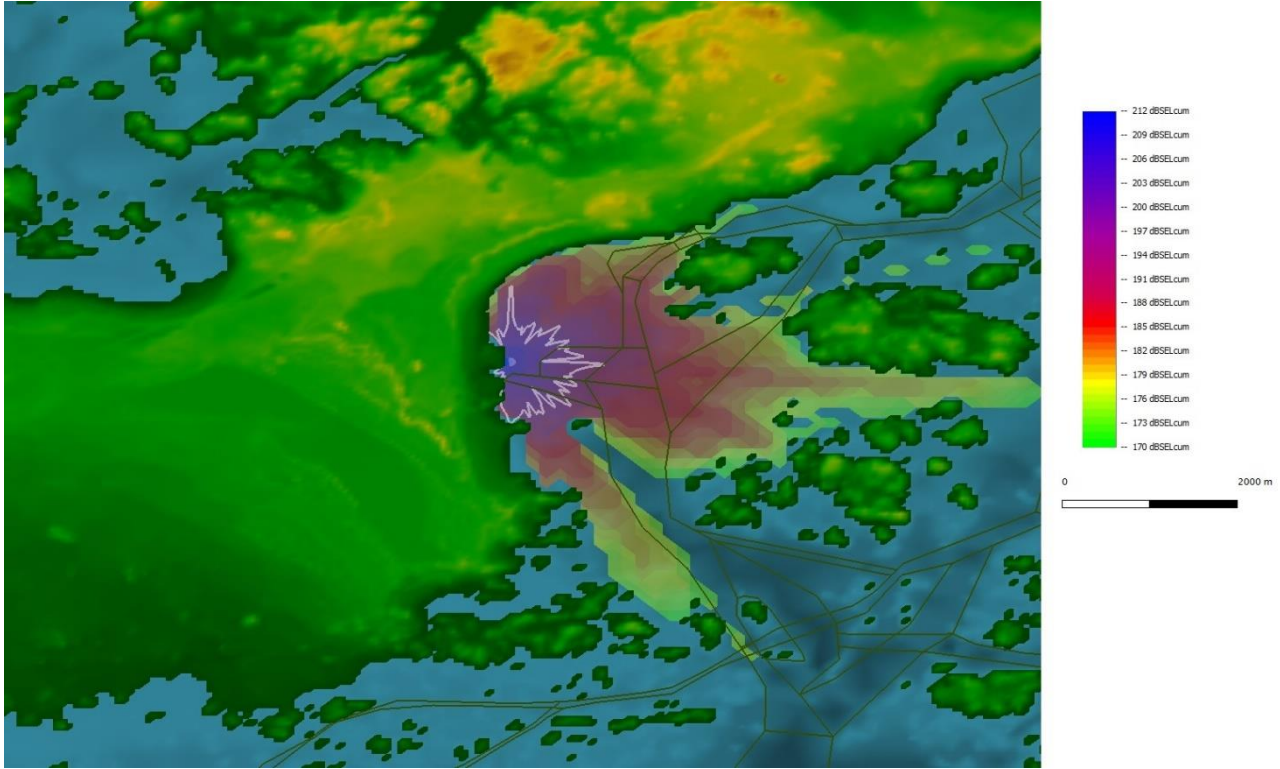
Kuva 8 Kalaryhmät 1,2, ja 3. 174 dB SEL single strike

Kuvassa 9 on esitetty kalaryhmien 2 (kalojen uimarakko ei osallistu kuulemiseen) ja 4 (kutu ja poikaset) altistusalue. Altistusalue ulottuu keskimäärin 519 metrin etäisyydelle, maksimietäisyyden ollessa 1164 metriä.



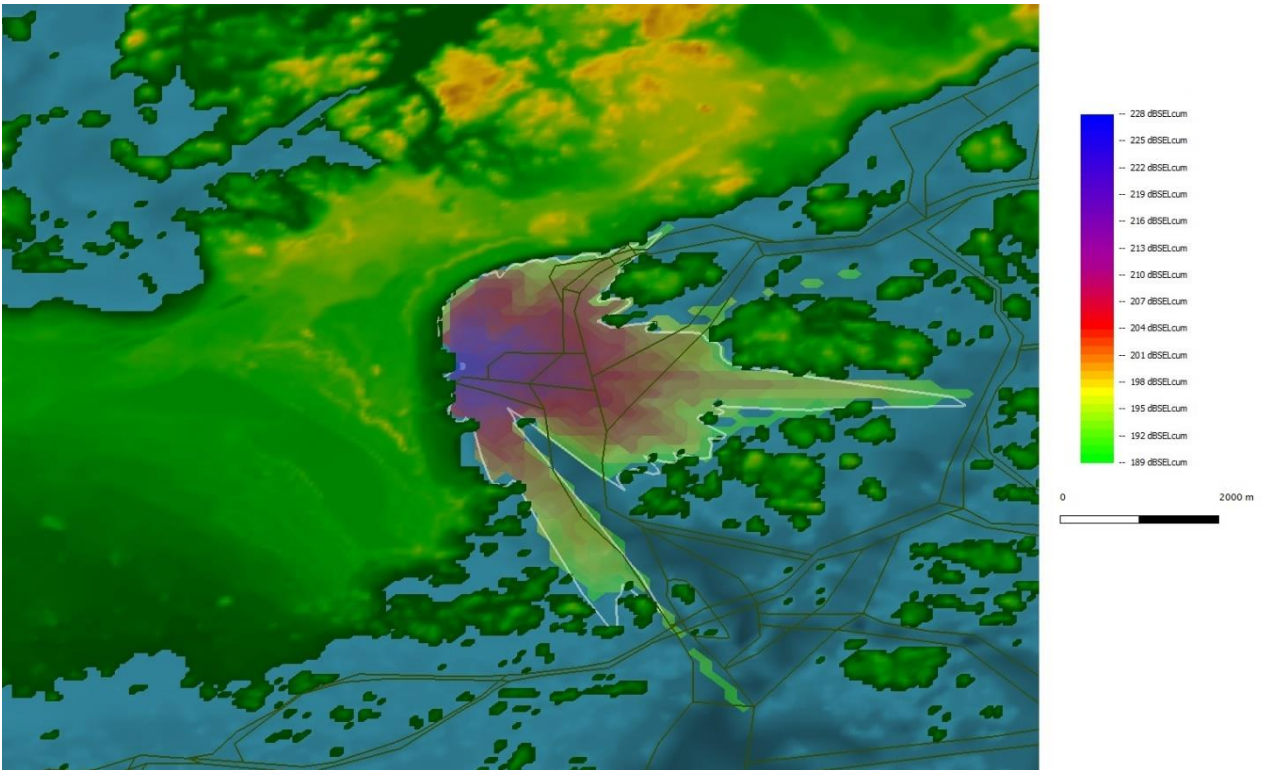
Kuva 9 Kalat, joiden uimarakko ei osallistu kuulemiseen (aistivat pääosin partikkelien liikettä, mm. lohi ja turska) sekä kalojen mäti ja poikaset. 210 dB SELcum.

Kalaryhmälle 3 eli kaloille, joilla uimarakko osallistuu kuulemiseen, arvioitu altistusalue on esitetty kuvassa 10. Altistusalue ulottuu keskimäärin 525 metrin etäisyydelle, maksimietäisyyden ollessa 1145 metriä.



Kuva 10 Kalat, joilla uimarakko osallistuu kuulemiseen (aistivat myös paineaallon, mm. särkikalat, sillikalat). 207 dB SELcum.

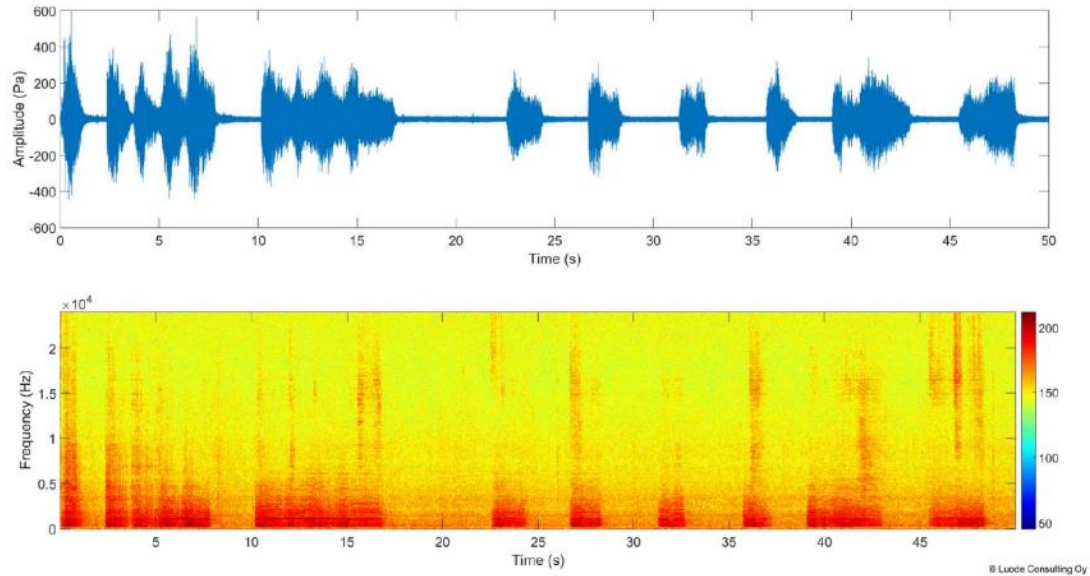
Pyöriäisen ja hylkeen pysyvän kuulonaleneman raja-arvona käytettiin 190 dB SELcum 1h. Tilapäisen kuulonaleneman raja-arvona käytettiin 175 dB SELcum 1h. Molemmissa malleissa alue laajeni keskimäärin 1969 metriin (Kuva 11). Tämä johtui todennäköisesti siitä, että äänenpainetasot vaimenevat pääosin ympärillä oleviin saariin.



Kuva 11 Pyöriäiset ja hylkeet. 175 dB ja 190 dB SELcum.

Louhinta

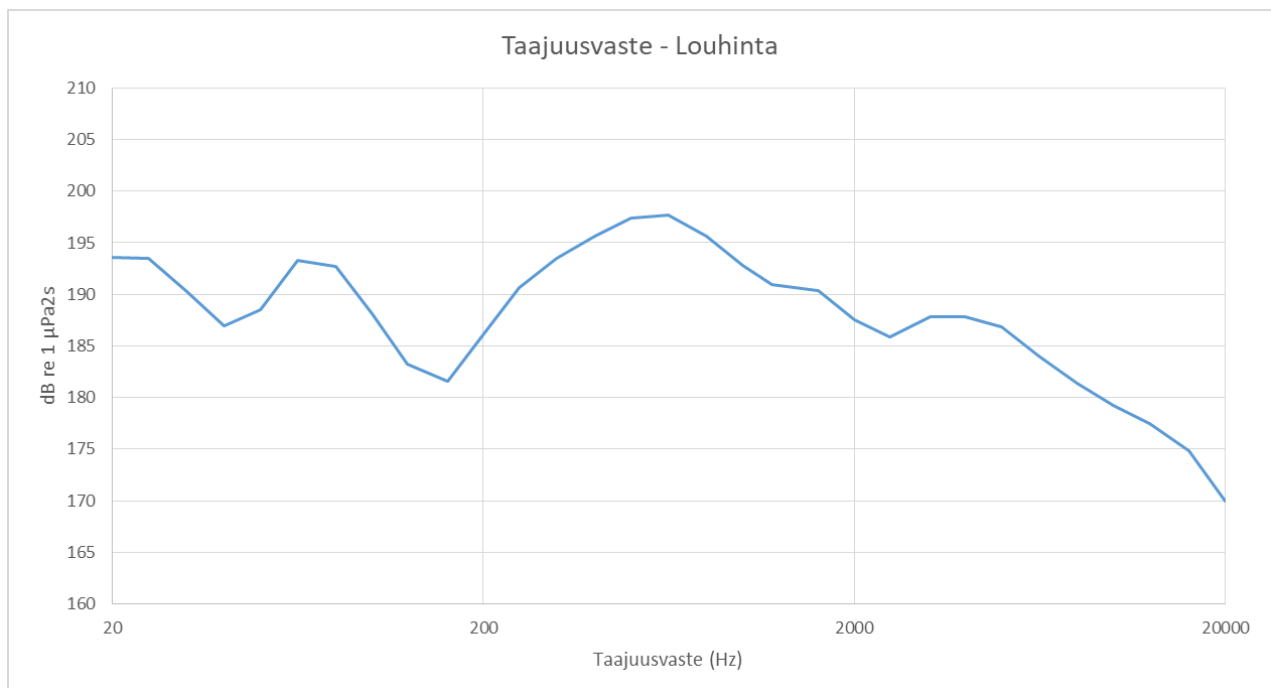
Louhinnan valmisteluiden yhteydessä kallioperään porataan reikiä räjähteille. Poraamisen äänenpainetasot riippuu porattavan reiän koosta sekä pohjan rakenteesta. Kuvassa 12 on esimerkki aikaisempien louhintatöiden yhteydessä mitatusta poraustapahtumasta Raumalta (153.8 dB re 1 μ Pa@1 m (rms)). Koverharin alueella merenpohjan sedimentti koostuu lähinnä hiekasta ja kalliosta. Poraamisesta syntyvä ääni etenee kahta kautta. Se siirtyy suoraan poratessa porausreiästä ympäröivään merenpohjaan sekä poraustyökaluston värähtelyn myötä suoraan veteen.



Kuva 12 Esimerkki porausmelun käyttäytymisestä Rauman väylän laajennuksesta.

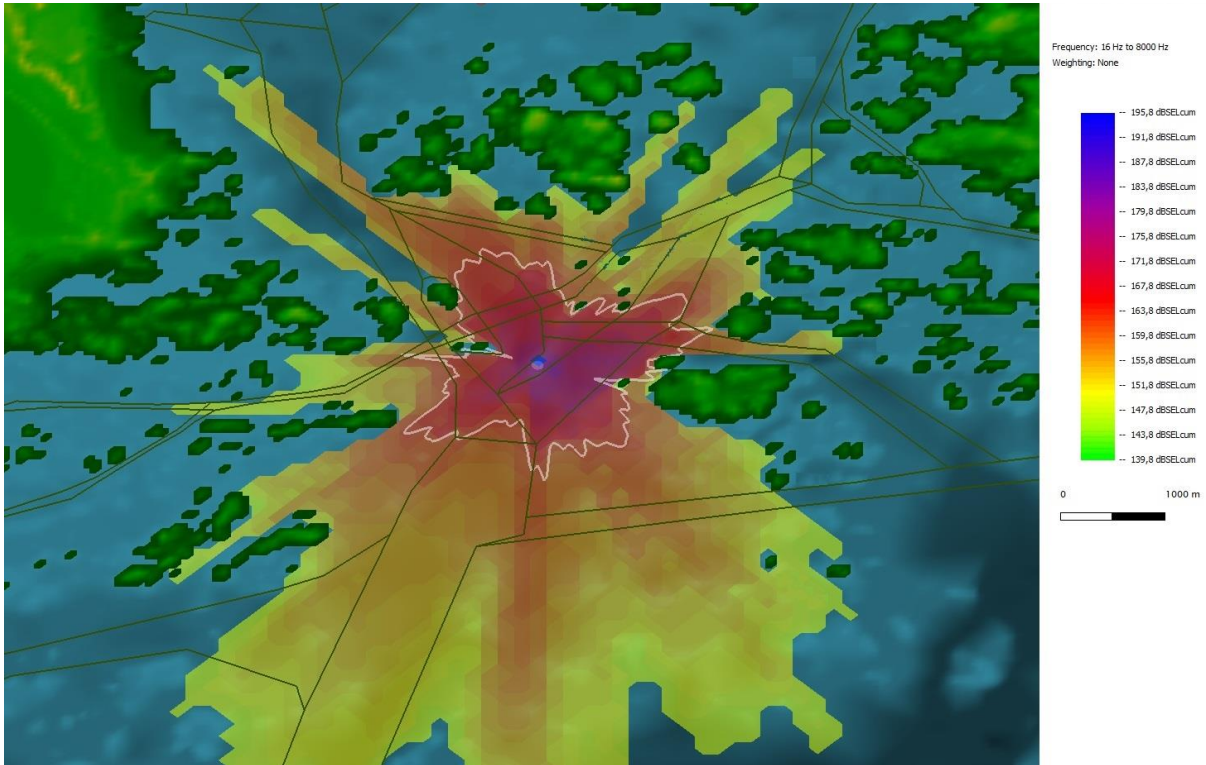
Poraamista huomattavasti merkittävämpi tapahtuma on itse räjäytys. Yksittäinen räjähdys kestää alle sekunnin, jolloin suurimmat huolenaiheet liittyvät välittömien kudosvaurioiden ja kuuloon kohdistuvien vaurioiden syntymisen riskiin, kun taas vaikutukset esimerkiksi käyttäytymiseen ovat hyvin rajallisia ja lyhytaikaisia.

Louhinnan osalta mallinnuksessa käytettiin meritöiden yhteydessä mitattuja louhinnan melutasoja (Kuva 13). Mittaukset suoritettiin kolmelta eri etäisyydeltä (1km, 2km ja 3km). Mallinnuksessa käytetty painottamaton äänialtistustaso yhden tapahtuman (yhden räjähdys) osalta oli 205,2 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ja huippuäänepainetaso oli 219 dB re 1 μPa .

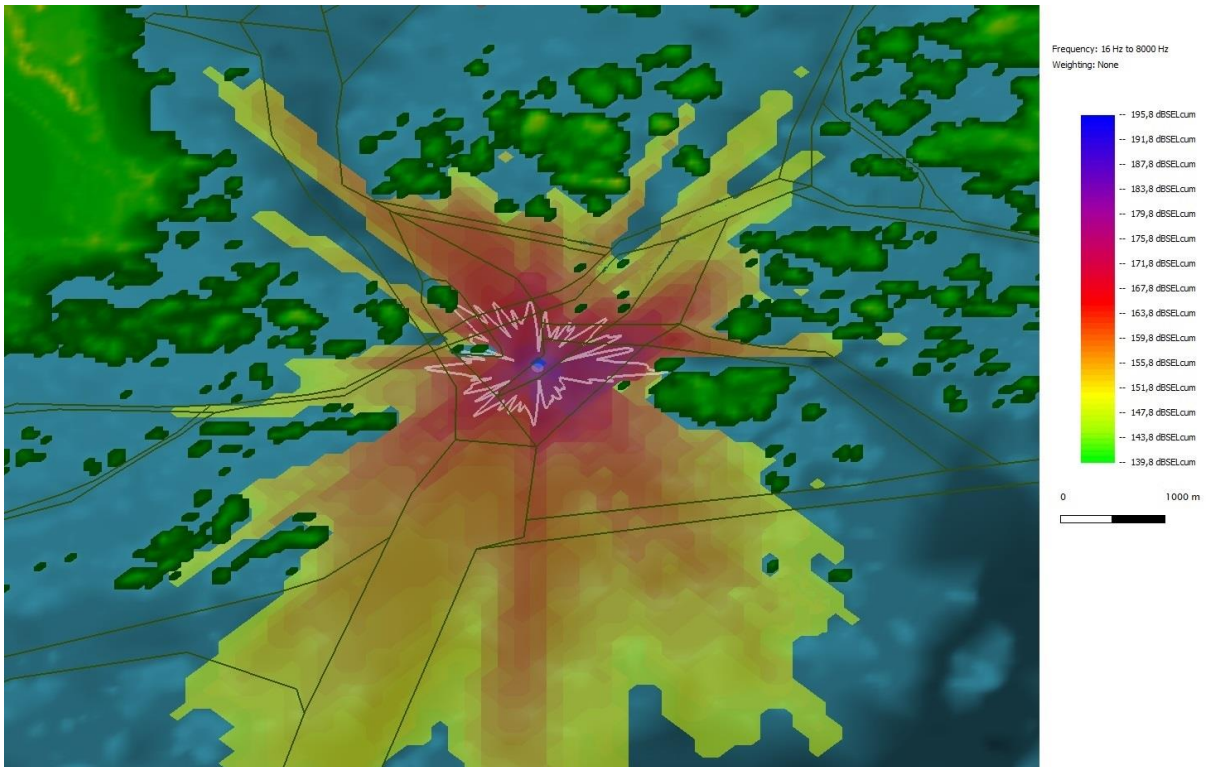


Kuva 13 Louhinnan taajuusvaste, 1/3-oktaavikaistat 20-20000 Hz.

Pyöriäisen ja hylkeen tilapäisen kuulonaleneman (kuva 14) raja-arvona käytettiin 164 dB SELcum (single event). Pysyvän kuulonaleneman (kuva 15) raja-arvona käytettiin 179 dB SELcum (single event). Keskimääräinen etäisyys oli 1088m (TTS) ja 600m (PTS). Maksimietäisyydet olivat 1723m (TTS) ja 1239m (PTS).



Kuva 14 Pyöriäiset ja hylkeet. 164 dB SELcum (single event).



Kuva 15 Pyöriäiset ja hylkeet. 179 dB SELcum (single event).

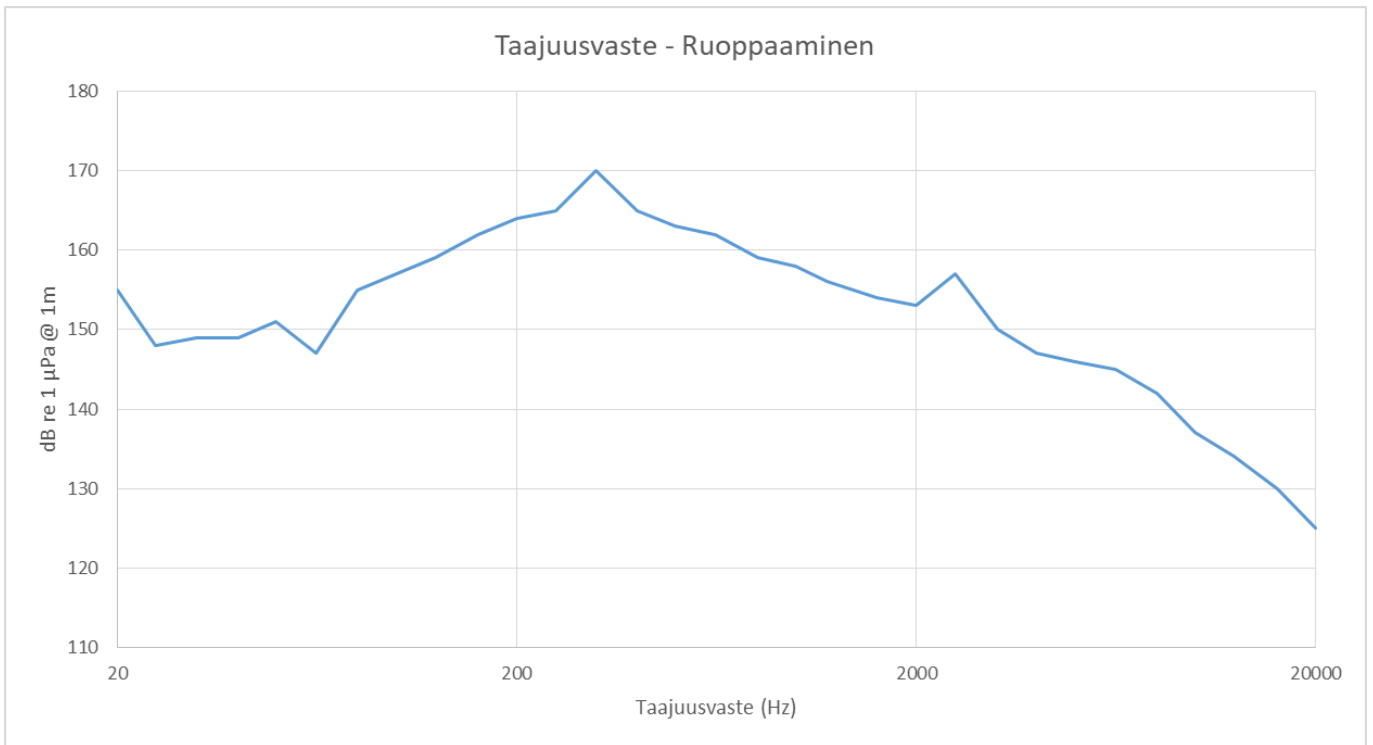
Kalojen osalta vaikutusalue 207 dB SELcum (single event) jäi kyseisen räjähdysen osalta lähikenttään eli joidenkin kymmenien metrien päähän. Myös aikaisempien tutkimusten mukaan merinisäkkäät ovat herkempiä louhinnan yhteydessä tehtäviin räjähdysiin. Räjähteen asennus porattuun reikään vaimentaa huomattavasti räjähdystä verrattuna vedessä tehtävään räjäytykseen. (Ward, P, 2015).

Ruoppaaminen

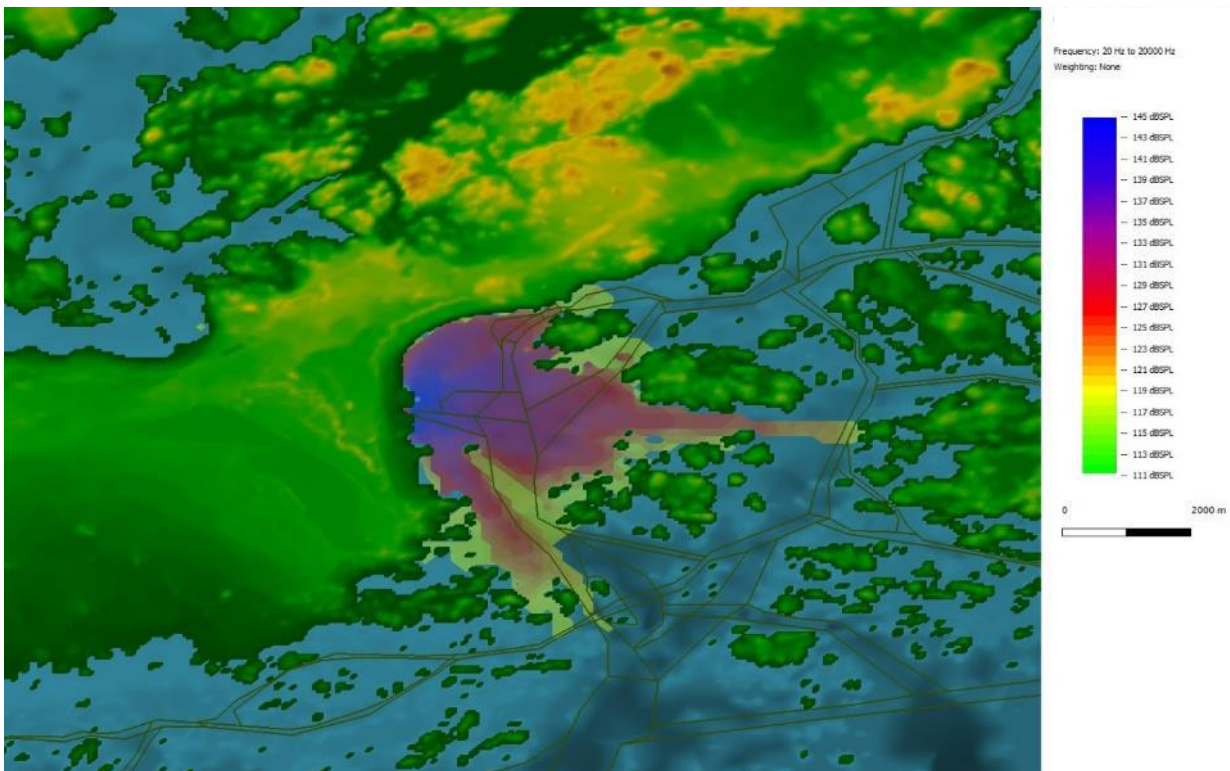
Aikaisemmin merirakentamisen yhteydessä tehdyissä mittauksissa ei ruoppauksen ääntä pystynyt erottamaan muusta laivaliikenteestä 1km etäisyydeltä. Koverharissa alueen taustamelu on niin matala, että ruoppausoperaation äänet voivat kuuluvat pidemmälle.

Ruoppaaminen aiheuttaa jatkuvaa laajakaistaista melua ja äänenpainetaso on samaa luokkaa yleisen laivaliikenteen kanssa. Suurin osa äänienergiasta on matalilla, alle 500 Hz taajuuksilla. Ruoppaamisesta syntyvä melupäästö vaihtelee 160 ja 180 dB re 1 μ PA @ 1m välillä.

Mallissa käytetty taajuusvaste on esitetty kuvassa 16. Laajakaistainen äänenpainetaso oli 174,7 dB re 1 μ PA @ 1m. Altistustasot eivät ylittäneet vaikutustasoja, joten alueita ei piirretty. Kuvassa 17 on esitetty esimerkki ruoppausmelun leviämisestä. Vaikutuksista keskustellaan enemmän seuraavassa luvussa. Ruoppaamisen ja laivaliikenteen osalta on esitetty taulukossa 2.



Kuva 16 Ruoppauksen taajuusvaste, 1/3-oktaavikaistat 20-20000 Hz.



Kuva 17 Ruoppausmelun leviäminen

Taulukko 2. Laivaliikenteestä ja ruoppauksesta aiheutuvan melun vaikutuksista eri kalalajeille sekä hylkeille ja pyöriäisille.

Melulähde	Kalan tyyppi	Kuolema tai kuolettava vamma	Pysyvä kuulonalenema	Palautuva kudosvaurio	Väliaikainen kuulonalenema	Peitevaikutus	Käyttäytyminen
Laivaliikenne	1	(N) Low (I) low (F) low		(N) Low (I) low (F) low	(N) Moderate (I) low (F) low	(N) High (I) High (F) Moderate	
	2	(N) Low (I) low (F) low		(N) Low (I) low (F) low	(N) Moderate (I) low (F) low	(N) High (I) High (F) Moderate	
	3	(N) Low (I) low (F) low		170 dB rms (48h) ⁴	158 dB rms (12h) ⁴	(N) High (I) High (F) High	(N) High (I) Moderate (F) low
	4	(N) Low (I) low (F) low	(N) Low (I) low (F) low	(N) Low (I) low (F) low		(N) High (I) Moderate (F) low	(N) Moderate (I) Moderate (F) low
	Pyöriäinen		> 173 dB SEL24h ³		> 153 dB SEL24h ³		
	Hylje		> 219 dB SEL24h ³		> 199 dB SEL24h ³		
Ruoppaaminen	1	(N) Low (I) low (F) low		(N) Low (I) low (F) low	(N) Moderate (I) low (F) low	(N) High (I) High (F) Moderate	
	2	(N) Low (I) low (F) low		(N) Low (I) low (F) low	(N) Moderate (I) low (F) low	(N) High (I) High (F) Moderate	
	3	(N) Low (I) low (F) low		170 dB rms (48h) ⁴	158 dB rms (12h) ⁴	(N) High (I) High (F) High	(N) High (I) Moderate (F) low
	4	(N) Low (I) low (F) low	(N) Low (I) low (F) low	(N) Low (I) low (F) low		(N) High (I) Moderate (F) low	(N) Moderate (I) Moderate (F) low
	Pyöriäinen		> 153 dB SEL24h ³				
	Hylje		> 199 dB SEL ³				

Laivaliikenteen lisääntyminen

Laivaliikenteen aiheuttamaa melua tutkittiin mittaamalla yksittäisen aluksen meluherätettä ja koko alusliikenteen aiheuttamaa alueellista melutasoa. Aluksen päämelulähteitä ovat pääkoneet, generaattorit, potkurin kavitaatio- ja värähtelymelu sekä aluksen liikkeen hydrodynaaminen melu. Melu johtuu veteen joko ilman tai pohjarakenteiden värähtelyiden kautta. Myös laivan luotainlaitteet aiheuttavat melua. Lisätutkimuksia tarvitaan vielä, jotta voidaan määrittää sen vaikutuksien laajuutta. Laivaliikenteen melu dominoi taajuusalueella 10–1000 Hz. Suurimmat melutasot ovat taajuusalueella 30–100 Hz.

Koverharin edustalla mittauksen aikana liikkui säännöllisesti kaksi alusta: Jeanetta ja Terschelling. Alukset eivät edusta tyypillistä satamassa vierailevaa alusta vaan laajennuksen jälkeen satamaliikenteen arvioidaan muodostuvan suuremmista, kontti-, ro-ro- ja ROPAX-aluksista. Tästä syystä laivaliikenteen lisääntymisen mallinnusta varten mitattiin laivaliikennettä myös Hangon edustalla. Taulukossa 3 on esitetty mittauksissa esiintyneiden alusten (Jeanette ja Terschelling) tiedot. Taulukossa on vertailun vuoksi esitetty yhden Ro-Ro-aluksen (Plyca) sekä konttialuksen (Baltic Tern) tiedot. Plycan meluheräte mitattiin Hangon edustalla olevilla hydrofoneilla.

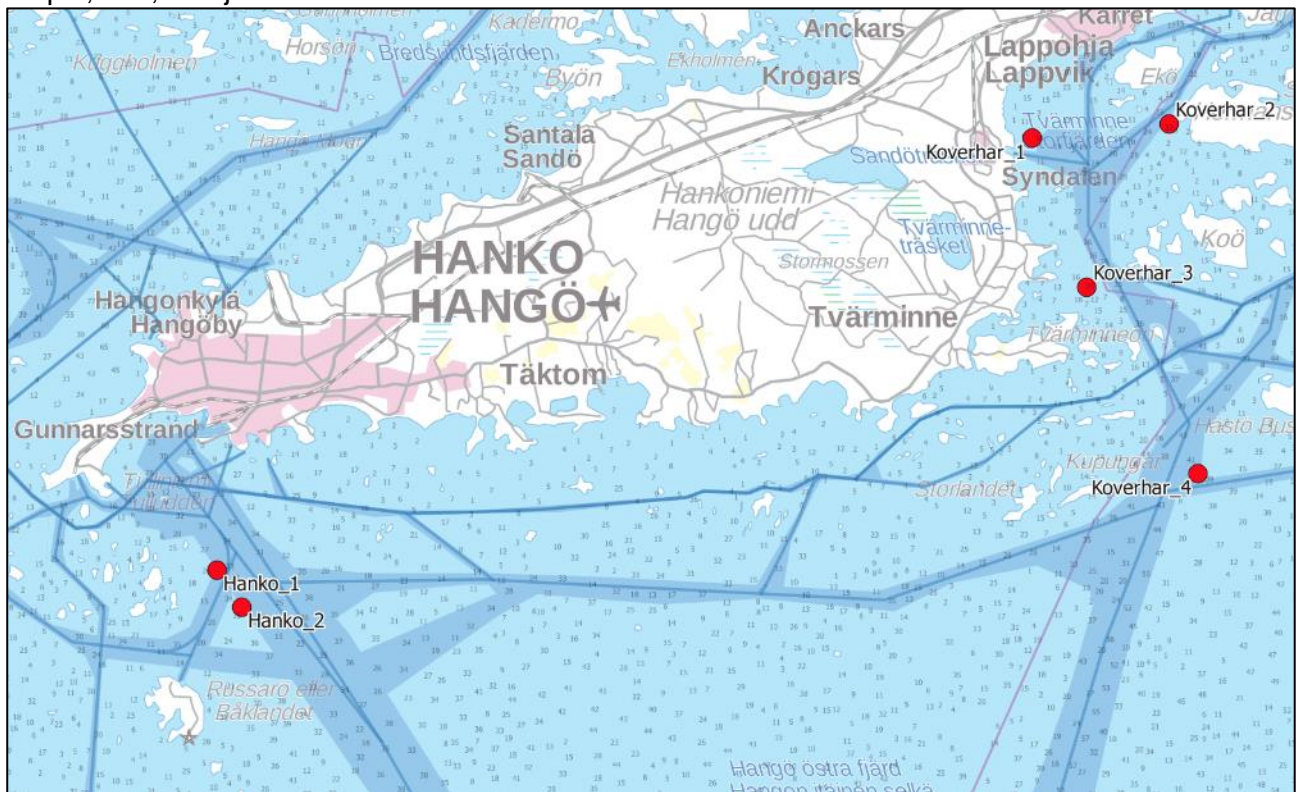
Taulukko 3. Taustatiedot mittausjaksolla operoineista aluksista Koverharin ja Hangon satamissa.

Jeanette	Terschelling	Plyca	Baltic Tern
Rahtilaiva	Rahtilaiva	Ro-Ro-alus	Konttialus
Kansallisuus: Alankomaat [NL]	Kansallisuus: Alankomaat [NL]	Kansallisuus: Alankomaat [NL]	Kansallisuus Kypros [CY]
Kokonaisvetoisuus: 3990 t	Kokonaisvetoisuus: 3990 t	Kokonaisvetoisuus: 28289 t	Kokonaisvetoisuus: 16324 t
Kantavuus: 6000 t	Kantavuus: 6000 t	Kantavuus: 18250 t	Kantavuus: 15952 t
Pituus: 110,78 m	Pituus: 110,78 m	Pituus: 205 m	Pituus: 169,4 m
Leveys 14 m	Leveys 14 m	Leveys 25,8 m	Leveys 27,23 m
Rakennusvuosi: 2007	Rakennusvuosi: 2005	Rakennusvuosi: 2009	Rakennusvuosi: 2005

Mittausten suorittaminen ja aineiston käsittely

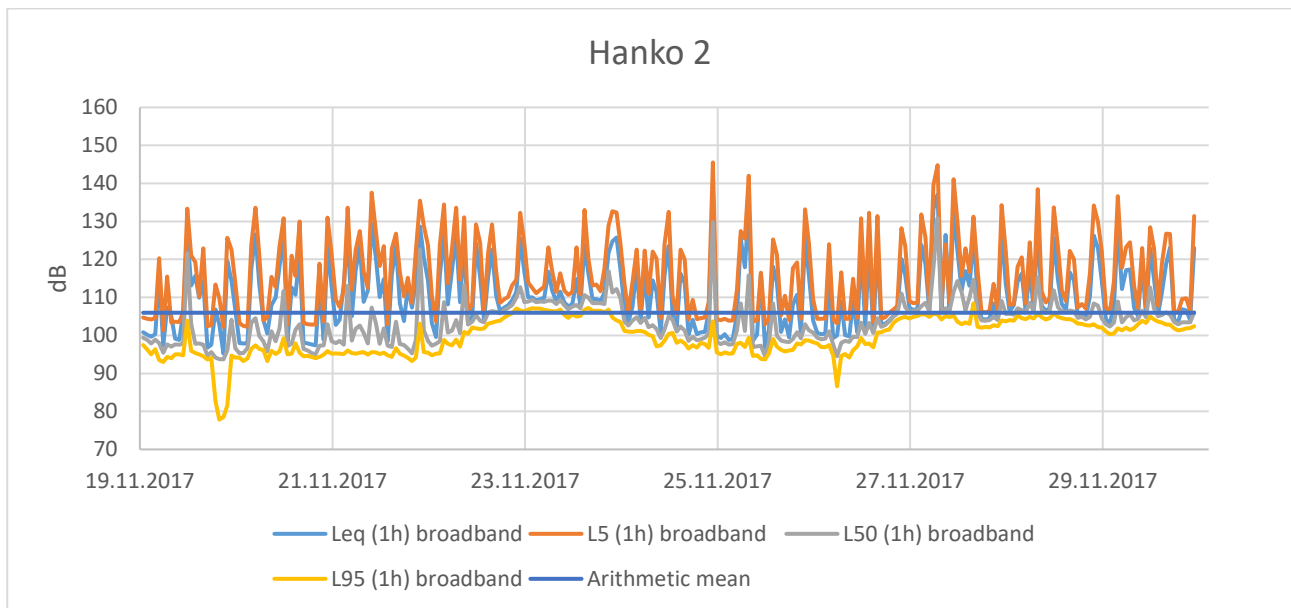
Melumittaukset suoritettiin Loggerhead DSG Ocean Logger – laitteilla. Kyseinen laite on pitkäaikaiseen itsenäiseen käyttöön tarkoitettu akustinen tallennusyksikkö. Laitteistot tallensivat jatkuvana koko mittausajan 50 kHz:n näytteenottotaajuudella ja 33 dB:n esivahvistuksella. Käytetyn HTI-96-MIN-hydrofonimallin taajuusalue on 2 Hz–30 kHz. Kuvassa 18 on esitetty mittauslaitteistojen sijainnit.

Mittausdatan esikäsittelyssä data käsiteltiin korjattuina hydrofonin herkkyyden ja käytetyn vahvistuksen mukaan. Data jaettiin yhden sekunnin pituisiin ikkunoihin, joista laskettiin äänenpainetasot terssikaistoittain alueelta 20 Hz–20 kHz. Datasta laskettiin tämän jälkeen Leq5min, Leq1h, L95, L50 ja L5.

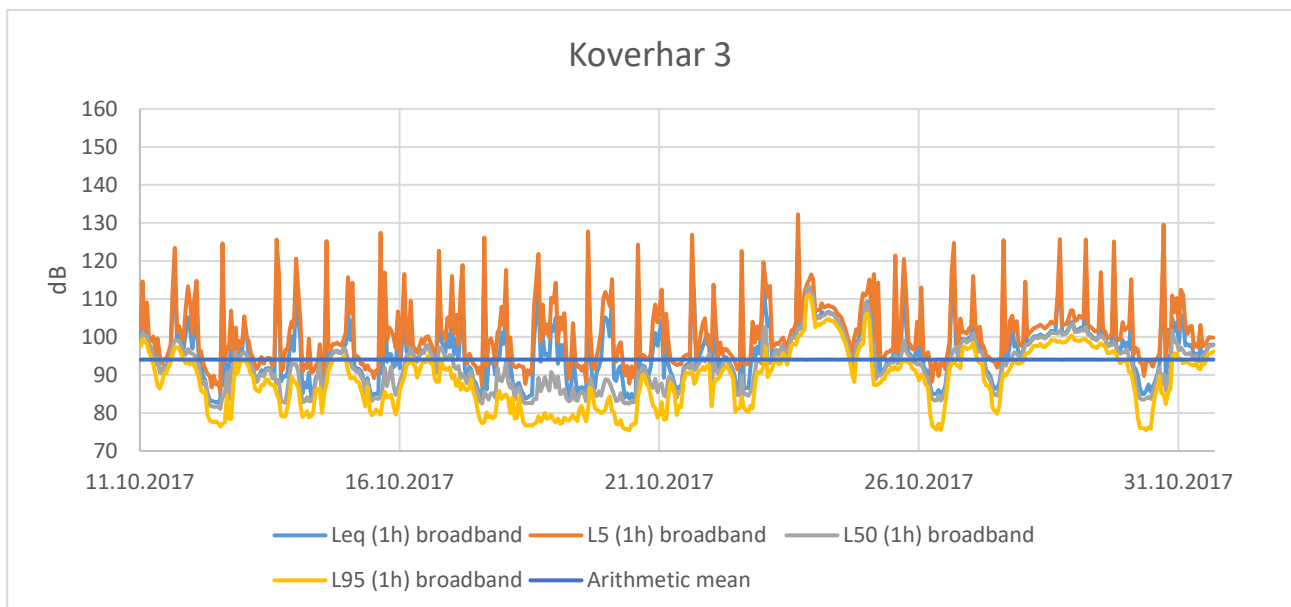


Kuva 18 Hydrofonien sijainnit

Mittausten aikana Hangon satamassa kävi keskimäärin 9 alusta päivittäin kun taas Koverharin väylää kulki kaksi alusta. Alukset ohittivat mittauspisteet myös lähtiessä, joten vuorokauden aikana ohituksia molemmissa paikoissa tuli kaksinkertainen määrä. Hangon edustalla olevat mittauspisteet olivat avoimella paikalla, jolloin tuulen kanssa korreloiva taustamelutaso oli korkeampi. Keskimääräinen melutaso Hangon edustalla oli 106 dB ja 94 dB mittauspisteessä kolme eli Koverhariin johtavalla väylällä. Taustamelutaso L95 (1h) oli Koverharissa (kuva 20) tyypillisesti 80–100 dB:n välillä kun taas Hangon edustalla (kuva 19) se oli noin 10 dB:a korkeampi.



Kuva 19 Leq (1 h), L95 (1 h) ja L5 (1 h) tasot asemalla Hanko 2



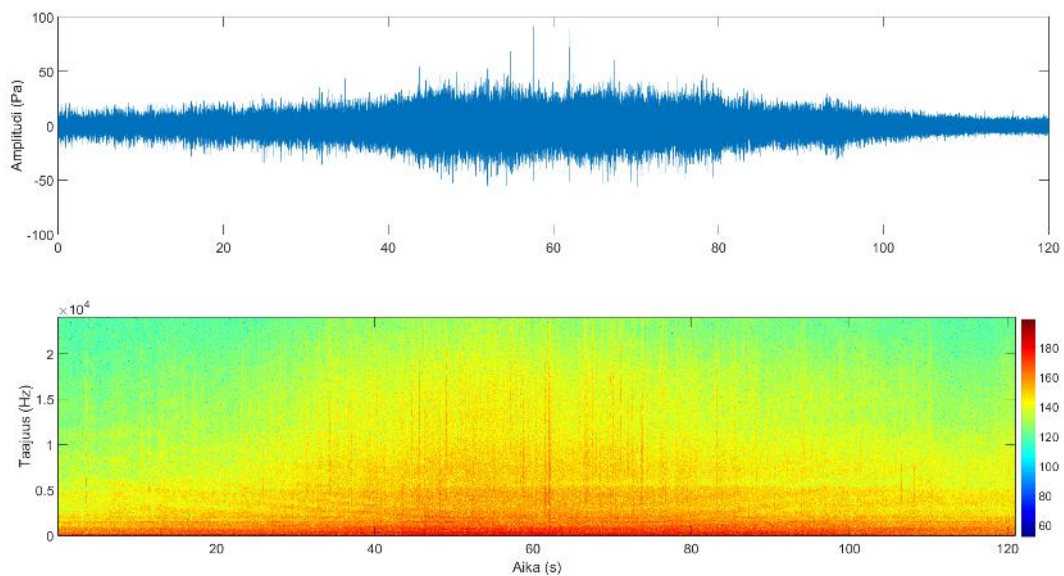
Kuva 20 Leq (1 h), L95 (1 h) ja L5 (1 h) tasot asemalla Hanko 2

Kahta Hangon satamassa käyvää alusta pyydettiin pudottamaan nopeutta 25.11.2017 mahdollisimman hitaaksi siten että niiden ohjailukyky säilyy. Ro-Ro-alus Stena Forerunnerin meluherätettä on vertailtu kahdella eri nopeudella kuvissa 21 ja 22. Kuvissa on nähtävissä selkeä

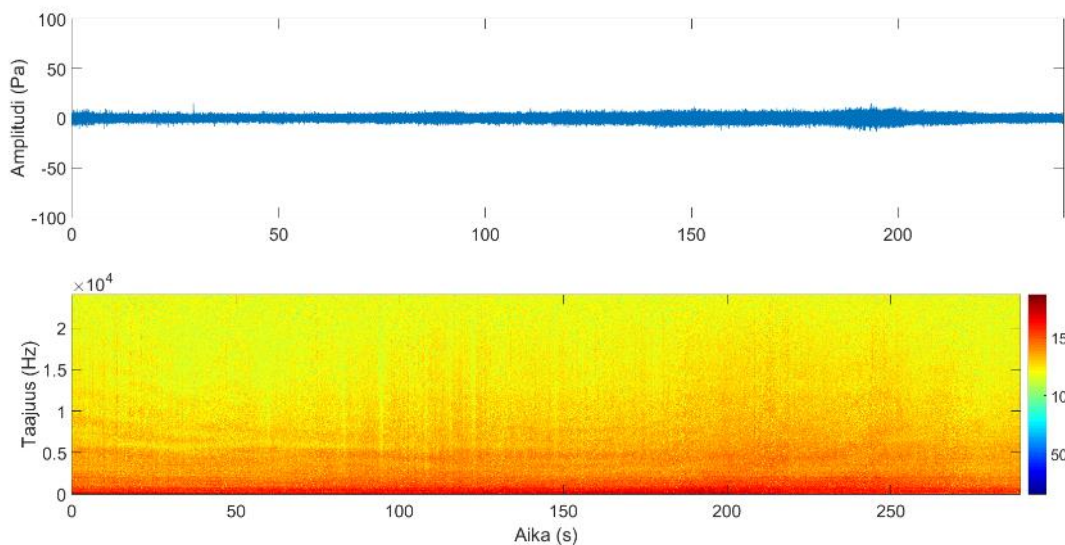
ero äänenpainetasossa. Yhteensä kyseisen aluksen ohituksia saatiin mittausjaksolla tallennettua yhteensä 10. Koska aluksen meluheräte ei ole välttämättä samanlainen molempiin sivusuuntiin, vertailuun otettiin ainoastaan satamasta lähdöt. Ohitusten tiedot on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 3. Mittauspaikan ohittaneen aluksen nopeus, ohitustapahtuman kesto ja mitattu äänenpainetaso Stena Forerunnerille.

Aika	Nopeus (kn) ~	Ohituksen kesto (min)	Äänenpainetaso (dB re. 1 μ Pa)
17. marraskuuta 2017 11:47	15	3	138,4
17. marraskuuta 2017 23:09	15	3	140,5
21. marraskuuta 2017 11:15	15	3	136,5
21. marraskuuta 2017 23:41	15	3	138
25. marraskuuta 2017 15:46	10	6	125,9



Kuva 21 Ro-Ro-alus Stena Forerunner, nopeus noin 15 solmua



Kuva 22 Ro-Ro-alus Stena Forerunner, nopeus noin 10 solmua

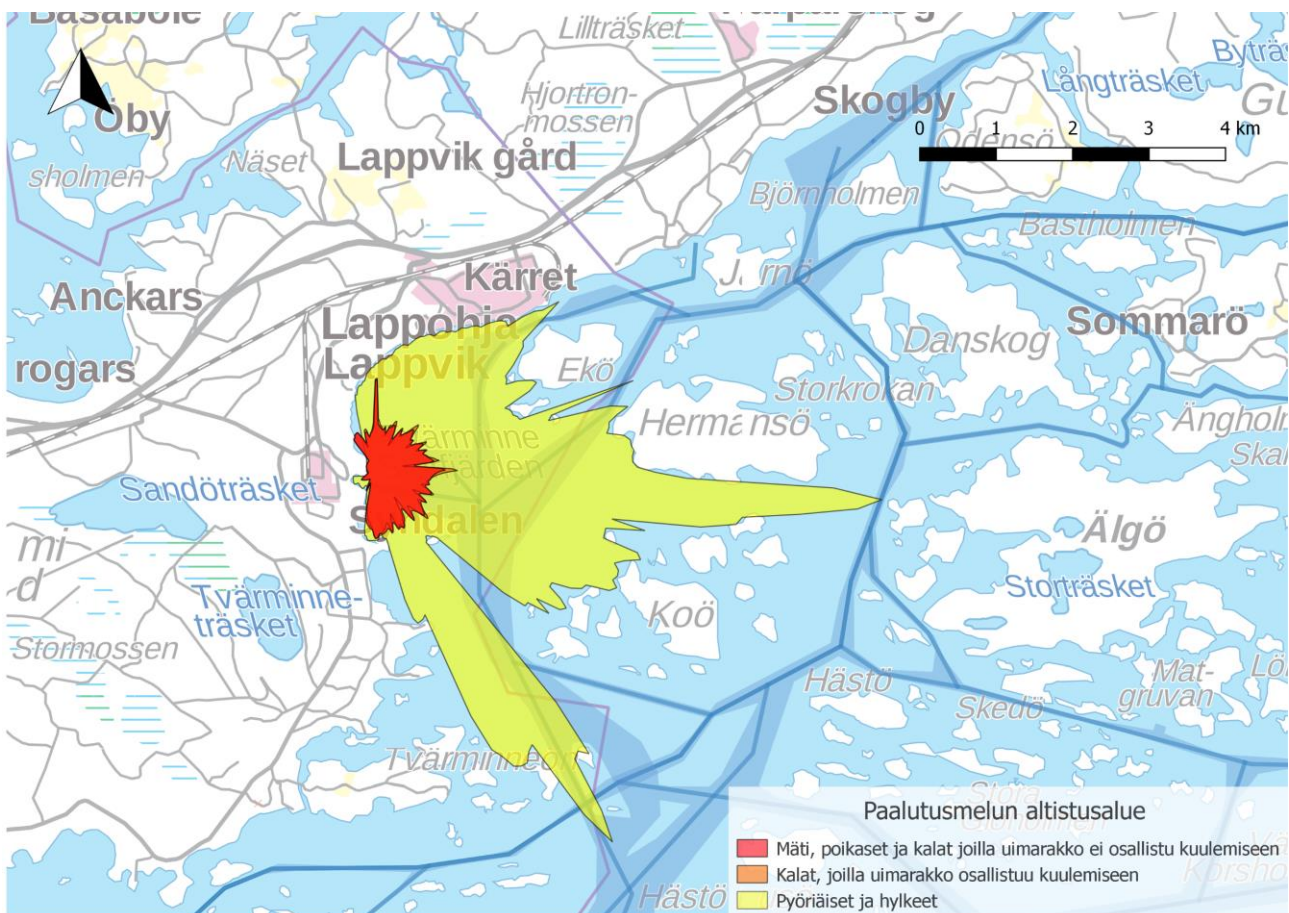
Vaikutusten arviointi

Paalutus

Halvorsen ym. (2012b) vertasivat minkälaisia vaurioita paalutusmelu aiheuttaa järvisammelle (nieluun yhteydessä oleva uimarakko), järvikampelalle (ei uimarakkoa) ja niilintilapialle (umpinainen uimarakko). Järvikampelalla ei havaittu lainkaan paalutusmelun aiheuttamia kudosvaurioita, kun taas niilintilapialla voimakas paalutusääni aiheutti suurimmat vauriot kaikista testatuista kalalajeista (Halvorsen ym. 2012b). Kun äänenpainetasoja laskettiin alemmalle tasolle, niilintilapian ja järvisammen vauriot olivat samaa suuruusluokkaa (Halvorsen ym. 2012b).

Paalutusmelun aiheuttamat kudosvauriot ovat seurausta siitä, että kaasun täyttämän ilmarakon seinämät alkavat värähdellä paineaallon seurauksena. Kaloilla, joilla uimarakko on yhteydessä nieluun, on mahdollista säädellä nopeammin uimarakon kokoa niiden kohdatessa paineaallon.

Sen sijaan kaloilla, joiden uimarakko on umpinainen ja kaasujen vaihto on hitaampaa, paineaalto saattaa aiheuttaa enemmän vaurioita (Halvorsen ym. 2012b). Kuvassa 23 Punaisen alueen sisällä paalutusmelu voi aiheuttaa kuoleman tai kuolettavan vamman kaloille, joilla ei ole uimarakkoa tai uimarakko ei osallistu kuulemiseen. Sama altistusalue koskee myös kalojen mätiä ja poikasia. Oranssin alueen sisällä paalutusmelu voi aiheuttaa kuoleman tai kuolettavan vamman kaloille, joilla uimarakko osallistuu kuulemiseen. Eri kalaryhmien alueet ovat hyvin samankokoisia.

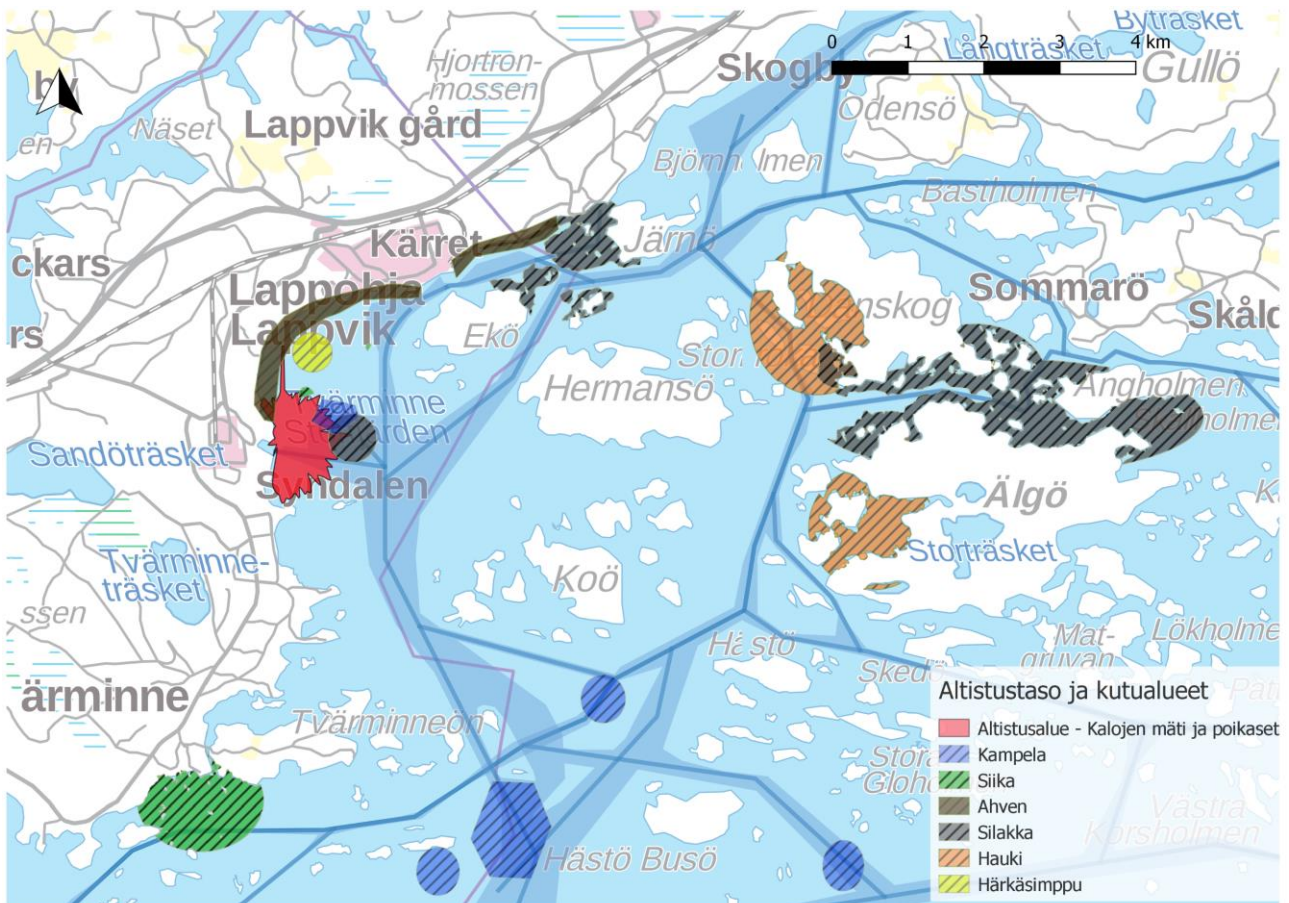


Kuva 23 Paalutuksen vaikutus kaloihin ja merinisäkkäisiin

Uimarakon ja sisäkorvan välisen yhteyden on havaittu korreloivan hyvän kuulon kanssa, erityisesti korkeilla taajuuksilla (Schultz-Mirbach ym. 2012, Mann ym. 2007). Esimerkiksi särkikaloilla on kehittynyt uimarakon etuosan ja sisäkorvan yhdistävä luurakenne, Weberin luut, jonka seurauksena niillä on useita muita kaloja herkempi kuulokynnys ja laajempi kuulon alue (Mann ym. 2007). Useilla kalaryhmillä on myös muita kuulemista parantavia sopeumia, kuten uimarakon jatkeena olevia ilman täyttämiä elimiä, jotka ovat yhteydessä sisäkorvaan (Schultz-Mirbach ym. 2012).

Keltaisen alueen sisällä kumulatiivinen paalutusmelu voi aiheuttaa tilapäisen tai pysyvän kuulonaleneman pyöriäiselle. Pyöriäisiä altistettiin tutkimuksessa (Kastelein ym. 2015) tallennetulle paalutusmelulle 60 minuutin ajan. Pieni mutta merkittävä tilapäinen kuulon heikkeneminen havaittiin 4 ja 8 kHz:n taajuusalueilla vaikka suurin osa (68 %) akustisesta paalutusenergiasta on taajuusalueella 500–800 Hz. Kaikuluotaukseen pyöriäisten käyttämä 125 kHz:n taajuusalue ei ollut altistunut paalutusmelulle.

Kuvassa 24 on verrattu paikallisia kutualueita kalojen poikasten ja mädin altistusalueeseen. Altistusalueen ulkoreunat sivuavat kampelan, silakan, ahvenen ja siian kutualueita.



Kuva 24 Altistustaso (Kalojen mäti ja poikaset) vs. kutualueet

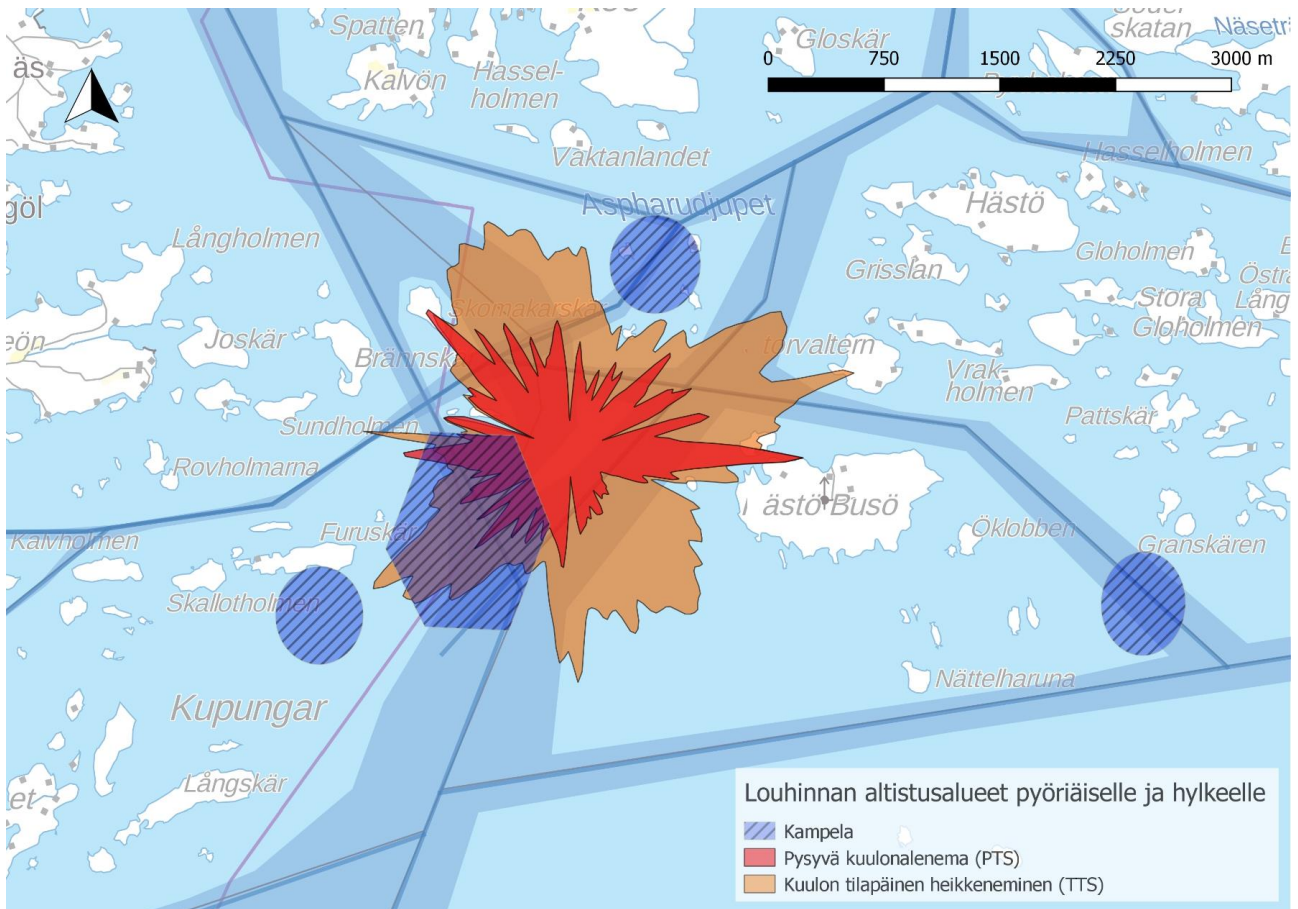
Louhinta

Räjähdyksissä räjäytyspisteestä leviävä ääni/paineaalto on vielä paalutusta ja ilmatykkejä jyrkemmin nouseva ja laskeva ja aiheuttaa siksi todennäköisemmin vaurioita merieliöissä erityisesti räjäytysten lähialueella. Räjäytysten vaikutukset kaloihin ulottuvat yleensä varsin lähelle räjäytysaluetta (muutamia kymmeniä metrejä). Popper ym. 2014 arvioivat kudosvaurioiden, kuulonaleneman ja

käyttäytymismuutosten riskin korkeaksi kaikilla kalatyypeillä ainoastaan äänenlähteen läheisyydessä, ja matalaksi muilla etäisyyksillä.

Kehittyvän mädin on havaittu vaurioituvan riittävän voimakkaasta mekaanisesta shokista, jonka esimerkiksi räjähdysten paineaalto voi saada aikaiseksi (Jensen ym. 2003, Faulkner ym. 2008). Tämä tulee ottaa huomioon esimerkiksi räjäytettäessä jokiuomia tai vanhoja siltoja tai alueilla, jossa tunnetusti on kalojen kutupaikkoja. Sorapatjan päällä tai sisällä sijaitsevan mädin on havaittu olevan alttiimpaa räjäytysten aiheuttamille vaurioille, kuin vapaassa vedessä olevan mädin (Faulkner ym. 2008). Mädin herkkyys räjäytysten aiheuttamalle kuolleisuudelle vaihtelee huomattavasti eri lajien ja kehitysasteiden välillä. Jensen ym. (2003) arvioivat, että kuuden *Onchorhynchus*-suvun lohen mädin kuolleisuus nousee 10 prosenttiin arvojen 147–838 mm s1 välillä lajista riippuen.

Kuvassa 25 on esitetty Louhinnan PTS (punainen) ja TTS (oranssi) vaikutusalueet pyöriäiselle ja hylkeelle. Louhinta-alueen välittömässä läheisyydessä on kampelan kutualue sinisellä.



Kuva 25 Louhinnan vaikutusalueet ja kampelan kutualue sinisellä.

Ruoppaaminen

Ruoppamisesta syntyvä melu on hyvin erilaista verrattuna esimerkiksi palautukseen. Lyhytkestoisesta ja korkeasta äänialtistustason sijaan ruoppaus aiheuttaa hyvin pitkäaikaisen altistuksen. Ruoppamisesta aiheutuva äänenpainetaso on samaa luokkaa yleisen laivaliikenteen kanssa ja sitä aiheutuu vain rakennusvaiheessa. Merirakentamisesta ruoppaamista tehdään kuitenkin usein ympäri vuorokauden kaikkina viikonpäivinä. Monta viikkoa jatkuva yhtäjaksoinen melu voi vaikuttaa monin tavoin kaloihin.

Ihmistoiminnan aiheuttaman vedenalaisen äänen vaikutuksia on tutkittu erityisesti merinisäkkäillä, joilla on havaittu vedenalaisen melun aiheuttamia fysiologisia stressireaktioita sekä akustisten viestien jäämistä taustakohinan taakse. Valailla on havaittu ääntelyn kovenemista alueilla, joilla on myös runsaasti ihmisperäisiä äänenlähteitä (Holt ym 2008).

Samankaltaisia, pitkäkestoisia tutkimuksia äänen vaikutuksesta ei ole tehty luonnossa elävillä kaloilla. Vaikka kalat eivät pääsääntöisesti ole yhtä riippuvaisia akustisesta kommunikaatiosta kuin valaat, vedenalainen melu saattaa aiheuttaa myös kaloille stressiä ja muutoksia käyttäytymisessä, sekä vaikeuttaa luonnollisten signaalien havainnoimista (peitevaikutus) (Slabbekoorn 2010). Peitevaikutus voi olla merkittävä erityisesti akustisesti kommunikoivien kalojen osalta, joille on tärkeää parinvalinnan kannalta kuulla esimerkiksi lajikumppaneiden kudunaikaisia soidinääniä tai saalis-/petokaloista lähteviä ääniä, tai muuten aistia ympäristöään (Slabbekoorn 2010). Kalat, joilla on kuulemiseen erikoistuneita rakenteita, ovat herkempiä taustakohinan aiheuttamalle peitevaikutukselle, kuin kalat, joilla näitä rakenteita ei ole (Wyssocki & Ladich 2005).

Laivaliikenteen lisääntyminen

Laivaliikenteen lisääntyminen on suurin jatkuvakestoinen melun aiheuttaja. Vedenalainen ääni saattaa vaikuttaa kalojen selviämisen kannalta oleellisiin reaktioihin. Esimerkiksi nuorilla ankeriailla (lasiankerias) tehdyissä kokeissa on havaittu, että laivamelu vähentää luonnollisia pakenemisreaktioita ja aiheuttaa fysiologisia stressireaktioita (Kohonnut hengitys ja aineenvaihdunnan taso) ja tekee siten ankeriaista helpompia saaliita pedoille (Simpson 2014). Bruintjes ym. (2016) osoittivat myöhemmin, että lasiankerioiden pakenemisreaktiot palautuivat nopeasti (2 minuutissa) takaisin normaaleiksi ja myös stressireaktiot palautuivat lähes normaalille tasolle laivamelun loppumisen jälkeen. Voimakas taustakohina saattaa vaikuttaa myös populaation sisäisiin suhteisiin, ja mahdollisesti vähentää äänen merkitystä kommunikoinnissa ja esimerkiksi reviirin puolustamisessa. Sebastianutto ym. (2011) havaitsivat laivamelun heikentävän punakitatkon (*Gobius cruentatus*) kykyä puolustaa reviiriään kilpailevaa lajikumppania vastaan. Kalanpoikasten ja mätimunien kohdalla, suhteelliset arvot perustuvat asiantuntija-arvioihin, sillä laivaliikenteen vaikutusta kalanpoikasiin ei ole tutkittu (Popper ym. 2014).

Mittauksissa havaittiin, että yksittäisen ro-ro-aluksen melutaso laski huomattavasti kun nopeutta hidastettiin. Nopeusrajoitukset voivat olla yksi keino melun vähentämiseksi. Toisaalta joissain nykyaikaisissa aluksissa potkuri voi olla suunniteltu optimaaliseksi yleisimmällä käytettävällä nopeudella. Tässä tapauksessa voi olla, että potkuri on äänekkäämpi matalammalla nopeudella. Myös aluksen hidastaessa altistumisaika kasvaa ja aluksen ohjailukyky heikkenee.

Vedenalaisen melun vähentäminen

Vedenalaisen melun voimakkuuteen sekä haitalliseen vaikutusalueeseen voidaan vaikuttaa laskemalla melulähteen herätettä, vaimentamalla melun etenemistä sekä arvioimalla alueella esiintyvien lajien erityispiirteitä.

Paalutusmelun voimakkuuteen vaikuttavat paalutustekniikka, pohjan koostumus, iskuvoimakkuus ja paalukoko. Melun etenemiseen vaikuttaa alueen syvyys, veden suolaisuus ja lämpötila sekä näiden kerrostuneisuus. Lisäksi taajuus sekä merenpohjan ja meren-pinnan olosuhteet vaikuttavat äänen heijastumiseen ja absorboitumiseen. Melun haitallisuuteen vaikuttavat melun voimakkuuden lisäksi altistus aika, äänienergian jakautuminen eri taajuuksille, melun laatu sekä lajin yksilöllinen herkkyys.

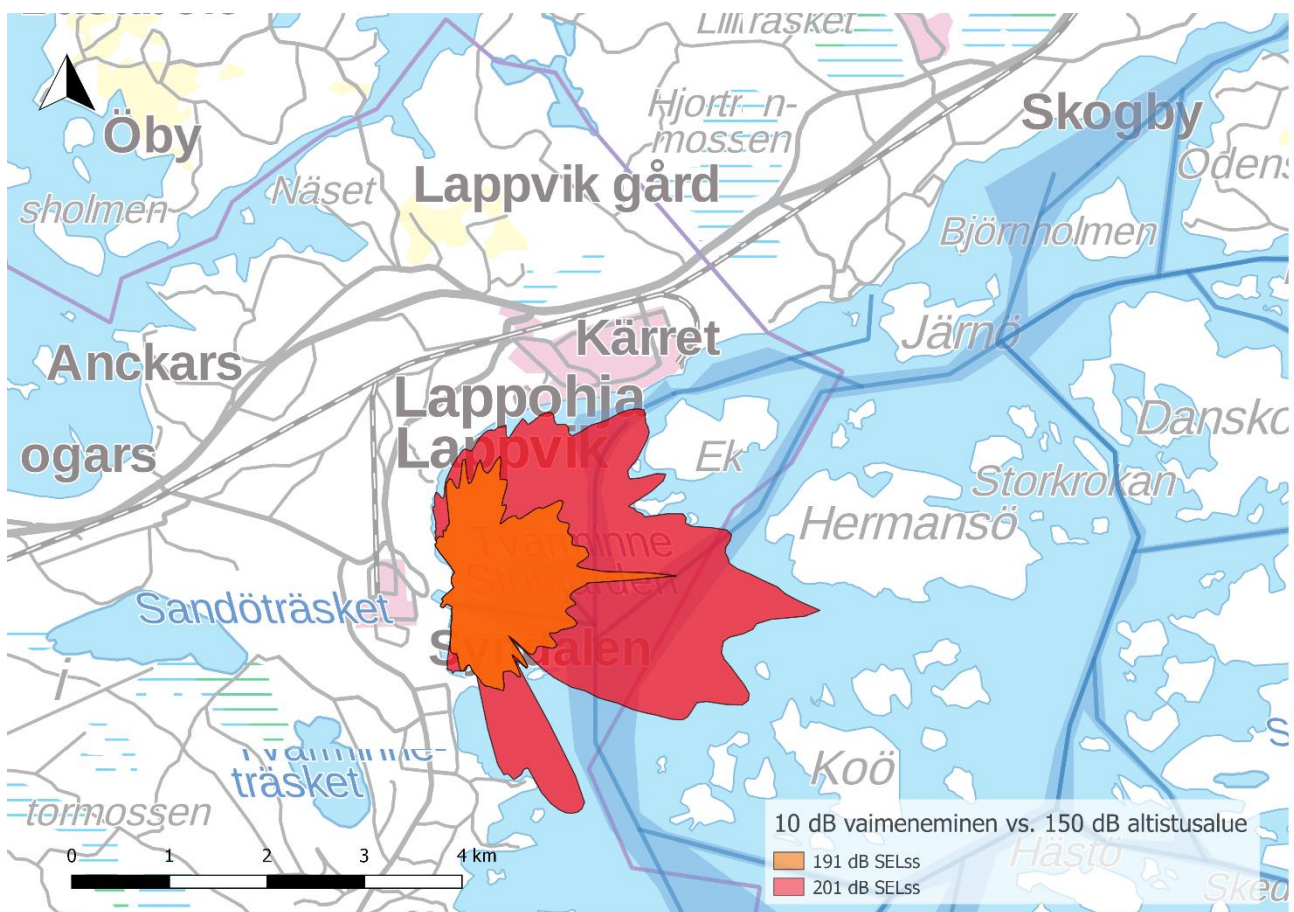
Louhinnan yhteydessä syntyvän shokkiaallon voimakkuuteen voidaan vaikuttaa räjähdysten latauskoolla. Jos porausreikien välistä etäisyyttä lyhennetään, voidaan käyttää pienempiä räjähdysmääriä. Myös käytettävällä räjähteellä on vaikutusta räjähdysnopeuteen. Louhinnan

yhteydessä voidaan myös harkita ns. ”soft start” – proseduuria, jossa merinisäkkäät karkotetaan kauemmaksi louhinta-alueelta pienemmillä panoksilla ennen varsinaista louhinta.

Paalutus- ja louhintamelua on mahdollista vähentää erilaisin rakentein, jotka vähentävät/hajauttavat äänen etenemistä vesipatsaassa. Kuplaverhot ovat yksi yleisimmistä käytössä olevista vähentämiskeinoista ja niiden vaimentava vaikutusalue ulottuu 80–800 Hz:n alueelle. Paalutusmelun suurimmat desibelit ovat taajuusalueen 100–300 Hz välissä (Elmer 2014), jossa sijaitsee myös suurimmalle osalle kaloista herkin kuuloalue. Kuplaverhojen vaikutusta saadaan lisättyä luomalla erikokoisia kuplia ja kasvattamalla ilmapirtta. Kuplaverhosta riippuen voidaan saada aikaan 5-18 dB:n vaimennus. Vaimennuksen tehokkuus riippuu myös virtauksista sekä veden syvyydestä. (Andersson ym. 2016)

Kuplaverhojen lisäksi paalutusäänen vaimentajana voidaan käyttää kiinteitä, ilmalla täytettyjä äänenvaimentimia (HSD, Hydso Sound Dampers), joiden on myös havaittu vähentävän paalutusääntä 10–15 desibelillä. HSD:n etuna on se, ettei vaimentimeen tarvitse jatkuvasti puhalltaa ilmaa ja myös se, että materiaalit voidaan suunnitella niin, että ääni vaimenee tietyiltä taajuuksilta (Elmer 2014).

Kuvassa 26 on vertailtu yksittäisen paaluniskun ja 150 dB:n altistusalueen laajuutta 10 dB:n vaimennuksen jälkeen.



Kuva 26 10dB:n vaimennuksen vaikutus altistusalueeseen

Johtopäätökset vedenalaisen melun vaikutuksista

Laajentamishankkeen vaihtoehdossa 1 meluallistutus jää huomattavasti pienemmäksi, koska paalutettavia laitureita on vain yksi ja louhintaa ei suoriteta ollenkaan. Myös ruoppauksen määrä on vain kolmanneksen. Vaihtoehdoissa 2 ja 2+ suurin ero liittyy sataman operatiivisen toiminnan aiheuttamaan meluun, jonka suurin aiheuttaja on laivaliikenne.

Taulukko 4 Eri vaihtoehtojen vertailut

	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2	Vaihtoehto 2+
Paalutettavat laiturit	1	2+1	2+2
Ruoppausmäärä (m³ltr)	31000	96000	102000
Ruoppauksen arvioitu kesto (vko)	3	9	10
Louhinta	-	6000	6000
Louhinnan arvioitu kesto (vko)	-	6	6
Arvioitu liikennemäärä	415	770	1070

Melun vaikutus voi vaihdella paljon olosuhteista riippuen. Useat erikoiset impulssimaiset herätteet, kuten kaikuluotaimen äänet tai aluksen luoma värähtely voivat houkuttaa kaloja. Kovat impulssimaiset äänet voivat taas säikäyttää kalat kauemmaksi äänilähteestä. Korkea taustamelutaso voi aiheuttaa haitallisia pitkäaikaisvaikutuksia. Melulle altistuminen voi aiheuttaa meren eliöille äkillisiä ja kroonisia vaikutuksia. Jatkuva melu ja äkkinäiset ärsykkeet voivat aiheuttaa kaloille stressiä, ja räjähdyspaikkojen läheisyydessä uivat kalat saattavat jopa kuolla voimakkaaseen paineaaltoon.

Pyöriäiset ja hylkeet ovat herkkiä melulle laajalla taajuusalueella. Pyöriäiset ovat erityisen herkkiä impulsiivisen melun aiheuttamalle melulle, mutta myös jatkuva melu voi myös osoittautua ongelmaksi joissakin tapauksissa (Dyndo ym. 2015). Itämeren suuri laivaliikenne luo riskin pitkäaikaiseen stressiin ja käyttäytymismuutoksiin.

Ympäristöön kulkeutuvan äänen voimakkuutta voidaan pyrkiä vähentämään esimerkiksi ilmaverhoilla tai muilla ääntä vaimentavilla rakenteilla tai käyttämällä hiljaisempia tekniikoita esimerkiksi paalutuksessa. Myös kalojen karkoitus alueelta karkottimilla tai prosessin vaiheittaisella kasvattamisella voi tulla kyseeseen riippuen työskentely tavasta. Kalanpoikasia ja mätä ei pystytä karkottamaan työskentelyn ajaksi, joten tämä tulisi ottaa huomioon erityisesti räjäytysten ajankohdassa. Kaloilla havaitaan muutoksia käyttäytymisessä jo vähäisenkin äänenpaineen kasvun seurauksena. Tästä syystä olisi biologisesti ja kalataloudellisesti tärkeillä alueilla tehtävät vesistötyöt hyvä ajoittaa kutuaikojen ulkopuolelle.

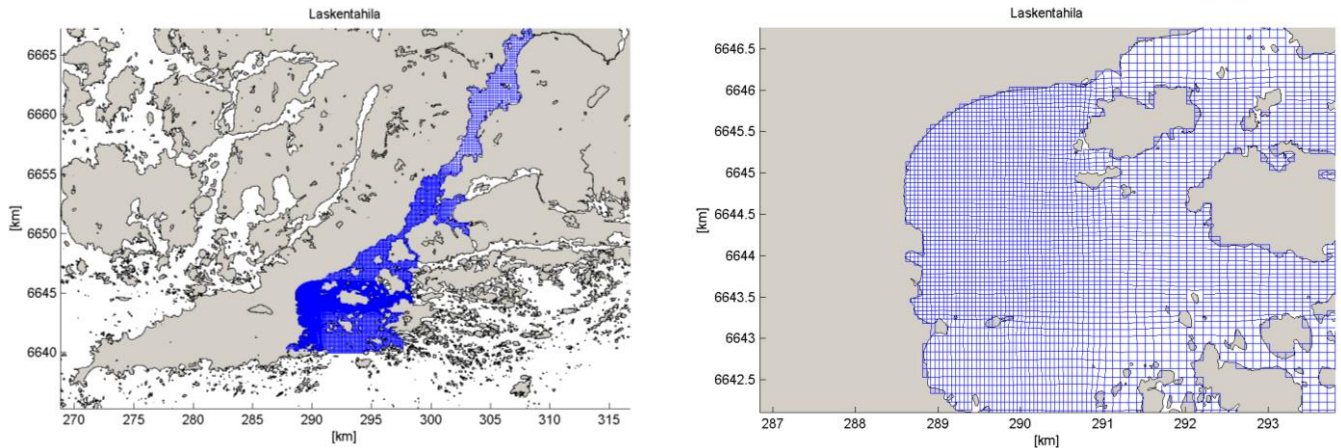
Sedimenttimallinnus

Laskentahila ja syvyysmalli

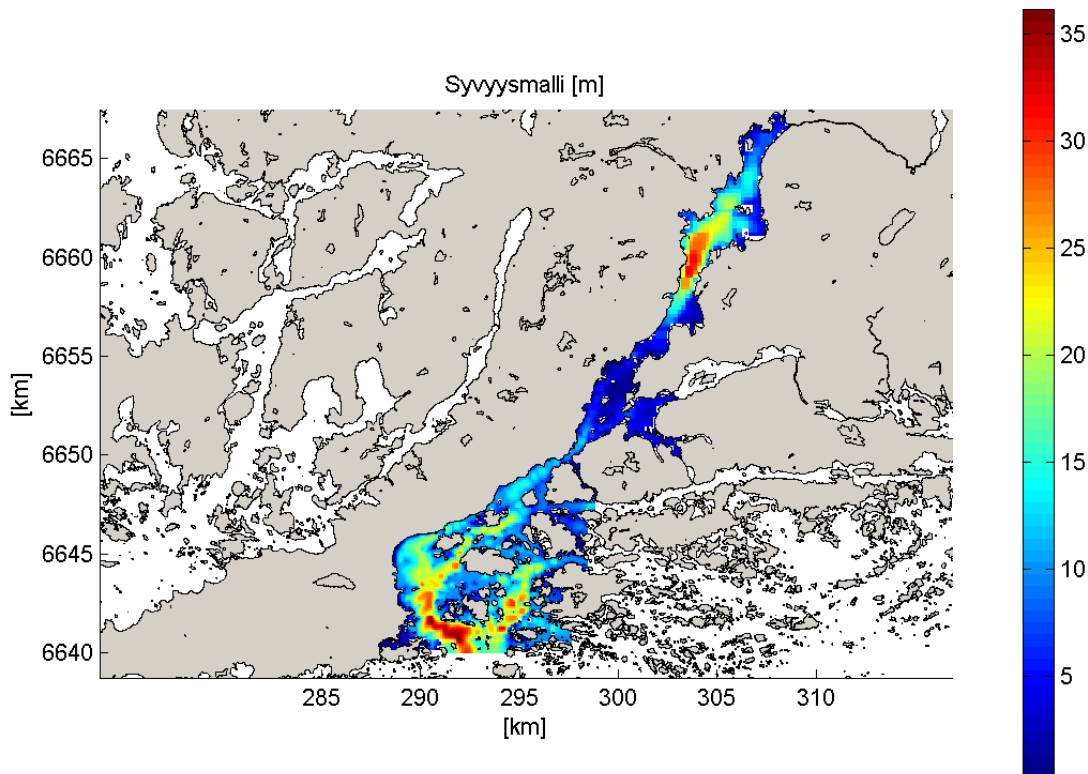
Sedimenttien kertymistä ja eroosiota kuvaavassa mallinnuksessa käytettiin Delft 3d -virtausmallia. Mallinnuksessa käytettiin suorakulmaista laskentahilaa (Kuva 27), jossa oli yhteensä 241 x 192 laskentaruutua. Mallinnettava alue kattoi mallinnuksen varsinaisen kohdealueen lisäksi aaltojen kannalta riittävän määrän merialueita sekä Pohjanpitäjänlahden. Laskentahilan tarkkuutta tihennettiin hiekkarannan alueelle suunniteltavien laiturirakenteiden vaikutusalueiden lähellä.

Hilakoko oli tiheimmillään hiekkarannalla noin 50 m, kasvaen avomerta kohden. Suurimmillaan hilakoko oli 200 m mallin Pohjanpitäjänlahden pohjukassa.

Syvyysmalli tehtiin yhdistämällä Liikenneviraston avoin syvyysaineisto sekä kohdealueelta tehdyt luotaukset (Kuva 28). Avoimella ulkoreunalla syvyysmallia tasoitettiin numeerisen stabiilisuuden saavuttamiseksi. Syvyysmallin tasapainotilan löytämiseksi tehtiin ensin malliin asetulla syvyysaineistolla yksi malliajo ennen nykytilan ja eri rakennusvaihtoehtojen mallinnusta. Käyttämällä malliajon lopputilanteeseen asetunutta syvyysmallia saatiin mahdollisimman hyvä syvyysmallin lähtötilanne varsinaisia malliajoja varten. Näin eliminoidaan syvyysmallin alkuasetusten ja tasapainotilan väliset eroavuudet tulosten tulkinnasta. Käytetty syvyysmalli oli muuten sama kuin melumallinnuksessa.



Kuva 27 Mallin laskentahila (vasen) ja suurennus Lappohjan hiekkarannan alueesta jossa hilakokoa on tihennetty.



Kuva 28 Malliskenaarioissa käytetty syvyysmalli, joka perustuu saatavilla oleviin syvyysaineistoihin.

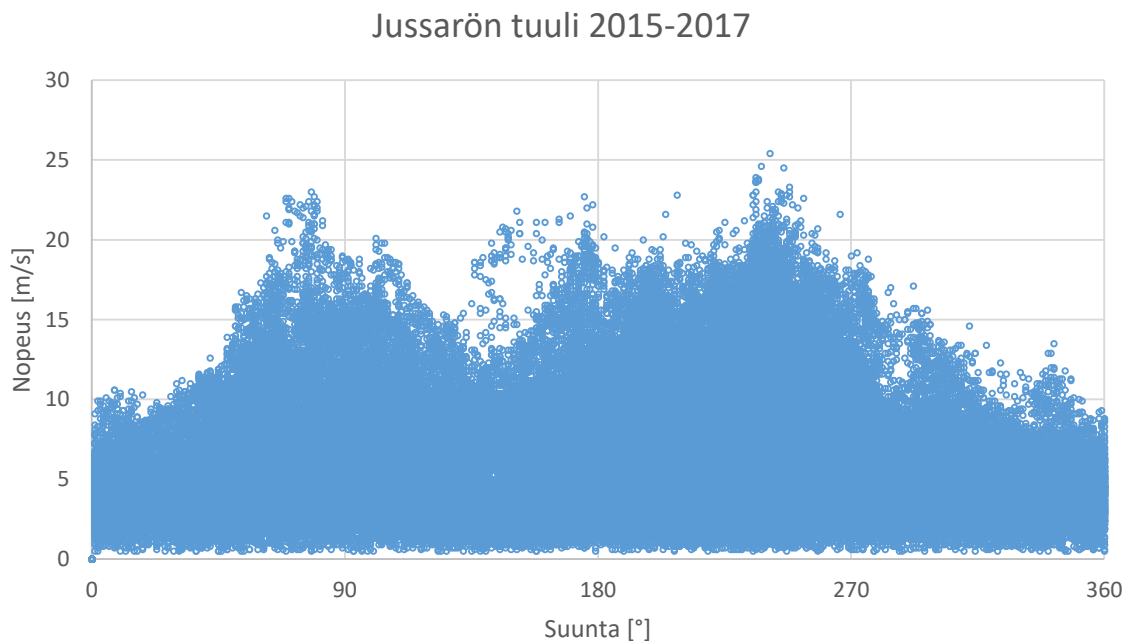
Mallin pakotteet ja reunaehdot

Mallin aloitusvaiheen ajotuloksien perusteella todettiin, että tärkeimmät sedimentin liikkeisiin vaikuttavista prosesseista ovat tuulen synnyttämät aallot ja niiden generoimat virtaukset, sekä tuulen aiheuttamat virtaukset. Meriveden pinnankorkeuden muutokset vaikuttivat Lappohjan hiekkarannan kohdalla virtauksiin niin vähän että ne jätettiin laskennasta pois. Tuuliaineisto, jota käytettiin sekä aaltojen että virtausten synnyttämiseen, ladattiin Jussarön havaintoasemalta (Ilmatieteenlaitos).

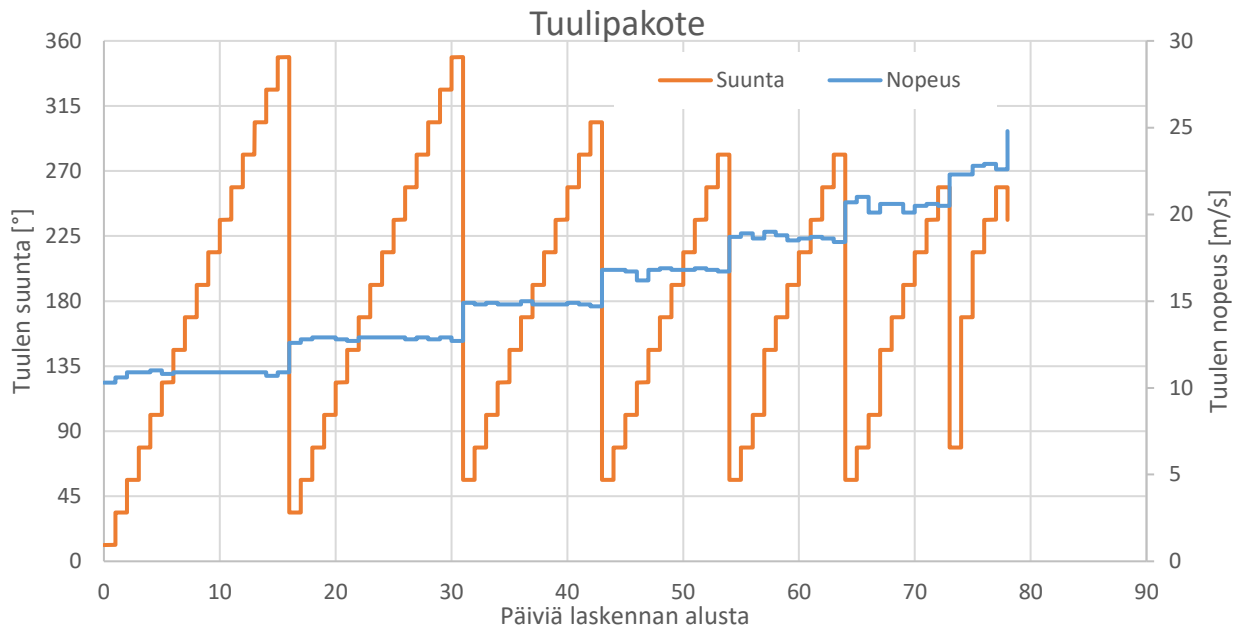
Tuuliaineistoista (kuva 29) etsittiin kahden vuoden (2015-2016) ajalta ääritilanteita, joista muodostettiin tiivistetty keinotekoinen aikasarja mallin laskenta-ajan lyhentämiseksi. Tuuli- ja aallohavainnot jaettiin 15° sektoreihin ja havainnoista laskettiin keskiarvot 1 m/s välein.

Heikot alle 5 m/s tuulen nopeudet jätettiin pois tarkastelusta. Näin muodostettiin tiivistetty aikasarja, jossa mallin virtauksia pakotetaan vuorokauden ajan tietystä 15° sektorista saapuvan tuulen nopeuden eri tasoilla (kuva 30). Koska ääritilanteet aiheuttavat suurimman osan hiekkarannan muutoksista niin muodostetulla aikasarjalla pakotettu malli kuvaa kahden vuoden aikana tapahtuvia muutoksia. Tulos on hyvin konservatiivisen koska voimakkaimmat myrskytilanteet harvoin kestävät koko vuorokautta.

Sedimenttimallissa määritettiin sedimenttiä koko hiekkarannan alueelle ja rannan edustan merialueelle. Sedimentin ominaisuudeksi asetettiin D50 koko $250 \mu\text{m}$ ja kuivatiheys 1600 kg/m^3 perustuen alueelta noudetun sedimentinäytteen raekokomääritykseen (Luode Consulting Oy 2017). Sedimenttiä oletettiin olevan pohjan tason alapuolella rajattomasti.



Kuva 29 Jussarön havaintoaseman tuuliaineisto vuosina 2015-2017.



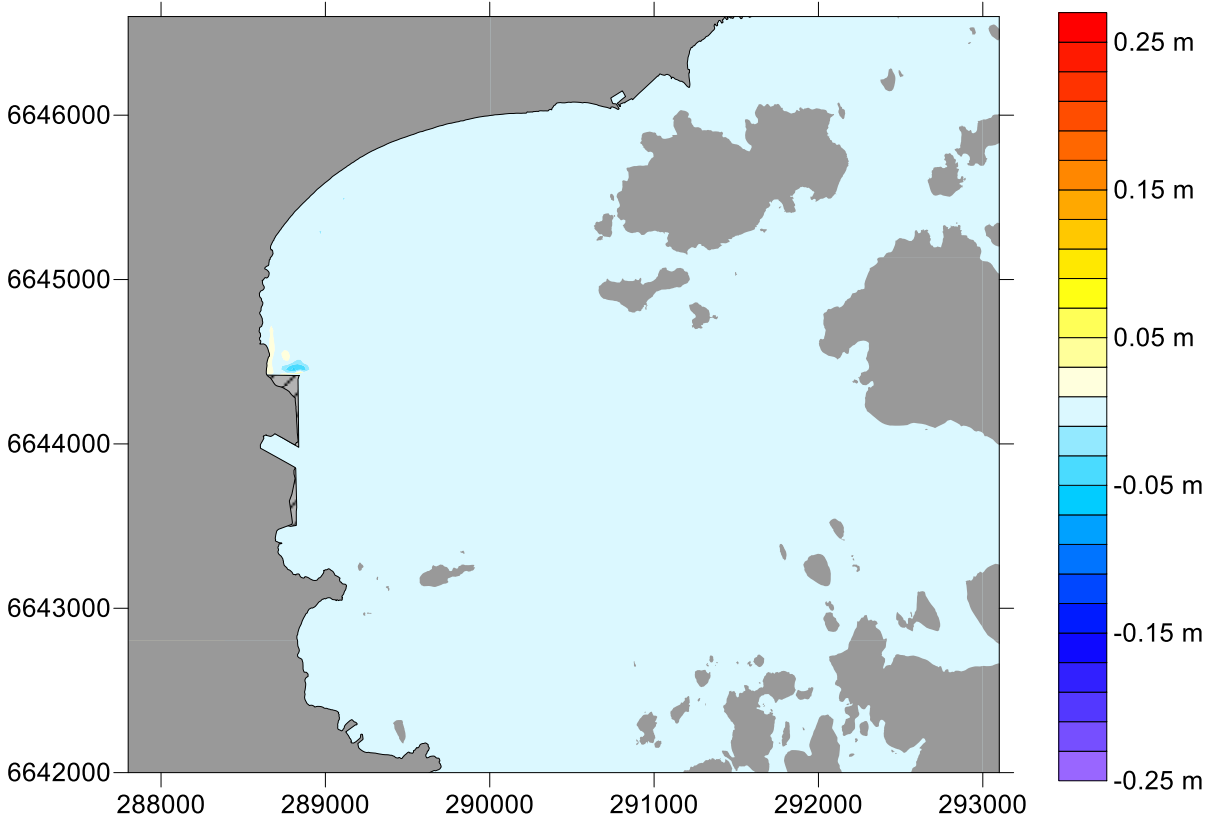
Kuva 30 Tuulihavainnoissa tiivistetty keinotekoinen aikasarja tuulen nopeudelle ja -suunnalle. Havainnoista on laskettu keskiarvot tuulen nopeuden osalta 1 m/s välein.

Virtausmallissa oli yksi avoin laskentahilan Suomenlahteen liittävä reuna etelässä (kuva 27). Laituri- ja aallonmurtajarakenteet mallinnettiin virtausmallissa muuttamalla alkuperäistä hilaa, jolloin suorat vertailut eri vaihtoehtojen välillä ovat mahdollisia. Ruoppaukset toteutettiin tekemällä muutoksia syvyysmalliin. Aaltomallille tehtiin laituri- ja aallonmurtajia varten este jonka läpi ei vesi päässyt virtaamaan eikä aallot etenemään.

Tulokset sedimenttimallinnuksesta

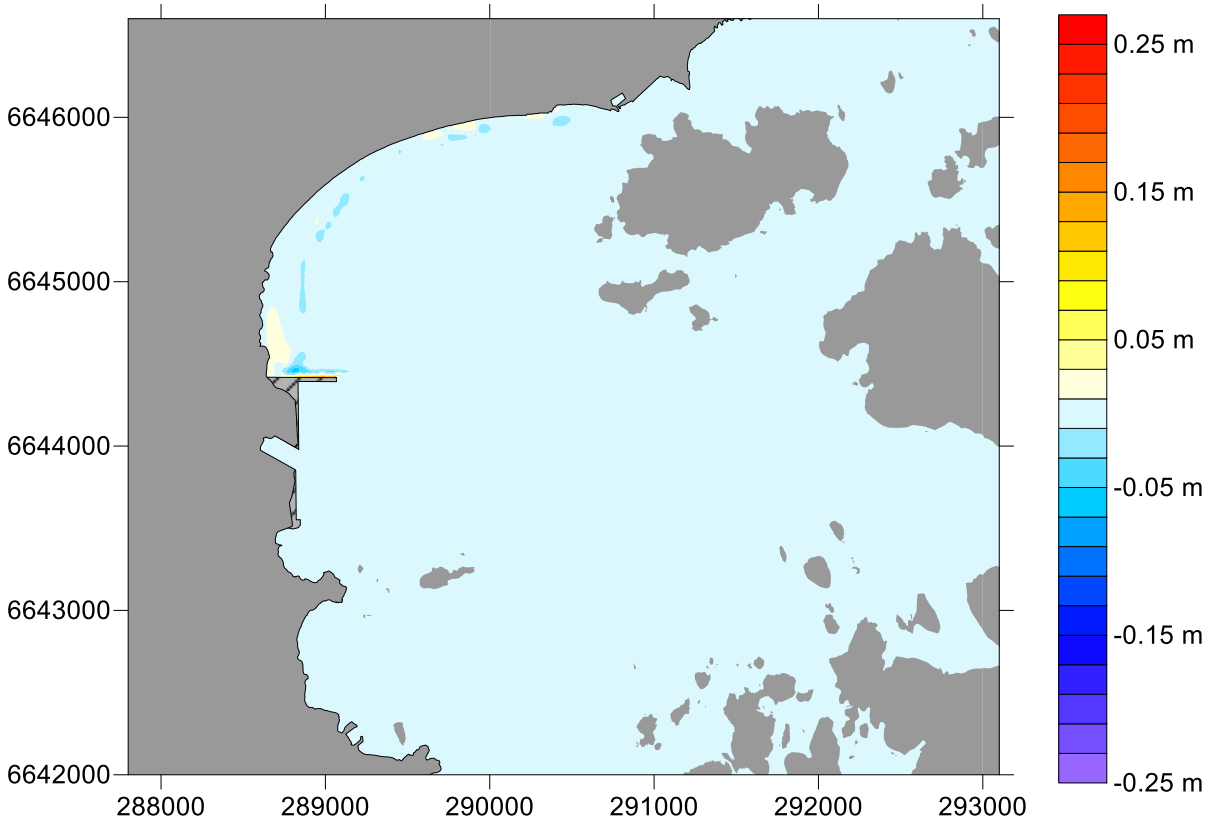
Ve1-vaihtoehdossa sedimentin pinnankorkeus nousee muutamilla sentteillä pienellä alueella sataman lähellä ja vastaavasti syvenee satama-alueen koillisreunassa (Kuva 31). Nykyisen rannan ja aallonmurtajan kulmaan muodostuu hitaasti hiekkakerros. Ve2 (Kuva 32) ja Ve2+ (Kuva 33) tilanteet ovat luonteeltaan samanlaisia kuin Ve1-tilanne. Pohjoisemman aallonmurtajan pohjoispuolelle muodostuu matala eroosioalue ja vastaavasti hiekkaa kertyy nykyisen rantaviivan ja sataman väliseen kulmaan.

Vaihtoehto 1, sedimentin pinnankorkeuden muutos



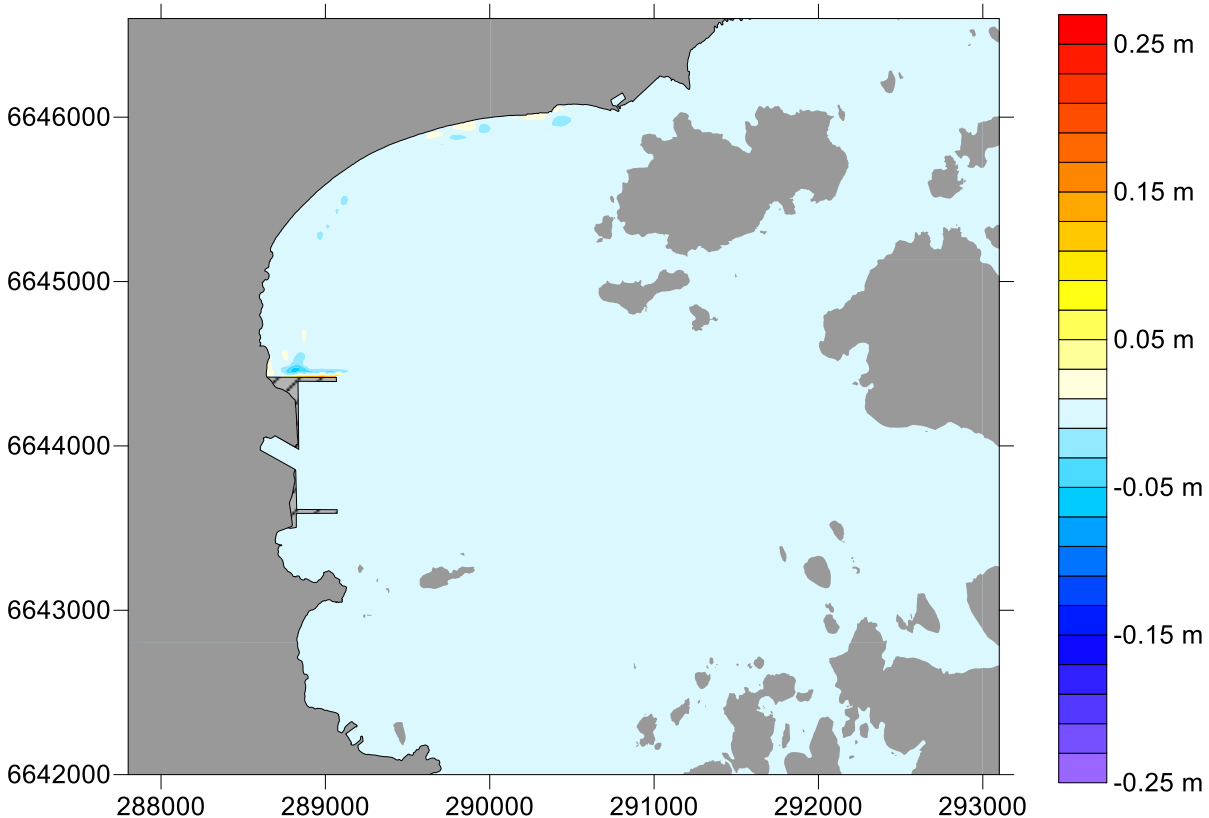
Kuva 31 Sedimentin pinnankorkeuden muutos vaihtoehdon 1 mukaisessa tilanteessa. Ruopatut alueet on poistettu kuvista.

Vaihtoehto 2, sedimentin pinnankorkeuden muutos



Kuva 32 Sedimentin pinnankorkeuden muutos vaihtoehdon 2 mukaisessa tilanteessa. Ruopatut alueet on poistettu kuvista.

Vaihtoehto 2+, sedimentin pinnankorkeuden muutos



Kuva 33 Sedimentin pinnankorkeuden muutos vaihtoehdon 2+ mukaisessa tilanteessa. Ruopatut alueet on poistettu kuvista.

Johtopäätökset sedimenttimallinnuksesta

Laajentamishankkeen kaikissa vaihtoehdoissa sedimenttien kertyminen ja eroosio jää muutamien senttimetrien tasolle. Suurimmat vaikutukset rajautuvat sataman pohjoispuolelle missä sedimenttien kertyminen on 5 cm tasolla. Vaihtoehdoissa missä sataman yhteyteen rakennetaan 1-2 uutta pistolaituria, havaitaan pienimuotoista eroosiota. Eroosion suuruusluokka jää muutamien senttimetrien tasolle.

Pääasiallisena kulkeutumismallina havaitaan aallokon nostavan hiekkaa hiekkarannan syvänteen reunusta kohti rantaa. Nettokuljetus tuo lisäksi pienen määrän materiaalia pohjoisesta etelään. Sama ilmiö on havaittavissa jo nykytilanteessa. Sataman syventämisen tai laitureiden rakentamisen ei näinollen katsota vaikuttavan Lappohjan hiekkarannan eroosioon tai hiekan kertymiseen laajemmin. Havaittavissa olevat vaikutukset rajautuvat sataman pohjoisosiin ja niiden välittömään läheisyyteen muutamien kymmenien metrien matkalle.

Lähteet

Amoser, S. & Ladich, F. 2003. Diversity in noise-induced temporary hearing loss in otophysine fishes. *The Journal of the Acoustical Society of America* 113(4):2170-2179.

Andersson, M.H., Andersson, S., Ahlsén, J., Andersson, B.L., Hammar, J., Persson, L.K.G., Pihl, J., Sigray, P., Wikström, A. 2016. A framework for regulating underwater noise during pile driving. A technical Vindval report, ISBN 978-91-620-6775-5, Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm, Sweden.

Dyndo, M., Wiśniewska, D.M., Rojano-Doñate, L., Madsen, P.T. 2015. Harbour porpoises react to low levels of high frequency vessel noise. *Scientific Reports*, 5: 11083. DOI: 10.1038/srep11083.

Faulkner, S., G., Welz, M., Tonn, W. M. & Schmitt, D., R. 2008 Effects of simulated blasting on mortality of rainbow trout eggs. *Transactions of the American Fisheries Society* 137:1-12

Guidance to Manage the Risk to Marine Mammals from Man-made Sound Sources in Irish Waters, Dept. of Arts, Heritage and the Gaeltacht, 2014

Halvorsen, M.B., Casper, B.M., Woodley, C.M., Carlson, T.J., Popper, A.N. 2012a. Threshold for onset of injury in Chinook salmon from exposure to impulsive pile driving sounds. *PLoS ONE* 7(6):e38968. doi: 10.1371/journal.pone.0038968

Halvorsen, M. B., Casper, B. C., Matthews, F., Carlson, T. J., and Popper, A. N. 2012b. Effects of exposure to pile driving sounds on the lake sturgeon, Nile tilapia, and hogchoker. *Proceedings of the Royal Society B*. 279: 4705–4714

Halvorsen, M.B., Casper, B.M., Woodley, C.M., Carlson, T.J., and Popper, A.N. 2011. Predicting and mitigating hydroacoustic impacts on fish from pile installations. NCHRP Research Results Digest 363, Project 25-28, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington, D.C.

Jensen, J., O., T. 2003. New mechanical shock sensitivity units in support of criteria for protection of salmonid eggs from blasting or seismic disturbance. *Can. Tech.Rep. Fish. Aquat. Sci. No. 2452*. Department of fisheries and oceans. Pacific Biological Station

National Marine Fisheries Service. 2016. Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing: Underwater Acoustic Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts. U.S. Dept. of Commer., NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-55, 178 p.

Neo, Y. Y., Seitz, J., Kastelein, R. A., Winter, H. V., ten Cate, C. & Slabbekoorn, H. 2014. Temporal structure of sound affects behavioural recovery from noise impact in European seabass. *Biological Conservation* 178: 65-73.

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

Slabbekoorn, H., Bouton, N., van Opzeeland, I., Coers, A., ten Cate, C., & Popper, A. N. 2010. A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish. *Trends in Ecology & Evolution* 25(7): 419-427.

Simpson, S.D., Purser, J. & Radford, A.N. 2015. Anthropogenic noise compromises antipredator behaviour in European eels. *Global Change Biology* 21(2):586-93.

Smith, M.E., Coffin, A.B., Miller, D.L., Popper, A.N. 2006. Anatomical and functional recovery of the goldfish (*Carassius auratus*) ear following noise exposure. *Journal of Experimental Biology* 209:4193–4202

Ward, P. Technical report 35283-0004-V5. 2015. Underwater noise impact study for Aberdeen Harbour Expansion Project: Impact of construction noise

Wysocki, L. E., & Ladich, F. 2005. Hearing in fishes under noise conditions. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology* 6(1): 28-36.

Taulukot 1 ja 2, Popper 2014

- 1 Halvorsen ym. 2011, 2012a ja 2012b.
- 2 Andersson, M.H., Andersson, S., Ahlsén, J., Andersson, B.L., Hammar, J., Persson, L.K.G., Pihl, J., Sigraý, P., Wikström, A. 2016. A framework for regulating underwater noise during pile driving. A technical Vindval report, ISBN 978-91-620-6775-5, Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm, Sweden.
- 3 National Marine Fisheries Service. 2016. Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing: Underwater Acoustic Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts. U.S. Dept. of Commer., NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-55, 178 p.
- 4 Smith, M.E., Coffin, A.B., Miller, D.L., Popper, A.N. 2006. Anatomical and functional recovery of the goldfish (*Carassius auratus*) ear following noise exposure. *Journal of Experimental Biology* 209:4193–4202
- 4 Amoser, S. & Ladich, F. 2003. Diversity in noise-induced temporary hearing loss in otophysine fishes. *The Journal of the Acoustical Society of America* 113(4):2170-2179.

LIITE 1 Laivaliikenteen melutasot

