

TAL TECH



Rahastanud Euroopa Liit
NextGenerationEU



Eesti
tuleviku heaks

Metoodika mõju hindamiseks hüdrodünaamikale ja vee omadustele (sh. vee kvaliteedile) meretuuleparkide rajamisel

Koostatud kliimaministri 2.11.2023 käskkirjaga nr 1-2/23/483 "**Toetuse andmise tingimuste kehtestamine taaste- ja vastupidavuskava reformi 8.1 „Taastuenergia kasutuselevõtu kiirendamine“ elluviimiseks**" eraldatud vahendite toetusel

Tellijä: Keskkonnaamet
Versioon: 10.06.2025

Sisukord

1. Taust	4
1.1. Ülevaade looduslikest protsessidest	4
1.2. Ülevaade tuuleparkide paigaldus- ja kasutusaegsetest potentsiaalsetest mõjudest.....	6
2. Uuringud tuulepargi rajamisega seotud mõju hindamiseks.....	8
2.1. Merepõhja häiringutega seotud heljumi leviku, ohtlike ainete ja eralduva fosfori mõju uuring	8
2.1.1. Uuringu vajalikkuse põhjendus ja uuritavad parameetrid	8
2.1.2. Uuringu läbiviija kvalifikatsioon	10
2.1.3. Uuringu metoodika.....	11
3. Uuringud tuulepargi mõju hindamiseks selle opereerimise perioodil	16
3.1. Hüdrodünaamika uuring	16
3.1.1. Uuringu vajalikkuse põhjendus ja uuritavad parameetrid.	16
3.1.2. Uuringu läbiviija kvalifikatsioon.....	17
3.1.3. Uuringu metoodika.....	17
3.2. Vee omaduste, sh. veekvaliteedi uuring	20
3.2.1. Uuringu vajalikkuse põhjendus ja uuritavad parameetrid	20
3.2.2. Uuringu läbiviija kvalifikatsioon	22
3.2.3. Uuringu metoodika.....	23
4. Seire, sh. järelseire nõuded	25
4.1. Ehitusaegne heljumi leviku seire.....	25
4.1.1. Seire vajalikkuse põhjendus ja mõõdetavad parameetrid	25
4.1.2. Seire läbiviija kvalifikatsioon	27
4.1.3. Seire metoodika	27
4.2. Hüdrodünaamika seire	31
4.2.1. Seire vajalikkuse põhjendus ja mõõdetavad parameetrid.....	31
4.2.2. Seire läbiviija kvalifikatsioon.	31
4.2.3. Seire metoodika	31
4.3. Vee omaduste, sh. veekvaliteedi seire	33
4.3.1. Seire vajalikkuse põhjendus ja uuritavad parameetrid	33
4.3.2. Seire läbiviija kvalifikatsioon.....	33
4.3.3. Seire metoodika	34
Kasutatud kirjandus	35

1. Taust

1.1. Ülevaade looduslikest protsessidest

Läänemere veesamba vertikaalne struktuur on keeruline ja mõjutatud mitmetest teguritest. Struktuuri mõjutavad soojusvahetus atmosfääriga, magevee sissevoolud, advektsioon ja vertikaalne segunemine (Leppäranta and Myrberg, 2009). Stratifikatsioon on tugevaim soojal perioodil, kui esineb termokliin. Termokliini all on soolasem ja külmem vahekiht, mis moodustub talvel. Vahekihi all on ca 50-70 m sügavusel asuv sooluse hüppekiht, ehk halokliin, mis eraldab vahekihist süvakihi. Viimane on vahekihist soolasem ja tavaliselt ka veidi soojem. Sügisel termokliin nõrgeneb ja liigub sügavamale. Talvel seguneb veesammas konvektiivselt pinnalt halokliinini ning kevade saabudes moodustub uuesti termokliin. Sõltuvalt piirkonnast võib kevadine kihistumine esmalt tekkida tänu magedama vee levikule (Liblik et al., 2020; Stipa et al., 1999; Stipa and Vepsäläinen, 2002). Termokliinis ja halokliinis tihedus sügavuse suurenedes kasvab, st. tegemist tiheduse hüppekihtide ehk püknokliinidega. Püknokliinidega eraldatud ülemine kiht, külm vahekiht ja süvakiht on väga erinevate vee omadustega. Lisaks temperatuurile, soolusele ja tihedusele on kihtides suured erinevused toitainetes ja muudes näitajates nagu nt. hapniku või toitainete sisaldus. Sõltuvalt hüdrodünaamilistest tingimustest võivad kliinid olla kaldu ja nende sügavus võib muutuda, st. et ka kolme eriomadustega veekihi sügavus varieerub. Näiteks Soome lahes on näidatud, et ülemise kihi paksus võib rannikulähedases konvergentsi tsoonis olla üle 40 m (Liblik; Lips, 2017). Soodsate tuultega võib rannanõlval termokliin ka pinnale tõusta, st. võib tekkida apvelling. Sellisel juhul võib arvestatav hulk vahekihi vett jõuda mere ülemisse kihti. Ka halokliini kõrgus muutub arvestaval määral (Elken et al., 2006). Suuremad kõikumised on rannanõlval (Liblik et al., 2022) ja terves Soome lahes (Liblik et al., 2013; Lips et al., 2017). Halokliinialune süvakihi vesi võib küll tõusta ja vajuda mitmekümne meetri ulatuses, kuid pinnakihti see vesi ei jõua. Permanentset halokliini Liivi lahes ei esine, mis tähendab, et talvisel perioodil seguneb seal vesi põhjani.

Vertikaalne ainevahetus kihtide vahel defineerib suuresti meresüsteemi ökoloogilised karakteristikud. Talvel aktiivset primaarproduksiooni ei esine ning enne sesoonse stratifikatsiooni teket on mere ülakihis saadaval toitaineid, sh. lämmastikku ja fosforit, mis on Läänemeres primaarproduksiooni limiteerivad toitained. Kevadeti, stratifikatsiooni tekkides, tarbitakse primarproduksiooni käigus ülemises kihis toitaineid, tekib kevadõitseng. Õitseng

kestab kuni limiteeriva toitainete lõppemiseni, milleks sõltuvalt piirkonnast on lämmastik või fosfor. Seejärel kontrollib primaarproduktiooni avamerel suuresti vertikaalse segunemise käigus ülemisse kihti saabuv toitainete voog. Rannikumeres, jõesuudmete lähedal saabub ülemisse kihti täiendavaid toitaineid jõgedest. Ka apvellingu käigus võib ülemisse kihti tõusta suurel hulgal toitaineid. Näiteks on näidatud, et Soome lahes tõusis massiivse apvellingu sündmuse käigus sama palju fosfaate, kui sinna saabub kuu jooksul jõgedest (Lips et al., 2009).

Vee läbipaistvus on ökoloogiliselt oluline parameeter, mis määrab, kui sügavale valgus meres tungib. See mõjutab fotosünteesi protsessi, mis on kriitiline planktoni ja põhjataimestiku kasvu seisukohalt. Vee läbipaistvust mõjutavad peamiselt planktoni kontsentratsioon ja suspendeeritud osakeste (liiv, muda orgaanika) hulk vees. Vee läbipaistvus on üks eutrofeerumise indikaatorparameetreid ning selle vähenemine viitab merekeskkonna seisundi halvenemisele. Vee läbipaistvusel on ka arvestav looduslik varieeruvus.

Läänemere hoovuste peamine käivitaja on tuul, kuid panustavad ka tiheduse ja veetaseme gradiendid. Tuul tekitab hoovuseid läbi veepinnale avaldatava nihkepinge, st. tekivad triivhoovused ja tuulega seotud transport. Triivhoovused tekitavad omakorda veetaseme gradienti, mis põhjustavad geostroofilisi hoovuseid. Näiteks tekib domineerivate edelatuultega Läänemere avaosa idarannikul kõrgem veetase, mille tagajärjel tekib geostroofiline hoovus suunaga piki rannikut põhja (Liblik et al., 2022). Sõltuvalt stratifikatsioonist esineb Läänemeres ühe-, kahe- või kolmekihiline hoovuste struktuur (Suhhova et al., 2018). Hoovused transpordivad erinevate omadustega veemasse, aga ka reostust, nt. inimtegevuse käigus merre sattunud toitaineid, õli või prügi. Keskmised hoovuskiirused jäävad suurusjärku ca 10 cm/s (Liblik et al., 2022; Suhhova, 2018). Avamerel hoovuseid kiirusega üle 1 m/s reeglina ei esine, kuid väinades võib tugevate tormide korral nii tugevat hoovust esineda (Otsmann et al., 1997).

Eesti merealade lainetus sõltub tuule suunast, kiirusest, lainete hoovõtumaast ja sügavusest. Kuna hoovõtumaa on Läänemeres (võrreldes avaookeaniga) lühike, siis on jõuavad lained küllastuseni suhteliselt kiiresti ning tuule vaibudes ka laineenergia väheneb kiirelt. Keskmise oluline laine kõrgus (ingl. k. significant wave height) Soome lahe suudmes ja Läänemere avaosas ületab 1 m; Soome lahe siseosas, Liivi lahes ja Väinameres jääb alla 1 m (Tuomi et al., 2010). Maksimaalne oluline laine kõrgus Läänemere avaosas võib ületada 8 m, Soome lahes kuni 5 m (Tuomi et al., 2010).

1.2. Ülevaade tuuleparkide paigaldus- ja kasutusaegsetest potentsiaalsetest mõjudest

Tuulikute paigaldamisega süvistatakse ja liigutatakse merepõhja materjali. Liigutatava sette maht sõltub vundamendi tüübist. Näiteks gravitatsiooni vundamendi puhul on Loode-Eesti ja Liivi lahe keskkonnamõju hindamistes (KMH) lähtunud eeldusest, et liigutatakse kuni 10 000 m³ ühe tuuliku kohta. Süvendamisel tekkiva heljumi potentsiaalsed keskkonnamõjud on mitmesugused ja võivad mõjutada nii vee kvaliteeti kui ka mereelustikku. Heljum võib põhjustada vee hägustumist, mis vähendab valguse kättesaadavust, mis omakorda mõjutab vetikate kasvu. See omakorda võib kahjustada mereloomastikku, kalastikku, linnustikku. Samuti võib heljum settida kalade koelmualadele. Lisaks võib süvendamisel veesambasse paiskuda varem settinud saasteaineid ja toitaineid. Toitainete lisandumine veesamba aineringsse võib põhjustada eutrofeerumist ja hapnikupuudust veekogu põhjakihis. See võib omakorda mõjutada kalade ja teiste veeloomade elutingimusi ning vähendada bioloogilist mitmekesisust. Sarnased potentsiaalsed mõjud on kaablite süvistamisega tekkival heljumil. Eesti merealadel on heljumi levikut modelleeritud ja seiratud peamiselt seoses sadamate süvendamisega ning materjali merre kaadamisega. Hüdrodünaamikale arvestatavat ehitusaegset mõju tuuleparkide rajamisel ei ole.

Tuulegeneraatorite käitamine merekeskkonnas võib mõjutada hüdrodünaamilisi protsesse. Need muudatused võivad olla lokaliseeritud vahetult tuulegeneraatori ümber ja/või levida kaugemale tuuleparkide piiridest (Christiansen et al., 2022; Daewel et al., 2022; Dorrell et al., 2022; Schultze et al., 2020). Tuulegeneraatorite poolt atmosfäärist eemaldatud kineetilise energia eemaldamine viib keskmise tuulekiiruse vähenemiseni generaatorite tuulealusel küljel, luues varjutusefekti (Akhtar et al., 2022).

Arvestades varjutusalal vähenenud tuulekiirusi, võib tuule poolt avaldatav pinge mere pinnale samuti väheneda. Viimase tõttu väheneb tuulehoovuse kiirus ja vertikaalne segunemine. Hoovuste nõrgenemine vähendab horisontaalset veevahetust piirkonnas. Vertikaalse segunemise nõrgenemine vähendab vertikaalset ainevahetust ning võib suurendada

stratifikatsiooni tugevust. Mõju tugevus sõltub tuulikute karakteristikutest, nende arvust, meteoroloogilistest tingimustest ning mere stratifikatsioonist ja muudest karakteristikutest.

Vees olevatel tuulikukonstruksioonidel on varjutusefektile vastupidine mõju. Konstruksioonid põhjustavad allavoolu keeriseid ning suurendavad vertikaalset segunemist. Uuringutes on saadud tulemuseks, et mõlemad vertikaalsele segunemisele vastastikku mõjuvad protsessid on olulised. On näidatud, et merre pandud struktuurid põhjustavad lokaalseid keeriseid, suurendavad vertikaalset segunemist ja transporti ning mõjutavad fütoplanktonit (produksiooni), millega omakorda kaasneb potentsiaalselt mõju kogu mere ökosüsteemile (Carpenter et al., 2016; Floeter et al., 2017; Rennau et al., 2012). Teisalt on ka leitud, et tuule kiiruse vähenemine põhjustab muutuseid hoovuste struktuuris, vähendab vertikaalset segunemist ja aitab kaasa hapnikupuuduse tekkele (Daewel et al., 2022). Oluline on märkida, et enamus tuuleparkide uuringuid on tehtud Põhjameres, mis on hüdrodünaamiliselt aktiivsem piirkond, kus on lisaks tuule tekitatud hoovustele looded (tõusud ja mõõnad). Kuna loodete roll Läänemere dünaamikas on väga tagasihoidlik ja peamine hoovuste käivitaja on otseselt või kaudselt läbi veetaseme gradientide või basseini omavõnkumiste tekitamise tuul, siis on tuule suhteline panus hoovuste kineetilisse energiasse ja ka vertikaalsesse segunemisse meie merealal võrreldes Põhjamerega suurem.

Varjutusefekt mõjutab lainetust. Mõjualas laineenergia väheneb, mis on tekitanud muret kohalike surfarite seas. Samuti võib laineenergia muutumine mõjutada veesamba vertikaalset segunemist ning settetransporti ja rannikuprotsesse üldisemalt. Lokaalselt on lainetus mõjutatud ka tuulikute vahetus läheduses.

2. Uuringud tuulepargi rajamisega seotud mõju hindamiseks

2.1. Merepõhja häiringutega seotud heljumi leviku, ohtlike ainete ja eralduva fosfori mõju uuring

2.1.1. Uuringu vajalikkuse põhjendus ja uuritavad parameetrid

Kui tuulikute või kaablite paigaldamisega süvistatakse, liigutatakse või kaadatakse merepõhja materjali, siis kaasneb sellega potentsiaalselt oluline keskkonnamõju. Keskkonnamõju hindamise ja keskkonnajuhtimissüsteemi seaduse järgi on olulise keskkonnamõjuga tegevus süvendamine mahus alates 10 000 m³. Sõltuvalt süvendustehnoloogiast ja setete lõimisest võib veesambasse sattuda 5-15% süvendatavast materjalist (Spearman et al., 2011). Tekkiv heljum võib hoovuste toel levida algasukohast eemale, kusjuures leviku kaugus sõltub peamiselt lõimisest ja piirkonna hüdrodünaamilistest karakteristikutest. Eesti merealadel toimuvate süvendustööde seire on näidanud levikuulatust suurusjärgus mõned kilomeetrid (Liblik and Lips, 2011b; Raag et al., 2014; Sipelgas et al., 2006). Soodsatel tingimustel võib heljum algasukohast jõuda veelgi kaugemale (Duclos, 2012).

Süvendamisel tekkiv heljum võib mõjutada nii vee kvaliteeti kui ka mereelustikku. Heljum vähendab vee läbipaistvust, mis omakorda vähendab fotosünteesiks piisava valgusega kihi ehk eufootse kihi paksust. Samuti võib nähtavuse vähenemine põhjustada röövkalade ja merelindude jahipidamise edukust; mõjutada kalade rännet, liikumisteedondi; mõjutada pelaagiliste kalamarjade ujuvust; mõjutada põhjaloomastikku ja -taimestikku (Bellas et al., 2007; Birklund and Wijisman, 2005; Westerberg et al., 1996; Yang et al., 2019).

Süvendamisel võivad veesambasse jõuda varem settinud ohtlikud ained nagu raskmetallid või naftasaadused. Näiteks võib tuua hiljuti Miinisadama süvendusel tekkinud reostuse (<https://www.err.ee/1609610393/pohja-tallinna-mererandades-on-olireostus>). Kuigi suurimad ohtlike ainete kontsentratsioonid leiduvad tõenäoliselt sadamate või laevaremonditehaste lähistel (Roots and Roose, 2013), võib kõrgeenenud sisaldusi setetes leida ka avamerel (Kuprijanov et al., 2021).

Süvendamisel võib eralduda settest veesambasse arvestatavas koguses toitaineid, eriti fosforit, mis võivad hoogustada eutrofeerumist ning potentsiaalselt põhjustada intensiivsemat primaarproduksiooni mere ülemises kihis ja suuremat hapniku tarbimist põhjalähedases kihis (Lednicka et al., 2022). Kõrgemad fosforisisaldused esinevad orgaanikarikastes mudastes setetes, akumulatsioonialadel (Ausmeel, 2022; Eesti Geoloogiateenistus, 2022; TTÜ meresüsteemide instituut, 2021).

Uuringus käsitletavat parameetrid saab grupeerida kaheks: (1) otsest keskkonnamõju kirjeldavad parameetrid, (2) täiendavad parameetrid, mis võimaldavad kirjeldada mõjutatavat keskkonda, eraldada looduslikku varieeruvust tuuleparkide mõjust ja vähendada määramatust. Otsese keskkonnamõju kirjeldavate parameetrite nimekiri sõltub konkreetsest arendustegevusest meres. Võimalike parameetrite hulka kuuluvad:

- Heljumi sisaldus ja hägusus;
- Ohtlike ainete (sh. raskemmetallid, naftasaadused, TBT) sisaldus vees;
- Toitainete (NO_3 , PO_4 , NH_4 , üldlämmastiku ja üldfosfori) sisaldus vees;
- Klorofüll *a* sisaldus vees;
- Lahustunud hapniku sisaldus vees;

Mõõtmisi, proovide kogumist ja analüüse tuleb teostada atesteeritud proovivõtjate poolt ja kasutades akrediteeritud meetodeid, mis vastavad HELCOM juhendmaterjalidele (kui need on olemas, toodud LISAs 1). Hägusus ja heljumi sisaldus on vajalikud süvendamisel/kaadamisel tekkiva settematerjali leviku hindamiseks ja loodusliku fooni kirjeldamiseks. Ohtlike ainete leviku hindamine on põhjendatud üksnes siis, kui settematerjal on reostunud. Toitainete, sh üldainete, klorofüll *a*, lahustunud hapniku sisalduse käsitlemine võivad olla vajalikud settest vabaneva fosfori mõju hindamisel vee kvaliteedile.

Uuringu teostamiseks vajalike täiendavate parameetrite hulka kuuluvad:

- Batümeetria ja sügavusinfo;
- Setete lõimimine;
- Ohtlike ainete sisaldus setetes;
- Fosfori sisaldus setetes, sh. mobiilse fosfori osakaal;
- Hoovuskiiruse komponendid;

- Temperatuuri ja soolsuse jaotused;
- Meteoroloogilised parameetrid (tuule suund ja kiirus; soojusvoo komponendid);
- Veetase;
- Lainetuse parameetrid;

Batümeetria ja sügavusinfo on vajalikud nii numbrilise mudeli sisendi loomiseks kui ka uuritava piirkonna geomorfoloogiast arusaamiseks. Erinevate batümeetriliste objektide ja iseärasuste (madalikud, kanalid jms.) mõju hoovusväljale ja üldisele tsirkulatsioonile on oluline ehk heljumi ja setete võimalik transport veesambas sõltub oluliselt ka uuritava piirkonna geoloogiast.

Süvendatava/kaadatava sette lõimis ja süvendus/kaadamismahu ajalise käigu info (planeeritud arendustegevused) on vajalikud süvendusest tuleva koormuse kirjeldamiseks mudelis. Setetes sisalduva ohtlike ainete ja fosfori sisaldused on vajalikud koormuse kirjeldamiseks mudelis. Hoovuskiiruse komponendid on vajalikud, et modelleerida heljumi levikut ning vajadusel ka mudeli verifitseerimiseks ja kalibreerimiseks. Temperatuuri ja soolsuse jaotused on vajalikud nii hoovuste arvutamiseks kui ka hüdrodünaamika mudeli tihedusvälja valideerimiseks. Meteoroloogilised parameetrid on vajalikud atmosfääri mõju kirjeldamiseks mudelis. Veetaseme andmed võivad olla vajalikud avatud radade kirjeldamiseks mudelis. Lainetuse parameetrid võivad olla vajalikud resuspensiooni sündmuste kirjeldamiseks.

2.1.2. Uuringu läbiviija kvalifikatsioon

Uuringu läbiviijal peab olema meeskonnas magistr kraadiga ekspert, mis on omandatud okeanograafia või merekeskkonnaga seotud erialal. Uuringu läbiviijal või vähemalt ühel eksperdil meeskonnas peab olema vastava uuringu läbi viimise kogemus heakskiidetud KMH protsessis osalemise läbi ja/või teadustöö kogemus (st. ekspert peab olema olnud vähemalt ühe ETIS 1.1 klassifikaatori teadusartikli autor). Proovid kogutakse atesteeritud proovivõtjate poolt ja analüüsid teostatakse nendeks akrediteeritud laboris.

2.1.3. Uuringu meetodika

Uuring jaotub kolme põhisuunda: heljumi levik, ohtlike ainete levik, fosfori eraldumine veesambasse. Heljumi sisaldus rannikust eemal on reeglina vaid suurusjärgus 1-2 mg/l. Süvendustööde intensiivsus sõltub paljudest asjaoludest, nagu mere sügavus ja setete lõimimine, ilmaolud jm. Päevased süvendusmahud võivad ulatuda üle 10 000 m³ (Liblik ja Lips, 2011). Ainete transport ja selle transpordi mastaabid on Läänemeres paljuski defineeritud mesomastaapsete protsessidega nagu nt. rannikuhoovused, keerised, apvelling ja daunvellingud. Võttes arvesse Läänemere keeriste mõõtmeid (Vortmeyer-Kley et al., 2019) ja eeldades, et süvendusmahust 10% pääseb veesambasse ja jaotub keerises ühtlaselt, saame, et 25 000 m³ süvendusmahu puhul oleks heljumi sisaldus selles veemassis 10 mg/l, st. ca kümnekordne võrreldes loodusliku fooniga avamerel. Tegelik heljumi jaotus looduses on märksa ebahomogeenne, st. veemassi mingites osades esinevad ka tunduvalt kõrgemad väärtused. Heljumi sisalduses esineb arvestatav looduslik varieeruvus, mis on kõrgem rannikutsoonis ning sügavatel aladel ka põhjalähedases kihis. Harva võivad ka nt. avamerel põhjalähedased heljumi sisalduse väärtused ulatuda üle 20 mg/l või isegi kuni 40 mg/l (Tallinna Tehnikaülikool, 2023). Sellise keskmise sisalduseni (40 mg/l) viiks keerise mastaapi veemassis süvendamine mahus 100 000 m³. Praktikas tõenäoliselt keeriste ajalist mastaapi arvestades sellist mahtu ära nii ei jõuta süvendada, et see ühte keerissesse jõuaks ning mõju hajub ajas, kuid kestab sellevõrra kauem. Võtame edaspidi nimetatud mahud (25 000 m³ ja 100 000 m³) tinglikeks piirideks heljumi leviku uuringu põhjalikkuse määratlemisel.

Heljumi leviku uuringu põhjalikkus sõltub süvendatava materjali mahust, et proportsionaalselt tegevuse potentsiaalsele mõjule vähendada uuringus antavate hinnangute määramatust:

- Kui süvendusmaht jääb alla 10 000 m³ ja ei esine olulist negatiivset mõju soodustavaid tingimusi (madal ja/või suletud mereala; looduskaitseala; kõrged üldfosfori kontsentratsioonid (>1000 mg/kg sette kuivmassis), siis ei ole heljumi leviku uuring vajalik.
- Süvendus- ja kaadamistöödel väljaspool hoiualasid ja reostumata sette korral, kogumahu kuni 25 000 m³ võib kaaluda heljumi levikule hinnangu andmist eksperthinnangu abil, st. ilma spetsiaalset modelleerimist teostamata.
- Kogumahu puhul üle 25 000 m³ tuleks teostada heljumi leviku modelleerimine.

- Kogumahu puhul üle 100 000 m³ tuleks simulatsiooni valideerida kohapealsete hoovuse- ja heljumi sisalduse (või hägususe) mõõtmistega.

Madalmeres (sügavus ≤ 15 m) tuleks lähtuda väiksematest mahtudest:

- Süvendus- ja kaadamistöodel väljaspool hoiualasid ja reostumata sette korral, kogumahu kuni 10 000 m³ võib kaaluda heljumi levikule hinnangu andmist eksperthinnangu abil, st. ilma spetsiaalset modelleerimist teostamata.
- Kogumahu puhul üle 10 000 m³ tuleks teostada heljumi leviku modelleerimine.
- Kogumahu puhul üle 25 000 m³ tuleks simulatsiooni valideerida kohapealsete hoovuse- ja heljumi sisalduse (või hägususe) mõõtmistega.

Nii eksperthinnangu kui modelleerimise puhul tuleb töödega tekitatavat heljumi levikut ja settimist võrrelda piirkonna heljumi kontsentratsiooni ja settimise taustafooniga, st. loodusliku ja muudest inimtegevustest tuleneva heljumi kontsentratsioonide ja settimisega. Kui looduslikku kontsentratsioonile ja settimisele ei ole olemasolevate teadmiste põhjal võimalik hinnangut anda, tuleb teostada kohapealsed mõõtmised hinnangu andmiseks.

Reostunud sette puhul tuleb teostada heljumi leviku modelleerimine ning selle põhjal anda hinnang vastava ohtliku aine levikule või modelleerida ka ohtliku aine levikut.

Modelleerimine tuleb teostada kolmemõõtmelise numbrilise hüdrodünaamika mudeliga, mida on varasemalt Läänemere või mõne muu rannikumere uuringutes kasutatud. Lihtsustamata võrranditel põhinevas meremudelites peaks olema arvestatud järgnevate mõjudega: inertsiaal jõududega (Maa pöörlemine), rõhujõududega (veetaseme gradiendid), gravitatsioonijõududega (tiheduse gradiendid), viskoosusjõududega ning väliste jõududega. Mudeli seadistuses peab arvesse võtma kohalikku batümeetriat, realistlikke temperatuuri ja soolsuse jaotuseid, atmosfääri mõju (tuul, soojusvahetus), süvendatava/kaadatava sette lõimist ning ohtlike ainete modelleerimise puhul vastavate ainete sisaldust settes. Arvutuste pikkus tuleks valida selline, et oleks võimalik teostada sesoonsete erinevuste analüüs st. simuleeritud peaks olema vähemalt üks suvi (juuni-august) ja talv (detsember-veebuar). Mudeli hoovusväli tuleks valideerida mõõtmistega.

Mudeli horisontaalne ruumisamm peab olema süvendustööde piirkonnas piisavalt väike, et representeerida heljumi leviku ruumilisi jaotusi, soovitatavalt uurimispiirkonna lähedal mitte üle 300 m. Mudel peab olema kolmemõõtmeline, vähemalt kümne vertikaalse kihiga, mis võimaldaks jälgida ka heljumi vertikaalseid jaotusi veesambas. Kui tööd eeldatav mõjupiirkond on madalmeres (piirkonnas, kus mere sügavus on < 15 m), võib kasutada ka kahekihilist mudelit, st. ilma vertikaalseid jaotusi lahendamata. Simulatsioon peab esitama heljumi levikut (ja kui kohaldub, siis ohtliku aine levikut) erinevate hüdrometeoroloogiliste tingimuste korral (st. nii sesoonselt stratifitseeritud kui ka stratifitseerimata tingimustes).

Setteproovide võtmisel ning lõimise ja ainete kontsentratsioonide määramisel (sh kontsentratsioonide normaliseerimisel) tuleb vastavalt süvendus/kaadamisala pindalale ja/või käideldava materjali mahule lähtuda HELCOMi juhiseist (HELCOM, 2024).

Settest eralduva fosfori mõju hindamisel on vaja lähtuda eralduva fosfori hulgast; selle potentsiaalsest mõjust mereala keskkonnaseisundile eutrofeerumise indikaatorite võtmes; mereala fosfori koormusest (looduslik ja muu inimtegevusega seotud koormus); hüdrodünaamilistest tingimustest ja veevahetusest. Mõju hindamise põhjalikkus peab olema proportsionaalne tegevuse potentsiaalsele mõjuga:

- Kui tegevuse käigus veesambasse sattuv mobiilse fosfori hulk jääb alla 10% võrreldes maismaalt sama ajaga (tööde perioodiga) antud rannikumere veekogumisse või HELCOM hindamisüksusesse tuleva fosfori koormusega, siis võib mõju hindamine piirduda ekspertarvamusega¹. Ekspertarvamuses tuleks arvesse võtta mõjutatavate rannikumere veekogumite ja/või avamere hindamisüksuste üldfosfori suvist sisaldust ülemises kihis ning hinnata, kas ja kui suurel alal võib settest vabanev fosfor muuta keskkonnaseisundi klassi üldfosfori indikaatori järgi halvemaks. Lisaks peaks ekspertarvamus kajastama hinnangut settest eralduva fosfori koormuse osakaalu muust inimtegevusest tuleva koormusega vastavale merealale. Kui süvendusmaht jääb alla 10 000 m³ ja ei esine olulist negatiivset mõju soodustavaid tingimusi (madal ja/või suletud mereala; looduskaitseala; kõrged üldfosfori kontsentratsioonid (>1000 mg/kg sette kuivmassis), siis ei peaks ekspertarvamus olema kohustuslik.

¹ 10% arvutada maismaakoormusest (näiteks <https://estmodel.app/en/#/> saadud hinnangutest) või hinnangulistest koormustest naaberaladelt.

- Kui eelnimetatud tingimus ei ole täidetud, siis tuleks teostada biogeokeemiline kolmemõõtmeline modelleerimine, mis on tehtud koos hüdrodünaamilise modelleerimisega ning modelleerimise tulemuste põhjal hinnata mõju toitainete jaotustele veesambas, klorofüll *a* jaotustele pinnakihis ja hapniku sisaldusele põhjakihis. Samuti tuleks modelleerimise põhjal hinnata kui suurel alal ja kui pika aja jooksul keskkonnaseisundi klass eutrofeerumise indikaatorite põhjal halveneb. Samuti peaks sellisel juhul setteproovidest määrama mobiilse fosfori kontsentratsioonid settes. Setteproovide arv peab olema kooskõlas HELCOMi vastava juhisega (HELCOM, 2024).

Biogeokeemilise (BGK) mudeli horisontaalne ruumisamm peab olema süvendustööde piirkonnas piisavalt väike, et representeerida BGK parameetrite ruumilisi jaotusi, soovitatavalt mitte üle 300 m. Mudel peab olema kolmemõõtmeline, vähemalt kümne vertikaalse kihiga. Kui tööd toimuvad madalmeres (piirkonnas, kus mere sügavus on < 15 m), võib kasutada ka kahekihilist mudelit, st. ilma vertikaalseid jaotusi lahendamata. Mõju hindamisel kasutatud BGK mudel peaks muutujatena sisaldama vähemalt nitraate ja ammooniumi ning fosfaate ja fütoplanktonit. Hapnikutingimuste muutuste hindamiseks peaks olema parameetrina kasutusel vees lahustunud hapniku kontsentratsioon. Modelleerimine peaks katma aineringi toitained-fütoplankton-zooplankton-detriit ehk üleminekud erinevatesse BGK muutujatesse. Lisaks peaks olema mudelis kirjeldatud toitainete vood veesamba ja setete vahel, sh. mobiilse fosfori vabanemine setetest madala hapnikusisalduse korral põhjalähedases veekihis.

Settest eralduva fosfori koormuse hindamiseks on vajalik kasutada realistlike andmeid sette fosfori sisalduse kohta, sh. mobiilse fraktsiooni kohta. Selleks tuleb võtta setteproovid ja määrata sealt üldfosfori sisaldus. Setteproovide võtmisel tuleb vastavalt süvendus/kaadamisala pindalale ja/või käideldava materjali mahule lähtuda HELCOMi juhiseist (HELCOM, 2024). Kui maht jääb alla $25\ 000\ m^3$, siis võib kasutada ka lähipiirkonnast (samast rannikumere veekogumist või HELCOM hindamisüksusest) pärit andmeid, kui need on saadud arendustöödega sarnases sügavusvahemikus ja sarnaste setteomadustega piirkonnast.

Heljumi modelleerimise tulemuseks on ajas muutuvad 3D väljad heljumi võimaliku leviku kohta veesambas ning heljumi settimise väljad. Võttes arvesse heljumi kontsentratsiooni loodusliku fooni ja varieeruvuse veesambas, ja loodusliku settimiskoormuse, on modelleerimise tulemuste abil võimalik hinnata, kui suur on töödega tekitatav häiring võrreldes olemasoleva

olukorraga. Võimalik on anda hinnang, kui pika aja jooksul, kui suurel alal ja mil määral ületab heljumi sisaldus vees (ja seetõttu ka vee läbipaistvus) loodusliku taseme. Samuti on võimalik hinnata, kuhu ja mis mahus materjal tõenäoliselt settib. Biogeokeemilise modelleerimise tulemuseks on ajas muutuvad 3D väljad veesamba toitainete, sh üldainete, klorofüllil ja hapniku sisalduse kohta. Võttes arvesse vastavate parameetrite looduslikku varieeruvust, on modelleerimise tulemuste põhjal võimalik hinnata häiringu tugevust, ruumilist ulatust ja ajalist kestust võrreldes olemasoleva olukorraga, sh. on võimalik hinnata, kui suurel alal ja kui pika aja jooksul väheneb eutrofeerumise indikaatorite järgi veekvaliteedi klass. Selleks võrreldakse mudelarvutustega saadud 0-alternatiivi ja arendustegevuse alternatiivide tulemusi ning võttes arvesse olemasolevat merekeskkonna seisundit (indikaatoreid) hinnatakse, kui suurel alal ja kui pika aja jooksul väheneb eutrofeerumise indikaatorite järgi veekvaliteedi klass. Kui hinnang antakse ekspertarvamusena, siis ei ole ruumilis-ajalist infot indikaatorite muutumise kohta võimalik esitada, vaid tuleb lähtuda eeldusest, et kogu veesambasse eralduv fosfor jaotub vastavas veekogumis ühtlaselt. Saadud andmete põhjal on võimalik hinnata tegevuse mõju olulisust vee heljumi sisaldusele (vee läbipaistvusele), heljumi settimisele, vee biogeokeemilistele omadustele. Oluline on, et uuring kirjeldaks ka hinnangute määramatust.

Uuring peab lähtuma maksimaalsetest mahtudest ja võrdväärselt käsitlema kõiki arendustegevuse alternatiive, sh. KMH protsessi käigus tekkivaid alternatiive (näiteks erinevad kaadamise alternatiivid).

Uuringu käigus saadud info võib olla oluline sisendmaterjal elustikule (põhjaelustik, kalastik, linnustik) avaldatava mõju hinnangutele.

3. Uuringud tuulepargi mõju hindamiseks selle opereerimise perioodil

3.1. Hüdrodünaamika uuring

3.1.1. Uuringu vajalikkuse põhjendus ja uuritavad parameetrid.

Tuulegeneraatorite käitamine merekeskkonnas võib mõjutada nii hoovuseid kui lainetust. Tuulegeneraatoritest allatuult tuulekiirus väheneb, st tekib varjutusefekt (Akhtar et al., 2022), mis omakorda tähendab, et tuule poolt avaldatav pinge mere pinnale samuti väheneb.

Tuule vähenemise tõttu väheneb tuulehoovuse kiirus ja vertikaalne segunemine. Hoovuste nõrgenemine vähendab horisontaalset veevahetust piirkonnas. Vertikaalse segunemise nõrgenemine vähendab vertikaalset ainevahetust ning võib suurendada stratifikatsiooni tugevust. Mõju tugevus sõltub tuulikute karakteristikutest, nende arvust, meteoroloogilistest tingimustest ning mere stratifikatsioonist ja muudest karakteristikutest.

Varjutusefektile vastupidine mõju on vees olevatel tuulikukonstruksioonidel. Viimased põhjustavad allavoolu keeriseid ning suurendavad vertikaalset segunemist. Vertikaalse segunemise ja hoovuste muutmine võib potentsiaalselt avaldada mõju kogu ökosüsteemile ning seda ka tuulikute asukohast eemal.

Varjutusefekt mõjutab lainetust. Mõjualas laineenergia väheneb. Samuti võib laineenergia muutumine mõjutada veesamba vertikaalset segunemist ning settetransporti ja rannikuprotsesse üldisemalt. Tuulegeneraatorite vahetus läheduses on lainetus lokaalselt samuti mehaaniliselt mõjutatud.

Uuritavate parameetrite nimekiri sõltub konkreetsest arendustegevusest. Mõju iseloomustavate parameetrite hulka kuuluvad:

- Hoovuskiiruse komponendid;
- Oluline laine kõrgus ja -periood;

Uuringu teostamiseks vajalike täiendavate parameetrite hulka kuuluvad:

- Batümeetria ja sügavusinfo;
- Temperatuuri ja soolsuse jaotused;
- Meteoroloogilised parameetrid (tuule suund ja kiirus; soojusvoo komponendid);
- Veetase.

Hoovuskiiruse komponendid ja laineparameetrid on hüdrodünaamikat kirjeldavad parameetrid. Temperatuuri ja soolsuse jaotused on vajalikud hoovuste arvutamiseks. Meteoroloogilised parameetrid on vajalikud atmosfääri mõju kirjeldamiseks mudelis. Veetaseme andmed võivad olla vajalikud avatud radade kirjeldamiseks mudelis.

3.1.2. Uuringu läbiviija kvalifikatsioon.

Uuringu läbiviijal peab olema meeskonnas magistrikraadiga ekspert, mis on omandatud okeanograafiaga seotud erialal. Uuringu läbiviijal või vähemalt ühel eksperdil meeskonnas peab olema vastava uuringu läbi viimise kogemus sarnases uuringus osalemisel ja/või teadustöö kogemus (st. ekspert peab olema olnud vähemalt ühe ETIS 1.1 klassifikaatori teadusartikli autor).

3.1.3. Uuringu metoodika

Uuringu põhjalikkus peab sõltuma tuulepargi nimivõimsusest. Väikese võimsusega parkides, ei ole hüdrodünaamiliste protsesside modelleerimine tingimata vajalik, vaid võib piirduda ekspertarvamusega, mis põhineb varasematel teadmistel.

Kui tuulepargi nimivõimsus või potentsiaalselt kumulatiivset mõju omava mitme tuulepargi nimivõimsuste summa ületab 100 MW, tuleks teostada hoovuste- ja lainetuse uuring koos modelleerimise ja kohapealsete mõõtmistega. Kas mitme tuulepargi kasutusega tekib kumulatiivne mõju või mitte, sõltub paljudest asjaoludest, kuid peamiselt tuulepargi karakteristikutest (turbiinide arv, võimsus). Väga suurte tuuleparkide puhul on *in-situ*- ja satelliidimõõtmiste abil näidatud, et varjutusefekt võib ulatuda üle 40 km kaugusele (Cañadillas et al., 2020; Djath et al., 2018; Hasager et al., 2015; Platis et al., 2018). Väiksemate arenduste

puhul, kus nimivõimsus jääb alla 100 MW, võib kumulatiivsuse hindamisel lähtuda 30 km diameetriga alast. Kui 30 km diameetriga ala sisse jäävate turbiinide nimivõimsus ületab 100 MW, tuleks eelkirjeldatud uuring teostada.

Hoovuseid ja lainetust tuleks modelleerida ilma tuulepargita ja koos tuulepargi mõjuga tuuleväljale. Tuulepargi mõju tuuleväljale tuleks arvutada teaduskirjanduses aktsepteeritud mudelitega nagu nt. Jensen (Jensen NO, 1983), Larseni (Larsen GC, 1988), Frandseni (Frandsen et al., 2006) või Bastankah and Porté-Agel (Bastankah and Porté-Agel, 2014) mudelid (nimekiri ei ole täielik).

Hoovuste modelleerimine tuleks teostada numbrilise hüdrodünaamilise mudeliga, mida on varem Läänemere või mõne muu rannikumere uuringutes kasutatud. Lihtsustamata võrranditel põhinevas meremudelites peaks olema arvestatud järgnevate mõjudega: inertsiaal jõududega (Maa pöörlemine), rõhujõududega (veetaseme gradiendid), gravitatsioonijõududega (tiheduse gradiendid), viskoosusjõududega ning väliste jõududega. Mudeli konfiguratsioon peab arvesse võtma kohalikku batümeetriat tuulepargi ümbruses, temperatuuri ja soolsuse jaotuseid, atmosfääri mõju (tuul, soojusvahetus). Mudeli horisontaalne ruumisamm peab olema piisavalt väike, et representeerida tuulikute tuleva varjutusefekti mõju, soovitatavalt mitte üle 300 m. Mudel peab olema kolmemõõtmeline, vähemalt kümne vertikaalse kihiga. Simulatsioon peab esitama mõju erinevate hüdrometeoroloogiliste tingimuste korral. Kui mõjus esineb sesoonsus, tuleb see eraldi välja tuua. Hoovusmudel peab olema verifitseeritud lähipiirkonnas tehtud hoovusmõõtmistega ilma sesoone stratifikatsioonita ja suvise stratifikatsiooni tingimustes, mõlemad vähemalt kahe kuu vältel. Sesoone stratifikatsiooni puhul tuleks mõõtmine teha vähemalt kahes kihis (pinnalähedases ja põhjalähedases kihis). Ilma sesoone stratifikatsioonita piisab mõõtmistest ühes kihis. Mõõtmiste sagedus peaks olema vähemalt üks kord tunnis.

Lainetuse modelleerimine tuleks teostada numbrilise lainemudeliga, mida on varem Läänemere või mõne muu rannikumere uuringutes kasutatud. Mudel peab arvesse võtma batümeetriat ja tuuleandmeid. Lainemudel peaks arvesse võtma järgmisi protsesse: laine genereerimine tuule poolt; lainete levik ruumis; interaktsioon merepõhja, sh. murdumine; energia kaotus, nt. põhjahõõrde tõttu; laine levikusuuna muutumine ebahürtlase batümeetria tõttu. Simulatsioon peab esitama mõju erinevate hüdrometeoroloogiliste tingimuste korral. Kui mõjus esineb sesoonsus, tuleb see eraldi välja tuua. Lainemudel peab olema verifitseeritud lähipiirkonnas

tehtud lainemõõtmistega vähemalt kolme kuu vältel. Mõõtmiste sagedus peaks olema vähemalt üks kord tunnis.

Lainetuse ja hoovuste modelleerimise tulemuseks on ruumilised väljad võimaliku mõju kohta (sh. kaardid ja/või aegread hoovuse ja lainetuse muutuse kohta võrreldes olemasoleva olukorraga). Võttes arvesse hoovuste ja lainetuse looduslikku varieeruvust, on modelleerimise tulemuste abil võimalik hinnata, kui suur on tuulepargi kasutusega tekitatav häiring võrreldes olemasoleva olukorraga. Saadud andmete põhjal on võimalik hinnata mõju olulisust hoovustele, üldisele tsirkulatsioonile ja lainetusele. Oluline on, et uuring kirjeldaks ka hinnangute määramatust.

Uuring peab võrdväärselt käsitlema kõiki arendustegevuse alternatiive, sh. KMH protsessi käigus tekkivaid alternatiive.

Uuringu käigus saadud info võib olla oluline sisendmaterjal elustikule (põhjaelustik, kalastik, linnustik) avaldatava mõju hinnangutele.

3.2. Vee omaduste, sh. veekvaliteedi uuring

3.2.1. Uuringu vajalikkuse põhjendus ja uuritavad parameetrid

Mõjud hüdrodünaamilistele protsessidele kanduvad potentsiaalselt üle vee omadustele. Hoovuste ja horisontaalse veevahetuse muutmine mõjutab horisontaalset veomaduste jaotust ja ainevahetust. Muutused vertikaalses segunemises mõjutavad stratifikatsiooni ja ainevahetust mere ülemise ja alumiste kihtide vahel. Mõju tugevus sõltub tuulikute karakteristikutest, nende arvust, meteoroloogilistest tingimustest ning mere stratifikatsioonist ja muudest karakteristikutest. Veesamba vertikaalne stratifikatsioon võib varjutusefekti tõttu tugevneda, samas tuulikute veealustest osadest tulenevad keerised ja vertikaalne segunemine võivad stratifikatsiooni ka nõrgendada. Enamus Eesti merealadele planeeritavatest tuuleparkides asub sügavamates piirkondades, kui tüüpiline termokliini sügavus suvel, mis on suurusjärgus 10-20 m (Liblik and Lips, 2011a; Skudra and Lips, 2017). Lisaks termokliinile esineb meie merealadel, eriti suuremate jõgede mõjualades vertikaalne soolsuse gradient, mis samuti mõjutab stratifikatsiooni (Liblik et al., 2020). Seega on nendes piirkondades kevadest sügiseni märkimisväärne stratifikatsioon, mille olemasolu dikteerib suuresti mere aineringe ja pelaagilise ökosüsteemi toimimise. Võib eeldada, et kui tuuleparkide rajamisel vertikaalne segunemine väheneb, siis termokliini tugevus ja soolsuse vertikaalne gradient suurenevad ning ülemise segunenud kihi paksus väheneb. Kui vertikaalne segunemine suureneb, siis termokliin ja soolsuse vertikaalne gradient nõrgenevad ning segunenud kihi paksus suureneb. Ülemise segunenud kihi paksus on oluline muutuja, mis mõjutab primaarproduksiooni, teisisõnu fütoplanktoni kasvu ja liigilist koosseisu (Lips et al., 2011). Muutused fütoplanktonis kanduvad üle järgmistele troofsustasemetele, st. mõju võib avalduda kogu ökosüsteemis. Kevadeti kontrollib meres õitsengut paljuski ülemise stabiilse segunenud kihi teke. Kui kiht on piisavalt stabiilne ja õhem (ei ulatu nii sügavale) kui eufootne tsoon, siis on primaarproduksiooniks tingimused soodsad. Lisaks ülakihi soojenemisele mõjutab ülemise segunenud kihi teket varakevadel või talvel magedama vee levik soolasema vee kohal (Liblik et al., 2020; Lips et al., 2014; Stipa et al., 1999). On hinnatud, et Läänemeres on kliimamuutused põhjustanud muutuseid stratifikatsiooni tekkes ja seeläbi ka primaarproduksioonis (Kahru et al., 2016). Sügisel, kui meri hakkab atmosfäärile soojust kaotama ning konvektsiooni ja tuulesegunemise

tõttu muutub segunenud kiht eufootses kihist paksemaks, ei ole primaarproduktsoon fütoplanktoni kasvuks piisav.

Stratifikatsiooni tugevnemisel väheneb vertikaalne toitainete voog mere süvakihist eufootsesse ülakihti, mistõttu primaarproduktsoon võib samuti väheneda. Samas, kui sellega seoses segunenud kihi paksus väheneb, võib see tähendada primaarproduktsooni koondumist õhemasse kihti. Samuti väheneks stratifikatsiooni tugevnemisel hapniku vertikaalne transport mere ülakihist alumisse kihti, mis võib soodustada hapnikupuuduse teket merepõhja lähedal. Kui stratifikatsioon tugevneb kevadel, võib see põhjustada varasema bioloogiliselt aktiivse hooaja alguse mere ülakihis. Kui stratifikatsioon nõrgeneb, siis tõenäoliselt soodustab see toitainete voogu mere alumistes kihtidest ülakihtidesse ning primaarproduktsoon võib suureneeda. Samas, kui stratifikatsiooni nõrgenemisega samal ajal toimub ka ülemise segunenud kihi paksenemine ja sagenevad olukorrad, kus segunenud kihi paksus on suurem eufootses kihis, siis võib selline sündmuste käik hoopis primaarproduktsooni pärssida. Ka muutus põhjalähedases hapniku kontsentratsioonis ei ole selge. Ühest küljest primaarproduktsooni suurenemine peaks suurendama orgaanilise aine settimist ja seeläbi hapniku tarbimist merepõhja lähedal. Teisalt, peaks suurenema ka vertikaalne hapniku transport ülakihist alumisse kihti. Muutused sõltuvad kohtspetsiifilistest asjaoludest, mistõttu on vaja kohapealsete mõõtmistega verifitseeritud numbriliste mudelitega simuleerida võimalikke muutuseid meresüsteemis. Kuna Eesti merealadele ei ole tuulikuid püstitatud, siis on modelleerimisel antud hinnangutes palju määramatust ning mõju täpsustuseks on vaja parkide põhjustatud muutusi hiljem seirata.

Uuringus käsitletavat parameetrid saab grupeerida kaheks: (1) otsesest keskkonnamõju kirjeldavad parameetrid, (2) täiendavad parameetrid, mis võimaldavad kirjeldada mõjutatavat keskkonda, eraldada loodusliku varieeruvust tuuleparkide mõjust ja vähendada määramatust.

Otsese keskkonnamõju kirjeldavate parameetrite nimekiri sõltub konkreetsest arendustegevusest. Võimalikke parameetrite hulka kuuluvad järgmised veesamba olekut ja omadusi kirjeldavad parameetrid:

- Temperatuur;
- Soolsus;
- Tihedus;

- Segunenud kihi paksus;
- Stratifikatsiooni tugevus või tiheduse vertikaalne erinevus ülakihi ja põhjalähedase kihi vahel;
- Toitainete sisaldus (lämmastiku- ja fosforiühendid, sh üldlämmastik ja üldfosfor);
- Klorofüll *a* sisaldus;
- Lahustunud hapniku sisaldus vees.

Uuringu täiendavate parameetrite hulka kuuluvad:

- Batümeetria ja sügavusinfo;
- Hoovuskiiruse komponendid;
- Meteoroloogilised parameetrid (tuule suund, kiirus; soojusvoo komponendid);
- Veetase;
- Jääd kirjeldavad parameetrid.

Temperatuur, soolsus, tihedus, segunenud kihi paksus, stratifikatsiooni tugevus või tiheduse vertikaalne erinevus ülakihi ja põhjalähedase kihi vahel, toitainete sisaldus (lämmastik ja fosfor), klorofüll *a* sisaldus, lahustunud hapniku sisaldus vees on meresüsteemi füüsikalisi ja biogeokeemilisi omadusi ning veesamba stratifikatsiooni kirjeldavad parameetrid. Batümeetria ja sügavusinfo on vajalikud numbrilise mudeli loomiseks. Hoovuskiiruse komponendid on vajalikud uuritavate parameetrite modellemiseks. Meteoroloogilised parameetrid on vajalikud atmosfääri mõju kirjeldamiseks mudelis. Veetaseme andmed võivad olla vajalikud avatud radade kirjeldamiseks mudelis.

3.2.2. Uuringu läbiviija kvalifikatsioon

Uuringu läbiviijal peab olema meeskonnas magistrikraadiga ekspert, mis on omandatud okeanograafiaga seotud erialal. Uuringu läbiviijal või vähemalt ühel eksperdil meeskonnas peab olema vastava uuringu läbi viimise kogemus sarnases uuringus osalemisel ja/või teadustöö kogemus (st. ekspert peab olema olnud vähemalt ühe ETIS 1.1 klassifikaatori teadusartikli autor). Proovid kogutakse atesteeritud proovivõtjate poolt ja analüüsid teostatakse nendeks akrediteeritud laboris.

3.2.3. Uuringu meetoodika

Uuringu põhjalikkus peab sõltuma tuulepargi nimivõimsusest. Väikese võimsusega parkides, ei ole modelleerimine tingimata vajalik, vaid võib piirduda ekspertarvamusega, mis põhineb varasematel teadmistel.

Kui tuulepargi nimivõimsus või potentsiaalselt kumulatiivset mõju omava mitme tuulepargi nimivõimsuste summa ületab 100 MW, tuleks teostada veesamba parameetrite modelleerimine. Veesamba parameetreid tuleks modelleerida ilma tuulepargita ja koos tuulepargi mõjuga tuuleväljale. Tuulepargi mõju tuuleväljale tuleks arvutada teaduskirjanduses aktsepteeritud mudelitega nagu nt. Jensen (Jensen NO, 1983), Larseni (Larsen GC, 1988), Frandseni (Frandsen et al., 2006) või Bastankah and Porté-Agel (Bastankah and Porté-Agel, 2014) mudelid (nimekiri ei ole täielik). Tuulikute poolt tekitatud vertikaalne segunemine peab olema arvesse võetud, arvestades piirkonna hüdodünaamilisi olusid ja teaduskirjanduses kasutatud praktikat.

Veesamba füüsikaliste parameetrite ja stratifikatsiooni modelleerimine tuleb teostada numbrilise hüdrodünaamilise mudeliga, mida on varem Läänemere või mõne muu rannikumere uuringutes kasutatud. Lihtsustamata võrranditel põhinevas meremudelites peaks olema arvestatud järgnevate mõjudega: inertiaaljõududega (Maa pöörlemine), rõhujõududega (veetaseme gradiendid), gravitatsioonijõududega (tiheduse gradiendid), viskoosusjõududega ning väliste jõududega. Mudeli konfiguratsioon peab arvesse võtma batümeetriat, temperatuuri ja soolsuse jaotuseid, atmosfääri mõju (tuul, soojusvahetus). Mudeli horisontaalne ruumisamm peab olema piisavalt väike, et representeerida eri-tuulikutest tuleva varjutusefekti mõju, soovitatavalt mitte üle 300 m. Mudel peab olema kolmemõõtmeline, vähemalt kümne vertikaalse kihiga. Simulatsioon peab esitama mõju erinevate hüdrometeoroloogiliste tingimuste korral. Kui mõjus esineb sesoonsus, tuleb see eraldi välja tuua.

Mudel peab olema verifitseeritud lähipiirkonnas tehtud mõõtmistega sesoonse stratifikatsiooni tingimustes ja ilma stratifikatsioonita. Sesoonse stratifikatsiooni tingimustes on vaja vähemalt kahe kuu vältel registreerida vähemalt kahel horisondil (ülemises kihis ja põhjalähedases kihis) temperatuur, soolsus, hoovuskiiruse komponendid, klorofüll *a*, hapniku kontsentratsioon. Ilma sesoonse stratifikatsioonita tingimuste korral tuleks vähemalt kahe kuu jooksul registreerida

vähemalt ühel horisondil temperatuur, soolsus, hoovuskiiruse komponendid, klorofüll a , hapniku kontsentratsioon. Hoovusmõõtmised tuleks läbi viia sagedusega vähemalt 1 kord tunnis, ülejäänud nimetatud parameetrite puhul vähemalt kord kolme tunni jooksul. Kui tuulepargi alalt ei koguta toitainete, sh üldainete proove riikliku seire raames vähemalt igal sesoonil, siis tuleks aasta jooksul vähemalt neljal korral ka seda teha pinnalähedasest ja põhjalähedasest kihist.

Vee omaduste modelleerimise tulemuseks on ruumilised väljad võimaliku mõju kohta (sh. kaardid ja/või aegread uuritavate parameetrite muutuse kohta võrreldes olemasoleva olukorraga). Võttes arvesse vastavate parameetrite looduslikku varieeruvust, on modelleerimise tulemuste abil võimalik hinnata, kui suur on tuulepargi kasutusega tekitatav häiring võrreldes olemasoleva olukorraga. Saadud andmete põhjal on võimalik hinnata mõju olulisust vee omadustele, sh. on võimalik hinnata, kui suurel alal ja kui pika aja jooksul väheneb eutrofeerumise indikaatorite järgi veekvaliteedi klass. Selleks võrreldakse mudelarvutustega saadud 0-alternatiivi ja arendustegevuse alternatiivide tulemusi ning võttes arvesse olemasolevat merekeskkonna seisundit (indikaatoreid) hinnatakse, kui suurel alal ja kui pika aja jooksul väheneb eutrofeerumise indikaatorite järgi veekvaliteedi klass. Kui hinnang antakse ekspertarvamusega, siis ei ole ruumilis-ajalist infot indikaatorite muutumise kohta võimalik esitada, vaid tuleb lähtuda eeldusest, et kogu veesambasse eralduv fosfor jaotub vastavas veekogumis ühtlaselt.

Uuring peab võrdväärselt käsitlema kõiki arendustegevuse alternatiive, sh. KMH protsessi käigus tekkivaid alternatiive.

Uuringu käigus saadud info võib olla oluline sisendmaterjal tegevusega elustikule (põhjaelustik, kalastik, linnustik) avaldatava mõju hinnangutele.

4. Seire, sh. järelseire nõuded

4.1. Ehitusaegne heljumi leviku seire

4.1.1. Seire vajalikkuse põhjendus ja mõõdetavad parameetrid

Süvendamisel tekkiv heljum võib mõjutada nii vee kvaliteeti kui ka mereelustikku. Heljum vähendab vee läbipaistvust, mis vähendab fotosünteesiks piisava valgusega kihi, eufootse kihi paksust. Samuti võib nähtavuse vähenemine põhjustada röövkalade ja merelindude jahipidamise edukust; mõjutada kalade rännet, liikumisteede; mõjutada pelaagiliste koelmute ujuvust (Birklund and Wijsman, 2005; Westerberg et al., 1996).

Heljumi leviku seire võib jaotada kaheks: ülevaate seire ja operatiivne seire. Ülevaate seire eesmärk on kaardistada ja kirjeldada heljumi levik ja settimine. Uuringu tulemused võimaldavad leida seoseid heljumi leviku ja elustiku muutuste vahel. Operatiivse seire eesmärk on jälgida heljumi levikut lähi-reaalajas. Operatiivseire abil on võimalik vältida suurema heljumi koguse kandumist ja settimist tundlikule alale. Kui heljumi kontsentratsioon tundlike alade piiridel ületab kriitilisi väärtusi, on võimalik tööd peatada või nende intensiivsust vähendada.

Uuritavate parameetrite nimekiri sõltub konkreetsest arendustegevusest, käideldava sette puhtusest, KMH käigus tehtud modelleerimiste ja hinnangute tulemustest. Mõõdetavate parameetrite hulka kuuluvad:

- Heljumi sisaldus ja hägusus;
- Ohtlike ainete (raskmetallid, naftasaadused, TBT) sisaldus vees;
- Toitainete, sh üldlämmastiku ja üldfosfori sisaldus vees;
- Klorofüll *a* sisaldus vees;
- Lahustunud hapniku sisaldus vees.

Mõõtmisi, proovide kogumist ja analüüse tuleb teostada atesteeritud proovivõtjate poolt ja kasutades akrediteeritud meetodeid, mis vastavad HELCOM juhendmaterjalidele (kui need on olemas, vt <https://helcom.fi/action-areas/monitoring-and-assessment/monitoring-guidelines/> ja

LISA 1), Hägusus ja heljumi sisaldus on vajalikud süvendamis/kaadamisel tekkiva heljumi leviku jälgimiseks. Lahustunud hapniku mõõtmine on vajalik, kui KMH käigus tehtud modelleerimine ja hindamine on prognoosinud hapniku kontsentratsioonide olulist vähenemist. Ohtlike ainete sisalduse mõõtmine on põhjendatud üksnes siis, kui sete on reostunud. Toitainete sisalduste, klorofüll *a* mõõtmine on põhjendatud, kui KMH käigus tehtud modelleerimine ja hindamine on prognoosinud settest vabaneva fosfori olulist mõju vee kvaliteedile.

Uuringu teostamiseks vajalike taustaparameetrite hulka kuuluvad:

- Batümeetria ja sügavusinfo;
- Süvendatava/kaadatava sette lõimimine;
- Süvendus/kaadamismahu ajaline käik, maht tunnis või ööpäevas;
- Ohtlike ainete sisaldus süvendatavas/kaadatavas settes;
- Fosfori sisaldus süvendatavas/kaadatavas settes;
- Hoovuskiiruse komponendid;
- Temperatuuri ja soolsuse jaotused;
- Tuule suund ja kiirus;
- Lainetuse parameetrid;
- Jääd kirjeldavad parameetrid.

Batümeetria ja sügavusinfo on vajalikud mõõtmistega tuvastatud mõju kvantifitseerimiseks. Süvendatava/kaadatava sette lõimimine ja süvendus/kaadamismahu ajalise käigu info on vajalikud süvendusest tuleva koormuse kirjeldamiseks ja mõju interpreteerimiseks. Sette ohtlike ainete ja fosfori sisaldused on vajalikud koormuse kirjeldamiseks ja mõju interpreteerimiseks. Hoovuskiiruse komponendid võimaldavad määrata valdavalt hoovuse suunda ja kiirust ning heljumi domineerivat levikusuunda. Temperatuuri ja soolsuse jaotused võimaldavad määrata veemassi päritolu ning eristada looduslike heljumi muutuseid süvendusest-kaadamisest tuleneva koormusega. Näiteks tuvastati Heltermaa sadama süvendamise ajal heljumi sisalduse suurenemine väga suurel alal, mis ei olnud seotud süvendustegevuse vaid looduslikult heljumirikka veemassi jõudmisega uurimisalale (Liblik and Lips, 2011). Sellise järelduseni aitasid jõuda soolsuse ja temperatuuri andmed. Tuule suuna ja kiiruse ning laine parameetrid võimaldavad samuti hinnata looduslike protsessidega tekitatavat heljumi ning eristada seda süvendus/kaadamistöödega tekkivast heljumist. Madalas rannikumeres on kõrgeks heljumi sisaldus tänu resuspensioonile tugevama lainetuse tingimustes tavapärane. Näiteks on näidatud,

et > 20 m sügavusel esinevad kõrgema lainetusega resuspensiooni juhtumid ja kõrgemad heljumi sisalduse väärtused (Tallinna Tehnikaülikool, 2023).

4.1.2. Seire läbiviija kvalifikatsioon

Uuringu läbiviijal peab olema meeskonnas magistrikraadiga ekspert, mis on omandatud okeanograafiaga seotud erialal. Uuringu läbiviijal või vähemalt ühel eksperdil meeskonnas peab olema vastava uuringu läbi viimise kogemus sarnases uuringus osalemisel ja/või teadustöö kogemus (st. ekspert peab olema olnud vähemalt ühe ETIS 1.1 klassifikaatori teadusartikli autor). Proovid kogutakse atesteeritud proovivõtjate poolt ja analüüsid teostatakse nendeks akrediteeritud laboris.

4.1.3. Seire meetodika

Süvendus- ja kaadamistöödel väljaspool hoiualasid ja reostumata sette korral, mahus kuni 25 000 m³ ning juhul kui KMH raames antud eksperthinnangus ei tooda välja heljumi leviku olulist mõju või seire vajalikkust, ei ole heljumi leviku seire teostamine vajalik. Madalmeres (sügavuses ≤ 15 m) tuleks seiret teha alates mahust 10 000 m³. Vastavalt ptk. 4.1.1. kirjeldatule saab eristada kahte tüüpi heljumi leviku seiret: ülevaate seiret ja operatiivne seire.

Heljumi ülevaate seire

Heljumi leviku ülevaate seire põhjalikkus sõltub süvendatava materjali mahust, piirkonnast, sette puhtusest, tundlike alade (sh. hoiualade) lähedusest. Kui tekkiva heljumi mõju madalatele, tundlikumatele merealadele (hoiualadele) ja elustikule on KMH-s tehtud hinnangute põhjal tagasihoidlik, siis ei ole vaja seiret teostada kogu tööperioodi vältel. Kui KMH raames tehtud uuringutes (sh. vee kvaliteedi, põhjaelustiku, kalastiku ja linnustiku uuringutes) ei tooda välja, et heljumi leviku mõju on eeldavalt oluliselt negatiivne, siis võib piirduda heljumi leviku ülevaate seire teostamisega esimese 30% süvenduse/kaadamise mahu käitlemisel. Kui seire käigus selguvad asjaolud, mis viitavad olulisele negatiivsele mõjule, tuleb seiret pikendada süvendus/kaadamistööde lõpuni. Samuti, kui selgub, et heljum levib tundlikule alale määral, mis võib põhjustada seal olulist negatiivset keskkonnamõju, siis tuleks rakendada ka

operatiivset seiret (isegi kui KMH käigus ei ole seda soovitatud). Teiseks, võib seire teostaja anda sellisel juhul suunise teatud tingimustega tööde peatamiseks või leevendavate meetmete kasutusele võtuks. Leevendavate meetmetena võib rakendada näiteks tööde intensiivsuse vähendamist või heljumi levikut takistava tõkke kasutamist.

Tuuliku vundamentide süvendustööd ja kaabli süvistamine on tuuleparkide arendustes ruumis hajutatud, mistõttu mõõtmisjaamade võrk muutub ajas. Seire käigus tehtavate mõõtmisjaamade arv ja asukohtade määramine on ekspertide pädevuses vastavalt süvendusmahule ja piirkonna eripäradele. Mõõtmisjaamasid peab olema piisavalt ja nende asetus peab olema selline, et oleks võimalik määratleda süvendus/kaadamistööde tõttu kõrgeenenud heljumi sisaldusega ala. Kaardistusi tuleks teha heljumi tekitavate tööde ajal vähemalt üle päeva. Mõõtmisjaamades tuleks määrata heljumi sisalduse vertikaalprofiilid kuni 2 m vertikaalse sammuga. Profiilid võib määrata ka hägususe mõõtmiste abil, kuid sellisel juhul peavad hägususe näidud olema konverteeritud heljumi sisalduse väärtusteks. Konverteerimise teostamiseks on vaja võtta veeproove heljumi sisalduse määramiseks. Paralleelselt tuleks määrata vee temperatuuri ja soolsuse vertikaalsed profiilid kuni 2 m vertikaalse sammuga. Lisaks ruumilistele kaardistustele tuleks vähemalt ühes asukohas mõõta hoovuste ja hägususe aegread süvendus-kaadamistööde teostamise jooksul, et anda hinnang töödega tekitatud heljumi hulga ja leviku valdavale suunale ning heljumi looduslikule varieeruvusele, sh. kaardistuste-vahelisel perioodil.

Ohtlike ainete sisalduse mõõtmine on põhjendatud üksnes siis, kui sete on reostunud. Sellisel juhul tuleks kaardistuse käigus koguda ka veeproove vastava ohtliku aine määramiseks. Veeproovid tuleks koguda ülemisest kihist (integreeritud veeproov 1, 5 ja 10 m sügavuselt) ja sügavamatel (≥ 15 m) merealadel ka põhjalähedasest kihist.

Toitainete sisalduse ja klorofüll *a* sisalduse mõõtmine on põhjendatud, kui KMH käigus tehtud modelleerimine ja hindamine on prognoosinud settest vabaneva fosfori olulist mõju vee kvaliteedile. Sellisel juhul tuleks kaardistuste käigus määrata ka toitainete sisaldus ülemises kihis (integreeritud veeproov 1, 5 10 m sügavuselt) ja sügavamatel (≥ 15 m) merealadel ka põhjalähedasest kihis ning klorofüll *a* ja hapniku vertikaalsed profiilid kuni 2 m vertikaalse sammuga.

Seire teostamisel võib täiendavalt kasutada ka satelliitseiret ja numbrilist modelleerimist, kuid need ei asenda kohapealseid mõõtmisi.

Heljumi operatiivne seire

Operatiivse seire eesmärk on jälgida heljumi levikut lähi-reaalajas ning vältida suurema heljumi koguse kandumist ja settimist tundlikule alale või liigset veekvaliteedi langust liialt suurel alal. Operatiivseire vajadus defineeritakse KMH käigus. Tundlik ala võib olla hoiuala, mille kaitse-eesmärkide täitmist heljumi sinna jõudmine ja/või settimine võiks pärssida; kalade koelmuala, lindude toitumisala või mõni muu ala, kus heljumiga tekitatud vee läbipaistvuse langus või heljumi settimine omab olulist negatiivset keskkonnamõju. Operatiivseire võib olla vajalik ka lähtuvalt sotsiaalmajanduslikust seisukohast, nt. kui süvendus- või kaadamistööde potentsiaalsesse mõjualasse jääb suplusrand. Operatiivseire käigus tuleks registreerida hägusust ning soovivatult ka temperatuuri ja soolsust. Samuti tuleks jälgida tuule- ja laineolusid (võib teostada ka numbrilise modelleerimise abil). Operatiivseiret tuleks teostada vähemalt kahes asukohas:

- Mõõtmisi tuleks teha heljumi leviku potentsiaalses mõjualas (mõjuala jaam), tundliku ala serval või tundliku ala ja heljumi algasukoha vahel, potentsiaalsel heljumi levimistrajektoril. Kui tundlikke alasid on mitu ja need asuvad üksteisest kaugel (nt. üks süvendus/kaadamistööde piirkonnas läänes, teine idas), siis tuleks mõõtmised läbi viia mõlemas asukohas.
- Lisaks tuleks teha mõõtmised loodusliku referentstaseme määramiseks. Referentsmõõtmisjaam peaks asuma võimalikult sarnastes tingimustes (sügavus, põhjasetete iseloom, kaugus rannikust) ja samas piirkonnas, kuid süvendus/kaadamistööde mõjupiirkonnast väljas. Paralleelmõõtmised potentsiaalses mõjualas ja referentsjaamas võimaldavad eristada süvendus/kaadamistöödega tekitatud heljumi looduslikkust foonist.

Heljumi sisaldus rannikust eemal on reeglina vaid kuni paar mg/l, kuid põhjalähedases veekihis võib lainetuse või hoovuse poolt tekitatud resuspensiooni toime tõusta sisaldus üle 20 mg/l (Tallinna Tehnikaülikool, 2023). Madalas rannikumeres leiavad resuspensiooni tõttu kõrgema heljumi sisalduse juhtumid sagedamini aset ning seal jõuab heljum ka pinnakihti, st. kogu veesambasse (Golubkov and Golubkov, 2023; Liblik et al., 2024; Liblik and Lips, 2011b; Uusõue et al., 2022). On hinnatud, et vee läbipaistvus väheneb 3 meetrini, kui heljumi sisaldus on ligikaudu 7 mg/l (Tallinna Tehnikaülikool, 2022). Heljumi sisalduse kriitiline piir sõltub konkreetsest kaasusest ja ühte kriitilist väärtust kogu Eesti merealadele kehtestada ei ole

mõistlik. Seetõttu tuleks kriitiline heljumi sisalduse väärtus iga kaasuse puhul määrata eksperdi poolt.

Operatiivseiret ei ole vaja tingimata teostada fikseeritud jaamades. Võimalik on kasutada ka autonoomseid liikuvaid platvorme. Mõnel juhul võib autonoomse liikuva platvormi kasutamine olla ainuvõimalik. Näiteks, kui jälgimist vajav tundliku ala piir on väga suur, siis võib punktmõõtmistega selle katmine olla ebamõistlikult kulukas.

Seire teostamisel võib täiendavalt kasutada ka satelliitseiret ja numbrilist modelleerimist, kuid need ei asenda kohapealseid mõõtmisi.

4.2. Hüdrodünaamika seire

4.2.1. Seire vajalikkuse põhjendus ja mõõdetavad parameetrid.

Teadustööde tulemused viitavad, et tuuleparkide piirkonnas muutuvad hoovuskiirused ja lainetus. Kuna Eesti merealadel olemasolevad tuulepargid puuduvad, siis KMH-des antavate hinnangute verifitseerimiseks tuleks teha hoovuste ja lainetuse seiret. Seire tulemused võimaldavad siduda muutuseid hüdrodünaamilistes protsessides muutustega vee omadustes, rannikuprotsessides ja elustikus. Uuritavateks parameetriteks on horisontaalse hoovuskiiruse komponendid või hoovuse suund ja kiirus ning laine kõrgus, -periood ja laine leviku suund. Lisaks tuleks mõõta tuule kiirust ja suunda.

4.2.2. Seire läbiviija kvalifikatsioon.

Uuringu läbiviijal peab olema meeskonnas magistrikraadiga ekspert, mis on omandatud okeanograafiaga seotud erialal. Uuringu läbiviijal või vähemalt ühel eksperdil meeskonnas peab olema vastava uuringu läbi viimise kogemus sarnases uuringus osalemisel ja/või teadustöö kogemus (st. ekspert peab olema olnud vähemalt ühe ETIS 1.1 klassifikaatori teadusartikli autor).

4.2.3. Seire meetodika

Mõõtmised tuleks teha ühe aasta jooksul enne tuulepargi ehitust ning samasugused mõõtmised kahel aastal peale tuulepargi tööle asumist. Peale kaheaastast kasutusaegset seiret tuleks otsustada, kas seiret jätkata või mitte. Mõõtmised tuleks teha vähemalt kahes asukohas:

- vähemalt ühes asukohas tuulepargi sees, kus eeldavalt esineb tuulepargi mõju (mõjuala jaam(ad)). Tuulepargi sees asuv(ad) jaam(ad) ei peaks asuma tuuliku vahetus läheduses vaid tuulikute vahel, neist ligikaudu võrdsel kaugusel. Nii presenteerib mõõtmine enam tuulepargi tervikmõju, mitte ühe tuuliku mõju;
- ühes asukohas sarnastes tingimustes (sügavus, avatus, kaugus rannikust), kuid tuulepargi alalt ja võimalikust mõjupiirkonnast eemal, kus tuulepargi mõju ei esine (referentsjaam).

Paralleelmõõtmised mõjuala jaama(de)s ja referentsjaamas enne tuulepargi ehitust võimaldavad hinnata loodusliku varieeruvust ja erisusi kahes asukohas. Paralleelmõõtmised tuulepargi kasutuse ajal võimaldavad määrata erisused kahes asukohas koos tuulepargi mõjust tuleneva signaaliga. Lihtsustatud näitena kirjeldame teoreetilisi laine mõõtmisi asuvas tuulepargis. Oletame, et oluline laine kõrgus mõõdeti kahes asukohas, jaamas L_TP (tuulepargiala sees) ja jaamas L_L (tuulepargi potentsiaalsest mõjualast väljas). Mõlemas jaamas tehti mõõtmisi aasta jooksul enne ja aasta jooksul peale tuulepargi kasutusele võttu. Jaamas L_TP saadi esimesel aastal keskmiseks oluliseks laine kõrguseks 0,78 m ja jaamas L_L 0,76 m; st. erinevus kahe jaama aasta keskmise olulise laine kõrguse vahel oli 0,02 m. Oletame, et kahe jaama erinevuste standardhälve oli 0,10 m. Teisel aastal saadi jaamas L_L oluliseks keskmiseks laine kõrguseks 0,73 m ja jaamas L_TP 0,69 m ning erinevuste standardhälve oli 0,11 m, st. ei erinenud oluliselt kahe aasta vahel. Siit järeldub, et teisel aastal langes laine kõrgus ligikaudu 4% loodusliku aastatevahelise muutlikkuse tõttu ning ligikaudu 8% tuulepargi kasutuse tõttu.

Kui tööd toimuvad valdavalt madalmeres, kus mere sügavus on < 15 m, võib hoovuskiirused mõõta ainult ühel horisondil. Kui mere sügavus on suurem, siis tuleks mõõta hoovuskiiruste vertikaalsed profiilid.

Kuna muutused hüdrodünaamilistes protsessides tulenevad peamiselt muutustest tuuleoludes, siis tuleks analoogselt kolme aasta jooksul (üks aasta enne tuulepargi rajamist ja kaks aastat kasutusajal) vähemalt kahes asukohas (tuulepargi ala sees ja mõjualast väljas) mõõta tuule suund ja kiirus.

Mõõtmised (hoovus, lainetus, tuul) tuleks teostada vähemalt tunnise intervalliga.

4.3. Vee omaduste, sh. veekvaliteedi seire

4.3.1. Seire vajalikkuse põhjendus ja uuritavad parameetrid

Mõjud hüdrodünaamilistele protsessidele kanduvad potentsiaalselt üle vee omadustele. Potentsiaalsetest mõjud vee omadustele on kirjeldatud peatükis 3.2.1. Arvestades meie merealade unikaalsust (praktiliselt puuduvad looded; tugev sesoonsus; madal soolsus; tugevad horisontaalsed ja vertikaalsed tiheduse gradiendid; sesoonne jääkate), ei ole teistel merealadel tehtud uuringud siia lihtsalt ülekantavad ja simulatsioonidel põhinevad hinnangud sisaldavad arvestataval hulgal määramatust. Seetõttu on vajalik teha seiret enne ja pärast tuulepargi rajamist. Uuritavateks parameetriteks on

- temperatuur,
- soolsus,
- tihedus (arvutatakse soolsuse ja temperatuuri põhjal),
- stratifikatsiooni tugevus (arvutatakse soolsuse ja temperatuuri põhjal),
- segunenud kihi paksus (arvutatakse soolsuse ja temperatuuri põhjal),
- hapniku sisaldus,
- klorofüllü sisaldus,
- toitainete, sh. üldlämmastiku ja üldfosfori sisaldus vees.

4.3.2. Seire läbiviija kvalifikatsioon

Uuringu läbiviijal peab olema meeskonnas magistrikraadiga ekspert, mis on omandatud okeanograafiaga või merekeskkonnaga seotud erialal. Uuringu läbiviijal või vähemalt ühel eksperdil meeskonnas peab olema vastava uuringu läbi viimise kogemus sarnases uuringus osalemisel ja/või teadustöö kogemus (st. ekspert peab olema olnud vähemalt ühe ETIS 1.1 klassifikaatori teadusartikli autor). Proovid kogutakse atesteeritud proovivõtjate poolt ja analüüsid teostatakse nendeks akrediteeritud laboris.

4.3.3. Seire metoodika

Mõõtmised tuleks teha enne tuulepargi ehitust ning peale tuulepargi tööle asumist. Mõõtmised tuleks teha vähemalt kahes asukohas:

- vähemalt ühes asukohas tuulepargi sees, kus eeldavalt esineb tuulepargi mõju (mõjuala jaam(ad)). Tuulepargi sees asuv(ad) jaam(ad) ei peaks asuma tuuliku vahetus läheduses vaid tuulikute vahel, neist ligikaudu võrdsel kaugusel. Nii presenteerib mõõtmine enam tuulepargi tervikmõju, mitte ühe tuuliku mõju;
- ühes asukohas sarnastes tingimustes (sügavus, avatus, kaugus rannikust), kuid tuulepargi alalt ja võimalikust mõjupiirkonnast eemal, kus tuulepargi mõju ei esine (referentsjaam).

Paralleelmõõtmised mõjuala jaama(de)s ja referentsjaamas enne tuulepargi ehitust võimaldavad hinnata loodusliku varieeruvust ja erisusi kahes asukohas. Paralleelmõõtmised tuulepargi kasutuse ajal võimaldavad määrata erisused kahes asukohas koos tuulepargi mõjust tuleneva signaaliga. Lihtsustatud näide tuulepargi mõju tuvastamise kohta analoogse mõõtmisstrateegia korral on toodud peatükis 4.2.3 lainetuse kohta.

Kui tuulepark asub madalmeres, kus mere sügavus on < 15 m, võib parameetrid mõõta ainult ühel horisondil. Kui mere sügavus on suurem, siis tuleks temperatuur, soolsus, toitained, sh üldained mõõta jää lahkumisest sügiseni vähemalt kahel horisondil: ülemises kihis ja põhjalähedases kihis. Talvel võib temperatuuri ja soolsuse mõõta ühel horisondil. Klorofüll a mõõtmised tuleks teha ülemises kihis jää lahkumisest sügiseni. Hapniku mõõtmised tuleks teha põhjalähedases kihis jää lahkumisest sügiseni. Kõik mõõtmised tuleks teha ühel aastal enne tuulepargi tööle asumist ning samasugused mõõtmised kahel aastal peale tuulepargi tööle asumist. Peale kaheaastast kasutusaegset seiret tuleks otsustada, kas seiret jätkata või mitte. Toitainete sisaldused tuleks stratifitseeritud perioodil määrata ülemises kihis (integreeritud veeproov 1, 5 10 m sügavuselt) ja sügavamatel (≥ 15 m) merealadel ka põhjalähedases kihis. Talvel võib toitainete (sh üldainete) sisaldused määrata ainult ülemisest kihist.

Temperatuuri, soolsuse, hapniku ja klorofüll a mõõtmised tuleks teha vähemalt 3 tunnise intervalliga. Toitainete (sh üldainete) mõõtmised tuleks teostada vähemalt kahenädalase intervalliga.

Kasutatud kirjandus

- Akhtar, N., Geyer, B. and Schrum, C.: Impacts of accelerating deployment of offshore windfarms on near-surface climate, *Sci. Reports* 2022 121, 12(1), 1–16, doi:10.1038/s41598-022-22868-9, 2022.
- Ausmeel, M.: Fosfori esinemisvormid Läänemere põhjasetetes. Magistritöö., Tartu Ülikool., 2022.
- Bastankhah, M. and Porté-Agel, F.: A new analytical model for wind-turbine wakes, *Renew. Energy*, 70, doi:10.1016/j.renene.2014.01.002, 2014.
- Bellas, J., Ekelund, R., Halldórsson, H. P., Berggren, M. and Granmo, Å.: Monitoring of organic compounds and trace metals during a dredging episode in the Göta Älv Estuary (SW Sweden) using caged mussels, *Water. Air. Soil Pollut.*, 181(1–4), doi:10.1007/s11270-006-9298-4, 2007.
- Birklund, J. and Wijsman, J. W. M.: Aggregate extraction : a review on the effect on ecological functions., 2005.
- Cañadillas, B., Foreman, R., Barth, V., Siedersleben, S., Lampert, A., Platis, A., Djath, B., Schulz-Stellenfleth, J., Bange, J., Emeis, S. and Neumann, T.: Offshore wind farm wake recovery: Airborne measurements and its representation in engineering models, *Wind Energy*, 23(5), doi:10.1002/we.2484, 2020.
- Carpenter, J. R., Merckelbach, L., Callies, U., Clark, S., Gaslikova, L. and Baschek, B.: Potential impacts of offshore wind farms on North Sea stratification, *PLoS One*, 11(8), doi:10.1371/journal.pone.0160830, 2016.
- Christiansen, N., Daewel, U. and Schrum, C.: Tidal mitigation of offshore wind wake effects in coastal seas, *Front. Mar. Sci.*, 9, doi:10.3389/fmars.2022.1006647, 2022.
- Daewel, U., Akhtar, N., Christiansen, N. and Schrum, C.: Offshore wind farms are projected to impact primary production and bottom water deoxygenation in the North Sea, *Commun. Earth Environ.*, 3(1), doi:10.1038/s43247-022-00625-0, 2022.
- Djath, B., Schulz-Stellenfleth, J. and Cañadillas, B.: Impact of atmospheric stability on X-band and C-band synthetic aperture radar imagery of offshore windpark wakes, *J. Renew. Sustain. Energy*, 10(4), doi:10.1063/1.5020437, 2018.
- Dorrell, R. M., Lloyd, C. J., Lincoln, B. J., Rippeth, T. P., Taylor, J. R., Caulfield, C. cille P., Sharples, J., Polton, J. A., Scannell, B. D., Greaves, D. M., Hall, R. A. and Simpson, J. H.: Anthropogenic Mixing in Seasonally Stratified Shelf Seas by Offshore Wind Farm Infrastructure, *Front. Mar. Sci.*, 9, 124, doi:10.3389/FMARS.2022.830927/BIBTEX, 2022.
- Duclos, P.-A.: Morphosedimentary impacts of marine aggregate extraction. Eastern English Channel

case study., 2012.

Eesti Geoloogiateenistus: Projekt 17065 „Merepõhja setete keskkonnaseisundi hindamise meetodika arendamine ja rakendamine“. Lõpparuanne., 2022.

Elken, J., Malkki, P., Alenius, P. and Stipa, T.: Large halocline variations in the Northern Baltic Proper and associated meso- and basin-scale processes, *Oceanologia*, 48(SI), 91–117 [online] Available from: <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.agro-article-356d2167-aacf-4d87-9af6-10513ffba666> (Accessed 21 April 2017), 2006.

Floeter, J., van Beusekom, J. E. E., Auch, D., Callies, U., Carpenter, J., Dudeck, T., Eberle, S., Eckhardt, A., Gloe, D., Hänselmann, K., Hufnagl, M., Janßen, S., Lenhart, H., Möller, K. O., North, R. P., Pohlmann, T., Riethmüller, R., Schulz, S., Spreizenbarth, S., Temming, A., Walter, B., Zielinski, O. and Möllmann, C.: Pelagic effects of offshore wind farm foundations in the stratified North Sea, *Prog. Oceanogr.*, 156, doi:10.1016/j.pocean.2017.07.003, 2017.

Frandsen, S., Barthelmie, R., Pryor, S., Rathmann, O., Larsen, S., Højstrup, J. and Thøgersen, M.: Analytical modelling of wind speed deficit in large offshore wind farms, in *Wind Energy*, vol. 9., 2006.

Golubkov, M. and Golubkov, S.: Patterns of the relationship between the Secchi disk depth and the optical characteristics of water, *Front. Mar. Sci.*, 11, doi:<https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1265382>, 2023.

Hasager, C. B., Vincent, P., Badger, J., Badger, M., Di Bella, A., Peña, A., Husson, R. and Volker, P. J. H.: Using satellite SAR to characterize the wind flow around offshore wind farms, *Energies*, 8(6), doi:10.3390/en8065413, 2015.

HELCOM: HELCOM Guidelines for Management of Dredged Material at Sea., 2024.

Jensen NO: A note on wind generator interaction. Tech note Risø-M-2411., Denmark., 1983.

Kahru, M., Elmgren, R. and Savchuk, O. P.: Changing seasonality of the Baltic Sea, *Biogeosciences*, 13(4), 1009–1018, doi:10.5194/bg-13-1009-2016, 2016.

Kuprijanov, I., Väli, G., Sharov, A., Berezina, N., Liblik, T., Lips, U., Kolesova, N., Maanio, J., Junttila, V. and Lips, I.: Hazardous substances in the sediments and their pathways from potential sources in the eastern Gulf of Finland, *Mar. Pollut. Bull.*, 170, 112642, doi:10.1016/J.MARPOLBUL.2021.112642, 2021.

Larsen GC: A simple wake calculation procedure. Tech note Risø-M-2760., 1988.

Lednicka, B., Kubačka, M., Freda, W., Haule, K., Dembska, G., Galer-Tatarowicz, K. and Pazikowska-Sapota, G.: Water Turbidity and Suspended Particulate Matter Concentration at Dredged Material Dumping Sites in the Southern Baltic, *Sensors*, 22(20), doi:10.3390/s22208049, 2022.

- Leppäranta, M. and Myrberg, K.: Topography and hydrography of the Baltic Sea, in *Physical Oceanography of the Baltic Sea*, edited by M. Leppäranta and K. Myrberg, pp. 41–88, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg., 2009.
- Liblik, Taavi; Lips, U.: Variability of pycnoclines in a three-layer, large estuary: the Gulf of Finland, *Boreal Environ. Res.*, 22, 27–47, 2017.
- Liblik, T. and Lips, U.: Characteristics and variability of the vertical thermohaline structure in the Gulf of Finland in summer, *Boreal Environ. Res.*, 16A, 73–83, 2011a.
- Liblik, T. and Lips, U.: Spreading of suspended matter in a shallow sea area influenced by dredging activities and variable atmospheric forcing: results of in-situ measurements, *J. Coast. Res.*, (SI64), 561–566, 2011b.
- Liblik, T., Laanemets, J., Raudsepp, U., Elken, J. and Suhhova, I.: Estuarine circulation reversals and related rapid changes in winter near-bottom oxygen conditions in the Gulf of Finland, *Baltic Sea, Ocean Sci.*, 9(5), 917–930, doi:10.5194/os-9-917-2013, 2013.
- Liblik, T., Väli, G., Lips, I., Lilover, M.-J., Kikas, V. and Laanemets, J.: The winter stratification phenomenon and its consequences in the Gulf of Finland, *Baltic Sea, Ocean Sci.*, 16, 1475–1490, 2020.
- Liblik, T., Väli, G., Salm, K., Laanemets, J., Lilover, M. J. and Lips, U.: Quasi-steady circulation regimes in the Baltic Sea, *Ocean Sci.*, 18(3), 857–879, doi:10.5194/OS-18-857-2022, 2022.
- Liblik, T., Buschmann, F., Siht, E., Kuprijanov, I., Väli, G., Lipp, M., Erm, A., Laanemets, J., Eschbaum, R., Verliin, A., Saks, L. and Zekker, I.: Environmental impact of water exchange blocking in a strait – a multidisciplinary study in the Baltic Sea, *Oceanologia*, 66(1), doi:10.1016/j.oceano.2023.06.002, 2024.
- Lips, I., Lips, U. and Liblik, T.: Consequences of coastal upwelling events on physical and chemical patterns in the central Gulf of Finland (Baltic Sea), *Cont. Shelf Res.*, 29(15), 1836–1847, doi:10.1016/j.csr.2009.06.010, 2009.
- Lips, I., Rünk, N., Kikas, V., Meerits, A. and Lips, U.: High-resolution dynamics of the spring bloom in the Gulf of Finland of the Baltic Sea, *J. Mar. Syst.*, 129, 135–149, doi:10.1016/J.JMARSYS.2013.06.002, 2014.
- Lips, U., Lips, I., Liblik, T., Kikas, V., Altoja, K., Buhhalko, N. and Rünk, N.: Vertical dynamics of summer phytoplankton in a stratified estuary (Gulf of Finland, Baltic Sea), *Ocean Dyn.*, 61(7), 903–915, doi:10.1007/s10236-011-0421-8, 2011.
- Lips, U., Laanemets, J., Lips, I., Liblik, T., Suhhova, I. and Suursaar, Ü.: Wind-driven residual circulation and related oxygen and nutrient dynamics in the Gulf of Finland (Baltic Sea) in winter, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 195, 4–15, doi:10.1016/J.ECSS.2016.10.006, 2017.

- Otsmann, M., Astok, V. and Suursaar, Ü.: A model for water exchange between the Baltic Sea and the Gulf of Riga, *Nord. Hydrol.*, 28(4–5), 351–364, doi:10.2166/nh.1998.31, 1997.
- Platis, A., Siedersleben, S. K., Bange, J., Lampert, A., Bärfuss, K., Hankers, R., Cañadillas, B., Foreman, R., Schulz-Stellenfleth, J., Djath, B., Neumann, T. and Emeis, S.: First in situ evidence of wakes in the far field behind offshore wind farms, *Sci. Rep.*, 8(1), doi:10.1038/s41598-018-20389-y, 2018.
- Raag, L., Sipelgas, L. and Uiboupin, R.: Analysis of natural background and dredging-induced changes in TSM concentration from MERIS images near commercial harbours in the Estonian coastal sea, *Int. J. Remote Sens.*, 35(18), 6764–6780, doi:10.1080/01431161.2014.963898, 2014.
- Rennau, H., Schimmels, S. and Burchard, H.: On the effect of structure-induced resistance and mixing on inflows into the Baltic Sea: A numerical model study, *Coast. Eng.*, 60(1), 53–68, doi:10.1016/j.coastaleng.2011.08.002, 2012.
- Roots, O. and Roose, A.: Hazardous substances in the aquatic environment of Estonia, *Chemosphere*, 93(1), doi:10.1016/j.chemosphere.2013.05.036, 2013.
- Schultze, L. K. P., Merckelbach, L. M., Horstmann, J., Raasch, S. and Carpenter, J. R.: Increased Mixing and Turbulence in the Wake of Offshore Wind Farm Foundations, *J. Geophys. Res. Ocean.*, 125(8), e2019JC015858, doi:10.1029/2019JC015858, 2020.
- Sipelgas, L., Raudsepp, U. and Kõuts, T.: Operational monitoring of suspended matter distribution using MODIS images and numerical modelling, *Adv. Sp. Res.*, 38(10), doi:10.1016/j.asr.2006.03.011, 2006.
- Skudra, M. and Lips, U.: Characteristics and inter-annual changes in temperature, salinity and density distribution in the Gulf of Riga, *Oceanologia*, 59(1), 37–48, doi:10.1016/J.OCEANO.2016.07.001, 2017.
- Spearman, J., de Heer, A., Aarninkhof, S. and van Koningsveld, M.: Validation of the TASS system for predicting the environmental effects of trailing suction hopper dredgers, *Terra Aqua*, (125), 2011.
- Stipa, T. and Vepsäläinen, J.: The fragile climatological niche of the Baltic Sea, 2002.
- Stipa, T., Tamminen, T. and Seppälä, J.: On the creation and maintenance of stratification in the Gulf of Riga, *J. Mar. Syst.*, 23(1–3), 27–49, doi:10.1016/S0924-7963(99)00049-4, 1999.
- Suhhova, I.: Structure and Variability of Currents in the Stratified Gulf of Finland. Hoovuste muutlikkus ja struktuur stratifitseeritud Soome lahes, Tallinn University of Technology., 2018.
- Suhhova, I., Liblik, T., Lilover, M.-J. and Lips, U.: A descriptive analysis of the linkage between the

- vertical stratification and current oscillations in the Gulf of Finland, *Boreal Environ. Res.*, 23, 83–103, 2018.
- Tallinna Tehnikaülikool: Heljumi leviku modelleerimine Loode-Eesti meretuulepargi KMH aruande koostamiseks., 2022.
- Tallinna Tehnikaülikool: Liivi lahe tuulepargi vee kvaliteedi; veesamba füüsikaliste ja biogeokeemiliste parameetrite ning reostuslevi uuring Lõpparuanne., 2023.
- TTÜ meresüsteemide instituut: Prioriteetsete ainete ja toiteainete vertikaalsest jaotusest Väinameres ja Liivi lahes., 2021.
- Tuomi, L., Kahma, K. K. and Pettersson, H.: Wave hindcast statistics in the seasonally ice-covered Baltic sea, *Boreal Environ. Res.*, 16, 451–472 [online] Available from: www.smhi.se, (Accessed 15 April 2019), 2010.
- Uusõue, M., Ligi, M., Kutser, T., Bourrin, F., Uudeberg, K., Kangro, K. and Paavel, B.: Effects of different conditions on particle dynamics and properties in West-Estonian coastal areas, *Oceanologia*, 64(4), doi:10.1016/j.oceano.2022.06.006, 2022.
- Vortmeyer-Kley, R., Lünsmann, B., Berthold, M., Gräwe, U. and Feudel, U.: Eddies: Fluid dynamical niches or transporters?-A case study in the Western Baltic Sea, *Front. Mar. Sci.*, 6(MAR), doi:10.3389/fmars.2019.00118, 2019.
- Westerberg, H., Rännbäck, P. and Frimansson, H.: Effects of suspended sediments on cod egg and larvae and on the behaviour of adult herring and cod, *Int. Counc. Explor. Sea, C.*, E:26(February), 1996.
- Yang, Z. F., Chen, D. and Xiao, B. P.: Impact assessment of dredging on fish eggs and larvae: A case study in Caotan, South China, in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 351., 2019.

LISAD

LISA1 HELCOM juhendid mõõtmiste ja proovivõtu läbiviimiseks

Vee läbipaistvus: HELCOM, 2017. Guidelines for monitoring of water transparency (Secchi depth). <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/Guidelines-for-measuring-Secchi-depth.pdf>.

Hägusus: HELCOM, 2017. Guidelines for monitoring of turbidity. <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/Guidelines-for-measuring-turbidity.pdf>

Nitraadid: HELCOM, 2017. Guidelines for sampling and determination of nitrate. <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/Guidelines-for-sampling-and-determination-of-nitrate.pdf>

Fosfaadid: HELCOM, 2017. Guidelines for sampling and determination of phosphate. <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/Guidelines-for-sampling-and-determination-of-phosphate.pdf>

Ammoonium: HELCOM, 2017. Guidelines for sampling and determination of ammonium. <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/Guidelines-for-sampling-and-determination-of-ammonium.pdf>

Üldlämmastik: HELCOM, 2017. Draft guidelines for sampling and determination of total nitrogen. <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/Guidelines-for-sampling-and-determination-of-total-nitrogen.pdf>

Üldfosfor: HELCOM, 2017. Guidelines for sampling and determination of total phosphorus. <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/Guidelines-for-sampling-and-determination-of-total-phosphorus.pdf>

Klorofüll *a*: HELCOM, 2017. Guidelines for monitoring of chlorophyll *a*. <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/Guidelines-for-measuring-chlorophyll-a.pdf>

Lahustunud hapnik: HELCOM, 2018. Guidelines for sampling and determination of dissolved oxygen in seawater. <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/Guidelines-for-sampling-and-determination-of-dissolved-oxygen.pdf>

Setted: HELCOM, 2024. HELCOM Guidelines for Management of Dredged Material at Sea. <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2024/03/HELCOM-Guidelines-for-Management-of-Dredged-Material-at-Sea.pdf>

