



Saare-Liivi tuulepargi veealuse müra mõju hindamine

TELLIJA: Roheplaan OÜ

Riin Kutsar, Juhatuse liige

TÄITJA: TTÜ Konstruktsiooni- ja vedelikumehaanika UR

Aleksander Klauson, professor

Mirko Mustonen, teadur

ESITATUD: 4. oktoober 2024. a.

TÄIENDATUD: 18. oktoober 2024. a.

Tallinn 2024

Lühendid ja tähised

dB re 1μPa	detsibell - kümnendlogaritmiline helirõhu mõõtühik vees (kontrollväärtus 1 μPa)
dB re 20μPa	detsibell - kümnendlogaritmiline helirõhu mõõtühik õhus (kontrollväärtus 20 μPa)
PCW	Kuulmisgrupp hülged vees (phocid carnivores in water)
PTS	Permanent Treshold Shift – püsiv kuuldeläve tõus
SL	Source Level - allikatase
SEL	Sound Exposure Level – heli kokkupuudetase
SPL	Sound Pressure Level – helirõhutase
TG NOISE	Technical Group on Underwater Noise - EL veealuse müra tehniline rühm
TTS	Temporary Treshold Shift – ajutine kuuldeläve tõus
ddek, detsidekaad	Sagedusriba, mis on ligikaudu võrdne 1/3 oktaaviga või ühe tertsribaga

SISUKORD

1.	SISSEJUHATUS.....	3
1.1	Helisid kirjeldavad suurused	3
1.2	Lähteülesanne	5
1.3	Tuulepargi ja tuulegeneraatorite andmed	7
2.	HELITUNDLIK ELUSTIK	8
2.1	Hülged	8
2.2	Räim	11
2.3	Elupaigad ja hindamisala.....	15
2.4	Keskkonnamõju hindamise skaala	16
3.	HELIALLIKAD	17
3.1	0 – alternatiiv. Hinnatav mereala.	17
3.2	Meretuulepargi ehitusperioodi heliallikad.....	20
3.3	Meretuulepargi kasutusperioodi heliallikad	26
4.	MODELLEERIMISE TULEMUSED.....	28
4.1	Ehitusperioodi helitasemete modelleerimine	28
4.2	Kasutusperioodi helitasemete modelleerimine.....	36
4.3	Leevendusmeetmed	38
5.	KOKKUVÕTE JA JÄRELDUSED	39
6.	KIRJANDUS.....	43

1. SISSEJUHATUS

1.1 Helisid kirjeldavad suurused

Helide füüsikalisel kirjeldamisel on enamasti keskseks mõisteks **helirõhk** ehk heli panus kogurõhku. Hetkelise helirõhu asemel kasutatakse tihti ajas keskmistatud väärtust ehk **helirõhu ruutude keskmist**, mis on defineeritud kui ajaintegraal:

$$\overline{p^2} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt$$

Seejuures on helide intensiivsuse põhinäitajaks helirõhu ruutude keskmise tase ehk **helirõhutase** (Sound Pressure Level, SPL), mida defineeritakse järgnevalt

$$L_p = 10 \log_{10}(\overline{p^2} / p_0^2) \text{ dB.}$$

Helirõhu taseme arvutamisel veekeskkonnas on viimases valemis kasutusel õhukeskkonnas arvutamisest erinev rõhu kontrollväärtus $p_0 = 1 \text{ } \mu\text{Pa}$. Vaikimisi on kõik helirõhu tasemed antud uuringus arvutatud kontrollväärtusega $1 \text{ } \mu\text{Pa}$.

Helirõhu ruutude ajaintegraali

$$E_{p,T} = \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt$$

nimetatakse heli kokkupuuteks, kus t_1 ja t_2 on vastavalt sündmuse alguse ja lõpu ajad.

Heli kokkupuutetase (Sound Exposure Level, SEL) on kümme korda kümnendlogaritm helirõhu ruutude ajaintegraali $E_{p,T}$ suhtest määratud kontrollväärtusesse $E_{p,0} = 1 \text{ } \mu\text{Pa}^2$ detsibellides.

Tippudevaheline helirõhk p_{pk-pk} on määratud ajavahemikus ja määratud sagedusvahemikus erinevalt ruutude keskmisest ekstremaalsete tippsurverõhu ja tipphõrendusrõhu summa ja iseloomustab seega ajaperioodi suurimat helirõhu väärtust.

Allikatase (Source Level, SL) iseloomustab heliallika võimsust ning seda arvutatakse valemiga

$$L_s = 10 \log_{10}(F_s / F_{s,0}) \text{ dB, kus } F_{s,0} = 1 \text{ } \mu\text{Pa}^2 \text{ m}^2$$

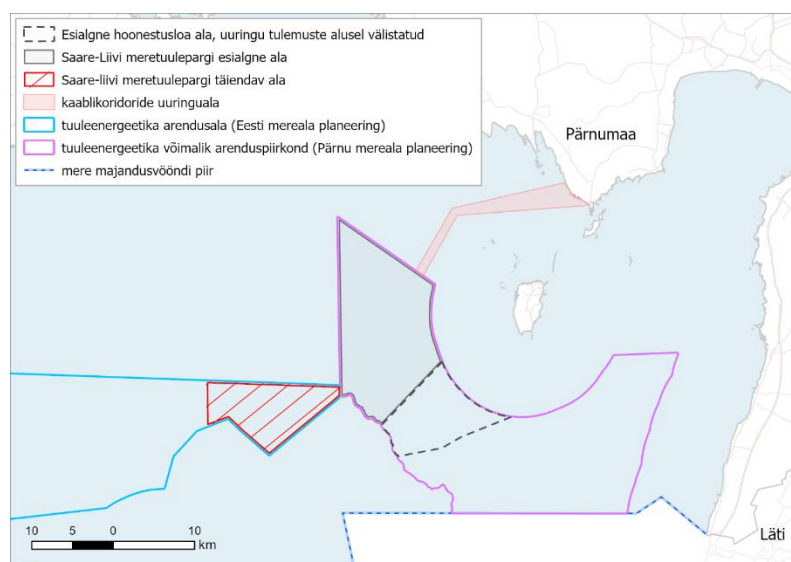
Selles valemis F_s on allikategur, mida arvutatakse kui

$$F_s = r^2 \overline{p^2}(r)$$

Loomad ei ole võimelised kuulma kõikide sagedustega helisid sama hästi ning nende erinevuste arvestamiseks kasutatakse *kuuldekaalufunktsioone*. Inimese kuulmise eripära võtavad arvesse kaalufunktsioonid A ja C . Mereimetajate kuulmisele vastavaid kaalufunktsioone tähistatakse tähega M . Kaalufunktsioon lubab arvestada just selle akustilise energia spektri osaga, mida mereloomad kuulavad kõigi paremini ning analüüsist välja jätta neid sagedusi, mida nad kuulavad halvemini.
(ISO 18405:2020, Allveeakustika. Terminoloogia).

1.2 Lähteülesanne

Utilitas Wind OÜ kavandab Liivi lahte meretuuleparki. Antud aruandes käsitletakse Saare-Liivi meretuulepargi esialgset ala (joonis 1). Hindamisel tuleb arvesse võtta, et Saare-Liivi meretuulepargi esialgse koormatava ala osale kavandatakse kuni 80 elektrituuliku püstitamist [Roheplaan 2022].



Joonis 1.1. Saare-Liivi tuuleparkide alad.

Tuulepargi mereala ehitustööde ja kasutuse faasis kiirgub vette akustiline energia, mis tõstab veealuse ümbrusmüra taset ning mille mõju elustikule (mereimetajatele ja kaladele) tuleb hinnata. Hindamiseks tuleb modelleerida veealuse müra levi tuulepargi ümbritseval alal. **Uuringute tulemusena antakse eksperthinnang veealuse müra mõju kohta mereala elustikule, modelleerimise tulemuste, õigusaktide, erialase kirjanduse ja ekspertteadmise põhjal.**

Kasutatav metoodika:

- Määratakse heliallikate akustilised karakteristikud, kasutades selleks peamiselt kirjanduses või avalikes andmebaasides olevaid samade või analoogsete heliallikate andmeid;
- Määratakse hinnatava mereala helitundliku elustiku asurkondade paiknemist ning elustikule olulised ajaperioodid;
- Modelleeritakse veealuse müra levi geoloogiliste uuringute ajal ning hinnatakse veealuse müra mõju elustikule;
- Modelleeritakse veealuse müra levi tuulikute vundamentide ehituse ajal, sh ka vaiade rammimisel kui võimalikul vundamendi alternatiivil, ning hinnatakse veealuse müra mõju

elustikule. Modelleeritakse ka teised võimalikud vundamendi ehitamise stsenaariumid: vaiade paigaldamine puurimise meetodil ning gravitatsioonivundamentide paigaldamine.

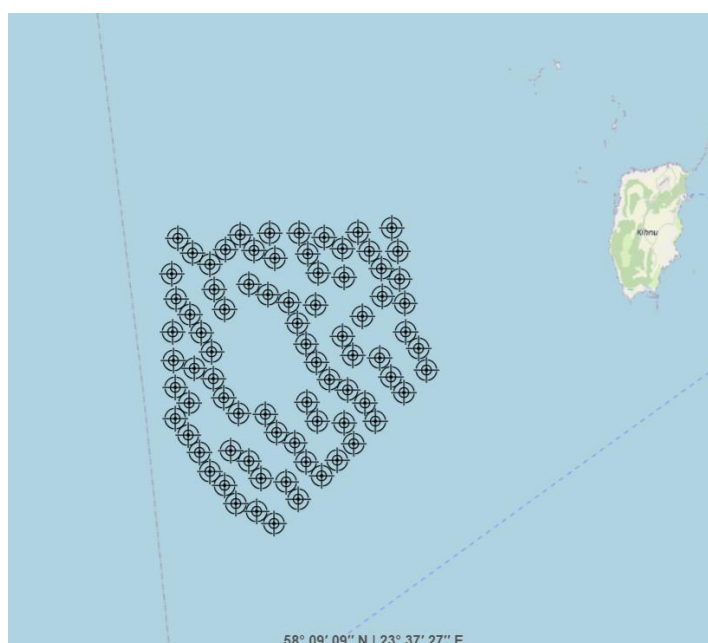
- Modelleeritakse veealuse müra levi tuulepargi kasutusperioodil ning hinnatakse veealuse müra mõju elustikule;
- Pakutakse leevendusmeetmed müra kahjuliku mõju vähendamiseks.

1.3 Tuulepargi ja tuulegeneraatorite andmed

Saare-Liivi tuulepargi lähteülesandes [Roheplaan, 2022] on ettenähtud tuulepargi 2 alternatiivset varianti, vastavalt 15 MW ja 20 MW võimsustega tuulikutega. Mõlema variandi tuulikute paigaldus on sama (Joon. 1.2). Kahe variandi andmed on toodud tabelis 1.1.

On modelleeritud tuuliku kahte vundamendi tüüpi:

- gravitatsioonivundament,
- vaivundament, vaia läbimõõdu ja paksuse suhe on $D/t = 216$ või 180



Joonis 1.2. Tuulikute eeldatav paigutus

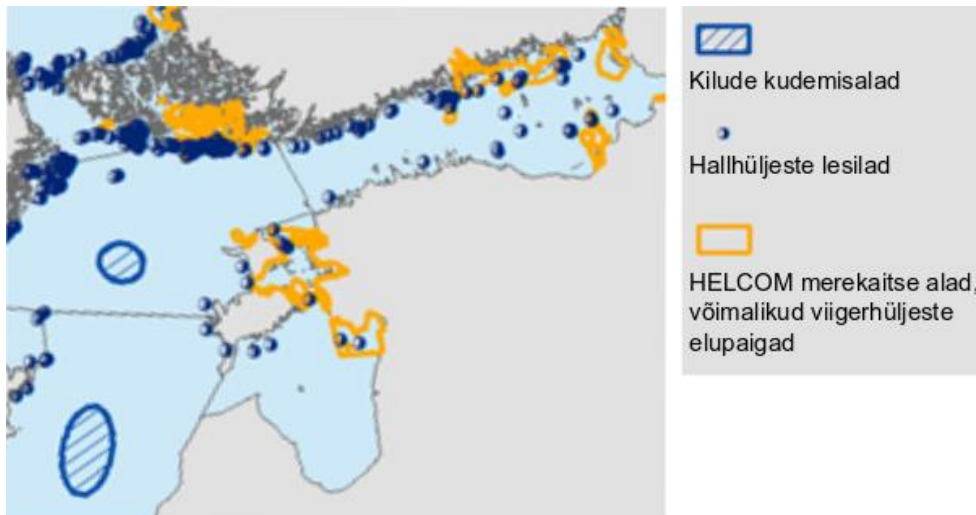
Tabel 1.1. Kavandatavate tuuleparkide alternatiivsed lahendused

Parameeter/näitaja	Alternatiiv 1	Alternatiiv 2
Tuulikute võimsus	15 MW	20 MW
Tuulikute arv	80 tk	80 tk
Tuulikumasti kõrgus veepinnast	Kuni 157 m	Kuni 170 m
Rootori diameeter	236 m	280 m
Tipukõrgus	Kuni 275 m	Kuni 310 m
Mere sügavus	Kuni 30 m	Kuni 30 m
Gravitatsioonivundamendi taldmiku läbimõõt, m	kuni 50 m	kuni 50 m
Vaivundamendi vaia läbimõõt/ paksus	12 m/ 83 mm	18 m /100 mm
Tuulikute omavaheline kaugus	Vähemalt 1 km	Vähemalt 1 km
Tuulikute kaugus rannikust	Vähemalt 10 km	Vähemalt 10 km

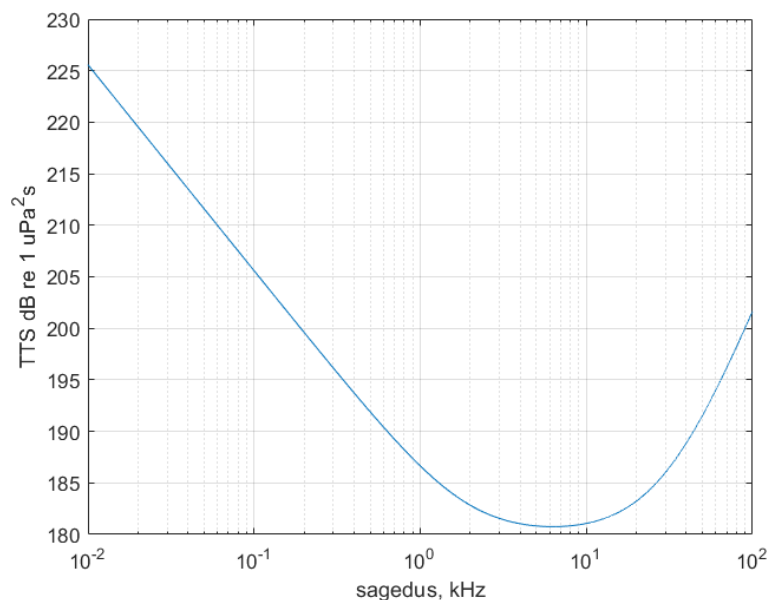
2. HELITUNDLIK ELUSTIK

2.1 Hülged

Läänemeres elavad hülged on helitundlikud loomad, kes kasutavad häälelist suhtlust nii õhus kui vees (Joon. 2.1). Kuulmine õhus ja vees on loomadele oluline rööv- ja saakloomade hääle kuulmiseks ning orientatsiooniks [Sauthall et al, 2000]. Kuna nende elukeskkonnas esineb rohkesti looduslikke helisid, siis loomadel on tähtis terav kuulmine segava müra taustal. Hülged on amfiibsed loomad ning nende kõrvad on väga tundlikud nii õhus kui ka vees (kuigi vees on kuulmistundlikus laiema sagedusribaga kui õhus). On täheldatud, et hülged kasutavad oma teravat kuulmist nii kiskjate vältimiseks (Läänemeres neil kiskjad praktiliselt puuduvad) kui ka saagi leidmiseks piiratud nähtavuse tingimustes. Tänapäeval liigitatakse mereloomi kuulmisrühmadeks [Southall 2019], nii et hülged kuuluvad kuulmisrühma PCW (phocid carnivores in water). Ajutise kuulmislähve tõusu (TTS) määratakse kokkupuute funktsiooniga, mille graafik on esitatud Joonisel 2.2.



Joonis 2.1 Mõnede helitundlike liikide elupaigad ja kriitilise tähtsusega alad [HELCOM 2016]



Joonis 2.2 Kuulmisrühma PCW (hülged) kokkupuute funktsioon [Southall et al., 2019]. Graafikust on näha, et ajutine kuulmisläve tõus 2 kHz juures esineb 183 dB helirõhutase korral ning 4 kHz juures esineb 181 dB korral.

Lisaks tuleb arvestada sellega, et inimtekkeline müra võib esile kutsuda hüljeste käitumuslike reaktsioone, mille tagajärjel kannatab nende energeetiline tasakaal (on häiritud toitumine). Uuringu [Götz 2010] kohaselt labori tingimustes reageerisid hallhülged signaalidele, mille helitasemed olid 135 dB re 1 μ Pa või kõrgemad. Ühes varasemas uuringus [Kastelein 2006] oli randali reageerimistasemeks määratud 107 dB re 1 μ Pa. Uuringute vähesuse tõttu ning lähtudes ettevaatuspõhimõttest loeme reageerimistasemeks 110 dB tertsi ribas 500 Hz.

Inimtekkelise mõju hindamisel tuleb arvestada ka hüljeste oluliste ajaperioodidega, kus toimub paaritumine ja poegimine (Tabel 2.1). Paaritumise perioodil hülged palju häälitsevad ning intensiivne inimtekkeline müra võib häirida loomade suhtlust maskeerides olulisi signaale. Loeme, et kõrge maskeerimise risk esineb siis, kui tertsriba 500 Hz juures inimtekkeline heli ületab loodusliku fooni 20 dB võrra ning mõõdukas risk 16 dB korral.

Tabel 2.1 Hüljestele olulised ajaperioodid.

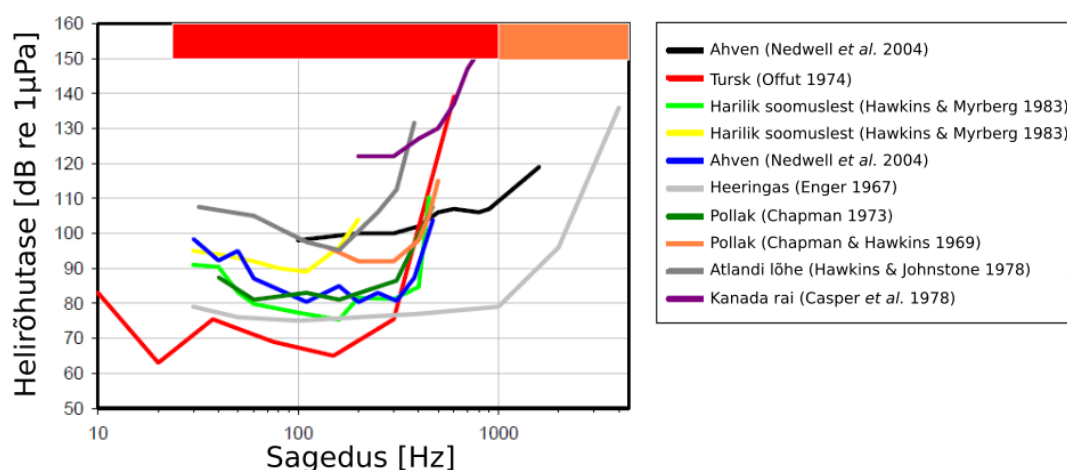
Liik	Poegimise periood	Paaritumise periood	Põetamise periood	Karvaajamise periood
Viigerhüljes (<i>Phoca hispida botnica</i>)	Veebruar-märts	Arvatakse esinevat kohe pärast poegade võõrutamist	4-6 nädalat	Aprilli keskpaik –mai algus
Hallhüljes (<i>Halichoerus grypus</i>)	Veebruar-märts	Märts -aprill	2 nädalat	Juuni

2.2 Räim

Kaladel on helide tajumiseks kaks sensoorset süsteemi. Lisaks kõrvale on kaladel ka küljejooneelund, mille abil on nad võimelised tajuma veeosakeste liikumist. Seeläbi saavad kalad küljejoone kaudu informatsiooni teiste kalade liikumisest ja paiknemisest vees.

- Kuulmisgeneralistideks liigitatakse kalad, kellel ujupõis kas puudub või ei ole ühendatud sisekõrvaga. Kuulmisgeneralistid tajuvad paremini helirõhu muutusi. Kuulmisgeneralistide hulka kuuluvad haug, ahven, angerjas, lest, lõhe ja forell.
- Kuulmisspetsialistideks liigitatakse kalad, kelle on ujupõis, mis on ühenduses sisekõrvaga ja teeb nende kuulmise “teravamaks”. Seejuures teeb kuulmisspetsialistide helide taju teravamaks kombineeritud helirõhu ja veeosakeste liikumise tajumine.

Käesolevas töös uuritud kalaliigiks on räim, mis kuulub kuulmisspetsialistide hulka. Kuulmisspetsialistide paremat helitaju kinnitab ka joonisel 2.3 näidatud kalaliikide audiogrammid. Audiogramm on graafik, mis näitab sagedusest sõltuvat helitundlikkust ehk minimaalset helirõhutaset, mida ollakse võimelised tajuma. Seetõttu, mida madalam on audiogrammi kõver mingil sagedusel, seda suurem on selle sageduse helitundlikkus. Jooniselt on näha, et heeringa audiogramm on antud kaladest üks madalamaid, mis tähendab teiste joonisel näidatud liikidega võrreldes suuremat helitundlikkust, eriti madalatel sagedustel.



Joonis 2.3 Mõnede kalade audiogrammid [Thomsen 2009]. Esitatud tulemused on saadud paljude erinevate teadlaste pikaajalise (1967-2004) töö tulemusena.

On teada, et pikaajalise müra tõttu tekib kaladel stress, mille märgiks on kortisooli ehk stressihormooni kõrgendatud tase veres [Sierra-Flores 2015]. Lisaks on näidatud, et

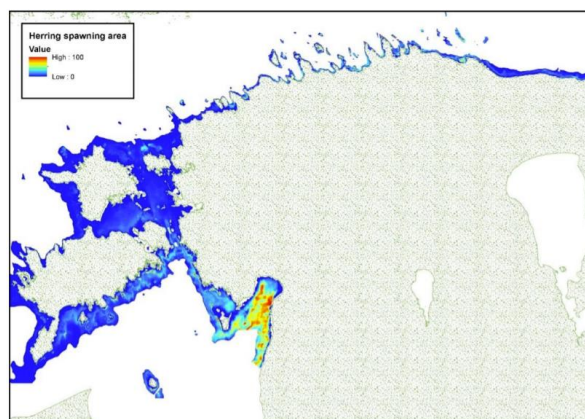
laiaribalise müra toimet tõuseb tursal kortisooli tase ning langeb kalamarja viljastamise edukuse määr.

Müra võib segada kalade häälelist kommunikatsiooni, mis omab nende elutegevuses tähtsat rolli. Eriti tähtis on kommunikatsioon paaritumise ja paljunemise perioodil. Näiteks meelitab isane tursk emast kala teatud tüüpi madalsageduslike hääletsuste (100 Hz) abil [Wysocki 2005]. Paljud kalad otsivad oma saaki kuulmise abil. Kuulmine hoiab kalasid ka ise kiskjate saagiks saamise eest. Mõlemaid funktsioone häirib kõrgeenenud ümbritsev helide foon[Slabbekoorn 2010].

Üks viis inimtekkelise müra mõju kaladele liigitamiseks on järgmine: müra võib omada mõju

- kalade kudemisele,
- kalakoondiste paiknemisele,
- pikaajalisele kala tervisele ning arengule,
- saaklooma-kiskja vahekorrale,
- kalade kommunikatsioonile (maskeerimine).

Kaladele kahjulike helirõhutasemetena on välja pakutud erinevaid väärtusi ja ühtne metoodika nende määramiseks praeguseni puudub. Käesolevas uuringus toetume tööle [Blaxter and Hoss, 1981], milles 8 – 11 cm pikka heeringa reageerimistase signaalile sagedusel 79 Hz oli 122 dB re 1 μ Pa. Räime kudemisalad Eesti vettes on näidatud Joonisel 2.4. **Kudemine toimub kahel perioodil mai – juuni ja august – september.**



Joonis 2.4 Räime kudemisalad [Aps et al., 2019]

Vastavalt uuringu [Kastelein 2008] tulemustele heeringas reageeris signaalidele sagedusvahemikus 0,07–0,2 kHz helitasemetel 122–138 dB re 1 μ Pa. Samas vastavalt [Olsen, 1971] heeringas reageeris helile 100 Hz siis kui see ületas loodusliku fooni 20-25 dB võrra. Loeme heeringa reageerimistasemeks 122 dB re 1 μ Pa tertsribas 125 Hz.

Inimtekkelise heli piirväärtused on toodud tabelis 2.2. Tabelist on näha, et hüljeste reageerimistase 110 dB on ligikaudselt võrdne kõrge maskeerimise riski tasemega 20 dB üle loodusliku ümbrusmüra väärtuse 87 dB (tabel 3.1), mis annab kokku 87+20=107 dB. Seega edasidi loeme hüljeste pidevmüra piirväärtuseks 110 dB re 1 μ Pa.

Oluline eluperiood hüljestel on veebruarist aprillini.

Olulised eluperioodid räimel maist juunini ning augustist septembrini.

Tabel 2.2 Inimtekkelise heli piirväärtused helitundlikule elustikule – pidev madalsageduslik müra

Mereliik	Tertsriba	Reageerimistase	Mõõdukas maskeerimise risk	Kõrge maskeerimise risk	Viited
	Hz	dB re 1μPa			
		helitase	ületamise tase		
Hülged	500	110	12	20	[Kastelein et al. 2006]
Räim	125	122	ei kohaldata	20 (reageerimistase)	[Olsen, 1971] [Blaxter and Hoss, 1981] [Kastelein et al. 2008]

Tabel 2.3 Inimtekkelise heli piirväärtused helitundlikule elustikule – impulssmüra

Mereliik	Reageerimistase, SEL, dB re 1 μ Pa ² s (M)	Reageerimistase tippväärtus, SPL, dB re 1 μ Pa	Ajutine kuuldeläve tõus (TTS) SELcum, dB re 1 μ Pa ² s	Alaline kuuldeläve tõus (PTS)
Hülged	171 [Southall 2008]	212 [Southall 2008]	170 dB SEL PCW kaalutud [Southall 2019] või 165 dB SEL 500 Hz tertsribas	185 dB SEL PCW kaalutud [Southall 2019] või 180 dB SEL 500 Hz tertsribas
Räim	ei kohaldata	ei kohaldata	186 [Popper 2014] või 183 dB SEL 125 Hz tertsribas	ei kohaldata

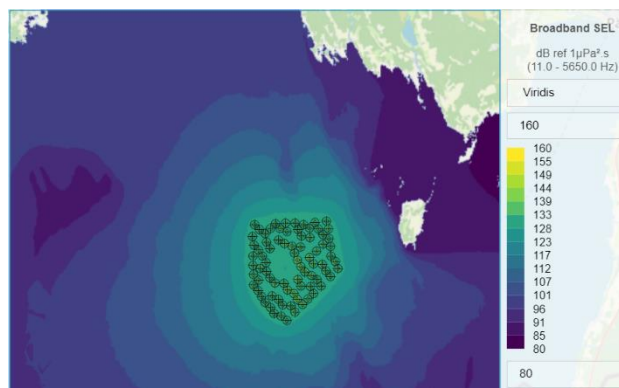
Tabel 2.4 Surmavad helirõhutasemed kaladel [Andersson 2016] – impulssmüra

	Kala	Kalamari ja vastsed
Suremus ja siseorganite vigastused	SEL(cum) 204 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ või 202 dB SEL 125 Hz tertsribas	SEL(cum) 207 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ või 204 dB SEL 125 Hz tertsribas

2.3 Elupaigad ja hindamisala

Inimtekkelise müra mõju hindamisel on lihtsustatult arvestatud, et räime ja hüljeste elupaigaks laiemas mõttes on kogu mereala pindalaga 3930 km², kujutatud joonisel 2.5.

Sellel merealal asuvad hall- ja viiGERhüljeste elupaigad (Joonis 2.1) ning räime kudealad (Joonis 2.4).



Joonis 2.5. Räime ja hüljeste elupaigana käsitletav hindamisala

2.4 Keskkonnamõju hindamise skaala

Käesolevas dokumendis on kasutatud järgmised keskkonnamõju kriteeriumid:

Kriteerium 1: inimtekkelise pidevmüra mediaanhelitase ei tohi ületada tabelis 2.2. toodud piirväärtusi (reageerimistasemeid) enam kui 20% loomade elupaigast loomadele olulistel eluperioodidel, vastavalt TG Noise soovitusel [TG Noise 2022].

Kriteerium 2: inimtekkeline impulssmüra on tasemel, mis ei tekita hüljestel alalist kuulmisläve tõusu (tabel 2.3).

Kriteerium 3: inimtekkeline impulssmüra on tasemel, mis ei ohusta räime kudemisalasid kudemisperioodidel (tabel 2.4).

Vastavalt toodud kriteeriumitele on koostatud KMH skaala (tabel 2.5).

Tabel 2.5 KMH skaala

Kirjeldus	KMH skaala	Märkused
Impulssmüra: ajutine ja alaline kuuldeläve tõus hüljestel ei esine. Pidevmüra: mediaanhelitase ületab reageerimistaset alla 20% elupaiga alast.	0	neutraalne/ mõju puudub
Impulssmüra: alaline kuuldeläve tõus hüljestel puudub, ajutine kuuldeläve tõus võib esineda. Pidevmüra: mediaanhelitase ületab reageerimistaset 20% elupaiga alast väljaspool olulisi eluperioode.	-1	väheoluline negatiivne mõju
Impulssmüra: esineb alaline kuuldeläve tõus hüljestel. Pidevmüra: mediaanhelitase ületab reageerimistaset üle 20% elupaiga alast mereliigi olulistel eluperioodidel.	-2	oluline negatiivne mõju

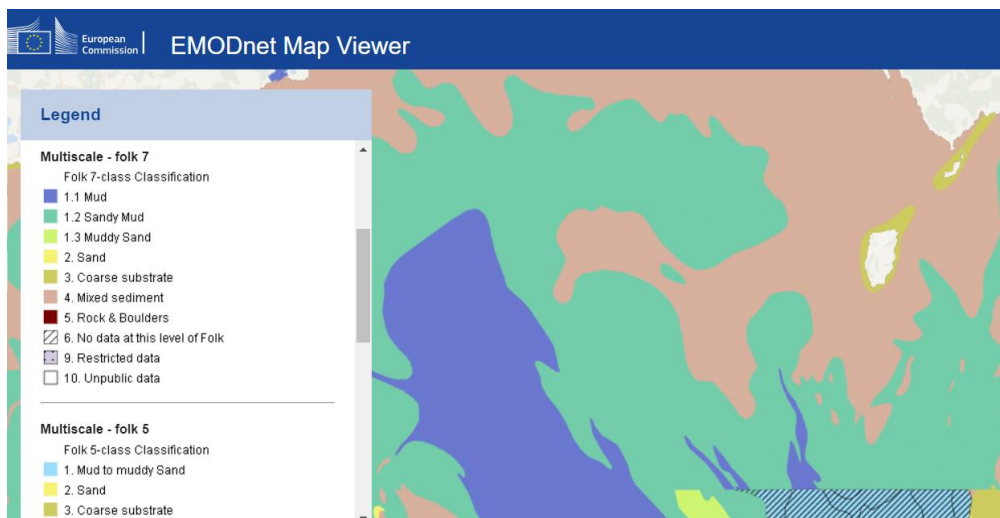
3. HELIALLIKAD

3.1 0 – alternatiiv. Hinnatav mereala.

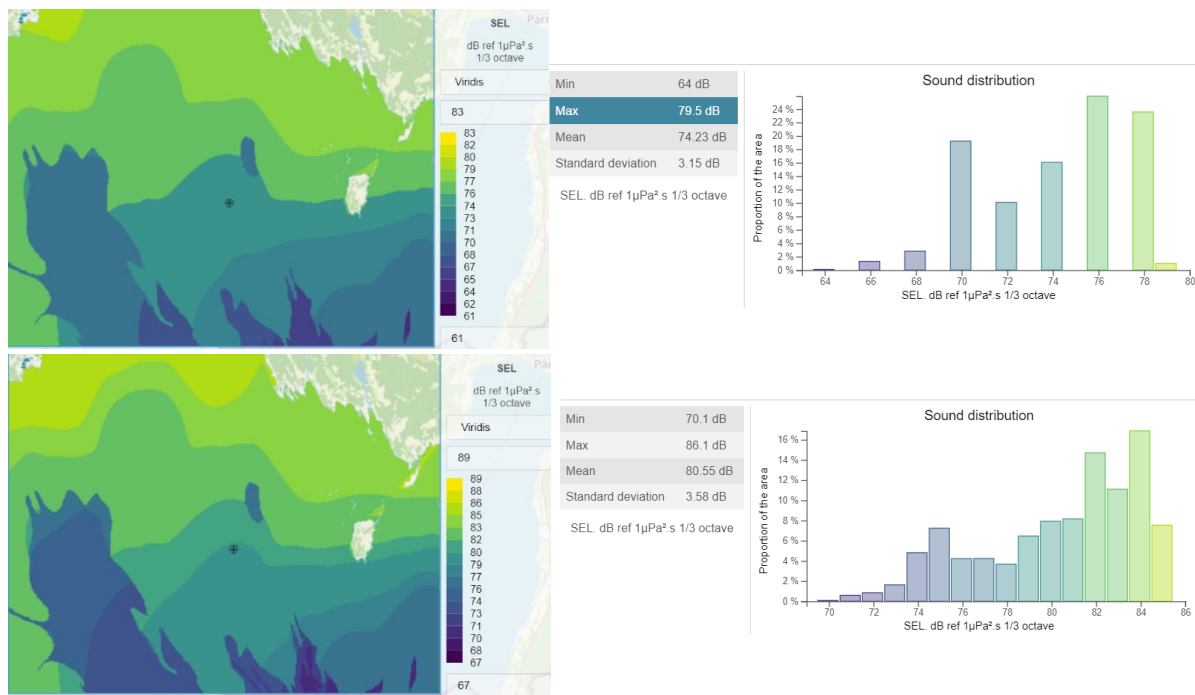
Enne tuulepargi ehitamisest tingitud müra hindamist on oluline selgitada esialgset olukorda enne ehituse algust. Joonistel 3.1 - 3.3 on näidatud hinnatav tuulepargi ala ning on esitatud loodusliku allveeheli modelleerimistulemused. Valitud mereala hõlmab tuulepargi territooriumi ja sellega piirnevaid Liivi lahe osi.

Mudelis on loodusliku ümbrusmüra peamiseks allikaks merepinna lained. Mürakaardid näitavad veealuse helitaseme mediaanväärtusi tertsribades 125 Hz ja 500 Hz. Modelleerimiseks on kasutatud tarkvara QUONOPS.

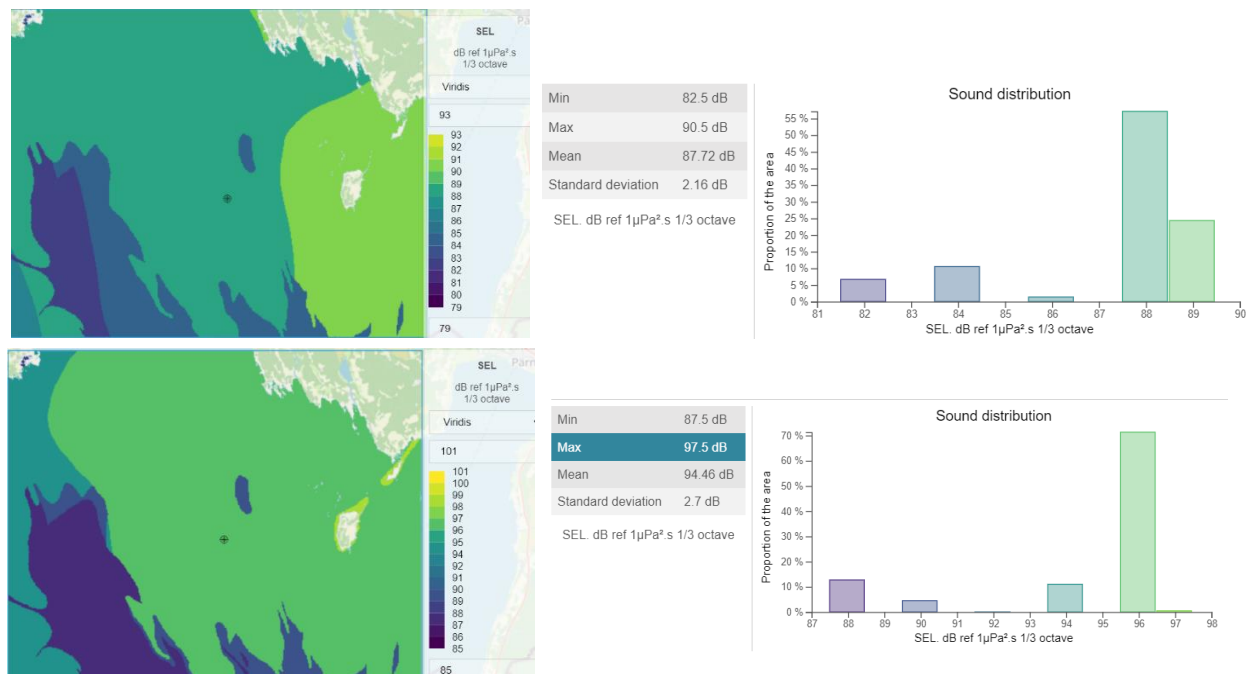
Joonisel 3.1 on näidatud mereala EMODnet kaardirakendusest merepõhja setete kaart. Järgnevatel joonistel toodud loodusliku müra kaardid näitavad, et helitasemed sõltuvad setete koosseisust. Mudase merepõhja puhul on heli kustuvus suurem ning helitasemed madalam. Loodusliku veealuse heli tasemed on esitatud jaanuari ja juuli 2024 jaoks, mis lubab hinnata ümbrusmüra sesoonseid muutusi.



Joonis 3.1. Merepõhja setted tuulepargi piirkonnas (EMODnet)



Joonis 3.2. Modelleeritud loodusliku ümbrusheli mediaantased.
detsidekaad 125 Hz üleval ja 500 Hz all, juuli 2024.



Joonis 3.3. Modelleeritud loodusliku ümbrusheli mediaantased.
detsidekaad 125 Hz üleval ja 500 Hz all, jaanuar 2024.

Tabelis 3.1 on toodud 0 - alternatiivi ümbrusmüra statistilised andmed detsidekaadides 125 Hz ja 500 Hz. Mediaanväärtused detsidekaadis 500 Hz on kõrgemad, kuna tuule mõju nendel sagedustel on suurem.

Tabel 3.1 Ümbrusmüratase tuulepargi merealal

Aastaaeg	0 - alternatiivi helitase, dB re 1uPa					
	125 Hz			500 Hz		
	min	keskväärtus	max	min	keskväärtus	max
juuni	64	74	80	70	81	86
jaanuar	83	88	91	88	94	98

3.2 Meretuulepargi ehitusperioodi heliallikad

Käesolevas uuringus käsitletakse nelja tuuliku paigaldamise stsenaariumi:

- gravitatsioonivundament,
- vaiade vibrorammimine,
- vaiade puurimine
- vaiade löökrammimine (ehk rammimine).

Vaiavundamendi korral kasutatakse vaiad läbimõõduga 12 ja 18 meetrit. Vaiade paigaldamisel tekkivate akustiliste allikate spektrid võetakse tarkvara Quonops andmebaasist. Kuna andmebaasis on suurim vaia läbimõõt 15 meetrit, siis 18 meetriliste vaia helispektrid on ekstrapoleeritud, kasutades muuseas aruande [Bellmann 2020] tulemusi.

1. *Gravitatsioonivundament*

Enne gravitatsioonivundamendi paigaldamist toimuvad merepõhja ettevalmistustööd järgmiste etappidena:

- Süvenduslaev tasandab merepõhja pumbates setteid laeva pardale ning viib neid kaadamisalale. Ühe vundamendi aluse ettevalmistamiseks võib kuluda umbes viis laeva reisi.
- Tasandatud merepõhja pinnale paigaldatakse kivikiht, kasutades selleks spetsiaalset laeva. Kivid liiguvad torus, mille ots on täpselt positsioneeritud. Kivid paigaldatakse ümber vundamendi ka peale selle paigaldamist, et kaitsta vundamendi alt setete erosiooni. Ühe vundamendi aluse tugevdamiseks võib kuluda mitukümmend laeva reisi.
- Gravitatsioonivundament pukseeritakse sadamast paigaldamiskohale kasutades selleks positsioneerimissüsteemidega varustatud puksiire.
- Ka elektrikaablite paigaldamiseks kasutatakse spetsiaalset laeva.

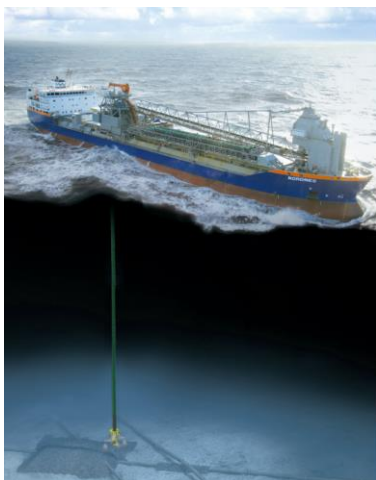
Merepargi ehituse veealuse helitase hindamiseks on rakendatud halvim stsenaarium, kus merealal on korraga 7 laeva:

- vundamendi paigaldamiskoha süvendamine. Näitena on võetud laev Cornelis Zanen (<https://www.dredgepoint.org/dredging-database/equipment/cornelis-zanen>, pikkus 132 m ning süvis 8 m). Halvima stsenaariumi korral süvenduslaev tasandab esimese vundamendi alust;



Cornelis Zanen

- vundamendi aluse kividega tugevdamine. Näitena on võetud laev Nordnes, (<https://www.vesselfinder.com/vessels/NORDNES-IMO-9229910-MMSI-244962000>, pikkus 166 m ning süvis 6 m). Halvima stsenaariumi korral laev paigaldab kive kõrval oleva teise vundamendi alust;



Nordnes

- neli puksiirlaeva veavad gravitatsioonivundamendi konstruktsiooni sadamast tuulepargi alale ning paigaldavad vundamendi eelnevalt ettevalmistatud alusele. On arvestatud 4 Katun tüüpi puksiirlaevadega (<https://www.vesselfinder.com/vessels/KATUN-IMO-9701126-MMSI-273380860>, pikkus 72 m ning süvis 5 m), mis veavad vundamendi kolmanda tuuliku paigaldamise kohta;



Katun

- kaabli paigaldamise laev on neljanda tuuliku ja ranniku vahel. Näitena on valitud laev <https://www.vesselfinder.com/vessels/NEXUS-IMO-9709972-MMSI-0>, mille pikkus on 123 m ja süvis 6 m).

Kõikide nimetatud laevade Nexus akustilised allikatasemed on esitatud tabelis 3.1.



Nexus

2. *Vaiade vibrorammimine*

Vibrorammimine (*vibrodriving*) on suhteliselt uudne tehnoloogia, mis lubab vaiade paigaldamist kiirmini ning tekitades üldjuhul vähem müra, võrreldes traditsioonilise vaiade rammimisega (<https://capeholland.com/applications/monopile-installation/>). Vaiad paigaldatakse suure laeva-platvormi abil.

Selle stsenaariumi korral paigaldatakse 12 või 18 meetri läbimõõduga vaia. Heli allika kirjeldamiseks kasutati QUONOPS tarkvara andmebaasi. Kuna tegemist on küllalt tugeva müra allikaga, siis teiste abilaevade müraga selles stsenaariumis võib mitte arvestada.

Vibrorammimist tinglikult loeme impulssmüra allikaks, kuna ta mõjub suhteliselt lühikese aja jooksul (3-4 tundi ühe vaia paigaldamiseks), et teda saaks pidevaks müraallikaks pidada. Vastavalt vibrorammimisel jälgime, et mereelustik ei saaks ajutist või alalist kuuldeläve tõusu.



CAPE VLT vibrorammimise platvorm

3. Vaiade puurimine

Ka vaiade puurimine on suhteliselt uudne tehnoloogia, mis oluliselt vähendab veealuse müra kiirgumist, võrreldes tavalise vaiade rammimisega.

Selle stsenaariumi korral paigaldatakse 12 või 18 m läbimõõduga vaia 10 km kaugusel Kihnu rannikust. Heliallika kirjeldamiseks kasutati QUONOPS tarkvara andmebaasi. Kuna tegemist on küllalt tugeva müra allikaga, siis teiste abilaevade müraga selles stsenaariumis võib mitte arvestada.

Puurimist tinglikult loeme impulssmüra allikaks, kuna ta mõjub suhteliselt lühikese aja jooksul (3-4 tundi ühe vaia paigaldamiseks), et teda saaks pidevaks müraallikaks pidada. Vastavalt vibrorammimisel jälgime, et mereelustik ei saaks ajutist või alalist kuuldeläve tõusu.



Bauer Renewables puurimise seadmestik

4. Vaiade rammimine

Tuulepargi rajamise ajal on suurimateks impulssmüra allikateks vaiade rammimine. Tehniliselt lihtsaimaks löökrammimise müra mõju leevendavaks meetmeks võib pidada pehmet rammimise alustamist. Täiendava heli summutamise võib saavutada kasutades õhupallide kardina (Hydro Sound Dampers and encapsulated bubbles). Tugevaim aga ka kallim leevendusmeede on õhumullpilvede (mullikardina) genereerimine (BBC - Big Bubble Curtain). Rammimise käigus tekkiv müra sõltub rammimistehnoloogiast, vasara energiast ja vaiade läbimõõdust [Bellmann et al., 2020].

Selle stsenaariumi korral paigaldatakse 12 või 18 m läbimõõduga vaia 10 km kaugusel Kihnu rannikust. Heliallika kirjeldamiseks kasutati QUONOPS tarkvara allikate andmebaasi. Kuna tegemist on tugeva müra allikaga, siis teiste abilaevade müraga selles stsenaariumis võib mitte arvestada.



Van Oord'i löökrammimise seadmestik

Tabel 3.1 Ehitusperioodi heliallikate kirjeldus.

Ehitustöö liik	Modelleerimises kasutatud laeva tüüp	Sagedusriba, Hz	Allikatase, dB Re 1 μ Pa @ 1 m	Infoallikas
Süvendamine	Cornelis Zanen	16 - 4000	189	Stephen P. Robinson, Dredging sound measurements, WODA Workshop, Paris, 26th March 2015
Kivide panek	Nordnes	16 - 4000	188	NORD STREAM 2, UNDERWATER NOISE MODELLING, FINLAND. Ramboll, 2016
Vundamendi transport ja paigaldamine	Katuden	16 - 4000	176	McCrodan, A. and Hannay, D. 2013. Modelling of Underwater Noise for Pacific NorthWest LNG Marine Construction and Shipping Scenarios Marine Construction and Shipping Scenarios. JASCO Document 00669, Version 2.14. Technical report by JASCO Applied Sciences.
Kaablite paigaldamine	Nexus	16 - 4000	182	Leaflet cable-laying vessel Nexus, Van Oord
Vibro-rammimine	Laev-platvorm	16 - 4000	223 (12 m) 227 (18 m)	https://capeholland.com/application/s/monopile-installation/ QUONOPS andmebaas (sõltuvalt vaia läbimõõdust)
Vaiade puurimine	Laev - platvorm	16 - 4000	201 (12 m) 205 (18 m)	https://www.vanoord.com/drupal/media/data/default/leaflet_aeolus.pdf?undefined QUONOPS andmebaas (sõltuvalt vaia läbimõõdust)
Vaiade rammimine	Laev - platvorm	16 - 4000	228 (12 m) 233 (18 m)	QUONOPS andmebaas (sõltuvalt vaia läbimõõdust)

3.3 Meretuulepargi kasutusperioodi heliallikad

Kasutusperioodil on peamisteks heliallikateks tuulegeneraatorid. Heliallika kirjeldamiseks me kasutame allikatase mõistet [ISO 18405:2020]. Kuna projekteeritavate tuulegeneraatorite mõõtmistulemused puuduvad, siis allikate helitase hindamiseks me kasutame teadusartiklis [Tougaard 2020] pakutud empiirilise valemi, mis on koostatud kirjanduses olevate mõõtmistulemuste analüüsi põhjal:

$$L_{eq} = C + \alpha \log_{10} \left(\frac{\text{distance}}{100 \text{ m}} \right) + \beta \log_{10} \left(\frac{\text{wind speed}}{10 \text{ m/s}} \right) + \gamma \log_{10} \left(\frac{\text{turbine size}}{1 \text{ MW}} \right).$$

Arvutustes on arvestatud, et $\alpha = -23,7$, $\beta = 18,5$, $\gamma = 13,6$ ning tuule kiirus on 10 m/s kõrgusel 10 meetrit. Kui valemis on kaugus 1 meeter, siis L_{eq} on võrdne allikatasemega.

Valemi abil arvutatud tuulegeneraatorite allikatasemed on toodud tabelis 3.2.

Tuulegeneraatorite teenindava laevana on modelleeritud laev Windea la Cour <https://www.vesselfinder.com/vessels/WINDEA-LA-COUR-IMO-9769025-MMSI-218824000> pikkusega 88 meetrit ja süvisega 5,9 m.



Windea la Cour

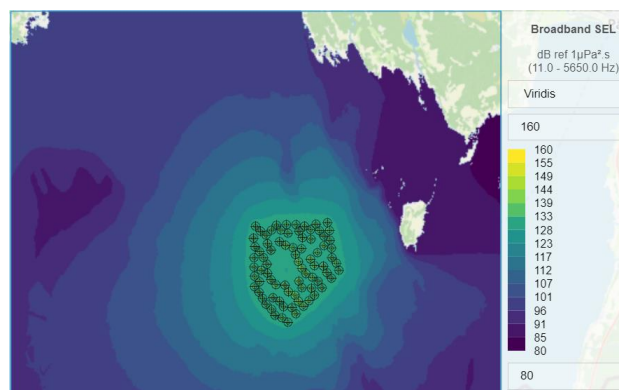
Tabel 3.2 Kasutusperioodi heliallikate kirjeldus

Heliallikate akustilised karakteristikud			
Tuuliku võimsus, MW	Sagedusriba, Hz	Tuulekiirus, m/s	Allikatase, dB re 1 μ Pa @ 1m
15 MW	16-4000	10	169
20 MW	16-4000	10	172
Teeninduslaev	16-4000	-	170

Võib näha, et tabelis 3.2 toodud teeninduslaeva allikatase on ligikaudu võrdne tuulegeneraatori omaga. Seega modelleerimises me teeninduslaevade müraga ei arvesta, kuna ta oluliselt ei mõjuta helipilti.

4. MODELLEERIMISE TULEMUSED

Modelleerimisel analüüsitakse ning antakse hinnang Joonisel 4.1 esitatud merealale, mille pindala on 3930 km². Valitud mereala hõlmab tuulepargi territooriumi ja sellega piirnevaid Liivi lahe osi. Kõikide stsenaariumide toimumise ajaks on valitud juuli keskpaik, kui ehitustööde jaoks soodne periood. Suveperioodil on loodulik ümbrusheli tase madal.

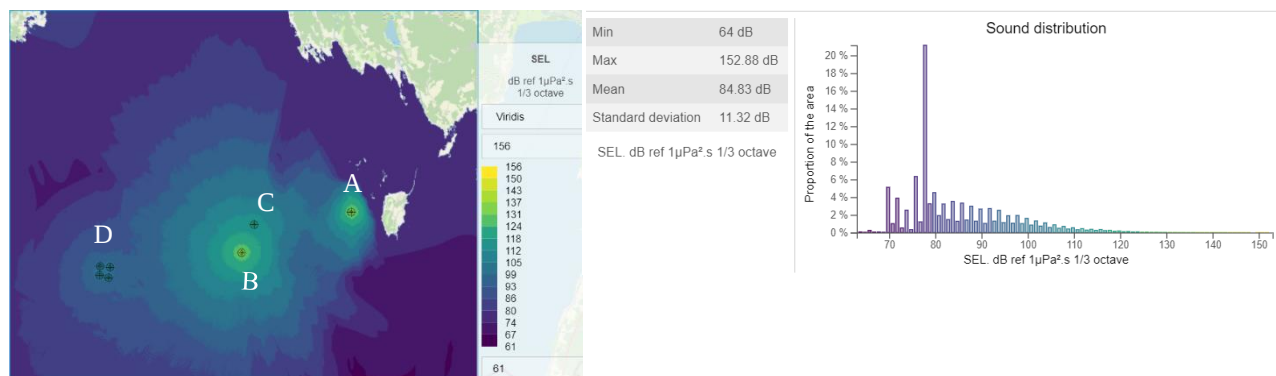


Joonis 4.1. Hinnatav mereala.

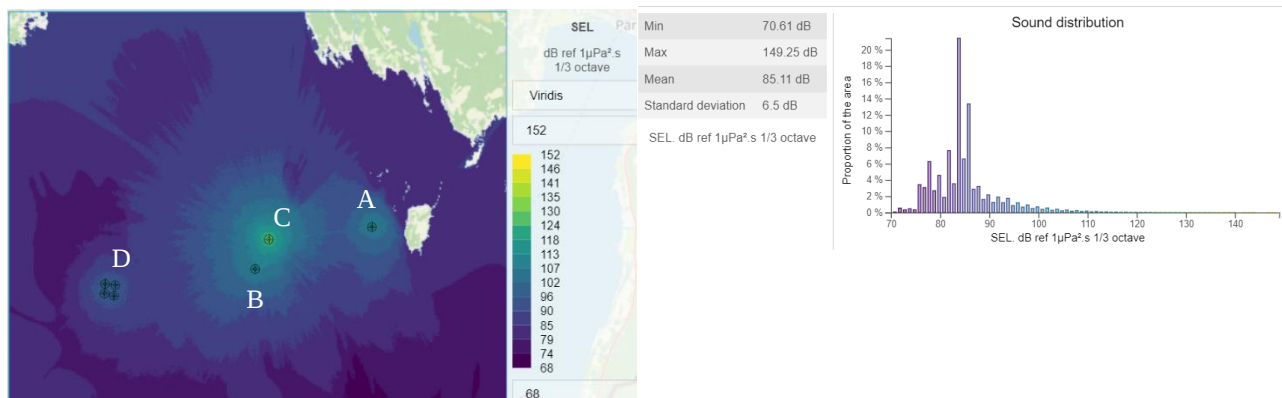
4.1 Ehitusperioodi helitasemete modelleerimine

4.1.1 Gravitatsioonivundament

Merepargi ehitusperioodi veealuse helitaseme hindamiseks on rakendatud halvim stsenaarium, kus merealal on korraga 7 laeva. Mereala eri osades korraga toimub süvendamine (A), kivide paigaldamine (B), kaablite paigaldamine (C) ning vundamendi vedu nelja puksiiri abil (D). Tööde teostamise periood on juuli ning mürakaardil esitatakse helitasemete mediaanväärtusi.



Joonis 4.2. Ehitusperioodi “halvimale” stsenaariumile vastavad modelleeritud helitasemed tertsisribas 125 Hz. Histogrammidel on helitasemete jaotus. Mereala helitase võrreldes 0 – alternatiiviga on tõusnud keskmiselt 11 dB võrra.



Joonis 4.3. Ehitusperioodi “halvimale” stsenaariumile vastavad modelleeritud helitasemed tertsribas 500 Hz. Histogrammil on mereala helitase jaotus. Mereala helitase võrreldes 0 – alternatiiviga on tõusnud keskmiselt 4 dB võrra.

Võrreldes saadud tulemusi punktis 3.1 toodud 0 – alternatiivi omadega võib järeldada, et mediaanhelitase ehitustööde ajal võib tertsribas 125 Hz tõusta $85 - 74 = 11$ dB võrra ning tertsribas 500 Hz tõusta $85 - 81 = 4$ dB võrra.

Stsenaariumi kokkuvõte:

Tertsribas 125 Hz reageerimistase 122 dB (räim) on ületatud alla 1% elupaigast.

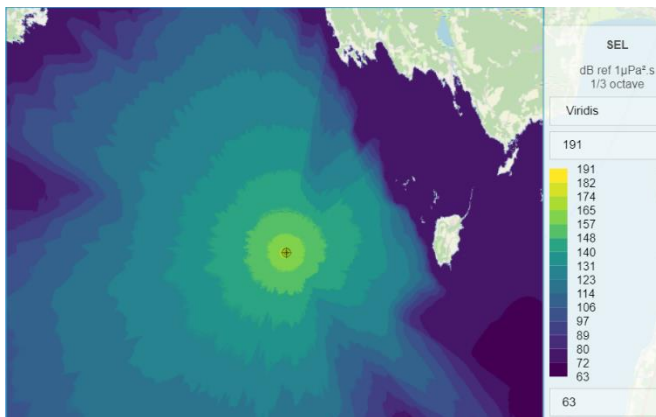
Tertsribas 500 Hz reageerimistase 110 dB (hüljes) on ületatud alla 1% elupaigast.

Mõju puudub.

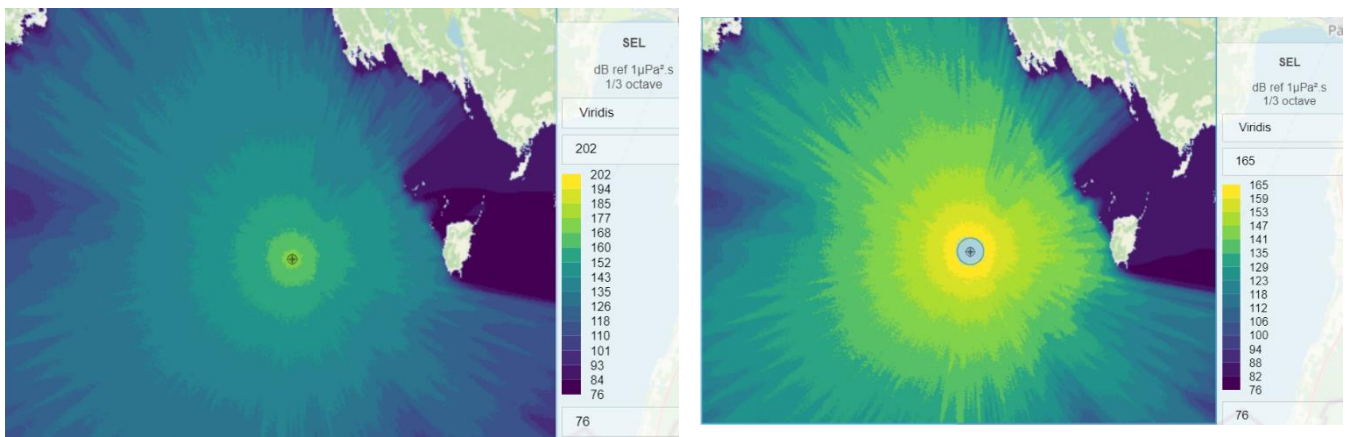
4.1.2 Vaiade vibrorammimine

Vaiade vibrorammimise modelleerimises arvestame kahe stsenaariumiga, kus Kihnu saare läheduses paigaldatakse vaiad läbimõõtudega 12,0 m ja 18 m.

a. 12 m läbimõõduga vaiade vibrorammimine



Joonis 4.4. Modelleeritud helitasemed vaiade vibrorammimise korral 125 Hz detsidekaadi sagedusribas, L05 ületamistase (5% kõige valjemate helide puhul). Ajutine kuuldeläve tõus rüümel võib esineda 40 meetrilises tsoonis.

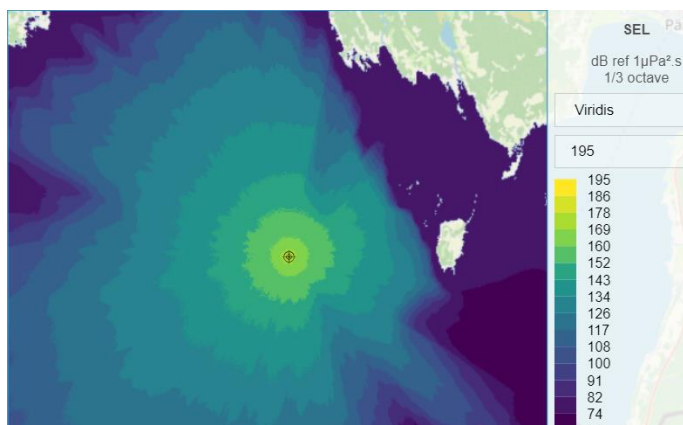


Joonis 4.5. Modelleeritud helitasemed vaiade vibrorammimise korral 500 Hz detsidekaadi sagedusribas, L05 ületamistase (5% kõige valjemate helide puhul). Paremalt - helesinine ring tähistab 1900 m raadiusega tsooni, kus võib esineda hüljeste ajutine kuuldeläve tõus. Alaline kuuldeläve tõus võib tekkida 150 m tsoonis.

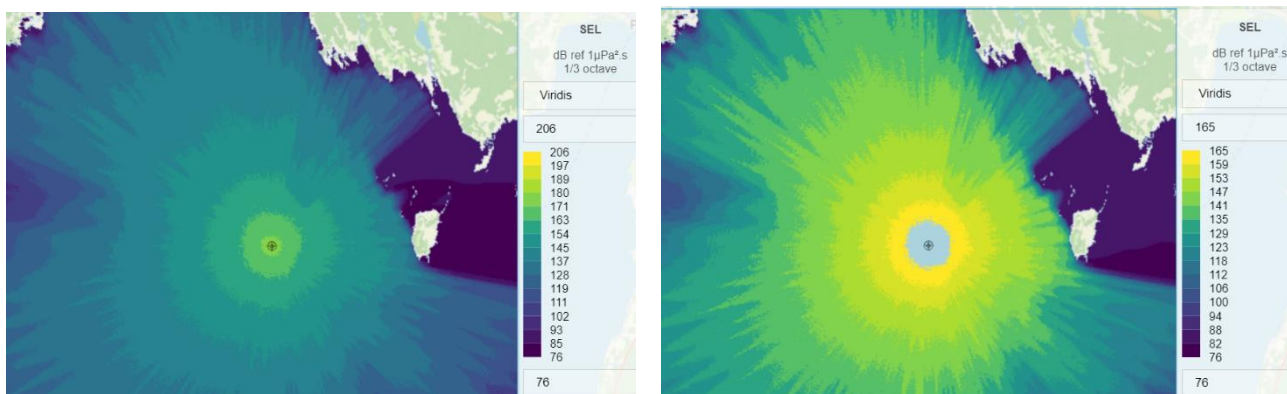
Stsenaariumi kokkuvõte:

- 40 meetrilises tsoonis võib rüümel esineda ajutine kuuldeläve tõus. Väheoluline negatiivne mõju.
- 1900 meetrilises tsoonis võib hüljestel esineda ajutine kuuldeläve tõus ning 150 meetrilises tsoonis püsiv kuuldeläve tõus. Väheoluline negatiivne mõju, kui rakendatakse leevendusmeetmeid, mis on kirjeldatud jaotises 4.3. Vastasel juhul esineb oluline negatiivne mõju.

b. 18 m läbimõõduga vaiade vibrorammimine



Joonis 4.6. Modelleeritud helitasemed vaiade vibrorammimise korral 125 Hz detsidekaadi sagedusribas, L05 ületamistase (5% kõige valjemate helide puhul). Ajutine kuuldeläve tõus räämel võib esineda 100 meetrilises tsoonis.



Joonis 4.7. Modelleeritud helitasemed vaiade vibrorammimise korral 500 Hz detsidekaadi sagedusribas, L05 ületamistase (5% kõige valjemate helide puhul). Paremalt - helesinine ring tähistab 3400 m raadiusega tsooni, kus võib esineda hüljeste ajutine kuuldeläve tõus. Alaline kuuldeläve tõus võib tekkida 320 m tsoonis.

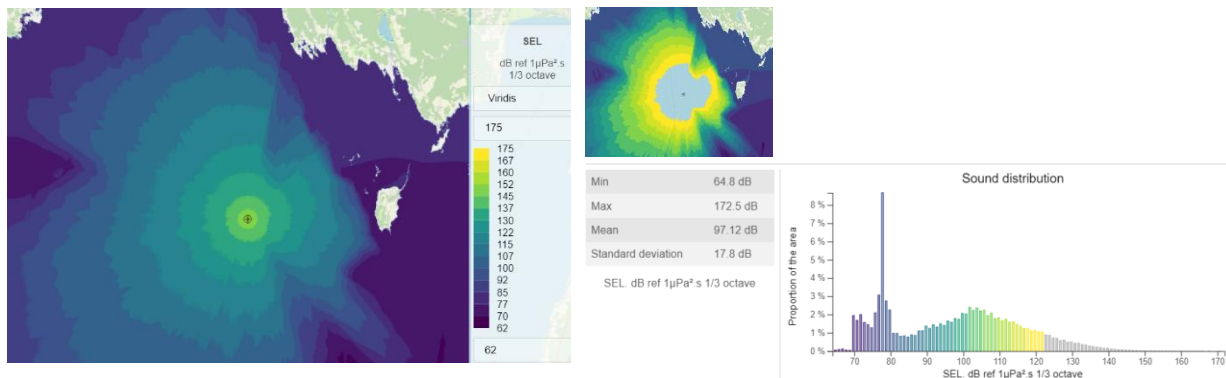
Stsenaariumi kokkuvõte:

- 100 meetrilises tsoonis võib räämel esineda ajutine kuuldeläve tõus. Väheoluline negatiivne mõju.
- 3400 meetrilises tsoonis võib hüljestel esineda ajutine kuuldeläve tõus ning 320 meetrilises tsoonis püsiv kuuldeläve tõus. Väheoluline negatiivne mõju, kui rakendatakse leevendusmeetmeid, mis on kirjeldatud jaotises 4.3. Vastasel juhul esineb oluline negatiivne mõju.

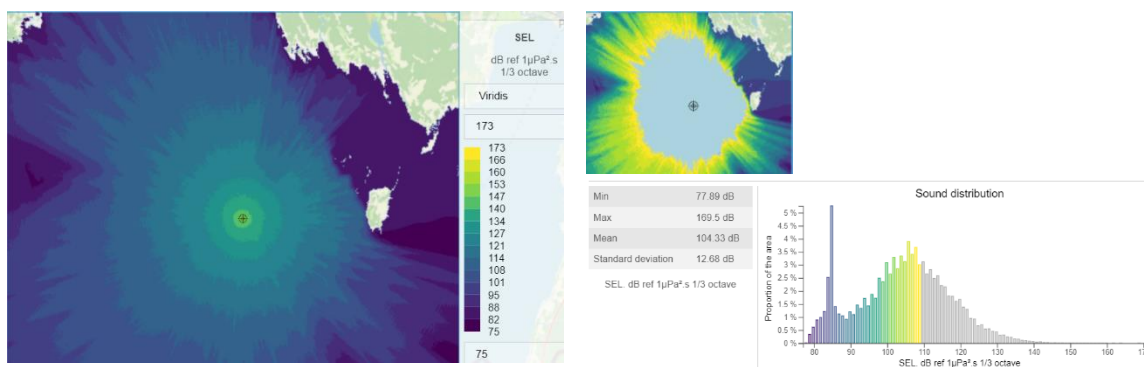
4.1.3 Vaiade puurimine

Vaiade puurimise modelleerimises arvestame kahe stsenaariumiga, kus Kihnu saare läheduses paigaldatakse vaiad läbimõõtudega 12,0 m ja 18 m.

a. 12 m läbimõõduga vaiade puurimine



Joonis 4.8. Vaia puurimise modelleeritud helitasemed tertsribas 125 Hz. Histogrammil on hinnatava mereala helitase jaotus. Ülemisel joonisel on helesinise värviga näidatud ala, kus mediaanhelitase on kõrgem, kui 122 dB (kalade reageerimistase). Ajutine kuuldeläve tõus räumel ei esine.

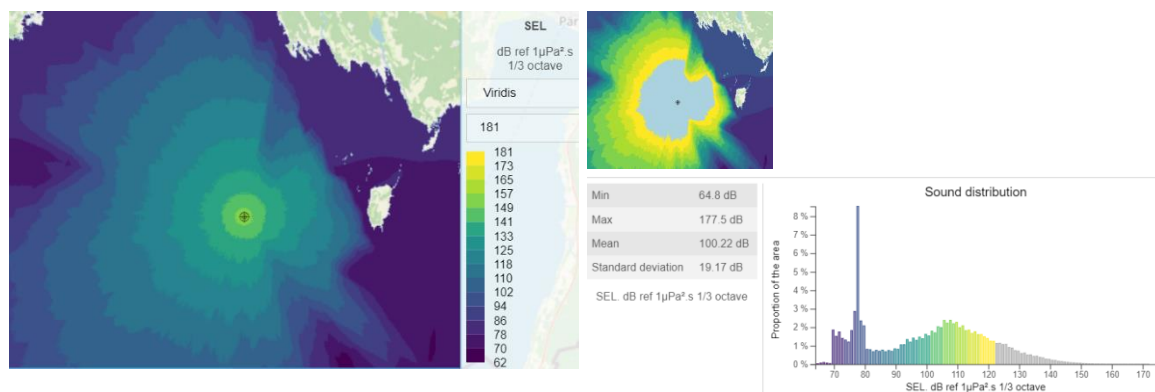


Joonis 4.9. Vaia puurimise modelleeritud helitasemed tertsribas 500 Hz. Histogrammil on hinnatava mereala helitase jaotus. Ülemisel joonisel on helesinise värviga näidatud ala, kus mediaanhelitase on kõrgem, kui 110 dB (hüljeste reageerimistase). Ajutine kuuldeläve tõus hüljestel võib esineda 40 meetrilises tsoonis.

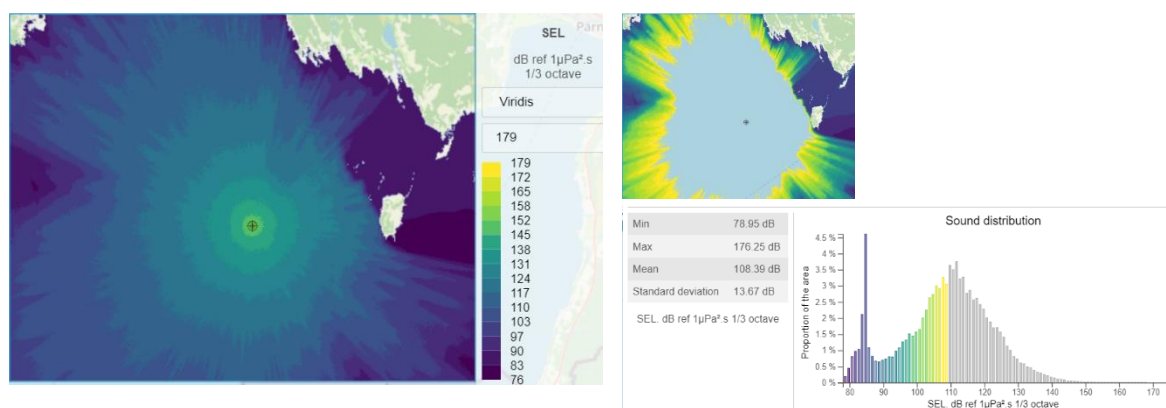
Stsenaariumi kokkuvõte:

- ajutine kuuldeläve tõus räumel ei esine. Väheoluline negatiivne mõju.
- 40 meetrilises tsoonis võib hüljestel esineda ajutine kuuldeläve tõus. Püsiv kuuldeläve tõus hüljestel ei esine. Väheoluline negatiivne mõju.

b. 18 m läbimõõduga vaiade puurimine



Joonis 4.10. Vaia puurimise modelleeritud helitasemed tertsisribas 125 Hz. Histogrammil on hinnatava mereala helitase jaotus. Ülemisel joonisel on helesinise värviga näidatud ala, kus mediaanhelitase on kõrgem, kui 122 dB (kalade reageerimistase). Ajutine kuuldeläve tõus räämel ei esine.



Joonis 4.11. Vaia puurimise modelleeritud helitasemed tertsisribas 500 Hz. Histogrammil on hinnatava mereala helitase jaotus. Ülemisel joonisel on helesinise värviga näidatud ala, kus mediaanhelitase on kõrgem, kui 110 dB (hüljeste reageerimistase). Ajutine kuuldeläve tõus hüljestel võib esineda 50 meetrilises tsoonis.

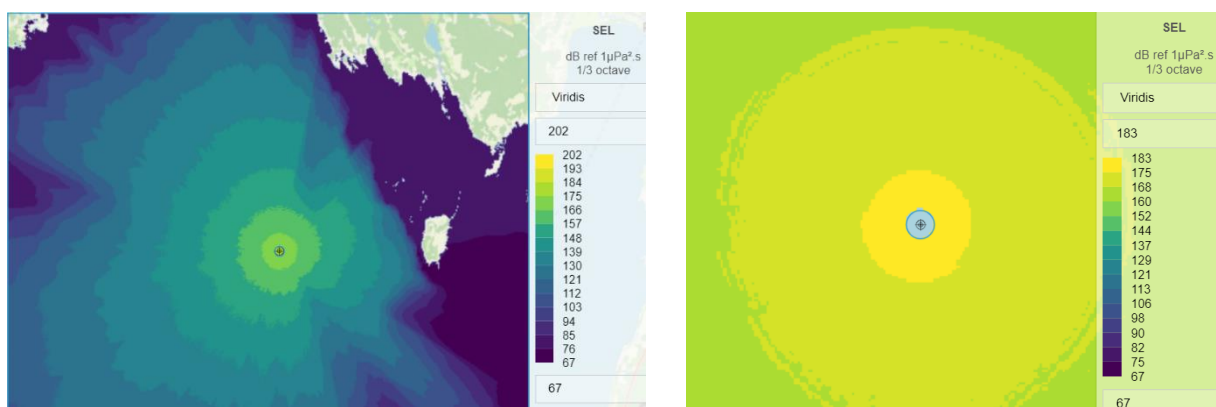
Stsenaariumi kokkuvõte:

- ajutine kuuldeläve tõus räämel ei esine. Väheoluline negatiivne mõju.
- 50 meetrilises tsoonis võib hüljestel esineda ajutine kuuldeläve tõus. Püsiv kuuldeläve tõus hüljestel ei esine. Väheoluline negatiivne mõju.

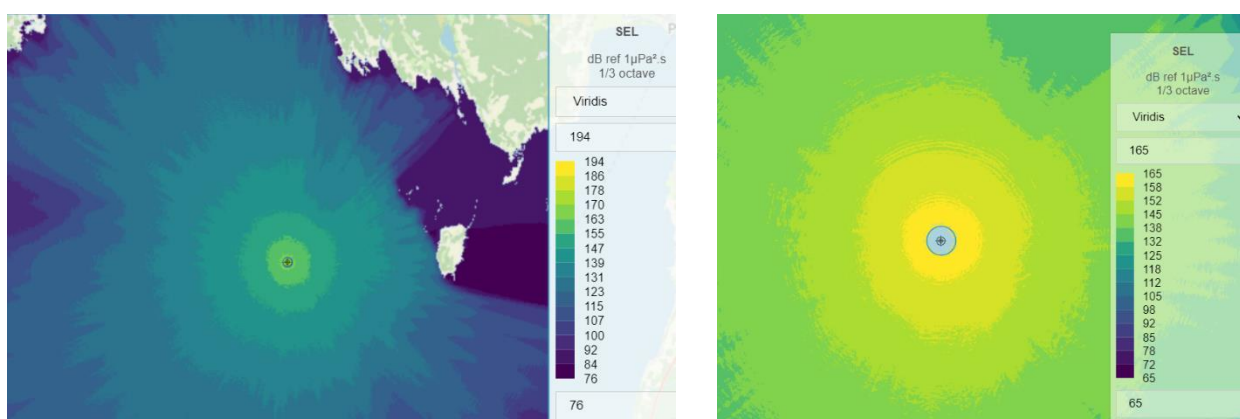
4.1.4 Vaiade rammimine

Vaiade rammimise modelleerimises arvestame kahe stsenaariumiga, kus Kihnu saare läheduses paigaldatakse vaiad läbimõõdudega 12,0 m ja 18 m.

a. 12 m läbimõõduga vaiade rammimine



Joonis 4.8. Modelleeritud helitasemed vaiade rammimise korral 125 Hz detsidekaadi sagedusribas. Vasakul on helikaart L05 ületamistase (5% kõige valjemate helide puhul). Paremalt - helesinine ring tähistab 140 m raadiusega tsooni, kus võib esineda räime ajutine kuuldeläve tõus.

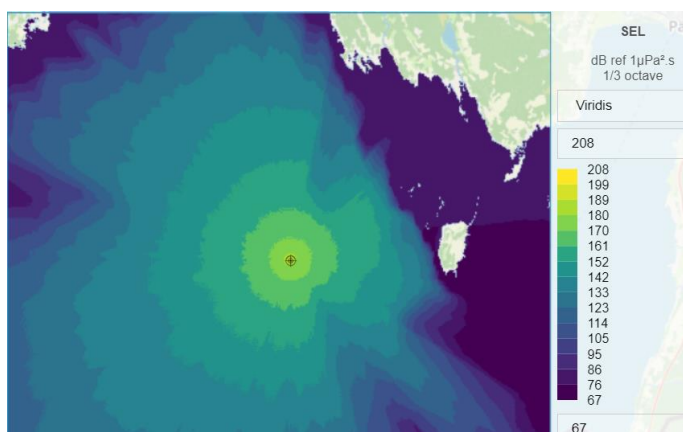


Joonis 4.9. Modelleeritud helitasemed vaiade rammimise korral 500 Hz detsidekaadi sagedusribas. Vasakul on helikaart L05 ületamistase (5% kõige valjemate helide puhul). Paremalt - helesinine ring tähistab 700 m raadiusega tsooni, kus võib esineda hüljeste ajutine kuuldeläve tõus. Alaline kuuldeläve tõus võib tekkida 50 m tsoonis.

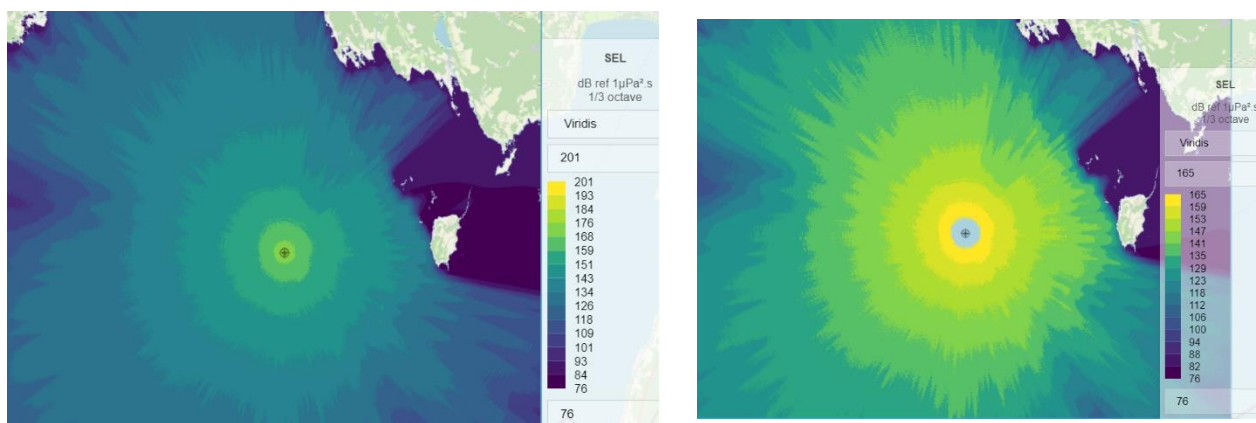
Stsenaariumi kokkuvõte:

- 140 meetrilises tsoonis võib rämel esineda ajutine kuuldeläve tõus. Väheoluline negatiivne mõju.
- 700 meetrilises tsoonis võib hüljestel esineda ajutine kuuldeläve tõus ning 50 meetrilises tsoonis püsiv kuuldeläve tõus. Väheoluline negatiivne mõju, kui rakendatakse leevendusmeetmeid, mis on kirjeldatud jaotises 4.3. Vastasel juhul esineb oluline negatiivne mõju.

b. 18 m läbimõõduga vaiade rammimine



Joonis 4.6. Modelleeritud helitasemed vaiade vibrorammimise korral 125 Hz detsidekaadi sagedusribas, L05 ületamistase (5% kõige valjemate helide puhul). Ajutine kuuldeläve tõus räämel võib esineda 500 meetrilises tsoonis.



Joonis 4.7. Modelleeritud helitasemed vaiade vibrorammimise korral 500 Hz detsidekaadi sagedusribas, L05 ületamistase (5% kõige valjemate helide puhul). Paremal - helesinine ring tähistab 2000 m raadiusega tsooni, kus võib esineda hüljeste ajutine kuuldeläve tõus. Alaline kuuldeläve tõus võib tekkida 200 m tsoonis.

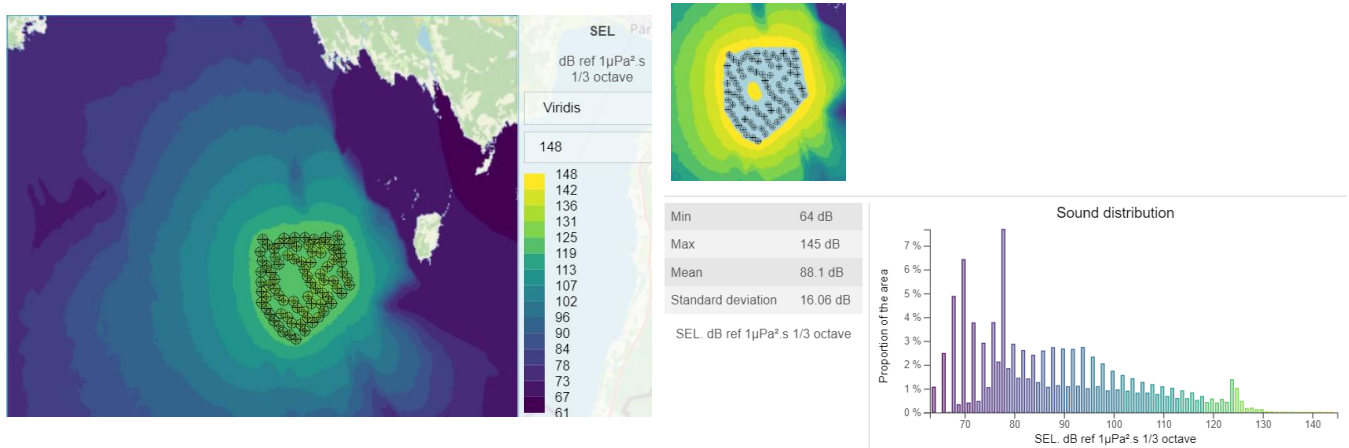
Stsenaariumi kokkuvõte:

- 500 meetrilises tsoonis võib räämel esineda ajutine kuuldeläve tõus. Väheoluline negatiivne mõju.
- 2000 meetrilises tsoonis võib hüljestel esineda ajutine kuuldeläve tõus ning 200 meetrilises tsoonis püsiv kuuldeläve tõus. Väheoluline negatiivne mõju, kui rakendatakse leevendusmeetmeid, mis on kirjeldatud jaotises 4.3. Vastasel juhul esineb oluline negatiivne mõju.

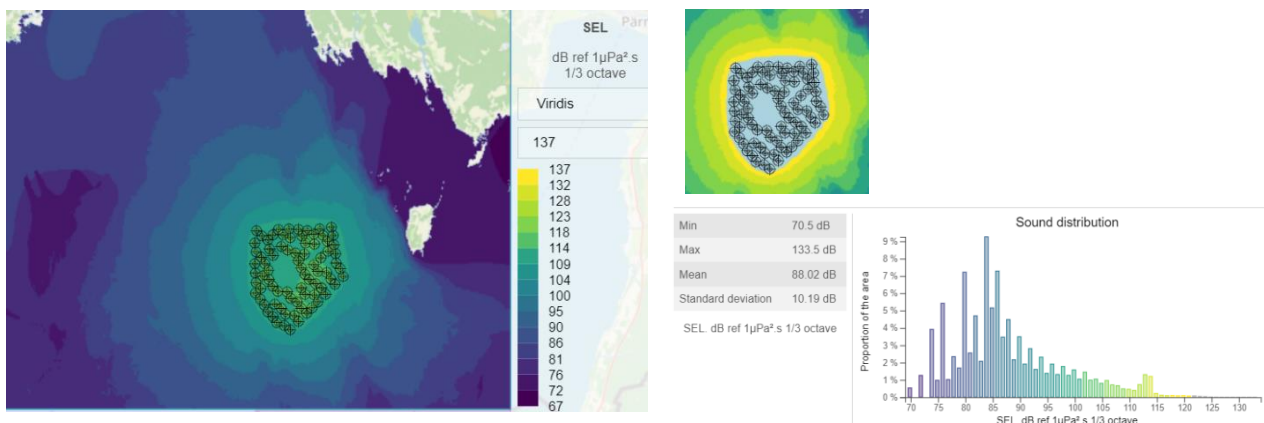
4.2 Kasutusperioodi helitasemete modelleerimine

4.2.1 Alternatiiv 1

Alternatiivi 1 korral on tuulepargis 80 tuulegeneraatorit, igaüks võimsusega 15 MW.



Joonis 4.10. Kasutusperioodi modelleeritud helitasemed alternatiivi 1 korral tertsribas 125 Hz. Joonisel on halli värviga näidatud ala, kus mediaanhelitase on kõrgem, kui 122 dB (kalade reageerimistase). Histogrammidell on mereala helitasemete jaotus. Mereala helitase võrreldes 0 – alternatiiviga on tõusnud keskmiselt 14 dB võrra.



Joonis 4.11. Kasutusperioodi modelleeritud helitasemed alternatiivi 1 korral tertsribas 500 Hz. Joonisel on halli värviga näidatud ala, kus mediaanhelitase on kõrgem, kui 110 dB (hüljeste reageerimistase). Histogrammil on mereala helitasemete jaotus. Mereala helitase võrreldes 0 – alternatiiviga on tõusnud keskmiselt 7 dB võrra.

Stsenaariumi kokkuvõte:

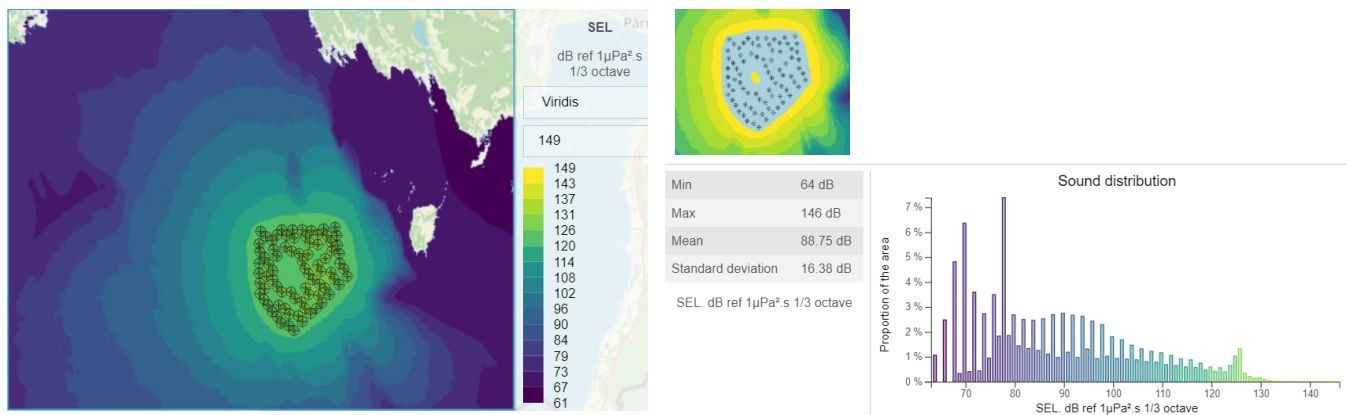
Tertsribas 125 Hz reageerimistase 122 dB (räim) on ületatud 5% elupaigast.

Tertsribas 500 Hz reageerimistase 110 dB (hüljes) on ületatud 4% elupaigast.

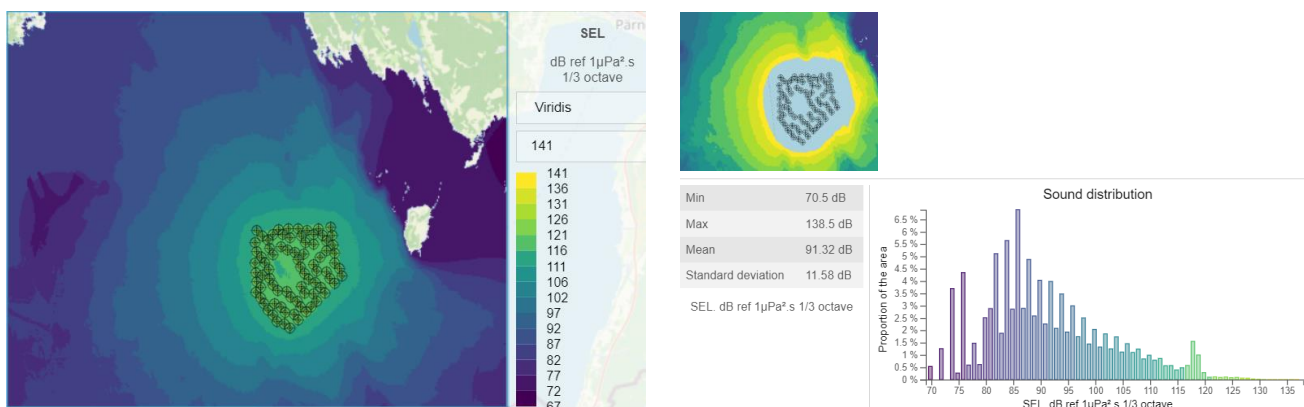
Väheoluline negatiivne mõju.

4.2.2 Alternatiiv 2

Alternatiivi 2 korral on tuulepargis 80 tuulegeneneraatorit, igaüks võimsusega 20 MW.



Joonis 4.12. Kasutusperioodi modelleeritud helitasemed alternatiivi 2 korral tertsribas 125 Hz. Joonisel on halli värviga näidatud ala, kus mediaanhelitase on kõrgem, kui 122 dB (kalade reageerimistase). Histogrammil on mereala helitasemete jaotus. Mereala helitase võrreldes 0 – alternatiiviga on tõusnud keskmiselt 15 dB võrra.



Joonis 4.13. Kasutusperioodi modelleeritud helitasemed alternatiivi 2 korral tertsribas 500 Hz. Joonisel on halli värviga näidatud ala, kus mediaanhelitase on kõrgem, kui 110 dB (hüljeste reageerimistase). Histogrammil on EP1 mereala helitasemete jaotus. Mereala helitase võrreldes 0 – alternatiiviga on tõusnud keskmiselt 10 dB võrra

Stsenaariumi kokkuvõte:

Tertsribas 125 Hz reageerimistase 122 dB (räim) on ületatud 6% elupaigast.

Tertsribas 500 Hz reageerimistase 110 dB (hüljes) on ületatud 8% elupaigast.

Väheoluline negatiivne mõju.

4.3 Leevendusmeetmed

Löök- ja vibrorammimine:

Kõrge müratase rammitava vaiba läheduses võib põhjustada püsivat ja ajutist kuuldeläve tõusu ohutsoonis juhuslikult viibivatel hüljestel (ja räimel). Leevendusmeetmed on eelkõige suunatud mereimetajate püsiva kuuldekahjustuse vältimisele, kuna ajutist kuuldekahjustust ei ole praktiliselt võimalik vältida.

Leevendusmeetmed võivad hõlmata:

- mereimetajate seiret,
- akustiliste heidutusvahendite kasutamist loomade eemale peletamiseks,
- rammimise aeglane algus, kus rammimise löögienergia on, näiteks, 20% maksimaalsest energiast esimese 30-45 minuti jooksul. Aeglase alguse aja jooksul saab loomastik pääseda ohutusse kaugusesse.

5. KOKKUVÕTE JA JÄRELDUSED

Tabel 5.1 Koondtabel ehitusperioodi ja kasutusperioodi erinevate alternatiivide poolt kiiratavate pidevmüra modelleerimistulemustega ning nende modelleerimistulemuste põhjal keskkonnamõju hindamine.

Parameeter/näitaja	Alternatiiv 0	Ehitusperiood	Kasutusperiood	
		Grav. vund.	Alternatiiv 1	Alternatiiv 2
Tuulikute võimsus	0	0	15 MW	20 MW
Tuulikute arv	0	0	80	80
Räime elupaiga mõjutatud osa, %	0	1	5	4
Piirväärtus: räime elupaiga mõjutatud osa, %	0	20	20	20
Hüljeste elupaiga mõjutatud osa, %	0	1	6	8
Piirväärtus: hüljeste elupaiga mõjutatud osa, %	0	20	20	20
Koondhinnang räimele	0	Mõju puudub	Mõju puudub	Mõju puudub
Koondhinnang hüljestele	0	Mõju puudub	Mõju puudub	Mõju puudub

Tabel 5.2 Koondtabel ehitusperioodi kiiritava impulsmüra modelleerimistulemustega ning nende modelleerimistulemuste põhjal keskkonnamõju hindamine.

Parameeter/näitaja	Alternatiiv 0	Ehitusperiood, 12 m läbimõõduga vaiad		
		Vibrorammimine	Puurimine	Rammimine
Ajutine kuuldeläve tõus rähmel, ohutsooni raadius, m	0	40	0	140
Ajutine kuuldeläve tõus hüljestel, ohutsooni raadius, m	0	1900	40	700
Püsiv kuuldeläve tõus hüljestel, ohutsooni raadius, m	0	150	0	50
Koondhinnang räimele	0	Väheoluline negatiivne mõju	Mõju puudub	Väheoluline negatiivne mõju
Koondhinnang hüljestele	0	Väheoluline negatiivne mõju*	Väheoluline negatiivne mõju	Väheoluline negatiivne mõju*

Parameeter/näitaja	Alternatiiv 0	Ehitusperiood, 18 m läbimõõduga vaiad		
		Vibrorammimine	Puurimine	Rammimine
Ajutine kuuldeläve tõus rähmel, ohutsooni raadius, m	0	100	0	500
Ajutine kuuldeläve tõus hüljestel, ohutsooni raadius, m	0	3400	50	2000
Püsiv kuuldeläve tõus hüljestel, ohutsooni raadius, m	0	320	0	200
Koondhinnang räimele	0	Väheoluline negatiivne mõju	Mõju puudub	Väheoluline negatiivne mõju
Koondhinnang hüljestele	0	Väheoluline negatiivne mõju*	Väheoluline negatiivne mõju	Väheoluline negatiivne mõju*

* leevendusmeetmete rakendamisel on mõju väheoluline negatiivne, muidu on oluline negatiivne mõju.

0 - mõju puudub
-1 väheoluline negatiivne mõju
-2 oluline negatiivne mõju

Modelleerimistulemused näitasid, et ehitusperioodil:

1. Kõige väiksema keskkonnamõjuga vundamendi ehituse stsenaarium kiiratava heli poolest oleks gravitatsioonivundamendi kasutamine, millele järgneb puurimine.
2. Vibrorammimisel ja löökrammimisel on tõenäoline, et ohutsoonis olevad hülged võivad ehitustööde ajal saada ajutise või püsiva kuuldeläve tõusu. Leevendusmeetmed lubavad püsiva kuuldeläve tõusu riski oluliselt vähendada ning siis mõju hüljestele võib pidada väheoluliselt negatiivseks.
3. Vibrorammimisel ja löökrammimisel on mõju räimele väheoluline negatiivne, puurimisel mõju puudub.

Modelleerimistulemused näitasid, et kasutusperioodil:

1. Erinevate tuulepargi alternatiivide kasutusperioodi tekitatava müra modelleerimistulemused näitavad, et alternatiivid 1 ja 2 on sarnase mõjuga.
2. Vastavalt kehtestatud kriteeriumidele ei ole räime populatsioon ohustatud, kuna hindamisala keskmise helitase mediaanväärtus 125 Hz juures on alla 122 dB.
3. Püstitatud kriteeriumide järgi ei ole hüljeste asurkonnad ohustatud kuna hindamisala keskmise helitase mediaanväärtus 500 Hz juures on alla 110 dB. Mõju hüljestele on märgatav vaid ehitusperioodil, nagu on näidanud ka mõned teised varasemad uuringud [Russel 2016].
4. Kokkuvõtteks võib hinnata tuuleparkide kasutusperioodi tekitatud ümbrusmüra taseme tõusu mõju hüljestele ja räimele mitteoluliseks.

Aruande tulemuste kontrollimiseks on soovitatav teha veealuse ümbrusmüra mõõtmisi tuulepargi ehitamise igas etapis ja ka kasutusperioodil:

1. Ümbrusmüra taset peab mõõtma ajal, kui ehitustöid ei toimu. Mõõtmiseks sobib asukoht, mis esindab võimalikult hästi tööde piirkonnas esinevat ümbrusmüra.
2. Helilevi mudeli õigsuse kontrolliks peab tööde piirkonnas läbi viima lühiajalise helirõhutasemete mõõtmise. Heliallikaks sobib paremini kontrollitava intensiivsusega impulssmüra allikas. Lisaks peab mõõtma vaiade vibrorammimisel ja puurimisel tekkivat helitaset. Mõlemale mõõtmisele kehtivad järgnevad nõuded [Klauson 2023]:
 - Mõõtmised peab sooritama mõõtepunktides, mis asuvad kontrollitava allikatasemega heliallikast kaugustel 750 m, 1000 m, 1500 m ja 2000 m. Soovituslik on lisaks paigutada mõõteseadmed 3 - 5 km ja 5 - 10 km kaugusele heliallikast.
 - Mõõtmispunktid peavad paiknema piki sirget, mis algab heliallika asukohas eemaldudes radiaalselt. Mõõtmispunktide horisontaalse kauguse hälve antud sirgest ei tohi ületada 5%.
 - Tegelike mõõtmispunktide asukohtade kaugused peab määrama 5% mõõtetäpsusega.
 - Igas mõõtepunktis võtavad helisid vastu kaks hüdrofoni, mis paiknevad 50% ja 75% vee sügavusest (kaugus merepinnast merepõhja). Hüdrofonide asukohad valitakse kõige madalamas vees paikneva mõõtmispunkti järgi. Näiteks, kui madalaimas punktis on vee sügavus 40 m, siis peavad hüdrofonid paiknema 20 ja 30 m sügavusel. Hüdrofonide kaugus merepinnast peab olema määratud vähemalt täpsusega 5%.
 - Mõõtmiste ajal peab määrama piirkonnas ka helikiiruste profiili vähemalt üks kord nelja tunni jooksul.

6. KIRJANDUS

1. [ISO 18405:2020] ISO 18405:2020, Allveekustika. Terminoloogia.
2. [Roheplaan 2022] Saare-Liivi meretuulepargi keskkonnamõju hindamine. KMH programm nõuetele vastavaks tunnistamisele 14.11.2022.
3. [Sauthall 2000] Sauthall, B.L., Schusterman, R.J. and Kastak, D., 2000. Masking in three pinnipeds: underwater, low-frequency critical ratios. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108(3), pp.1322-1326.
4. [Sauthall 2019] Sauthall, B.L., Finneran, J.J., Reichmuth, C., Nachtigall, P.E., Ketten, D.R., Bowles, A.E., Ellison, W.T., Nowacek, D.P. and Tyack, P.L., 2019. Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations for residual hearing effects. *Aquatic Mammals*, 45(2), pp.125-232.
5. [HELCOM 2016] HELCOM, Noise Sensitivity of Animals in the Baltic Sea. Baltic Boost. 2016.
6. [Götz 2010] Götz, Thomas, and Vincent M. Janik. 2010. "Aversiveness of Sounds in Phocid Seals: Psycho-Physiological Factors, Learning Processes and Motivation." *Journal of Experimental Biology* 213 (9): 1536–48. <https://doi.org/10.1242/jeb.035535>.
7. [Kastelein 2006] Kastelein, Ronald A., Sander van der Heul, Willem C. Verboom, Rob J.V. Triesscheijn, and Nancy V. Jennings. 2006. "The Influence of Underwater Data Transmission Sounds on the Displacement Behaviour of Captive Harbour Seals (*Phoca Vitulina*)." *Marine Environmental Research* 61 (1): 19–39. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2005.04.001>.
8. [Klauson 2023] Klauson, A. Mustonen, M. Veealuse inimtekkilise impulssmüra normide ja piirangute uuring. Aruanne. Keskkonnaministeerium, 2023.
9. [Thomsen 2009] Thomsen F. et al. (2009) A generic investigation into noise profiles of marine dredging in relation to the acoustic sensitivity of the marine fauna in UK waters: PHASE 1 Scoping and review of key issues.
10. [Sierra-Flores 2015] Sierra-Flores, R., Attack, T., Migaud, H. and Davie, A., 2015. Stress response to anthropogenic noise in Atlantic cod *Gadus morhua* L. *Aquacultural engineering*, 67, pp.67-76.
11. [Wysocki 2005] Wysocki, L.E. and Ladich, F., 2005. Hearing in fishes under noise conditions. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 6(1), pp.28-36.
12. [Slabbekoorn 2010] Slabbekoorn, H., Bouton, N., van Opzeeland, I., Coers, A., ten Cate, C. and Popper, A.N., 2010. A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish. *Trends in ecology & evolution*, 25(7), pp.419-427.
13. [Blaxter and Hoss, 1981] Blaxter, J.H.S., Hoss, D.E., 1981. Startle response in herring: the effect of sound stimulus frequency, size of fish, and selective interference with the acoustico-lateralis system. *Journal of the Marine Biology Association UK* 61, 871–879.
14. [Kastelein 2008] Kastelein, Ronald A., Sander van der Heul, Willem C. Verboom, Nancy Jennings, Jan van der Veen, and Dick de Haan. 2008. "Startle Response of Captive North Sea Fish Species to Underwater Tones between 0.1 and 64kHz." *Marine Environmental Research* 65 (5): 369–77. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2008.01.001>.
15. [Aps 2019] Robert Aps, Ville Karvinen, Marco Nurmi, Riku Varjopuro 2019. Pelagic fisheries of Baltic herring and sprat and Maritime Spatial Planning. Plan4Blue report: Deliverable D.T4.5.1.
16. [Olsen 1971] Olsen, K., 1971. Influence of vessel noise on behaviour of herring. *Modern fishing gear of the world*, 3, pp.91-294.
17. [Robinson 2015] Stephen P. Robinson, Dredging sound measurements, WODA Workshop, Paris, 26th March 2015.
18. [Ramboll 2016] NORD STREAM 2, UNDERWATER NOISE MODELLING, FINLAND. Ramboll, 2016.

19. [McCrodan ja Hannay 2013] McCrodan, A. and Hannay, D. 2013. Modelling of Underwater Noise for Pacific NorthWest LNG Marine Construction and Shipping Scenarios Marine Construction and Shipping Scenarios. JASCO Document 00669, Version 2.14. Technical report by JASCO Applied Sciences.
20. [Van Oord] Leaflet cable-laying vessel Nexus, Van Oord.
21. [Bellmann 2020] Bellmann M. A., Brinkmann J., May A., Wendt T., Gerlach S. & Remmers P. (2020) Underwater noise during the impulse pile-driving procedure: Influencing factors on pile-driving noise and technical possibilities to comply with noise mitigation values. Supported by the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)), FKZ UM16 881500. Commissioned and managed by the Federal Maritime and Hydrographic Agency (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)), Order No. 10036866. Edited by the itap GmbH.
22. [TG Noise 2022] Setting of EU Threshold Values for continuous underwater sound. Recommendations from the Technical Group on Underwater Noise (TG Noise). Deliverable 4 of the work programme of TG Noise 2022.
23. [Tougaard 2020] Tougaard, Jakob. 2020. "How Loud Is the Underwater Noise from Operating Offshore Wind Turbines?" J. Acoust. Soc. Am., 9.
24. [Russell 2016] Russell, Debbie J.F., Gordon D. Hastie, David Thompson, Vincent M. Janik, Philip S. Hammond, Lindesay A.S. Scott-Hayward, Jason Matthiopoulos, Esther L. Jones, and Bernie J. McConnell. "Avoidance of Wind Farms by Harbour Seals Is Limited to Pile Driving Activities." Edited by Steve Votier. Journal of Applied Ecology 53, no. 6 (December 2016): 1642–52.
<https://doi.org/10.1111/1365-2664.12678>.