

Bothnia Offshore Lambda North

Vedenalaista akustiikkaa koskeva täydentävä muistio

9.10.2025

Versio: 1

Laatija: Johan Portström

Toimeksiannon numero: 30069090

Toimeksianto: Bothnia Offshore Lambda

North

Asiakas: Statkraft

Projektipäällikkö: Lina Sultan

Tarkistaja: Leonard Kolman

Hyväksyjä: Leonard Kolman

Asiakirjan numero: 1

1 Johdanto

Sweco tutki Statkraftin toimeksiannosta Bothnia Offshore Lambda North -tuulipuiston paalutuksen aiheuttamaa vedenalaista melua vuonna 2024. Tämä muistio on täydennys kyseiseen raporttiin. Alkuperäiseen raporttiin ei ole tehty muita muutoksia kuin mitä tässä muistiossa todetaan.

Suurten monopile-paalujen aiheuttamaa paalausmelua Itämerellä tutkittiin aiemmassa raportissa, jossa esitettiin neljä eri skenaariota:

- Ilman toimenpiteitä
- Hydrosound-vaimentimella (HSD)
- Tuotteella nimeltä PULSE, jonka valmistaja IQIP lupasi 6 dB:n parannuksen
- Suurella kaksinkertaisella kuplaverholla (DBBC) Veden syvyys vaihtelee 40 ja 70 metrin välillä.

Statkraftilta on saatu kommentteja hyväksytyistä parannustoimenpiteistä. Pohjan on havaittu olevan kovempi kuin aiemmin luultiin, mikä tarkoittaa, että PULSE-tuotetta ei pitäisi käyttää.

PULSE on siksi poissuljettu eikä sitä tutkita.

Aiemmin käytetyn suuren kaksinkertaisen kuplaverhon aikaansaama parannus saattoi olla hieman optimistinen. Lähteen voimakkuuden määrittämismenetelmä tehtiin ottamalla paalutuksen spektri ja suuren kaksinkertaisen kuplaverhon lisäsvaimennuksen spektri saksalaisen Institut für technische und angewandte Physik (ITAP) tutkimushankkeen yhteydessä esitetystä spektristä, jossa tutkittiin useiden vuosien ajan offshore-paalutuksesta aiheutuvaa vedenalaista melua. Tiivistelmä tutkimuksen päätelmistä on raportissa *"Underwater noise during percussive pile driving: Influencing factors on pile-driving noise and technical possibilities to comply with noise mitigation values"*, jonka ovat laatineet Michael Bellmann, Adrian May, Torben Wendt, Stephan Gerlach, Patrick Remmers ja Jana Brinkmann (2020).

Lisäsvaimennuksen spektri vähennettiin äänilähteen spektristä, minkä tuloksena saatiin noin 24 dB:n parannus. Tätä menetelmää ovat käyttäneet useat muut konsultit vastaavissa tutkimuksissa, ja usein on oletettu, että veden syvyys on suurempi kuin tässä tapauksessa.

Osassa aiemmin mainittua Bellmannin ja muiden raporttia todetaan, että kaksinkertaisen kuplaverhon (DBBC) avulla odotettavissa olevat parannukset ovat usein pienempiä kuin mitä tämä menetelmä antaa ymmärtää. Parannuksen suuruuteen vaikuttavat useat tekijät, kuten veden syvyys, äänilähteen spektrisisältö, ilmamäärä kuplaverhon läpi ja muut paikalliset olosuhteet.

Siksi on syytä tehdä varovaisempi oletus pahimmasta mahdollisesta skenaariosta sen osalta, mitä parannuksia DBBC:llä voidaan saavuttaa.

Laskettuja suojaetäisyyksiä tarkistetaan sen vuoksi melulähdettä koskevalla uudella oletuksella, jotta äänitaso olisi pikemminkin yliarvioitu kuin aliarvioitu.

9.10.2025

Bellmann et al. esittävät taulukossa yhteenvedon saavutetuista parannuksista seuraavasti:

Versio 1

Toimeksiannon numero: 30069090
Toimeksianto: Bothnia Offshore Lambda
North

Kuva 1. Taulukko erityyppisten kuplaverhojen lisäsvaimennuksista (Bellman et al, 2020).

Broadband insertion loss	
Järjestelmän kokoonpano	ΔSEL [dB]
Single Big Bubble Curtain - BBC ($> 0,3 \text{ m}^3 / (\text{min} \cdot \text{m})$, water depth $< 25 \text{ m}$)	$11 \leq 14 \leq 15$
Double Big Bubble Curtain - DBBC ($> 0,3 \text{ m}^3 / (\text{min} \cdot \text{m})$, water depth $< 25 \text{ m}$)	$14 \leq 17 \leq 18$
Single Big Bubble Curtain - BBC ($> 0,3 \text{ m}^3 / (\text{min} \cdot \text{m})$, water depth $\sim 30 \text{ m}$)	$8 \leq 11 \leq 14$
Single Big Bubble Curtain - BBC ($> 0,3 \text{ m}^3 / (\text{min} \cdot \text{m})$, water depth $\sim 40 \text{ m}$)	$7 \leq 9 \leq 11$
Double Big Bubble Curtain - DBBC ($> 0,3 \text{ m}^3 / (\text{min} \cdot \text{m})$, water depth $\sim 40 \text{ m}$)	$8 \leq 11 \leq 13$
Double Big Bubble Curtain - DBBC ($> 0,4 \text{ m}^3 / (\text{min} \cdot \text{m})$, water depth $\sim 40 \text{ m}$)	$12 \leq 15 \leq 18$
Double Big Bubble Curtain - DBBC ($> 0,5 \text{ m}^3 / (\text{min} \cdot \text{m})$, water depth $> 40 \text{ m}$)	$\sim 15-16$

Noin 40 metrin syvyydessä vedessä, jossa ilmamäärä on yli $0,4 \frac{\text{m}^3}{\text{min} \cdot \text{m}}$, on saavutettu 12–18 dB:n parannus. Yli 40 metrin syvyydessä, jossa ilmamäärä on $0,5 \frac{\text{m}^3}{\text{min} \cdot \text{m}}$, on saavutettu noin 15–16 dB:n parannus.

Hyvin varovainen arvio olisi valita 12 dB:n lisäsvaimennus etäisyysarviointia varten.

On epätavallista, että kuplaverhoja käytetään yli 40 metrin syvyyksissä, mutta Bellmanin mukaan niitä on käytetty 70 metrin syvyydessä sekä Pohjanmerellä että Itämerellä, mutta parannusta ei ole mitattu eikä arvioitu (2020).

Sven Kischinskin ja Karin Ludemannin raportissa "*Development of Noise Mitigation Measures in Offshore Wind Farm Construction*" (Saksan luonnonsuojeluviraston raportti, 2013) mainitaan kuitenkin, että kaksinkertaisten kuplaverhojen parhaat tulokset saavutetaan, kun verhojen välinen etäisyys on vähintään kolme kertaa veden syvyys, joka niiden on oltava toimiakseen kahtena erillisenä kuplaverhona. Optimaalisella etäisyydellä mitattiin, että pitkän ajan keskiäänitaso parani 17 dB ja huipputaso 21 dB.

Kyseisissä syvyyksissä tämä tarkoittaa, että sisemmän ja ulomman kuplaverhon välinen etäisyys kyseisissä syvyyksissä voi olla noin 210 metriä.

2 Laskenta

Jotta saavutetaan varovainen arvio, 12 dB:n lisäysvaimennus, mutta säilytetään silti parannuksen spektrinen ulkoasu, tehdään samalla tavalla kuin edellisessä raportissa Lambda Northin osalta. Suuren kaksinkertaisen kuplaverhon lisäysvaimennuksen spektri vähennetään lähteen spektristä, mutta lisäysvaimennusta pienennetään niin, että kokonaisparannus on enintään 12 dB.

Näin saadaan spektri, jota voidaan käyttää myös taajuuspainotetun äänitason laskemiseen hylkeille, PCW. Painottamattoman äänilähteen ja PCW-painotetun äänitason välinen ero on 22 dB, kun käytetään tätä DBBC-oletusta.

Tuloksena saadut lähteen voimakkuudet on esitetty alla:

Taulukko 1. Oletetut lähteen voimakkuudet.

Lähteen voimakkuudet (oletettu äänitaso 1 metrin etäisyydellä)	Painottamaton dB	PCW-painotettu dB
Vaimentamaton tapaus 100 % iskunkestävyys	228	209
Hydro Sound Damperilla	219	194
Kaksinkertaisella kuplaverholla	216	194

2.1 Äänitaso 750 metrin etäisyydellä

Yksinkertaistettu leviämislaskelma tehdään äänitason arvioimiseksi 750 metrin päässä äänilähteestä. Vain geometrinen leviäminen arvioidaan.

Äänen geometrinen leviäminen valtamerissä riippuu pääasiassa syvyydestä. Jos äänilähde on kuin täysin vapaa pistemäinen lähde vedessä, ääni leviää pallomaisesti, kunnes se saavuttaa pinnan ja pohjan, ja leviää siten $20\log(r)$:llä. Tämän jälkeen se muuttuu vähitellen sylinterimäiseksi leviämiseksi ja leviää pitkille etäisyyksille $10\log(r)$:nä. Siirtymä on asteittainen ja riippuu todellisuudessa muun muassa äänilähteen koosta ja pohjan pehmeydestä. Yksinkertainen sekamalli¹ keskipitkillä etäisyyksillä on olettaa, että leviäminen on $15\log(r)$.

750 metrin etäisyydellä äänen oletetaan tällöin vähenevän $15\log(750) = 43$ dB.

Taulukko 2. Äänitasot 750 metrin etäisyydellä.

Äänitasot SPL_{rms} (oletettu äänitaso 750 metrin etäisyydellä)	Painottamaton dB	PCW-painotettu dB
Vaimentamaton tapaus 100 % iskunkestävyys	185	166
Hydro Sound Damperilla	176	151
DBBC:llä	173	138

¹ Alkuperälähde: H.W. Marsh & M. Schulkin, "Colossus II Shallow-Water Acoustic Propagation Studies," USL Report No. 550, 1. kesäkuuta 1962.

3 Tulos

9.10.2025

Tässä kappaleessa esitetään päivitetty lasketut vaikutusetäisyydet eri arvioituille ohjearvoille sekä äänitasot Natura 2000 -alueilla.

Versio 1

Alkuperäisessä raportissa kaikki alle yhden (1) kilometrin vaikutusetäisyydet on esitetty muodossa "<1 km", ja näin on tehty myös tässä raportissa.

Toimeksiannon numero: 30069090
Toimeksianto: Bothnia Offshore Lambda
North

Taulukoiden luvut esitetään dBsea-arvona / 15log-arvona, jossa

- dBsea = aiemmin laskettu tulos
- 15log = uusi laskenta oletetulla etäisyysvaimennuksella 15log(etäisyys)

Melun kumulatiivisen vaikutuksen osalta se on laskettu etäisyyden mukaan edellisessä raportissa kuvatus menetelmän mukaisesti.

3.1 Arvioidut vaikutusetäisyydet - Silakka ja kilohaili

Taulukko 3. Lambda North, silakan ja kilohailin arvioidut suojaetäisyydet.

Ohjearvo	Vaikutuksen tyyppi	Pisin etäisyys (kilometreinä), jolla ohjearvo ylittyy (km) dBsea / 15*log		
		Vaimentamaton	HSD	DBBC
SEL _{cum} 186	TTS: Kuulon tilapäinen heikkeneminen	61,4 / 92,6	20,8 / 30,9	- / 18,6
SEL _{cum} 203	PTS: Pysyvä tai palautuva vaurio	7,4 / 6,0	1,8 / 1,1	- / <1
L _{peak} 206	TTS: Kuulon tilapäinen heikkeneminen	1,2 / <1	<1 / <1	- / <1
L _{peak} 207	PTS: Pysyvä tai palautuva vaurio	<1 / <1	<1 / <1	- / <1

3.2 Arvioidut vaikutusetäisyydet – Hylkeet

Taulukko 4. Lambda North, hylkeen arvioidut suojaetäisyydet.

Ohjearvo	Vaikutuksen tyyppi	Pisin etäisyys (kilometreinä), jolla ohjearvo ylittyy (km) dBsea / 15log		
		Vaimentamaton	HSD	DBBC
SEL _{cum,PCW} 170	TTS: Kuulon tilapäinen heikkeneminen	34,6 / 63,1	2,2 / 4,5	- / 4,5
L _{peak} 212	TTS: Kuulon tilapäinen heikkeneminen	1,1 / <1	<1 / <1	- / <1
SEL _{cum,PCW} 185	PTS: Pysyvä tai palautuva vaurio	3,0 / 3,3	<1 / <1	- / <1
L _{peak} 218	PTS: Pysyvä tai palautuva vaurio	<1 / <1	<1 / <1	- / <1

3.3 Äänitasot Natura 2000 -alueilla

9.10.2025

3.3.1 Agön-Kråkön

Versio 1

Lähin Natura 2000 -alue, jolla hylkeet ovat tärkeäksi nimetty laji, on Agön-Kråkön. Natura 2000 -alue sijaitsee noin 33 kilometriä Lambda Northista länteen. Hylkeet arvioidaan PCW-painotettujen arvojen mukaan.

Toimeksiannon numero: 30069090
Toimeksianto: Bothnia Offshore Lambda
North

Kuva 2. Lambda Northin länsipuolella sijaitseva Natura 2000 -alue Agön-Kråkön.



Taulukko 5. Paalutuksen aiheuttamat arvioidut äänitasot Agön-Kråkönissä.

	Vaimentamaton	HSD:llä	DBBC:llä
SPL	151	143	119
SPL _{PCW}	126	115	97
L _{peak}	174	166	162
SEL _{CUM}	189*	181	177
SEL _{CUM,PCW}	164	153	155

*Uimarakollista kalaa koskeva TTS-ohjearvo ylittyy.

Hylkeille haittaa aiheuttavien äänitasojen ei odoteta ylittävän. Uimarakollisen kalan TTS-ohjearvo 186 dB voi kuitenkin ylittyä, jos äänilähdettä ei vaimenneta.

3.3.2 Finngrundet

9.10.2025

Noin 62 kilometriä Lambda Northista etelään sijaitsee Natura 2000 -alue Finngrundet. Aluetta ei ole nimetty hylkeiden tai kalojen suojelua varten, mutta sitä kuvataan potentiaalisesti merkitykselliseksi sekä kalojen elämän että hylkeenpyynnin kannalta. Alueella saattaa olla silakkaa ja harmaahylkeitä.

Versio 1

Toimeksiannon numero: 30069090
Toimeksianto: Bothnia Offshore Lambda
North

Kuva 3. Lambda Northin eteläpuolella sijaitseva Natura 2000 -alue Finngrundet.



Taulukko 6. Paalutuksen aiheuttamat arvioidut äänitasot Finngrundetissa.

	Vaimentamaton	HSD:llä	DBBC:llä
SPL	149	141	137
SPL _{PCW}	124	113	115
L _{peak}	172	164	160
SEL _{CUM}	187*	179	175
SEL _{CUM,PCW}	162	151	153

*Uimarakollista kalaa koskeva TTS-ohjearvo ylittyy.

Hylkeille haittaa aiheuttavien äänitasojen ei odoteta ylittyvän. Uimarakollisen kalan TTS-ohjearvo 186 dB voi kuitenkin ylittyä, jos äänilähdettä ei vaimenneta.

3.3.3 Gran

9.10.2025

Lambda Northin luoteispuolella sijaitseva Granin alue on nimetty hylkeille tärkeäksi alueeksi.

Versio 1

Toimeksiannon numero: 30069090

Toimeksianto: Bothnia Offshore Lambda
North

Kuva 4. Granin Natura 2000 -alue – noin 44 kilometriä Lambda Northista.



Taulukko 7. Paalutuksen aiheuttamat arvioidut äänitasot Granissa.

	Vaimentamaton	HSD:llä	DBBC:llä
SEL _{SS}	153	144	141
SEL _{PCW,SS}	128	116	119
L _{peak}	176	167	164
SEL _{CUM}	191*	182	179
SEL _{CUM,PCW}	166	154	157

*Uimarakollista kalaa koskeva TTS-ohjearvo SEL_{cum} 186 dB ylittyy.

Hylkeille haittaa aiheuttavien äänitasojen ei odoteta ylittyvän. Uimarakollisen kalan TTS-ohjearvo 186 dB voi kuitenkin ylittyä, jos äänilähdettä ei vaimenneta.