

Bothnia Offshore Sigma

Vedenalaista akustiikkaa koskeva täydentävä muistio

Versio 1

Laatija: Johan Portström

Toimeksiannon numero: 30069090

Toimeksianto: Bothnia Offshore

Sigma

Asiakas: Statkraft

Projektipäällikkö: Lina Sultan

Tarkistaja: Leonard Kolman

Hyväksynyt: Leonard Kolman

Asiakirjan numero: 1

1 Johdanto

Sweco tutki Statkraftin toimeksiannosta Bothnia Offshore Sigma -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 määrittämenetelmä tehtiin ottamalla paalutuksen spektri ja suuren kaksinkertaisen kuplaverhon lisäysvaimennuksen 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"* av Michael Bellmann, Adrian May, Torben Wendt, Stephan Gerlach, Patrick Remmers och Jana Brinkmann (2020).

Lisäysvaimennuksen 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 tapauksesta sen osalta, mitä parannuksia DBBC:llä voidaan saavuttaa.

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

Bellmann et al. esittävät taulukossa yhteenvedon saavutetuista parannuksista seuraavasti:

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

Broadband insertion loss	
Järjestelmän kokoonpano	ASEL [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 lisäysvaimennus 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 Sigman 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. Painottomattoman 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)	Painottama ton 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	151

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

3 Tulos

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

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

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 kuvatun menetelmän mukaisesti.

3.1 Arvioidut vaikutusetäisyydet - Silakka ja kilohaili

Taulukko 3. Sigman pohjoisosa, silakan ja kilohailin arvioidut suojaetäisyydet.

Ohjearvo	Vaikutuksen tyyppi	Pisin etäisyys (kilometreinä), jolla ohjearvo ylittyy (km) dBsea / 15log		
		Vaimentamat on	HSD	DBBC
SEL _{cum} 186	TTS: Kuulon tilapäinen heikkeneminen	90,4 / 92,6	25,5 / 30,9	- / 18,6
SEL _{cum} 203	PTS: Pysyvä tai palautuva vaurio	4,9 / 6,0	<1 / <1	<1 / <1
L _{peak} 206	TTS: Kuulon tilapäinen heikkeneminen	1,2 / <1	<1 / <1	<1 / <1
L _{peak} 207	PTS: Pysyvä tai palautuva vaurio	<1 / <1	<1 / <1	<1 / <1

Taulukko 4. Sigman eteläosa, silakan ja kilohailin arvioidut suojaetäisyydet.

Ohjearvo	Vaikutuksen tyyppi	Pisin etäisyys (kilometreinä), jolla ohjearvo ylittyy (km) dBsea / 15log		
		Vaimentamaton	HSD	DBBC
SEL _{cum} 186	TTS: Kuulon tilapäinen heikkeneminen	103,2 / 92,6	25,7 / 30,9	- / 18,6
SEL _{cum} 203	PTS: Pysyvä tai palautuva vaurio	3,0 / 6,0	<1 / <1	- / <1
L _{peak} 206	TTS: Kuulon tilapäinen heikkeneminen	1,1 / <1	<1 / <1	- / <1
L _{peak} 207	PTS: Pysyvä tai palautuva vaurio	<1 / <1	<1 / <1	- / <1

3.2 Arvioidut vaikutusetäisyydet – Hylkeet

Taulukko 5. Sigman pohjoisosa, hylkeen arvioidut suojaetäisyydet.

Versio 1

Toimeksiannon numero: 30069090

Toimeksianto: Bothnia Offshore

Sigma

Ohjearvo	Vaikutuksen tyyppi	Pisin etäisyys (kilometreinä), jolla ohjearvo ylittyy (km) dBsea / 15log		
		Vaimentamaton	HSD	DBBC
SEL _{cum,PCW} 170	TTS: Kuulon tilapäinen heikkeneminen	43,9 / 67,9	3,0 / 4,5	- / 4,5
L _{peak} 212	TTS: Kuulon tilapäinen heikkeneminen	<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

Taulukko 6. Sigman eteläosa, 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	51,0 / 67,9	2,8 / 4,5	- / 4,5
L _{peak} 212	TTS: Kuulon tilapäinen heikkeneminen	<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 Sigmasta

Versio 1

3.3.1 Vänta Litets grund

Lähin Natura 2000 -alue, jolla on nimettyjä kaloja, on Vänta Litets grund, joka sijaitsee noin 50 kilometrin päässä Sigman pohjoisosasta. Kalat arvioidaan painottamattomien äänitasojen mukaan.

Toimeksiannon numero: 30069090

Toimeksianto: Bothnia Offshore
Sigma

Kuva 2. Vänta Litets grundin Natura 2000 -alue – noin 50 kilometriä Sigman pohjoisosasta. Noin 100 kilometriä Sigman eteläosasta



Taulukko 7. Paalutuksen aiheuttamat arvioidut äänitasot Vänta Litets grundissa.

	Vaimentamaton	HSD:llä	DBBC:llä
SPL	159	151	147
SPL _{PCW}	136	123	125
L _{peak}	182	174	170
SEL _{CUM}	197*	189*	185
SEL _{CUM,PCW}	174**	161	163

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

**Hyljettä koskeva TTS-ohjearvo SEL_{CUM,PCW} 170 dB ylittyy

On olemassa vaara, että TTS-ohjearvo ylittyy tutkitussa paalutusmenetelmässä, ellei käytetä kaksinkertaista kuplaverhoa tai muuta paalutusmenetelmää, kuten jacket-perustusta.

3.3.2 Agön-Kråkön

Lähin Natura 2000 -alue, jolla on nimettyjä harmaahylkeitä, on Agön-Kråkön, joka sijaitsee noin 90 kilometrin päässä Sigman pohjoisosasta. Harmaahylkeet arvioidaan PCW-painotettujen äänitasojen mukaan.

Versio 1

Toimeksiannon numero: 30069090

Toimeksianto: Bothnia Offshore

Sigma

Kuva. 3 Agön-Kråkönin Natura 2000 -alue – noin 94 kilometriä Sigman eteläosasta.



Taulukko 8. Paalutuksen aiheuttamat arvioidut äänitasot Agön-Kråkönissä.

	Vaimentamaton	HSD:llä	DBBC:llä
SEL _{ss}	147	136	135
SPL _{PCW,ss}	123	111	113
L _{peak}	170	159	158
SEL _{CUM}	185	174	173
SEL _{CUM,PCW}	161	149	151

Äänitasojen ei ennusteta ylittävän nykyisiä ohjearvoja.

3.3.3 Finngrundet

Sigman eteläpuolella sijaitsee myös Finngrundetin Natura 2000 -alue, jonka on kuvattu olevan mahdollisesti tärkeä sekä kalojen että hylkeenpyynnin kannalta.

Versio 1

Toimeksiannon numero: 30069090

Toimeksianto: Bothnia Offshore

Sigma

Kuva 4. Finngrundetin Natura 2000 -alue – noin 82 kilometriä Sigman eteläosasta.



Taulukko 9 Paalutuksen aiheuttamat arvioidut äänitasot Finngrundetissa.

	Vaimentamaton	HSD:llä	DBBC:llä
SEL _{SS}	148	137	136
SEL _{PCW,SS}	124	112	114
L _{peak}	171	160	159
SEL _{CUM}	186	175	174
SEL _{CUM,PCW}	162	150	152

Hylkeille haittaa aiheuttavien äänitasojen ei odoteta ylittyvän.

Vaimentamattomassa tapauksessa kalojen TTS-ohjearvon, SEL_{cum} 186 dB, oletetaan lähestyvän mutta ei ylittyvän.

3.3.4 Gran

15.10.2025

Sigman länsipuolella sijaitseva Granin alue on osoitettu hylkeille.

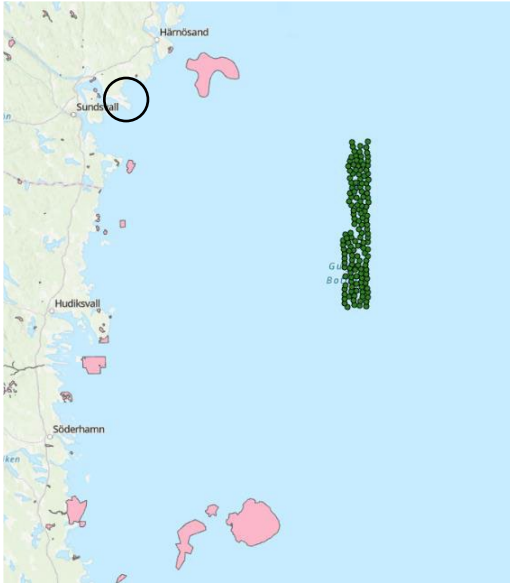
Versio 1

Kuva 5. Granin Natura 2000 -alue – noin 90 kilometriä Sigmasta

Toimeksiannon numero: 30069090

Toimeksianto: Bothnia Offshore

Sigma



Taulukko 10 Paalutuksen aiheuttamat arvioidut äänitasot Granissa.

	Vaimentamaton	HSD:llä	DBBC:llä
SEL _{SS}	151	141	139
SPL _{PCW,SS}	127	115	115
L _{peak}	174	164	162
SEL _{CUM}	189*	179	177
SEL _{CUM,PCW}	165	155	153

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

Hylkeille haittaa aiheuttavien äänitasojen ei odoteta ylittyvän. Uimarakollisen kalan TTS-ohjearvon arvioidaan ylittyvän, jos äänilähdettä ei vaimenneta.