

Tuulen, aaltojen ja virtausten vaikutuksen mallintaminen Olof Skötkonungin tuulipuistossa

Tuulipuiston vaikutusten mallintaminen osana
ympäristövaikutusten arviointia (YVA).

Tarkistus 2.2

2025-05-22

Laadittu Deep Wind Offshore AS:lle

Olof Skötkonungin tuulipuiston tuuliin, aaltoihin ja virtauksiin kohdistuvien vaikutusten mallintaminen

Tuulipuiston mallinnetut vaikutukset osana ympäristövaikutusten arviointia (YVA).

Tarkistus 2.0

Laadittu seuraavalle taholle: Deep Wind

Offshore AS Edustaja:: Sara Barkevall

Yhteyshenkilö:	Cecilia Gustafsson Gombrii
Projektipäällikkö:	Cecilia Gustafsson Gombrii
Laatupäällikkö:	Charlotta Lövestedt, Martin Johnsson
Kirjoittajat: M:	Thomas Heggem, Cecilia Gustafsson Gombrii, Martin Johnsson, Sina Saremi
Projektin nro..:	12806265
Hyväksynyt:	Charlotta Lövestedt
Hyväksymispäivämäärä:	2025-05-22
Tarkistettu:	Tarkistus 2.0
Luokitus:	Luokitus: Tämä asiakirja on vain projektiryhmän jäsenten saatavilla, ja sen jakaminen projektiryhmän ulkopuolelle edellyttää asiakkaan ennakkohyväksyntää.
Filename:	Olof Skötkonung_rev2025-05.docx: Vaikutukset tuulen aaltoihin ja virtauksiin Olof Skötkonungissa_rev2025-05.docx

Tiivistelmä

Tässä raportissa kuvataan Olof Skötkonungin merituulipuiston tuuli-, aalto- ja virtausvaikutusten mallintamista. Tässä kuvatut mallinnustulokset koskevat vaikutuksia tuulipuiston toimintavaiheen aikana, ja ne on laadittu tuulipuiston ympäristövaikutusten arvioinnin (YVA) pohjaksi. Tämä raportti täydentää aiempia tutkimuksia sedimentin leviämisen mallintamisesta tuulipuiston asennustöiden aikana, jotka esiteltiin hakemuksen taustaraportissa.

Olof Skötkonungin tuulipuiston on suunniteltu koostuvan 70 tuulivoimalasta, muuntamosta ja kaapeliverkosta. Tuulivoimalat ottavat talteen osan tuulienergiasta, mikä alentaa tuulennopeuksia paikallisesti tuulipuiston ympäristössä. Tuulen väheneminen riippuu muun muassa tuulivoimaloiden mitoista ja teknisistä ominaisuuksista. Tiedot tuulivoimaloista ja tuulipuiston suunnittelusta on saatu Deep Wind Offshore AS:ltä. Tuulienergian talteenotto aiheuttaa lee-ilmiötä, jotka voivat jossain määrin vaikuttaa paikalliseen aaltojen ja virtausten kulkeutumiseen sekä sekoittumiseen.

Tuuliin, aaltoihin ja virtauksiin kohdistuvien vaikutusten mallintamista on kehitetty hydrodynamiikan ja aaltojen paikallisella kolmiulotteisella yhdistelmämallilla. Vaikutusten kuvaamiseksi on mallinnettu kaksi skenaariota ("perusskenaario" ja toimintavaihe). Perusskenaariossa aallot, virtaukset ja kerrostuminen simuloidaan nykytilanteessa ilman tuulipuistoa. Tuulipuiston toimintavaiheen skenaariota varten on kehitetty korjattu tuulikenttä, joka perustuu tuulipuiston suunnitteluun ja tuulivoimaloiden teknisiin ominaisuuksiin. Tämän jälkeen hydrodynamiikka ja aallot on mallinnettu toimintavaiheen skenaariota varten korjatun tuulen avulla. Lisäksi tuulivoimaloiden perustukset on sisällytetty toimintavaiheen mallinnukseen, jotta rakenteiden vaikutus aaltoihin ja virtauksiin voidaan ottaa huomioon. Perus- ja toimintavaiheen skenaarioiden tuloksia verrattiin sitten tuulen, aaltojen, virtausten ja kerrostuneisuuden osalta. Simulointiajankohdaksi valittiin elokuu, joka vastaa Finngrundetin naapurissa sijaitsevien Natura 2000 -alueiden veden vaihtumisen kannalta *huonointa skenaariota*.

Tuuleen, aaltoihin ja virtauksiin kohdistuvia vaikutuksia koskevat mallinnustulokset osoittavat seuraavaa:

- Korjattu tuulivoimakenttä osoittaa tuulivoimapuiston ollessa toiminnassa lee-vaikutuksia, jolloin tuulen nopeus vähenee. Tuulen suunta on suurimman osan ajasta lounaasta, mikä tarkoittaa, että vaikutus keskimääräiseen tuulennopeuteen tapahtuu pääasiassa puistoalueella ja suoraan puistoalueen pohjois- ja koillispuolella. Vaikutus on suhteellisen paikallinen, mutta keskimääräinen tuulennopeus pienenee 1 % noin 20 km:n etäisyydelle tuulipuiston pohjoisrajasta pohjoiseen/koilliseen.
- Alue, jolla kuukausittainen keskimääräinen merkitsevä aallonkorkeus pienenee 1-2 prosenttia (elokuussa), ulottuu tuulipuiston pohjoispuolelle ja Finngrundet Östra bankenin Natura 2000 -alueen yli. Paikallisesti vähennys on jopa 2,4 prosenttia Natura 2000 -alueen siinä osassa, joka on lähimpänä tuulipuiston itäistä turbiiniryhmää.
- Aallot ja virtaukset on simuloitu yhdistetyssä mallissa, jotta voidaan ottaa huomioon aaltojen ja virtausten välinen vuorovaikutus, jota esiintyy esimerkiksi matalilla alueilla, joilla aallot murtuvat.
- Virtausmalli ja virtausnopeudet puiston sisällä ja Finngrundetin yllä ovat hyvin samankaltaisia sekä toiminta- että perusvaiheessa, mutta toimintavaiheessa nopeudet ovat hieman pienentyneet.
- Tulokset eivät osoita pysyvää merkittävää vaikutusta lämpötila- ja suolapitoisuusprofiileihin elokuussa.
- Finngrundetin vedenvaihtoa koskevat laskelmat osoittavat, että veden vaihtuvuus vähenee, mutta se on hyvin pieni, ja 90 prosenttia vedestä vaihtuu kuudessa päivässä molemmissa skenaarioissa.

Sisällysluettelo

1	Johdanto tutkimukseen.....	5
1.1	Oletukset	6
2	Tiedot.....	7
2.1	Bathymetria	7
2.2	Tuulipuisto	7
3	Mallin kuvaus	10
3.1	Yhdistetty hydrodynaaminen ja aaltomalli (perusmalli).	10
3.1.1	Mallinnusjakso	10
3.1.2	Mallinnusverkko	10
3.1.3	Mallin käyttö	11
3.1.4	Vedenkorkeuden ja kerrostuneisuuden validointi	13
3.1.5	Aaltojen validointi	15
3.2	Hydrodynamiikan ja aaltojen yhdistetty mallintaminen käyttövaiheen aikana.	17
3.2.1	Tuulivoimaloita koskevat oletukset	17
3.2.2	Tuulikenttien korjaus käyttövaiheen aikana	18
3.2.3	Hydrodynamiikan ja aaltojen mallintaminen (toimintavaihe).....	19
3.3	Vedenvaihto Natura-alueella2000 Finngrundet-saari	20
4	Tuuliin, aaltoihin ja virtauksiin kohdistuvien vaikutusten mallintamisen tulokset.	21
4.1	Tuulivaikutus.....	21
4.2	Aaltojen vaikutus.....	24
4.3	Virtausten vaikutus.....	26
4.4	Vaikutus kerrostumiseen ja sekoittumiseen.....	28
4.5	Keskustelu ja päätelmät	35
5	Viitteet.....	37

1 Johdanto hankkeeseen

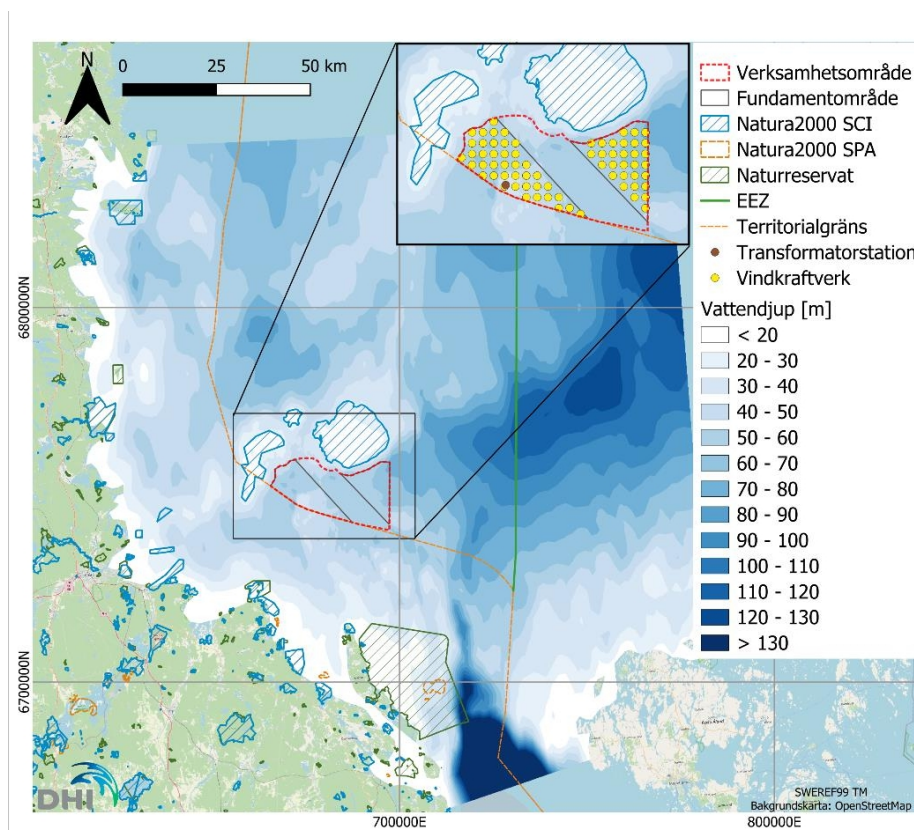
Deep Wind Offshore AS (DWO) on tilannut DHI Sverige AB:ltä (DHI) mallinnuksen tuuliin, aaltoihin ja virtauksiin kohdistuvista vaikutuksista suunnitellun Olof Skötkonungin merituulipuiston osalta. Mallinnustuloksia on käytetty tuulipuiston ympäristövaikutusten arvioinnissa (YVA).

Sedimentin leviäminen tuulipuiston alueella suoritettavien asennustöiden aikana on mallinnettu ja esitetty aiemmassa raportissa, joka oli hakemuksen liitteenä.

Tässä raportissa kuvataan tuulivoimapuiston tuuliin, aaltoihin ja virtauksiin kohdistuvien vaikutusten mallintamista tuulivoimapuiston toimintavaiheen aikana. Tuulipuisto on merkitty punaisella ääriviivalla kuvaan 1.1, jossa on esitetty mallinnusalue ja syvyysolosuhteet.

Raportti on jäsennelty seuraavasti:

- Luvussa 2 kuvataan mallin syöttötiedot ja suunnitellusta tuulipuistosta saadut tiedot.
- Luvussa 3 kuvataan mallinnettujen tuuli-, aalto- ja virtausvaikutusten asetukset.
- Luvussa 4 esitellään mallinnettujen tuuli-, aalto- ja virtausvaikutusten tulokset.



Kuva 1.1 Aaltojen ja hydrodynamiikan mallinnuksessa käytetty alue ja batymetria Olof Skötkonungin tuulipuistossa (punainen katkoviiva).

1.1 Edellytykset

Sovellettu tuulipuisto sijaitsee lähellä Finngrundetin kolmiosaista Natura2000-aluetta. Sovelletun toiminnan vaikutusten analyysissä keskitytään siksi korostamaan vaikutuksia alueen suojelun tasoon (ks. myös YVA). Alueelle on ominaista matala pohja, jossa on kirkasta vettä ja arvokasta pohjakasvillisuutta. Runsaat leväkannat kasvavat pääasiassa alle 7 metrin syvyydessä, ja niitä voi esiintyä jossain määrin myös 10 metrin syvyydessä.

Tärkein uhka leväkannoille on silttilevien kasvu, jota voi esiintyä, jos alueen vesi muuttuu liian seisovaksi. Näin ollen kesän tyynet jaksot ovat herkimmillään, ja siksi tässä tutkimuksessa keskitytään niihin, ja silloin pääasiassa alle 10 metrin syvyyksiin Finngrundetin Natura 2000 -alueilla.

2 Tiedot

Tässä luvussa kuvataan tuulipuistosta saatuja batymetria- ja muita tietoja, joita on käytetty Olof Skötkonungin tuuliin, aaltoihin ja virtauksiin kohdistuvien vaikutusten paikallisten mallien kehittämisessä.

2.1 Bathymetria

Tuulivoimapuiston ympärillä vallitsevien syvyysolosuhteiden esittämiseksi mallissa on käytetty EMODnetin [EMODnet Product Catalogue \(europa.eu\)](https://www.emodnet.eu/) syvyystietoja.

Mallin syvyysuhteet on esitetty kuvassa 2.1. Tuulipuiston alueella syvyys vaihtelee noin 20-70 metrin välillä. Tuulipuiston uloin ääriviiva on merkitty katkoviivalla punaisella viivalla. Tuulipuiston pohjois- ja länsipuolella sijaitsevilla matalammilla alueilla on kolme Natura 2000 -aluetta. Tuulivoimaloiden, sähköaseman (OSS) ja sisäisen kaapeliverkon (IAC) sijainti on esitetty sisäkkäisissä kuvissa DWO:n toimittamien tietojen mukaisesti, kuten jäljempänä 2.2 kohdassa kuvataan.

2.2 Tuulipuisto

Tuulipuisto on esitetty mallinnuksessa DWO:lta saatujen tietojen mukaisesti.

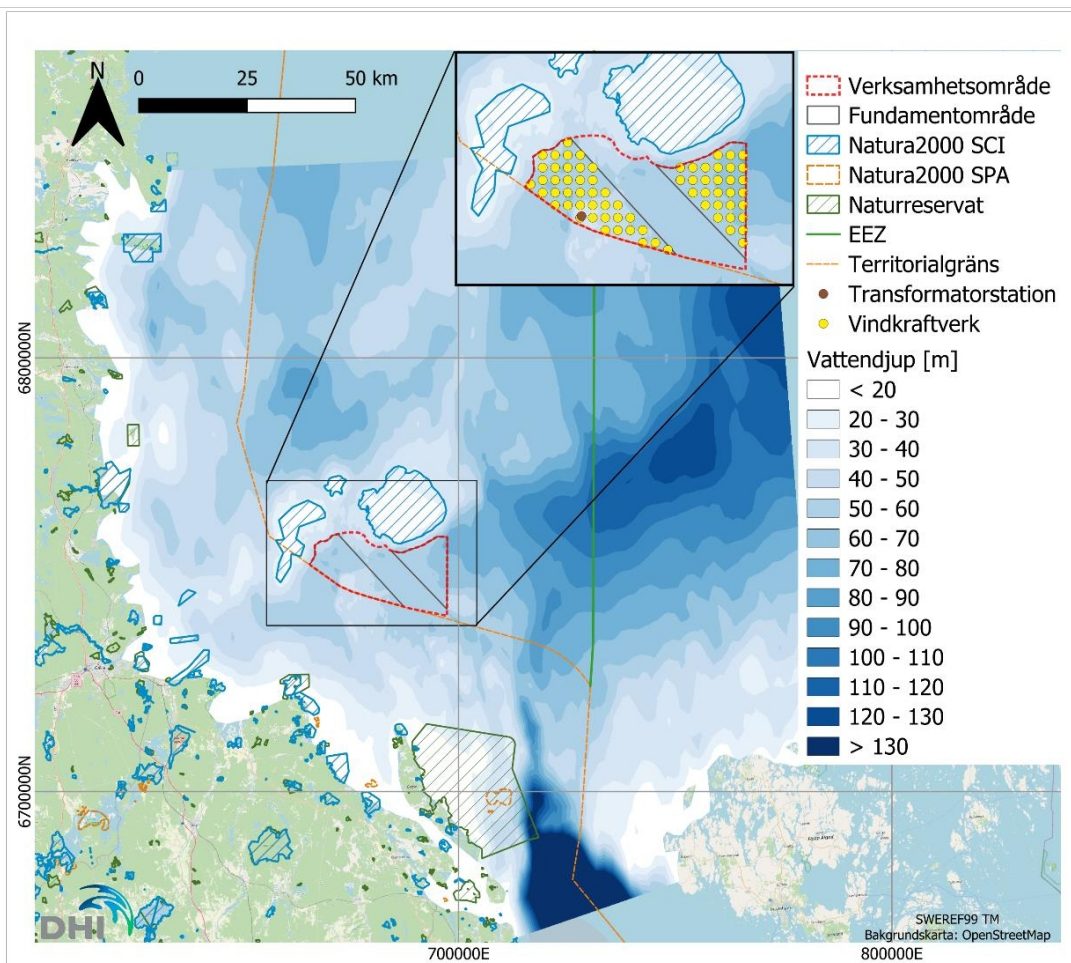
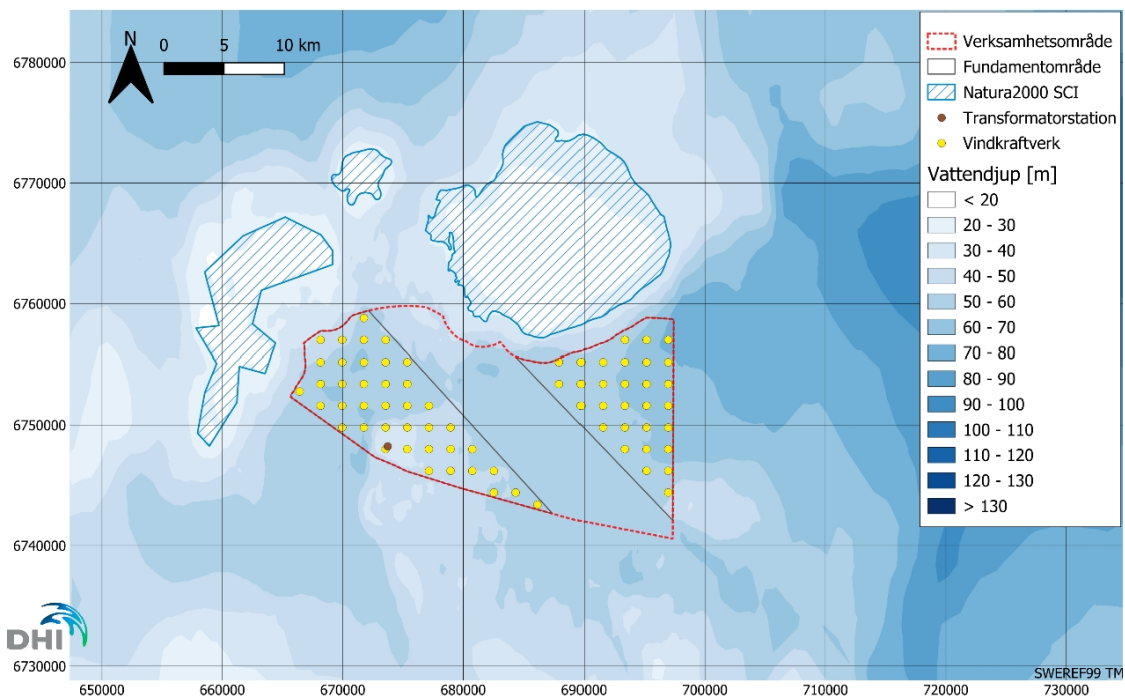
Turbiinien tekniset tiedot on lueteltu seuraavassa:

- Turbiinin roottorin pyyhkäisyhalkaisija: 280 m.
- Turbiinin napakorkeus: 165 m
- Tuulen nopeus: 3,5 m/s
- Tuulen poiskytkentänopeus: 28 m/s
- Tehokertoimen ja työntövoimakertoimen jakautuminen tuulen nopeuden mukaan on saatu perustaksi, mutta niitä ei ole lueteltu tässä.

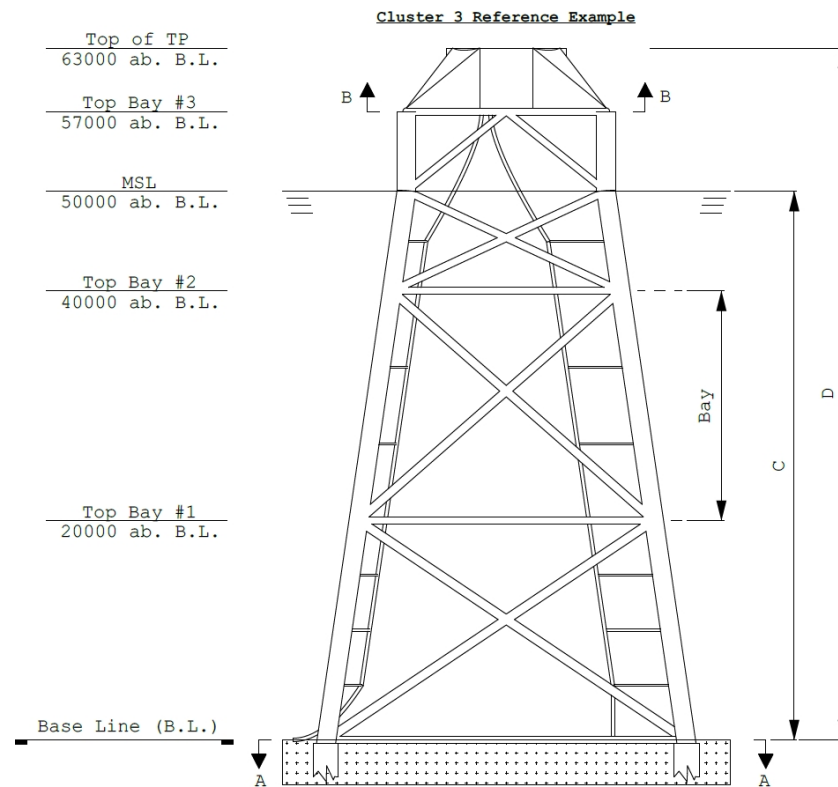
Asennettavat perustukset ovat "vaippatyyppejä", jotka seisovat pohjan päällä ja jotka on ankkuroitu neljällä pohjaan lyötyyn ja porattuun paaluun. Perustusten kaavamainen luonnos on esitetty kuvassa 2.23. Perustusten jalkojen välinen sivuttaispituus pohjassa on 36 m (puiston eri osa-alueiden keskiarvo), ks. merkintä "A" kuvassa 2.23. Perustusten jalkojen välinen sivuttaispituus perustuksen yläosassa (vedenpinnan yläpuolella, ks. merkintä "B" kuvassa 2.23) on 20 m. Perustuksia on 20 kappaletta on 20 m. Tuulipuiston perustusten kokonaismäärä on 71 (joista 70 on tuulivoimaloiden perustuksia ja 1 sähköasema). Paalujen ulkohalkaisija on 2,5-4 m. DWO on ilmoittanut, että sähköaseman mitat olisi oletettava samoiksi kuin tuulivoimaloiden perustusten.

Toiminta-alueen pinta-ala on 395 km² ja perustamisalueen pinta-ala noin 202 km², jotka on esitetty kuvassa 2.1.

Saadun tiedon perusteella mallissa tehdyt tuulivoimaloita koskevat oletukset on kuvattu kohdassa 3.2.1. 3.2.1 Tuulivoimaloita koskevat oletukset on kuvattu kohdassa .



Kuva 2.1 Tuulipuiston batymetria ja pohjapiirros (ylhäällä) ja koko mallinnusalueen batymetria (alhaalla).



Kuva 2.23 Kaaviokuva vaippaperustuksesta.

3 Mallin kuvaus

Mallinnus on tehty kuvaamaan tuulen, aaltojen ja virtausten vaikutusta tuulipuiston toimintavaiheessa. On laadittu kaksi mallinnusskenaariota;

1) ilman tuulipuistoa (perustilanne) ja 2) tuulipuiston kanssa toimintavaiheessa. Näiden kahden skenaarion (perusskenaario ja toimintavaihe) mallintaminen kuvaa tuulipuiston vaikutusta tuuleen, aaltoihin ja virtauksiin.

Hydrodynamiikan ja aaltojen mallinnus on tehty käyttäen mallinnustyökaluja MIKE 3 FM (/4/) ja MIKE 21 SW (/5/), jotka on yhdistetty toisiinsa, jotta voidaan esittää virtausten vaikutus aaltoihin sekä aaltojen vaikutus virtauksiin (säteilystressin kautta aaltojen murtuessa). Tuulikenttien korjaus operatiivisen vaiheen aikana on kehitetty PyWake-ohjelmalla ([Welcome to PyWake - PyWake 2.5.0 documentation \(dtu.dk\)](#)).

Seuraavassa osassa kuvataan malliasetukset molempia skenaarioita varten sekä Natura 2000 Finngrundet Ö:n osalta mallinnetun vedenvaihdon vertailu.

3.1 Yhdistetty hydrodynamiikan ja aaltojen malli (perustilanne).

Jäljempänä kuvataan paikallisen yhdistetyn hydrodynaamisen ja aaltomallin asetukset perusskenaariota varten (ilman tuulipuistoa).

3.1.1 Mallinnusjakso

Virtaus- ja aalto-olosuhteita ja niiden vaihtelua vuoden aikana analysoitiin aluksi simuloimalla vuotta 2020, joka valittiin edustavaksi vuodeksi normaaliolosuhteita varten ilman historiallisia myrskyjä. Tämän analyysin perusteella todettiin, että elokuu oli kuukausi, jolloin veden pintalämpötila oli lämmin ja aalto- ja virtausolosuhteet olivat tyynet, joten se edustaa kesäkautta, jolloin hydrografiset olosuhteet olivat kriittisimmät veden heikon vaihtumisen ja hienojakoisten siiltilevien kasvun riskin kannalta Finngrundetin Natura2000-alueilla. Elokuu 2020 valittiin siksi simulointijaksoksi, koska se edustaa ympäristövaikutusten kannalta pahinta mahdollista tilannetta.

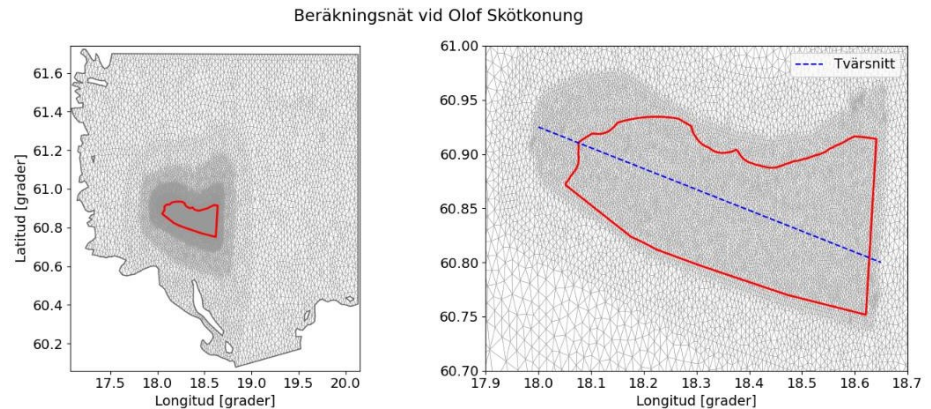
3.1.2 Laskentaruudukko

Paikallisen mallin laskentaverkko on esitetty kuvassa 3.1.

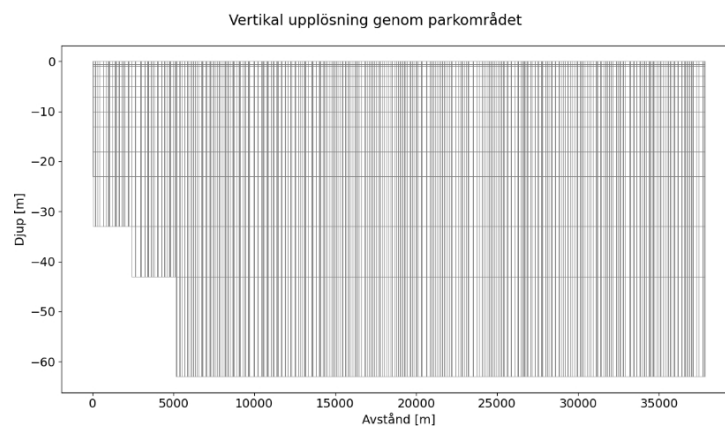
Puistoalueella sijaitseville laskentasuoluille on annettu noin 200-400 metrin sivupituus, jota pidetään riittävänä erottelukyvyn kannalta, jotta voidaan simuloida alueen virtausten vaakasuuntaista kaltevuutta. Korkeimman resoluution solut sijaitsevat tuulipuiston alueella, ja ne karkeutuvat vähitellen mallin ulkoreunoja kohti.

Laskentasuolujen sivupituus mallin ulkoreunoilla on 3 km:n luokkaa.

Mallin vertikaalinen resoluutio koostuu 20 syvyyskerroksesta. Lähimpänä pintaa olevat kerrokset ovat ohuempia ja niiden syvyys voi vaihdella vedenpinnan korkeuden mukaan. Tämän jälkeen on kiinteitä kerroksia, jotka ovat ohuempia vesipatsaan yläosassa, jotta voidaan varmistaa riittävä resoluutio lämpötilan ja suolapitoisuuden kerrostuneisuuden kuvaamiseksi, ja jotka paksuuntuvat asteittain syvemmillä alueilla, joissa vaihtelu on vähäisempää ja joissa tutkimus on myös vähemmän kiinnostavaa. Kuvassa 3.2 esitetään puistoalueen läpi kulkevan laskentaverkon poikkileikkaus.



Kuva 3.1 Olof Skötkonungin paikallismallin laskentaverkko.



Kuva 3.2 Pystysuora resoluutio koostuu kahdesta ohuesta pintakerroksesta, joiden paksuus voi vaihdella vedenpinnan mukaan, ja 18 kiinteästä syvyyskerroksesta. Kerrokset ovat ohuimpia lähellä pintaa. Poikkileikkaus esittää puistoalueen läpi kulkevaa leikkausta lännestä itään, joka on merkitty sinisellä katkoviivalla kuvan 3.1 sisäkuvassa.

3.1.3 Mallin ajaminen

Hydrodynamiikan ja aaltojen yhdistelmämallin pakotteet (reunaehdot) on johdettu alueellisista tiedoista.

Alueella virtaukset syntyvät pääasiassa alueellisista tuulimalleista ja ilmanpaine-eroista.

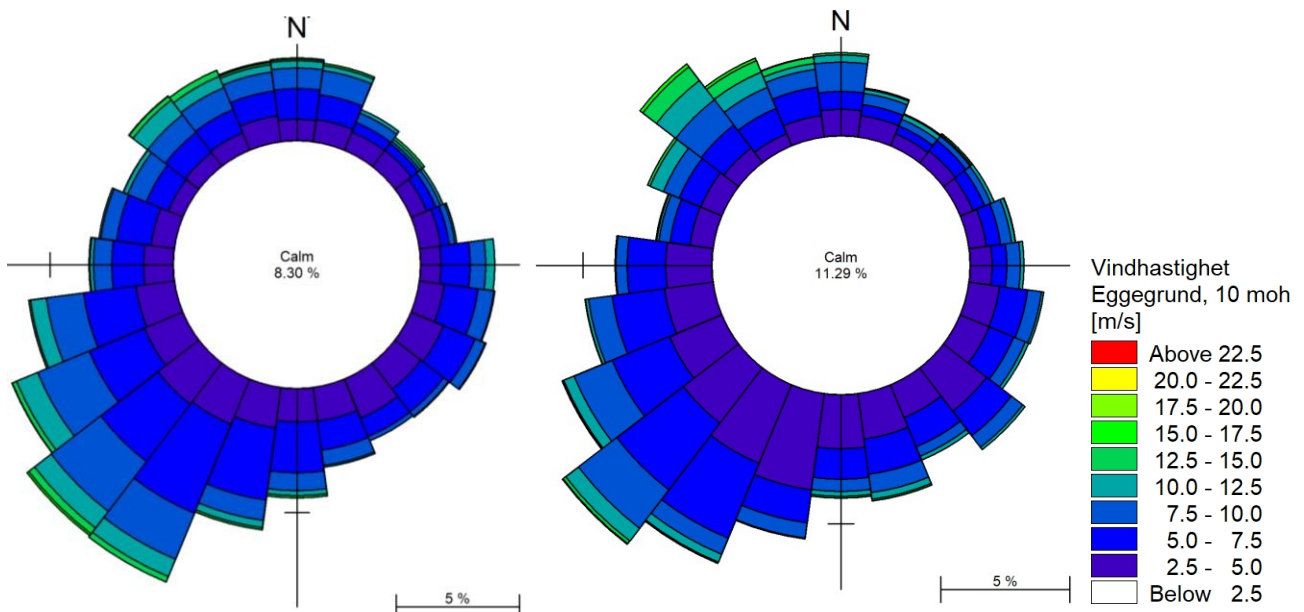
Meteorologiset kentät, jotka sisältävät tuulen nopeuden ja suunnan, ilmanpaineen ja ilman lämpötilan, on haettu NORA:sta3, /6/. Vertailun vuoksi havaittuun tuuleen on kuvassa 3.3 esitetty tuuliruusu SMHI:n mittausasemalla Eggegrundissa Gävlen ulkopuolella, ja siinä on esitetty tuulen nopeuden ja suunnan jakauma vuonna 2020.

Merentutkimuksen reunaehdot on johdettu kahdesta eri mallista. Vedenkorkeus sekä virtauksen nopeus ja suunta ovat CMEMS:stä (<https://doi.org/10.48670/moi-00010>). Suolapitoisuus ja lämpötila on otettu HyComista (<https://www.hycom.org/hycom/overview>). Eri lähteet valittiin mittauksiin vertaamisen jälkeen, jotta saataisiin mahdollisimman tarkat reunaehdot.

Paikallisen mallinnusalueen ulkopuolella syntyviä saapuvia aaltoja koskevat reunaehdot koostuvat aaltotiedoista (merkittävä aallonkorkeus, aallon huippujakso,

aallon suunta ja suuntien keskihajonta), jotka on haettu alueellisesta aaltomallista (DHI metocean data portal <https://www.metocean-on-demand.com/>).

Delångersån-, Dalälven-, Nianån-, Norralaan-, Ljusnan-, Skärjån-, Hamrångeån-, Hamrångeån-, Testeboån-, Gavleån-, Forsmarksån-, Tamnårån-, Olandsån- ja Skeboån-virtausten virtaamat on haettu SMHI:n S-HYPE-järjestelmästä. Ne syöttävät makeaa vettä mallinnusalueelle, joten pinnan suolapitoisuus on mallissa hyvin edustettuna (<https://www.smhi.se/data/hydrologi/vattenwebb>).

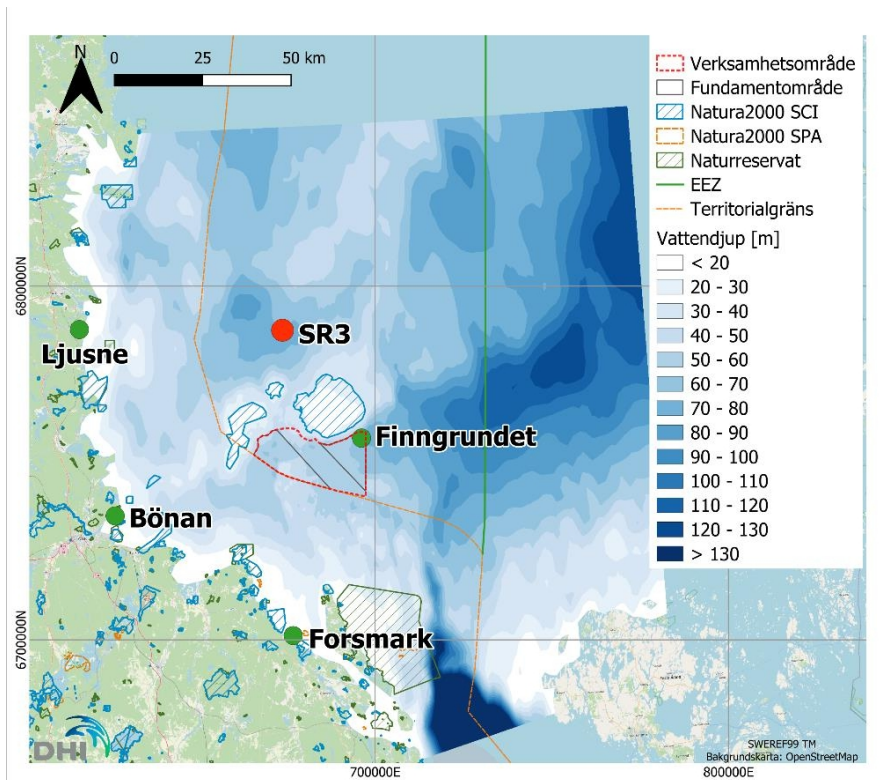


Kuva 3.3 Tuuli nousi vuonna 2020 SMHI:n Eggegrundin asemalla NORA3:n alueellisten tietojen (vasemmalla) ja SMHI:n havaittujen tuulien (oikealla) perusteella.

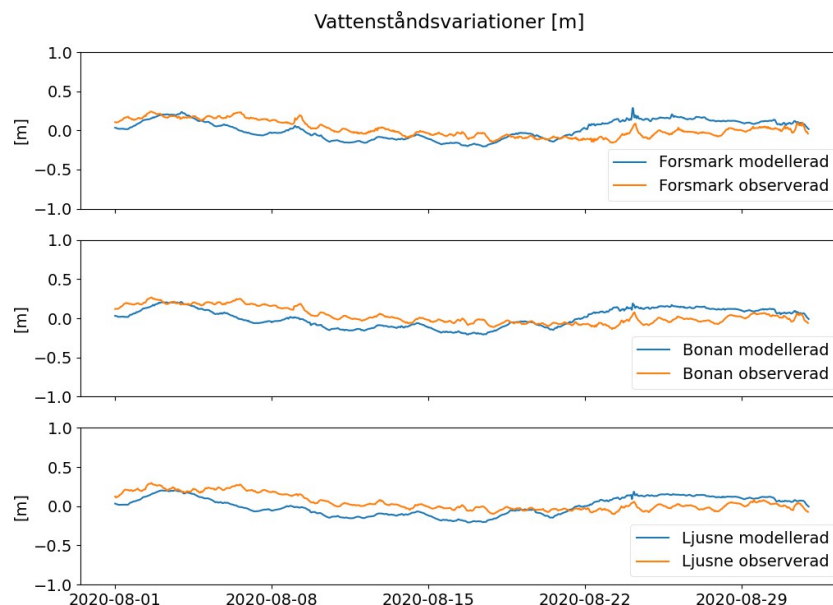
3.1.4 Vedenkorkeuden ja kerrostuneisuuden validointi

Paikallisen hydrodynaamisen mallin validointi on tehty vertaamalla mallin tuloksia alueelta tehtyihin havaintoihin. Asemat, joilla on havaintotietoja, on esitetty kuvassa 3.4. Vihreät merkit osoittavat asemat, joilla on havaitut vedenkorkeudet, ja punaiset merkit osoittavat asemat, joilla on havaitut lämpötila- ja suolapitoisuusprofiilit.

Vedenkorkeuden vaihtelut validoitiin SMHI:stä saatujen havaittujen arvojen aikasarjoihin Bönan SJÖV:n, Forsmarkin ja Ljusnen seuranta-asemilla. Mallinnetut ja havaitut aikasarjat esitetään kuvassa 3.5. Malli kuvaa vedenkorkeuden vaihtelua suhteellisen hyvin.

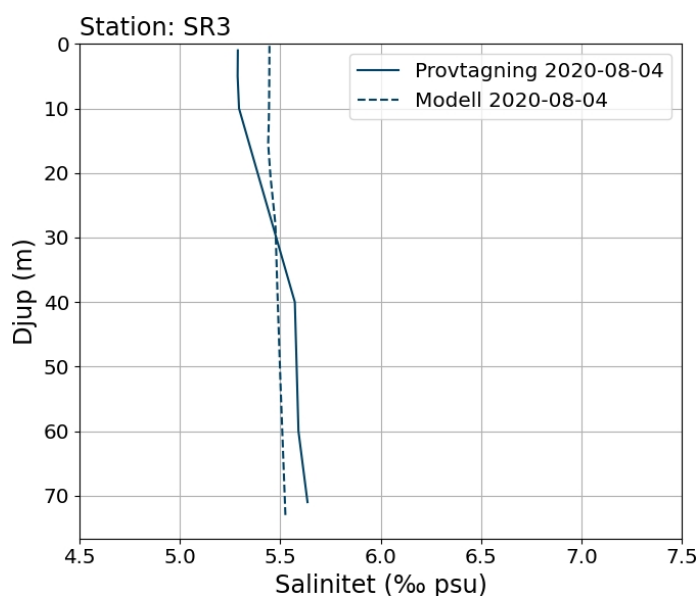


Kuva 3.4 Asemat, joilta on saatu havaintotietoja: vedenkorkeus (vihreä merkki) sekä lämpötilan ja suolapitoisuuden profiili (punainen merkki).



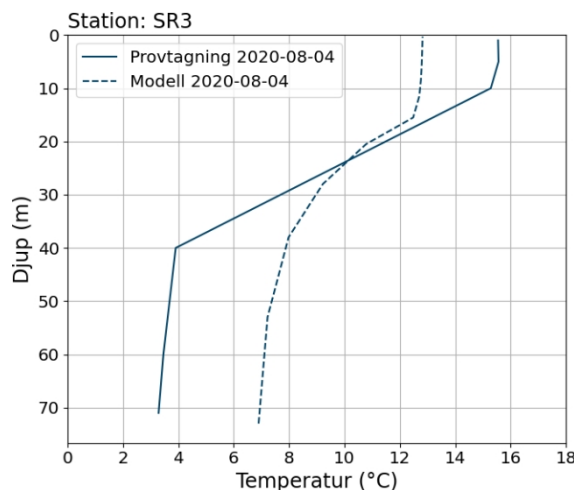
Kuva 3.5 Vedenkorkeus suhteessa keskimääräiseen merenpinnan tasoon, havaittu (oranssi) ja mallinnettu (sininen) asemilla Bönan, Forsmark ja Ljusne.

Suolapitoisuusprofiilit (jotka osoittavat mallin kyvyn esittää kerrostuneisuutta ja vertikaalista sekoittumista) validoitiin SMHI:stä ([SharkWeb \(smhi.se\)](https://sharkweb.smhi.se)) saatujen havaintotietojen perusteella. Mallinnetut ja havaitut profiilit on esitetty kuvassa 3.6. Mallinnettu suolapitoisuus on lähellä havaittuja arvoja noin 5,5 psu. Kerrostuneisuus on alueella yleisesti ottaen heikkoa, ja pinnan ja pohjan välinen ero on noin 0,5 psu. Valitettavasti Finngrundetin sisäpuolisilta matalilta alueilta ei ole mittaustuloksia, ja on epätodennäköistä, että yli 20 metrin syvyydessä suolapitoisuudella olisi merkitystä virtauksen nopeuteen ja vaihtuvuuteen Natura 2000 -alueiden matalammissa osissa. Mittaukset eivät osoita kerrostuneisuutta 0-10 metrin syvyydessä. Huomattakoon, että alueen kerrostuneisuudesta saadakse kuvan on analysoitu useampia asemia kuin kuvassa on esitetty, vaikka valitettavasti mittauksia on tehty hyvin vähän.



Kuva 3.6 Mallinnetut ja havaitut suolapitoisuuden syvyysprofiilit.

Samanlainen väite voidaan esittää lämpötilan pystysuuntaisesta gradientista. Mallinnettu lämpötilan kerrostuneisuus kuvaa yleensä syvyysvaihtelua, sillä lämpötila on suhteellisen vakio ylimmässä 10 metrin syvyydessä ja kerrostuneisuus muutaman kymmenen metrin syvyydessä. Havaittu profiili on haettu SMHI:stä ([SharkWeb \(smhi.se\)](https://sharkweb.smhi.se)). Sekä suolaprofiili että lämpötilaprofiili osoittavat, että vesipatsaan ylimmässä osassa ei ole kerrostuneisuutta (mittaukset ja malli ovat yksiselitteisiä).

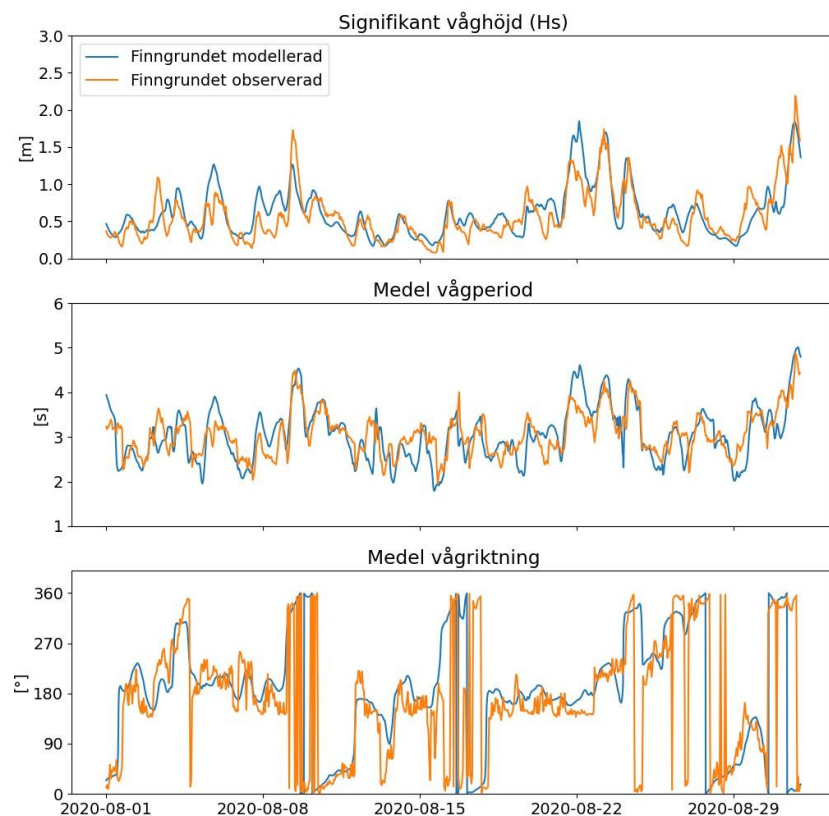


Kuva 3.7 Mallinnetut ja havaitut lämpötilan syvyysprofiilit.

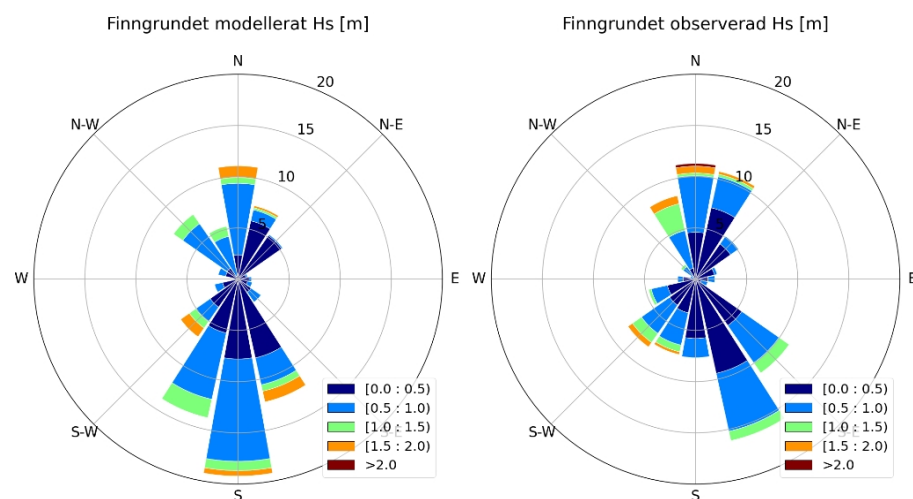
3.1.5 Aaltojen validointi

Mallinnetut aallot on validoitu vertaamalla niitä havaittuihin aaltoihin. Havaitut aikasarjat on saatu SMHI:n Finngrundetin asemalta, ks. kuva 3.4. Ote havaituista ja mallinnetuista aikasarjoista (merkitsevä aallonkorkeus, aallon huippujakso ja aallon suunta) on esitetty kuvassa 3.8. Ote osoittaa, että aaltodynamiikka on mallissa hyvin edustettuna tuulipuiston lähellä.

Aallonkorkeus ja -suunta Finngrundetissa koko mallinnusvuoden 2020 ajan on esitetty kuvan 3.9 aaltoruusuilla, mallinnettu (ylhäällä) ja havaittu (alhaalla). Kuvasta käy ilmi, että malli yleisesti ottaen kuvaa tuulipuiston kohdalla vallitsevia pohjois- ja etelä-kaakkois-suuntaisia aaltosuuntia.



Kuva 3.8 Ote havaitusta (oranssi) ja mallinnetusta (sininen) merkitsevstä aallonkorkeudesta (Hs, ylhäällä), keskimääräisestä aaltojaksosta (T01, keskellä) ja aallon suunnasta (alhaalla).



Kuva 3.9 Merkitsevä aallonkorkeus ja aallon suunta Finngrundetissa elokuussa 2020, mallinnettu (vasemmalla) ja havaittu (oikealla).

3.2 Hydrodynamiikan ja aallokon yhdistetty mallintaminen käyttövaiheen aikana.

Tuulipuiston käyttövaiheen skenaariota varten on kehitetty korjattu tuulikenttä, joka perustuu tuulipuiston suunnitteluun ja tuulivoimaloiden teknisiin ominaisuuksiin. Korjattu tuulikenttä sisältää arvioidut lee-ilmiöt, jotka ilmenevät tuulivoimaloiden ollessa toiminnassa, kun tuulen nopeus vähenee. Hydrodynamiikka ja aallot on mallinnettu toimintavaiheen skenaariota varten korjatun tuulen avulla. Lisäksi tuulivoimaloiden perustukset on sisällytetty toimintavaiheen mallinnukseen, jotta rakenteiden vaikutus aaltoihin ja virtauksiin voidaan ottaa huomioon. Hydrodynamiikan ja aaltojen oletukset, tuulikentän korjaus ja mallinnusasetelma toimintavaiheen hydrodynamiikkaa ja aaltoja varten kuvataan seuraavissa kohdissa.

3.2.1 Tuulivoimaloita koskevat oletukset

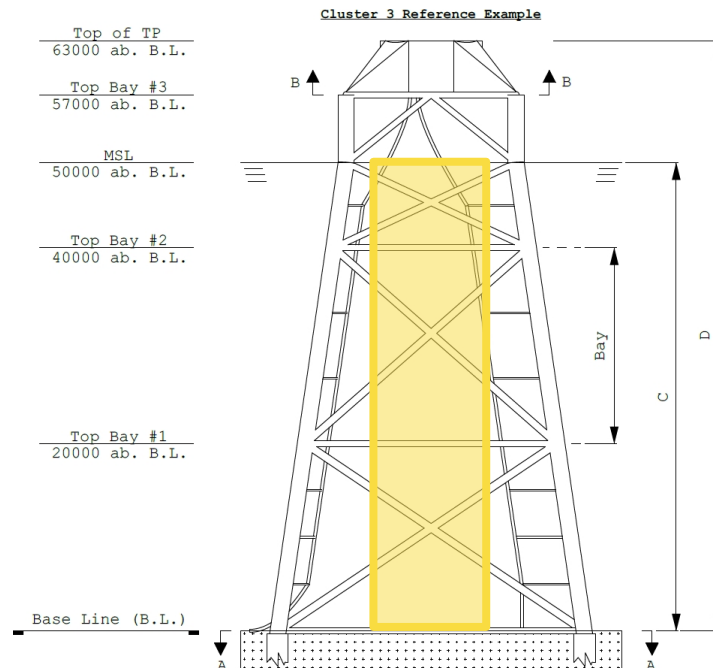
DWO on toimittanut tietoja puistoalueella sijaitsevista tuulivoimaloista, ks. kohta 2.2. Saatujen tietojen perusteella on tehty muutamia oletuksia, jotka kuvataan tässä.

Tuulivoimaloiden tornien halkaisijaksi (vedenpinnan yläpuolella) on arvioitu 14 metriä perustusten luonnoksen ja perustusten yläreunan 20 metrin sivupituuden perusteella (ks. kohta 2.2).

Tuulivoimalan ja sähköaseman perustukset ("vaippa") esitetään mallissa yksinkertaisena sylinterinä, jonka mitat perustuvat perustusten poikkipinta-alaan ja joka muodostaa virtausvastuksen ja vähentää aaltoenergiaa perustusten leeward-puolella. Mallissa käytetty tehollinen poikkipinta-ala perustuu rakenteen pohjapaalujen väliseen etäisyyteen ja veden syvyyteen kunkin tuulivoimalan kohdalla. Pohjapaalujen keskimääräinen etäisyys on 36 metriä tuulipuiston eri perustusten osalta (ks. 2.2 kohta). Rakenteen on oletettu olevan 30-prosenttisesti kiinteä, joten mallissa perustuksia edustavan sylinterin tehollinen halkaisija on 12 metriä. Perustusten yksinkertaistetun esityksen oletetaan olevan konservatiivinen, koska todellisen rakenteen, jossa on ohuempia tukijalkoja ja aukkoja, pitäisi aiheuttaa vähemmän kitka- ja turbulenssivaikutuksia kuin huomattavasti suuremman kiinteän rakenteen, vaikka tehollinen halkaisija olisikin sama.

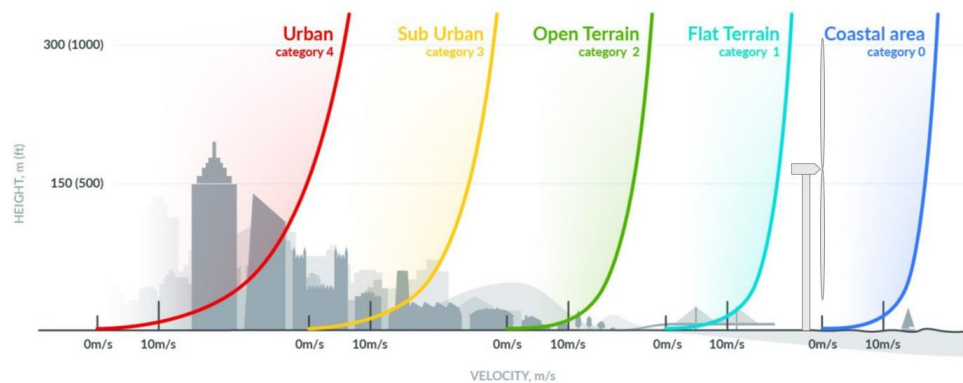
Kaavamainen luonnos perustusten esittämisestä aaltojen ja virtausten vaikutusten mallintamisessa on esitetty kuvassa 3.10 (ei mittakaavassa).

Malliin ei ole sisällytetty merenpohjan mahdollisia huuhtoutumissuojia, koska niiden vaikutus on suhteellisen pieni verrattuna muihin perustuksiin.



Kuva 3.10 Kaaviokuva merenpohjan perustusten esittämisestä (keltaisella) aaltojen ja virtausten vaikutusten mallintamisessa (ei mittakaavassa).

3.2.2 Tuulikenttien korjaus käyttövaiheen aikana



Kuva 3.11 Kaaviokuva tuuliprofiilista roottorin lapojen korkeudella (tuuliprofiilit otettu osoitteesta <https://www.simscale.com/docs/analysis-types/pedestrian-wind-comfort-analysis/wind-conditions/atmospheric-boundary-layer/>).

Kuvassa 3.11 esitetään kaavamaisesti, miten tuulivoimalan roottori sijaitsee suhteessa tuuliprofiiliin.

Tuulivoimalaitoksista saatuihin tietoihin (kohta 2.2) perustuva tuulivoimakenttien korjaus käyttövaiheen aikana on laskettu PyWake-ohjelmalla ([Welcome to PyWake - PyWake 2.5.0 documentation \(dtu.dk\)](https://www.pywake.com/)). PyWake on Python-pohjainen työkalu, jota voidaan käyttää muun muassa tuulivoimapuistojen tuulivoimakenttien laskemiseen, kun tuulennopeudet ovat pienemmät tuulivoimaloiden leeward-puolella. PyWake on kehitetty Tanskan teknisessä yliopistossa.

Jotta voidaan laskea tuulennopeuden pienentyminen tuulivoimaloiden leeward-puolella ja tuottaa korjattu tuulikenttä, tarvitaan meteorologisia syöttötietoja. Ne saatiin NORA3, /6/. Tuulivoimapuiston pisteestä poimittiin meteorologisten parametrien aikasarja, joka sisältää tuulen nopeuden, tuulen suunnan, ilman lämpötilan, kosteuden, merenpinnan lämpötilan ja keskimääräisen ilmanpaineen merenpinnalla. Näiden parametrien avulla lasketaan tuulennopeus turbiinin korkeudella (niin sanotulla COARE bulk air-sea flow -menetelmällä, ks. esim.

/PyWake-ohjelmassa lasketaan tuulen nopeuden väheneminen tuulivoimalan leeward-puolella. Vähennys riippuu useista turbiiniparametreista, kuten halkaisijasta ja energiakertoimista. Jotkin kertoimet puolestaan riippuvat tuulen nopeudesta, ja ne päivitetään PyWakessa tämän mukaisesti. Tuloksena on tuulipuiston ja sen lähiympäristön kattava vektorikenttä, jossa alennettu tuulennopeus on määritetty kullekin ruudukkosolulle ja aika-askeleelle. Tätä paikallista vektorikenttää sovelletaan malliin, jotta tuulivoimaloiden leeward-puolella olevat alennetut tuulennopeudet saadaan kuvattua.

Alennetun tuulennopeuden laskeminen on malli, joka perustuu joihinkin oletuksiin. Esimerkiksi tuulennopeuden laskennassa turbiinin korkeudella COARE:n kautta, ja että PyWakessa käytetään yhdestä pisteestä saatuja tuulitietoja. Kun alennetun tuulen nopeuden laskenta turbiinin korkeudella on suoritettu, tuuli 10 metrin korkeudella arvioidaan olettamalla, että tuulen nopeus noudattaa logaritmista profiilia.

3.2.3 Hydrodynaaminen ja aaltomalli (toimintavaihe)

Kehitettyä korjattua tuulta (ks. kuvaus 3.2.2 kohdassa) on sovellettu aaltojen, virtausten ja kerrostuneisuuden yhdistettyyn hydrodynaamiseen mallintamiseen toimintavaiheen skenaariossa. Lisäksi malliin on sisällytetty tuulipuiston perustukset.

Perustusten vaikutus virtaukseen mallinnetaan laskemalla tehollinen virtausvastus kunkin yksittäisen perustuksen kohdalla seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$F = \frac{1}{2} \rho_w \gamma C_D A_e v^2$$

jossa ρ_w on veden tiheys, γ on vakiokerroin, joka ottaa huomioon tukkeutumisvaikutuksista johtuvat kasvaneet virtausnopeudet, C_D on virtausvastuskerroin, A_e on perustuksen tehollinen poikkipinta-ala vesipatsaassa kussakin paikassa ja v on virtausnopeus. Kun vastus, F on suurempi kuin nolla, se edustaa voimaa virtauksen vastakkaiseen suuntaan. Rakenteiden mallintaminen MIKE 3 FM:ssä on kuvattu kohdassa /1/.

Perustusten vaikutusta aaltoihin simuloidaan laskemalla aaltoenergian väheneminen kunkin perustuksen takana. Aaltoenergian väheneminen lasketaan kunkin perustuksen kohdalla seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$S_{i,l,m} = -\frac{c}{A_i} c_g E_{i,l,m}$$

, jossa A_i on sen laskentaverkon solun pinta-ala, jossa perustus sijaitsee, c on heijastuskerroin, c_g on aaltojen ryhmäkerrosnopeus ja $E_{i,l,m}$ on aaltospektrin energiatiheys. Yksinkertaisen sylinterin edustaman perustuksen tapauksessa heijastuskerroin saadaan $c = D \cdot r$, jossa D on sylinterin halkaisija ja $0 \leq r \leq 1$ on heijastuskerroin. Heijastuskerroin, r , riippuu syvyydestä ja aaltojaksosta. Tätä kuvataan tarkemmin kohdassa /5/.

Muutoin yhdistetyn hydrodynaamisen mallin asetukset tehdään samalla tavalla kuin perusskenaariossa, ks. kuvaus 3.1 kohdassa.

Aaltojen ja virtausten väliset vuorovaikutukset on otettu huomioon (esim. aaltojen aiheuttama virtaus *säteilystressin* kautta).

3.3 Vedenvaihto Natura 2000 -verkostoon kuuluvalla Finngrundetin saarella

Hydrodynaamisen ja aaltomallinnuksen tuloksia (perusskenaario ja toimintavaihe) käytettiin lisäksi liikennemallin ajamiseen, jossa osoitettiin vaikutus veden vaihtoon Finngrundet Östrassa. Tässä mallissa kaikille Natura 2000 -alueen laskentasoluille annettiin kuvitteellinen merkkiainekonsentraatio, jonka arvo oli 100 prosenttia 1. elokuuta. Tämän jälkeen virtaukset hajottavat aluksi alueella olevan veden niin, että arvot pienenevät vähitellen. Jos arvo on esimerkiksi 50, se tarkoittaa, että 50 prosenttia 1. elokuuta solussa olleesta vedestä on korvattu Natura 2000 -alueen ulkopuolelta tulevalle vedelle. Jos arvo on 0, kaikki solun vesi on korvattu. Vertailemalla veden vaihtumisnopeutta tuulipuiston kanssa ja ilman tuulipuistoa saadaan kuva siitä, miten paikallinen veden vaihtuvuus muuttuu.

4 Tuuliin, aaltoihin ja virtauksiin kohdistuvien vaikutusten mallintamisen tulokset.

Tässä jaksossa esitellään tuulivoimapuiston toimintavaiheen aikana tuuliin, aaltoihin ja virtauksiin kohdistuvien vaikutusten simuloinnin tulokset. Esitetyt tulokset osoittavat seuraavaa:

- Ero tuuliolosuhteissa.
- Merkitsevän aallonkorkeuden ero.
- Virtausnopeuden ero.
- Stratifikaatio- ja sekoittumisolosuhteet esitetään lämpötilan ja suolapitoisuuden syvyysprofiilien avulla ja miten Natura2000-alueella tapahtuu 100 prosentista alkavan kuvitteellisen pitoisuuden laimeneminen.

4.1 Tuulen vaikutus

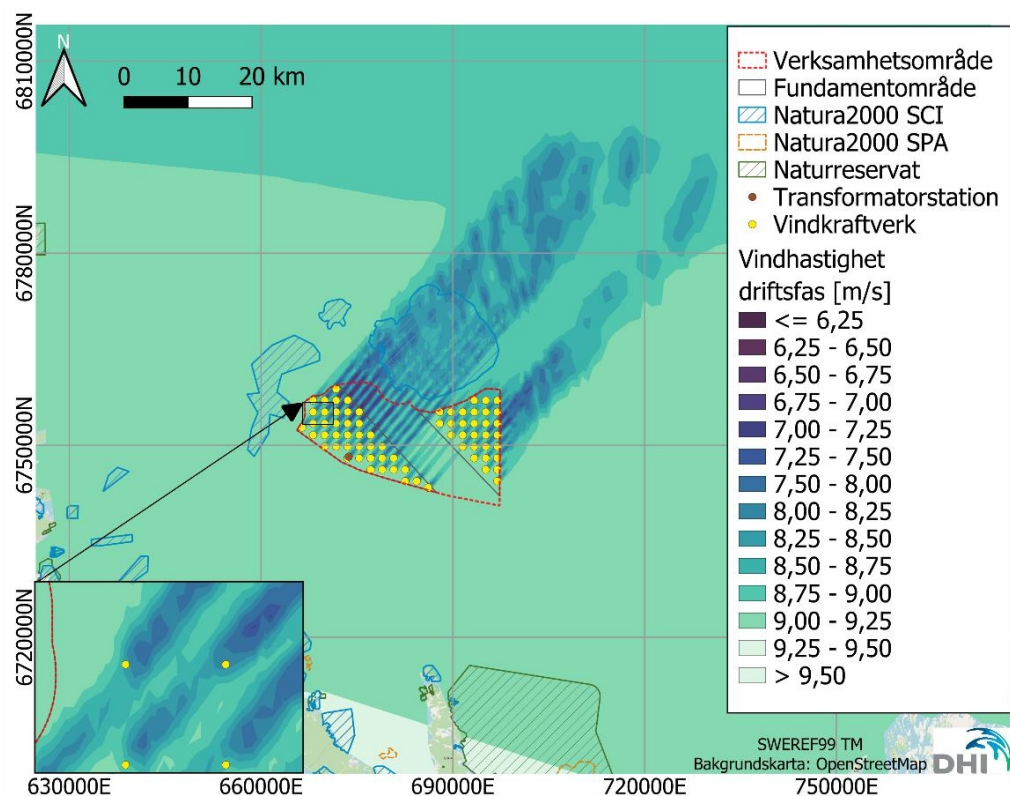
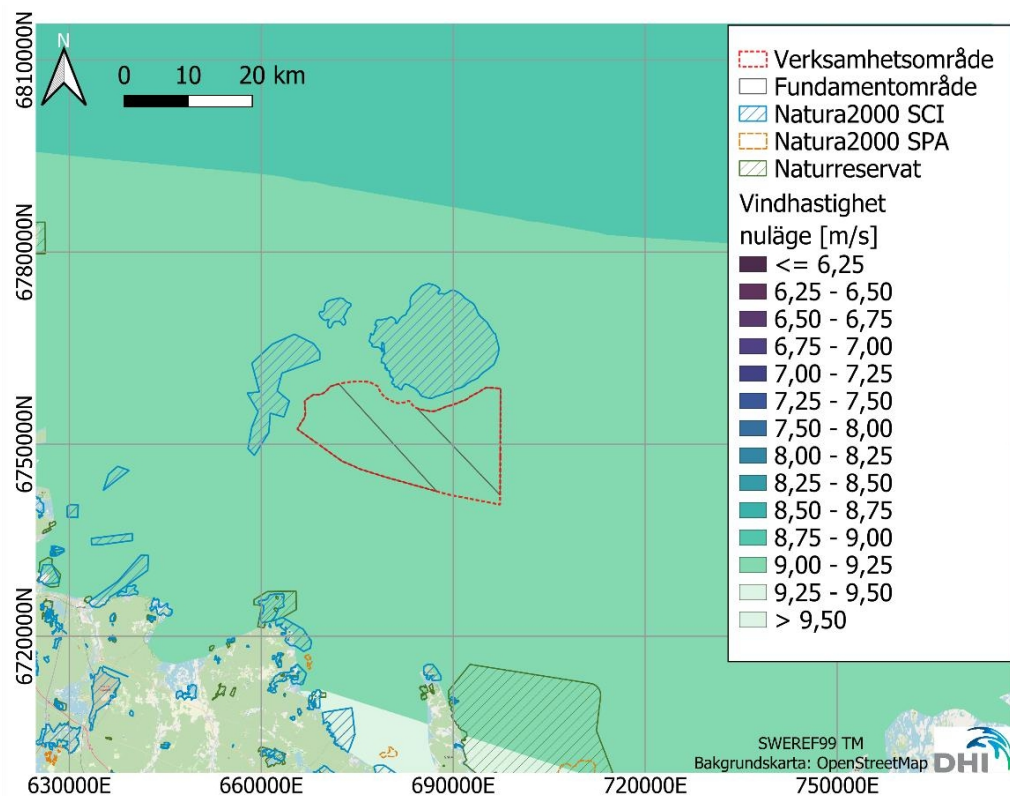
Kuvassa 4.1 esitetään tilannekuva tuulen nopeudesta ilman tuulipuistoa ja tuulipuiston kanssa tuulisena aikana (tuulen nopeus noin 9 m/s). Alin kuva osoittaa korjattua tuulen nopeutta toimintavaiheen aikana, jolloin tuulennopeudet ovat pienentyneet tuulivoimaloiden tuulensuojan alapuolella.

Keskimääräinen tuulennopeus simulointijakson aikana (lähtötilanne ilman tuulivoimaloita) on esitetty kuvassa 4.2.

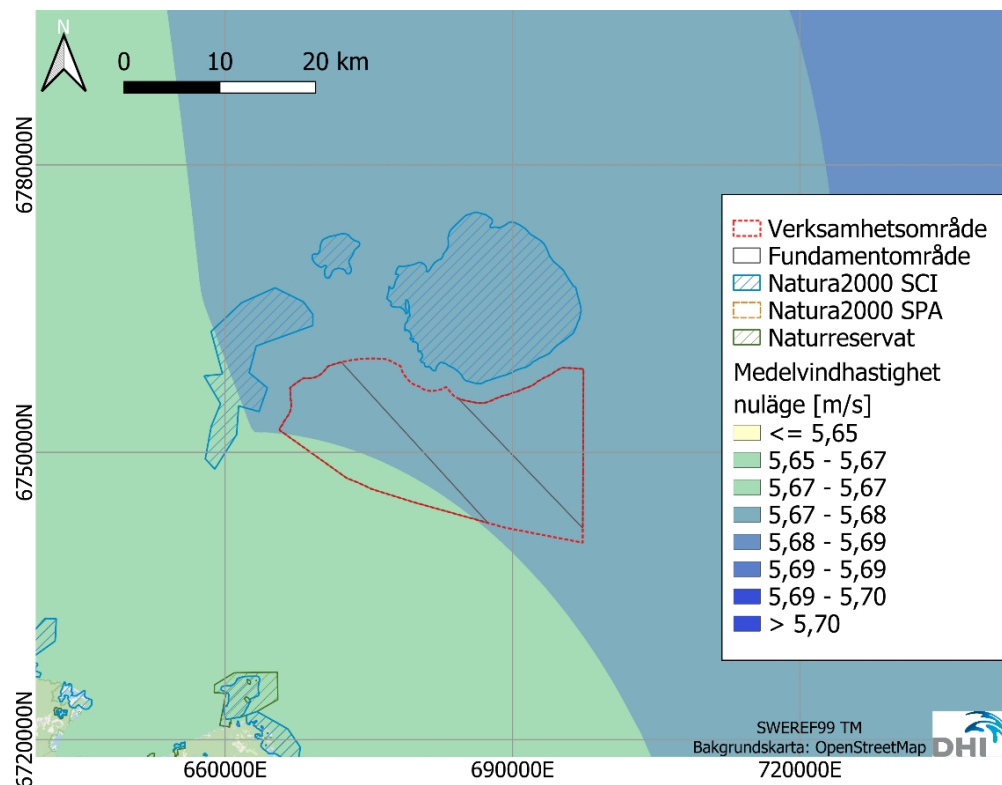
Keskimääräisen tuulennopeuden ero elokuun aikana kahden skenaarion (perusskenario ja toimintavaihe) välillä on esitetty kuvassa 4.3.

Tuulipuistossa vallitseville tuuliolosuhteille on ominaista lounaasta puhaltava tuuli (ks. kuva 3.3). Tämä tarkoittaa, että keskimääräisen tuulennopeuden väheneminen tapahtuu pääasiassa puistoalueen pohjois-koillispuolella ja paikallisesti puistoalueen sisällä. Keskimääräinen tuulennopeus alueella on noin 5,7 m/s, ja se pienenee yli 1 % enintään noin 20 km:n etäisyydellä tuulipuistoalueen rajasta pohjois-koilliseen (kuva 4.3). Keskimääräinen tuulen nopeus alenee yli 5 prosenttia lähinnä puistoalueella.

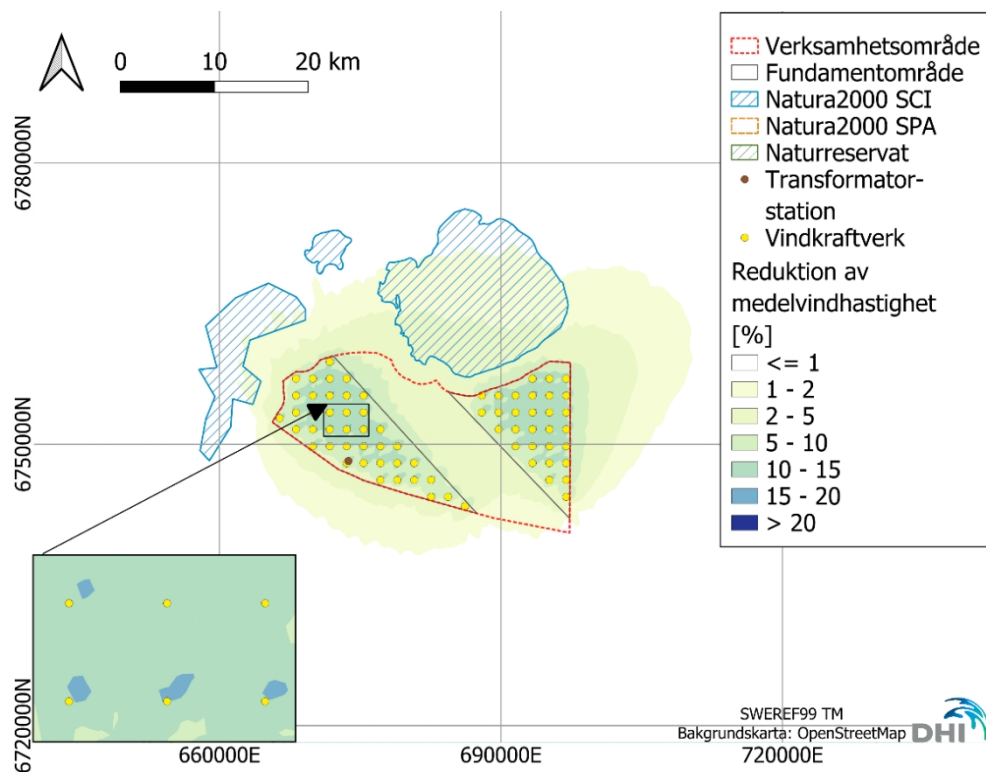
Myös pohjois-luoteistuulet ovat alueella yleisiä (kuva 3.3). Puistoalueen eteläpuolella keskituulennopeus vähenee 1 prosentin verran aina noin 10 kilometrin etäisyydelle tuulipuiston etelärajasta (kuva 4.3).



Kuva 4.1 Tuulen nopeuden tilannekuva (10 m korkeudella merenpinnasta) ilman tuulipuistoa (ylhäällä) ja tuulipuiston kanssa (alhaalla). Näytetty aika-askel on 9. elokuuta 2020 klo 02:00, jolloin tuulen nopeus oli noin 9 m/s.



Kuva 4.2 Keskimääräinen tuulen nopeus elokuussa 10 metrin korkeudella merenpinnasta.

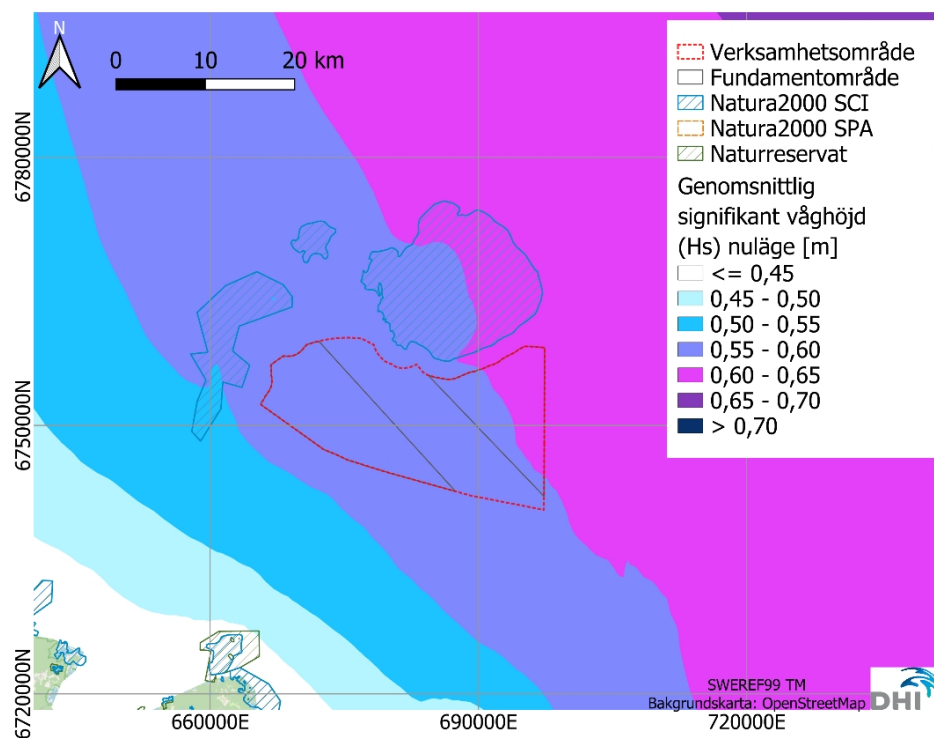


Kuva 4.3 Keskimääräisen tuulennopeuden pieneneminen elokuussa 10 metriä merenpinnan yläpuolella.

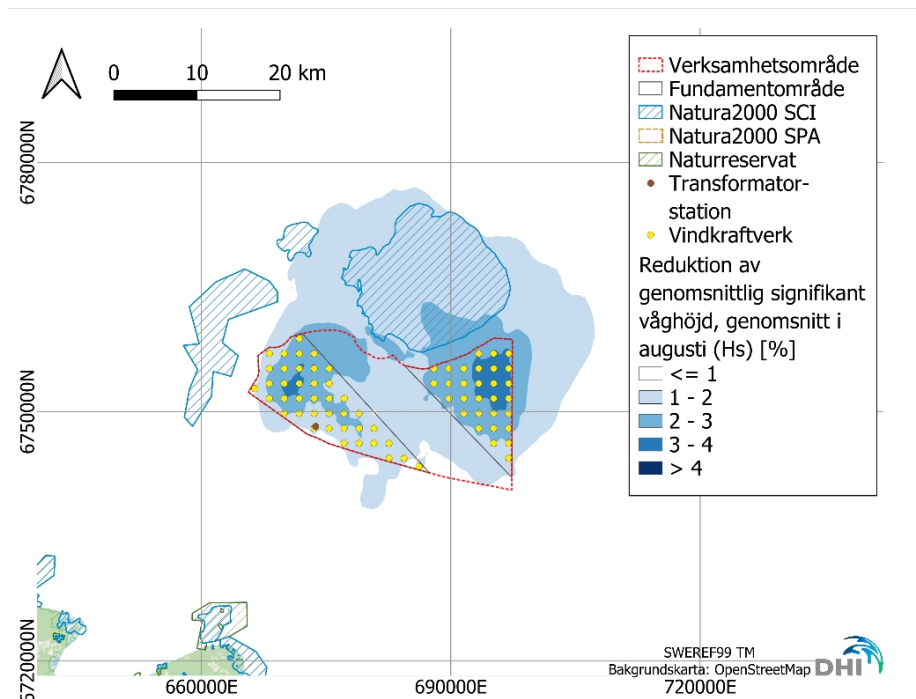
4.2 Aaltojen vaikutus

Keskimääräinen merkitsevä aallonkorkeus (perustaso) elokuussa on esitetty kuvassa 4.4. Keskimääräinen aallonkorkeus tuulipuiston alueella on 0,55-0,6 metriä.

Elokuun kuukausittaisen keskimääräisen merkitsevän aallonkorkeuden ero kahdessa skenaariossa (perusskenaario ja toimintavaihe) on esitetty kuvassa 4.5. Vähennys on suurin tuulivoimaloiden ympärillä, noin 4,8 prosenttia 150 metrin säteellä. Vähennys vähenee asteittain etäisyyden kasvaessa kahdesta voimalaryhmästä. Suurin vähennys Finngrundetissa on 2,4 prosenttia, joka on Natura 2000 -alueen siinä osassa, joka on lähimpänä tuulipuiston itäistä turbiiniryhmää. Alue, jolla aaltojen vähennys on vähintään 1 %, ulottuu noin 20 km pohjoiseen, 10 km itään ja 6 km etelään tuulipuistosta.



Kuva 4.4 Keskimääräinen merkitsevä aallonkorkeus elokuussa (lähtötilanne).

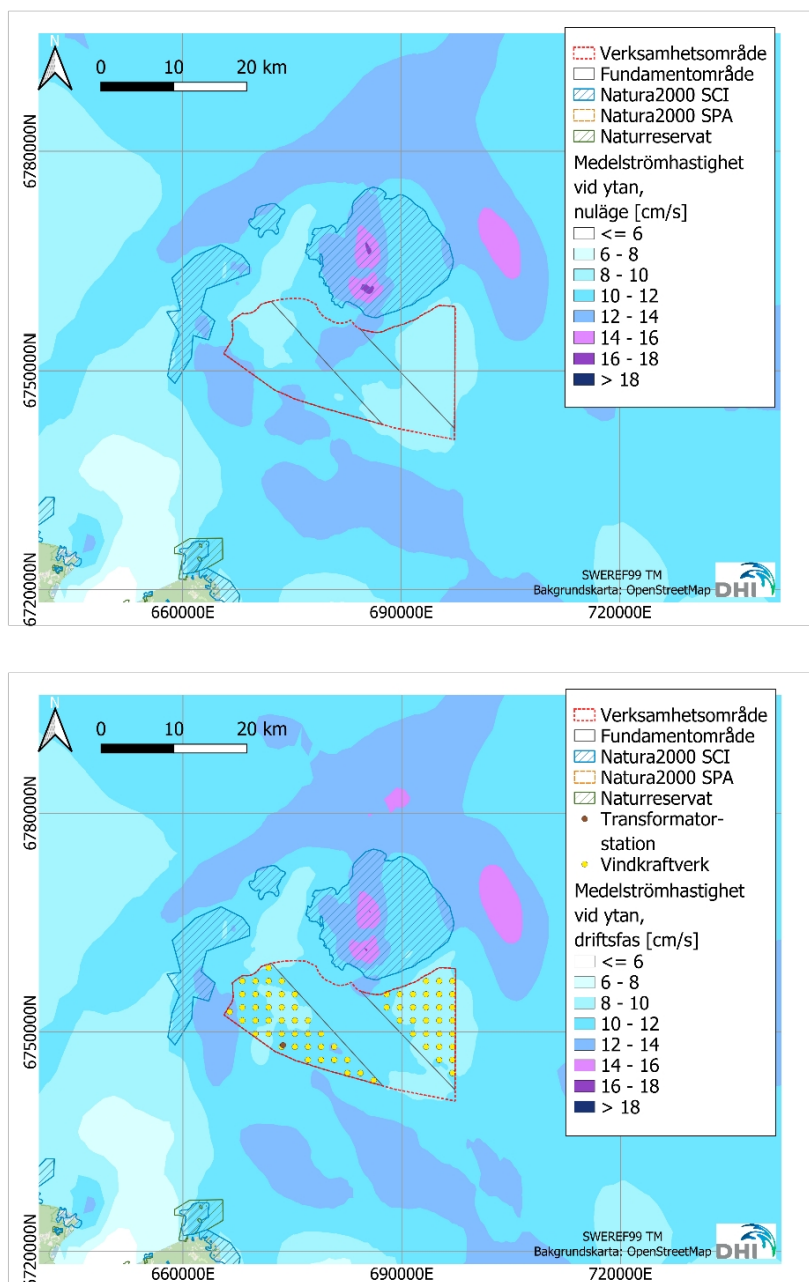


Kuva 4.5 Merkitsevän aallonkorkeuden kuukausittaisten keskiarvojen ero elokuussa kahden skenaarion osalta.

4.3 Virtausten vaikutus

Keskimääräinen pintavirtausnopeus elokuussa (perustilanne) on esitetty kuvan 4.6 ylimmässä paneelissa. Keskimääräinen virtausnopeus tuulipuiston alueella on noin 11 cm/s pinnalla, idässä ja lännessä se on alhaisempi, noin 9 cm/s. Keskimääräinen virtausnopeus on noin 11 cm/s. Keskimääräinen virtausnopeus on noin 9 cm/s. Nopeus on korkeampi Finngrundetin yläpuolella, korkeimmillaan hieman yli 16 cm/s. Tämä johtuu siitä, että virtaus kiihtyy hieman, kun se kulkee matalampien alueiden ohi.

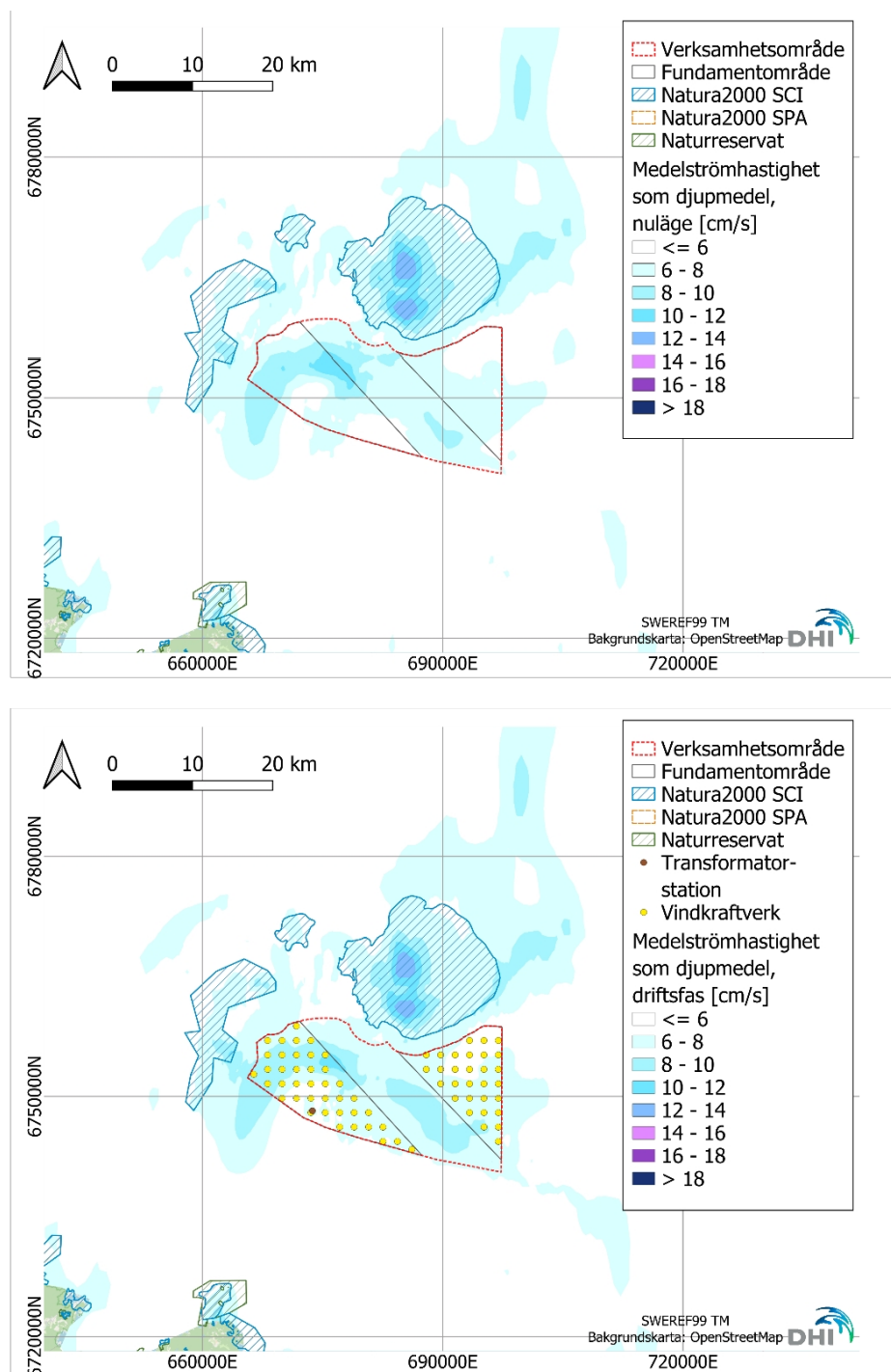
Toimintavaiheen vastaavat tulokset on esitetty kuvan 4.6 alemmassa paneelissa. Virtauskuvio ja nopeudet pinnalla ovat toimintavaiheessa hyvin samankaltaisia kuin nykytilanteessa, mutta nopeuksissa on havaittavissa pientä laskua.



Kuva 4.6 Pintavirtausnopeuden kuukausittaiset keskiarvot elokuussa nykytilanteessa (ylhäällä) ja toimintavaiheessa (alhaalla).

Vastaavat tulokset, mutta syvyyskeskiarvoina, on esitetty kuvassa 4.7. Periaatteessa vain tuulipuiston sisällä on mahdollista havaita eroja tuulivoimapuiston välillä.

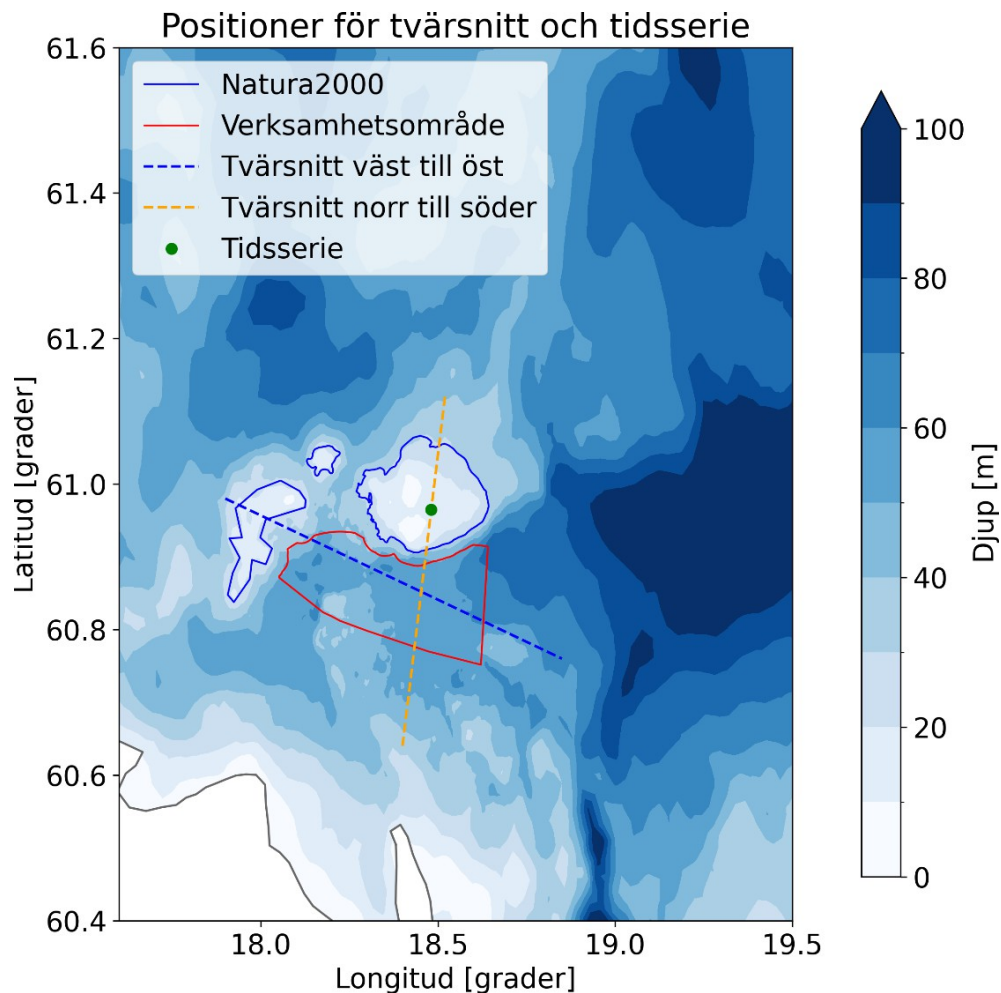
skenaarioiden välillä. Tuulipuistossa virtausnopeus syvyyskeskiarvona elokuussa on yleensä 6-10 cm/s. Suurimmat nopeudet Finngrundetin yllä ovat 12-14 cm/s molemmissa skenaarioissa.



Kuva 4.7 Virtausnopeuden kuukausittaiset keskiarvot elokuussa syvyyskeskiarvona nykytilanteessa (ylhäällä) ja toimintavaiheessa (alhaalla).

4.4 Vaikutus kerrostumiseen ja sekoittumiseen

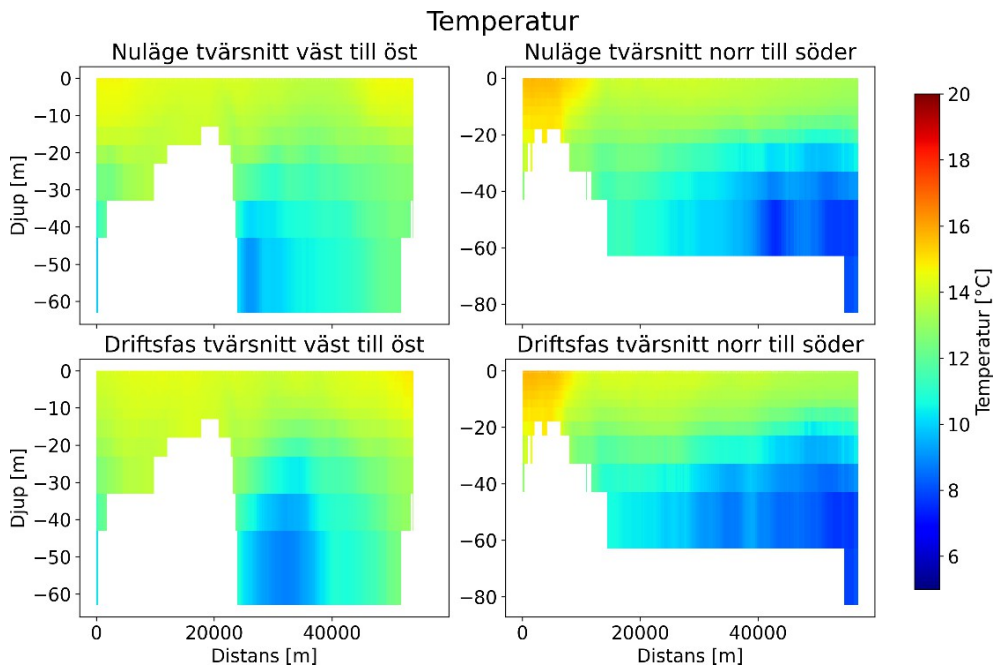
Kerrostumiseen ja sekoittumiseen kohdistuvien vaikutusten havainnollistamiseksi on otettu lämpötilan ja suolapitoisuuden syvyysprofiilit molemmista skenaarioista. Syvyysprofiilien sijainnit on esitetty kuvassa 4.8.



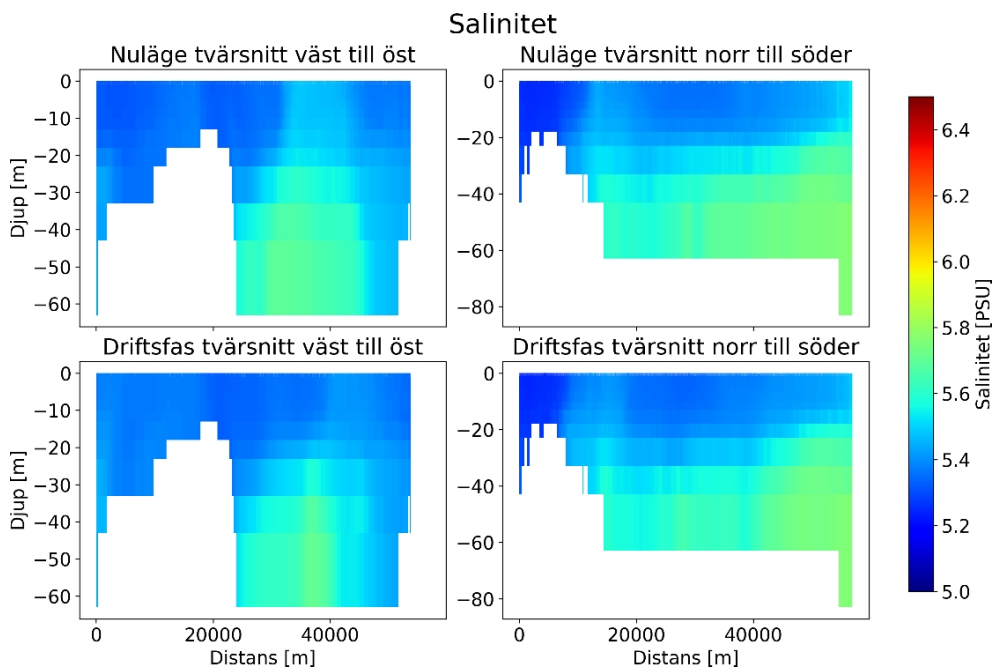
Kuva 4.8 Yleiskartta, jossa on poikkileikkausten sijainnit ja aikasarjat.

Kuvassa 4.9 esitetään keskilämpötila kahdessa poikkileikkauksessa tuulipuiston kanssa ja ilman tuulipuistoa. Joitakin pieniä eroja on havaittavissa, mutta yleiskuva on, että nykytilanteen (perusskenaario) ja toimintavaiheen välillä on hyvin vähän eroja, ja tämä pätee myös Finngrundetissa. Sama pätee suolapitoisuuteen, kuten kuvasta käy ilmi.

4.10. Ero on yleensä alle 0,5 astetta ja 0,1 PSU.



Kuva 4.9 Lämpötilan kuukausittainen keskiarvo elokuussa kahden skenaarion osalta: perustilanne (ylhäällä) ja toimintavaihe (alhaalla).

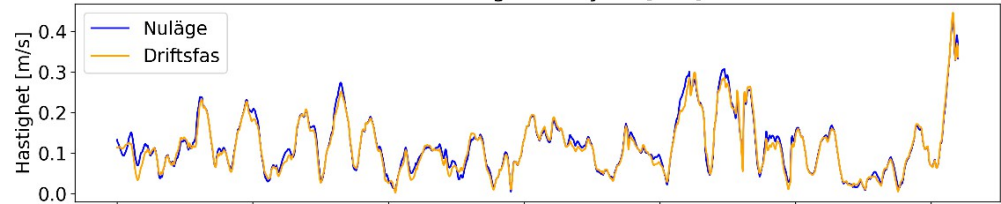


Kuva 4.10 Suolapitoisuuden kuukausittainen keskiarvo elokuussa kahdessa skenaariossa: perusskenaario (ylhäällä) ja toimintavaihe (alhaalla).

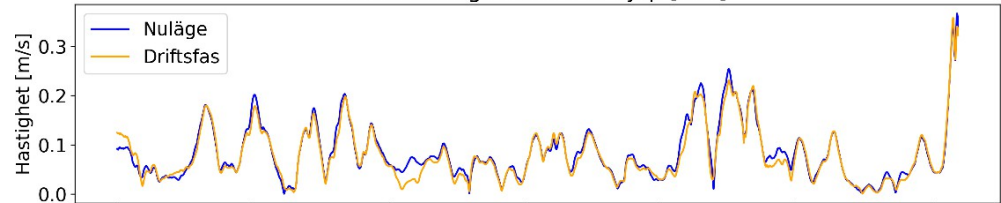
Vaikutuksen havainnollistamiseksi Finngrundetissa on esitetty virtauksen nopeuden aikasarjat pinnalla ja 7 metrin syvyydessä, aallonkorkeus ja tuulen nopeus Finngrundetin keskellä sijaitsevassa pisteessä (ks. kuva 4.8) kahden skenaarion osalta. Vastaavat lämpötila- ja suolapitoisuusarvot pinnalla ja 7 metrin syvyydessä on esitetty kuvassa 4.12. Skenaarioiden välillä on pieniä eroja, erityisesti virtausnopeuden pieneneminen. Ero on kuitenkin hyvin pieni ja paljon pienempi kuin luonnollinen vaihtelu.

Tidsserier i Natura 2000-området Finngrundet Ö

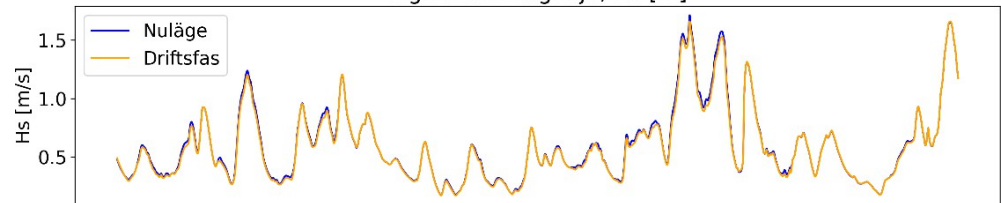
Strömhastighet vid ytan [m/s]



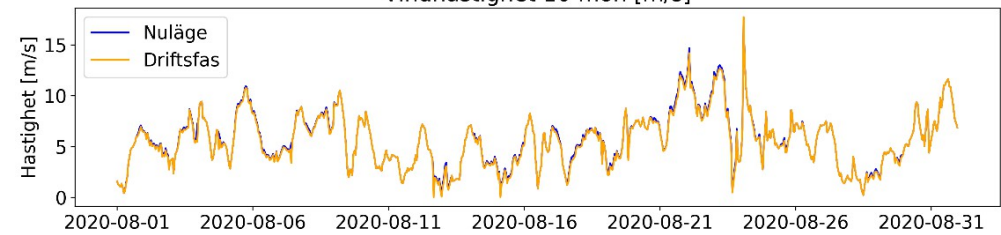
Strömhastighet vid 7 m djup [m/s]



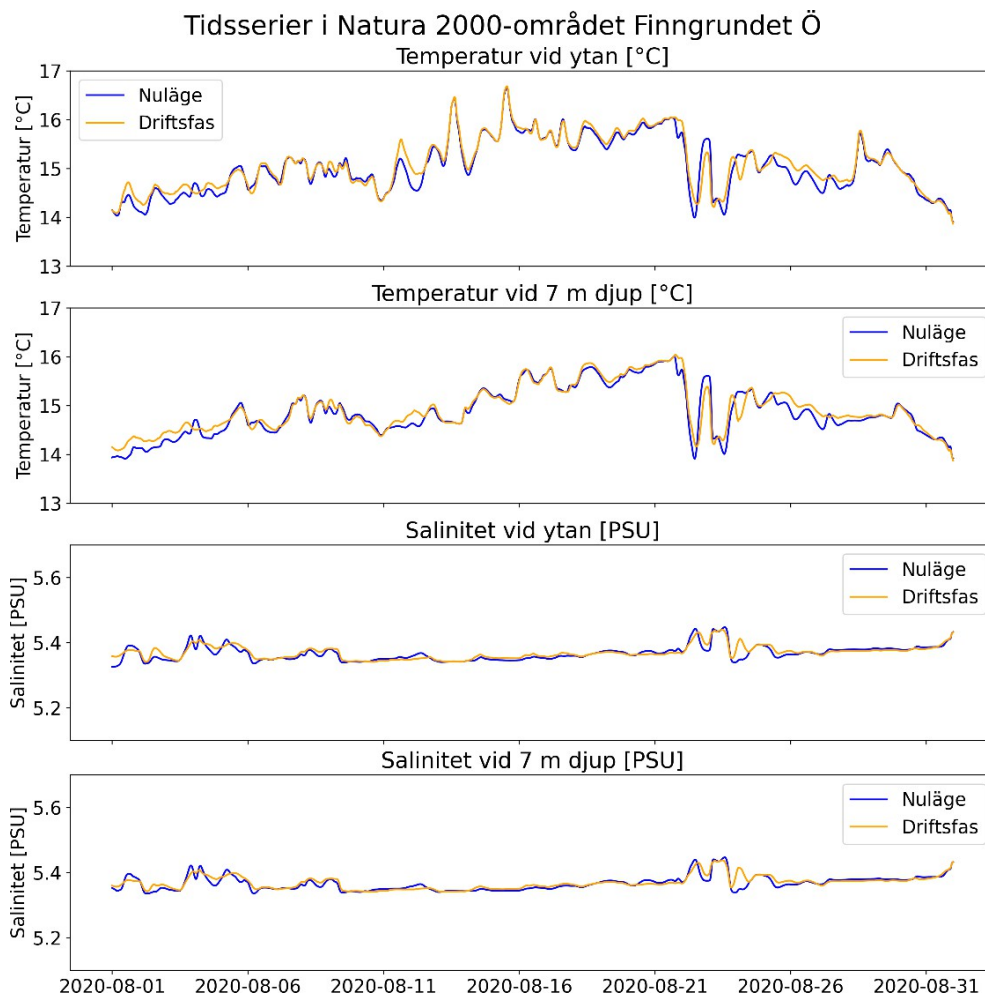
Signifikant våghöjd, Hs [m]



Vindhastighet 10 möh [m/s]



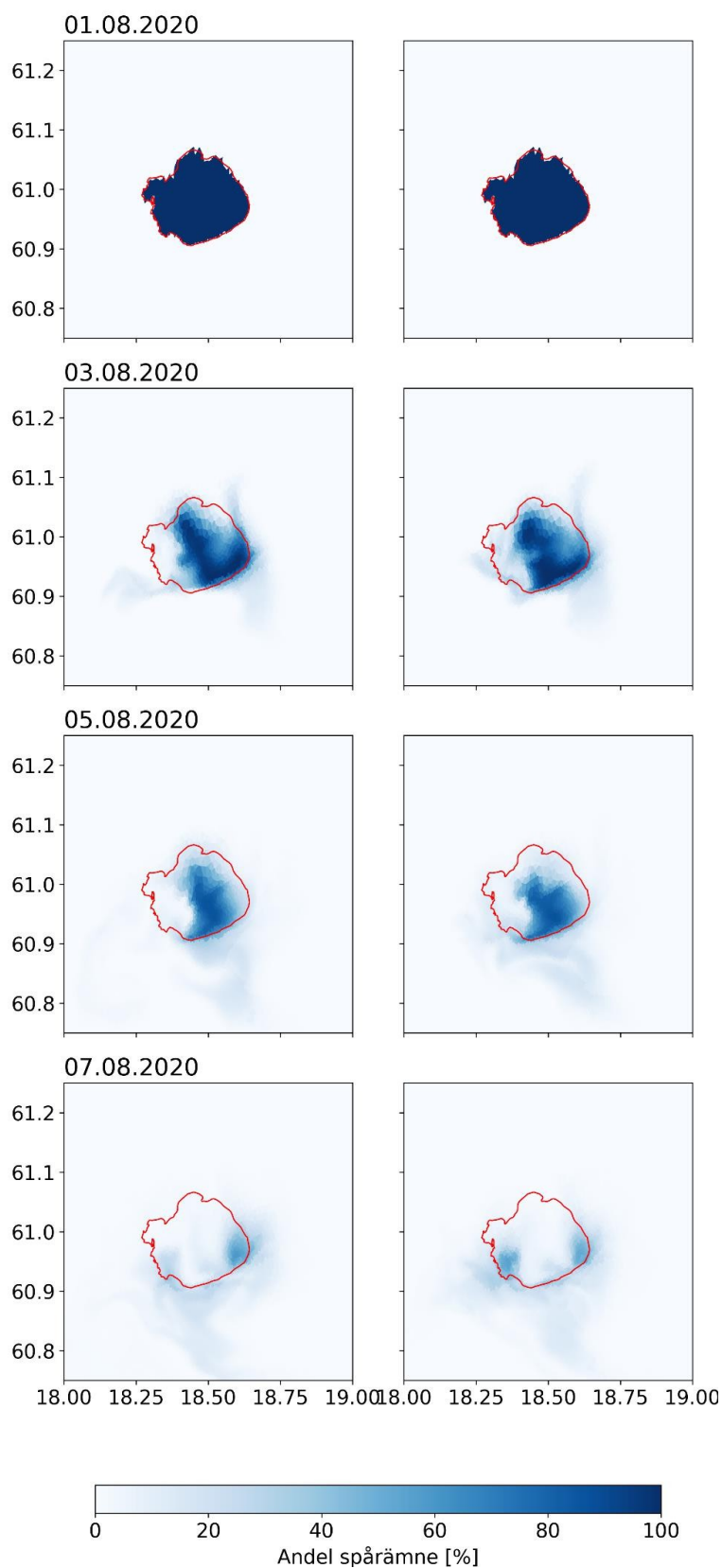
Kuva 4.11 Virtausnopeuden aikasarjat pinnalla ja 7 metrin syvyydessä, aallonkorkeus ja tuulen nopeus Finngrundetin keskellä sijaitsevassa pisteessä (ks. kuva 4.8) kahdessa skenaariossa: perusskenaario (sininen) ja toimintavaihe (oranssi viiva).



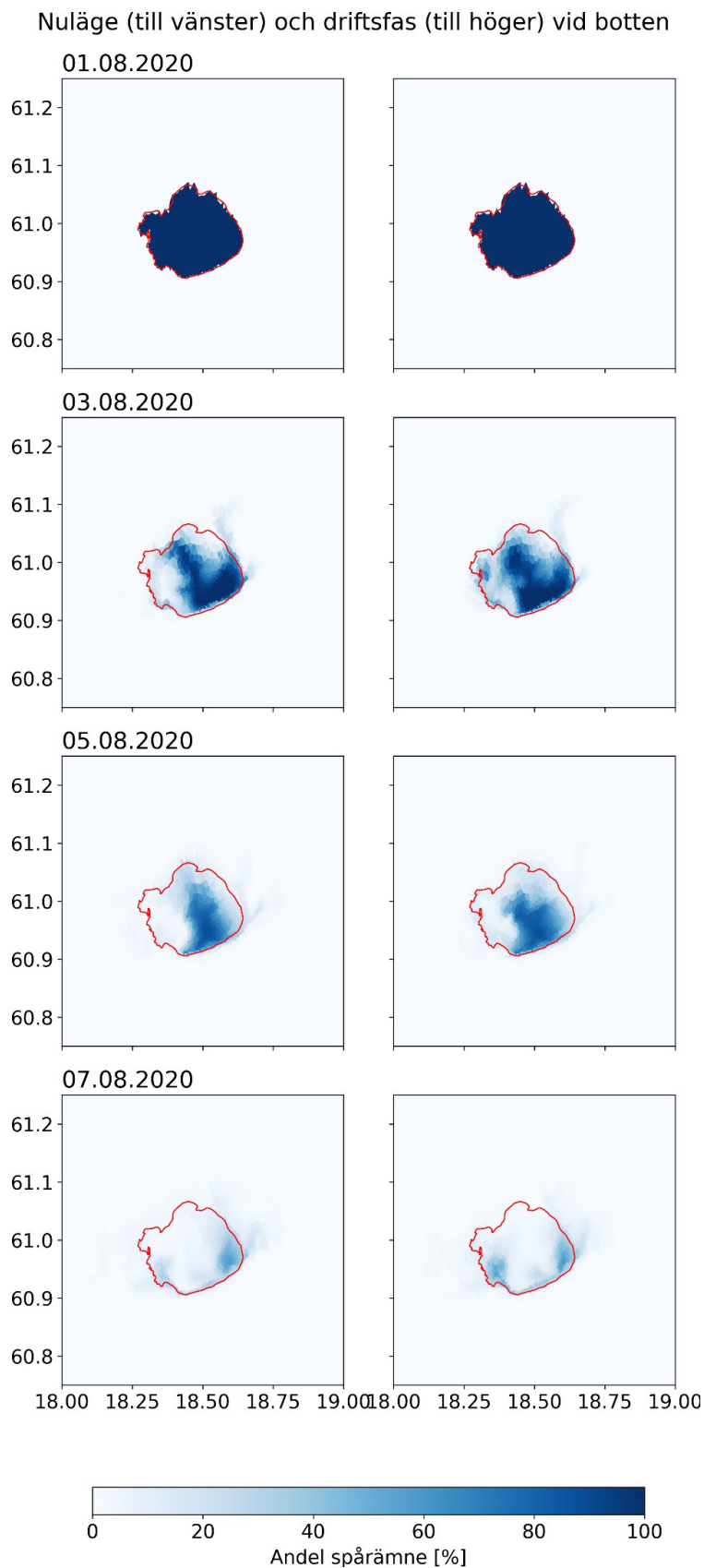
Kuva 4.12 **Lämpötilan ja suolapitoisuuden aikasarjat pinnalla ja 7 metrin syvyydessä Natura 2000 - alueen Finngrundet Ö keskellä sijaitsevassa pisteessä (ks. kuva 4.8) kahdessa skenaariossa: perustilanteessa (sininen) ja toimintavaiheessa (oranssi viiva).**

Kuvissa 4.13 - 4.15 esitetään kuvasarjat kahden päivän välein 1. elokuuta alkaneesta liikevaihdosta perusskenaarion ja toimintavaiheen osalta syvyyskeskiarvoina pohjalla ja pinnalla. Kuvassa 4.16 esitetään samasta laskennasta saadut tulokset, mutta aikasarjana Finngrundet Ö:n keskellä (ks. piste kuvassa 4.8). Noin kuuden päivän kuluttua 90 prosenttia Finngrundet Ö:n vedestä vaihtuu alun perin Natura2000-alueen ulkopuolella olevaan veteen. Tämä koskee sekä perus- että toimintavaihetta. Toimintavaiheessa on mahdollista havaita, että veden vaihtumisaste on hieman laskenut, mutta se on marginaalinen.

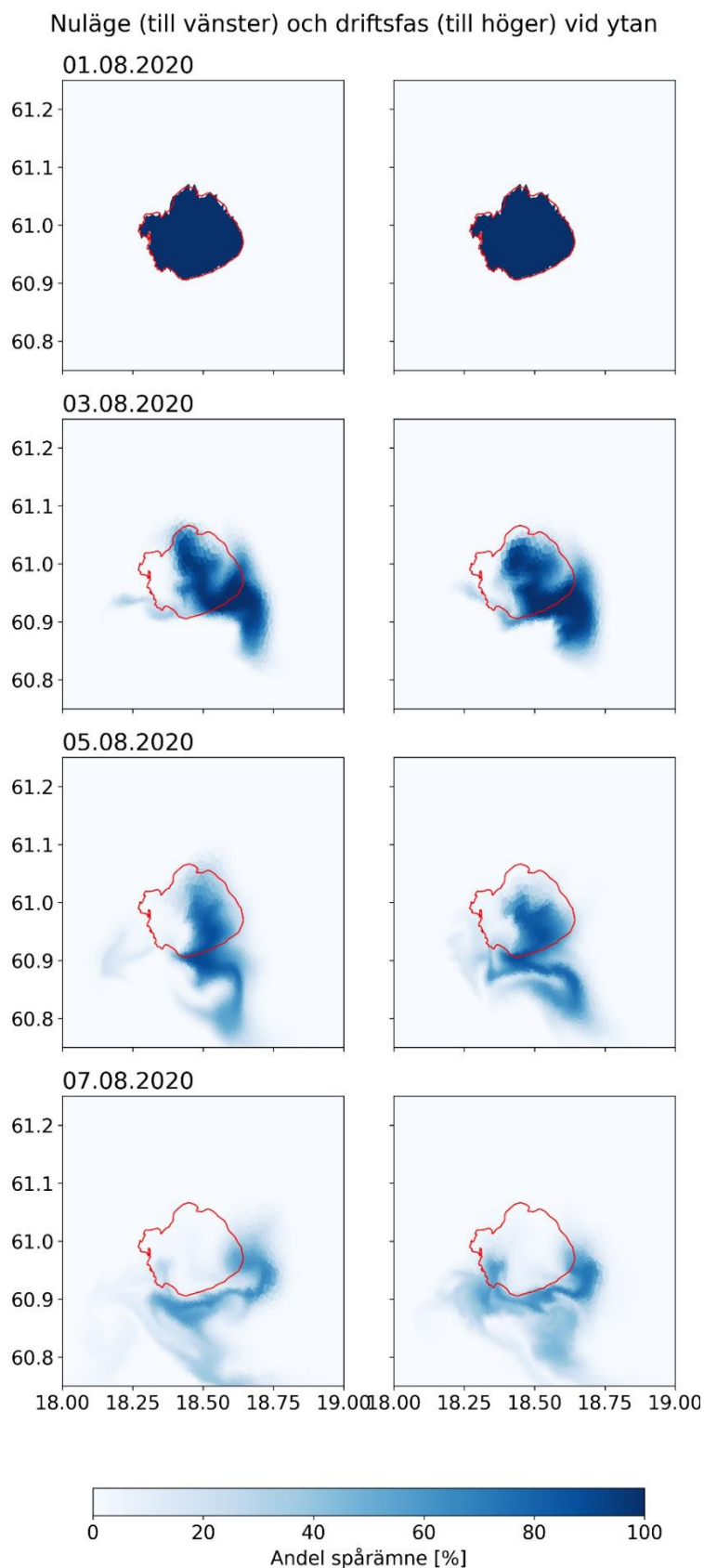
Nuläge (till vänster) och driftsfas (till höger), djupmedel



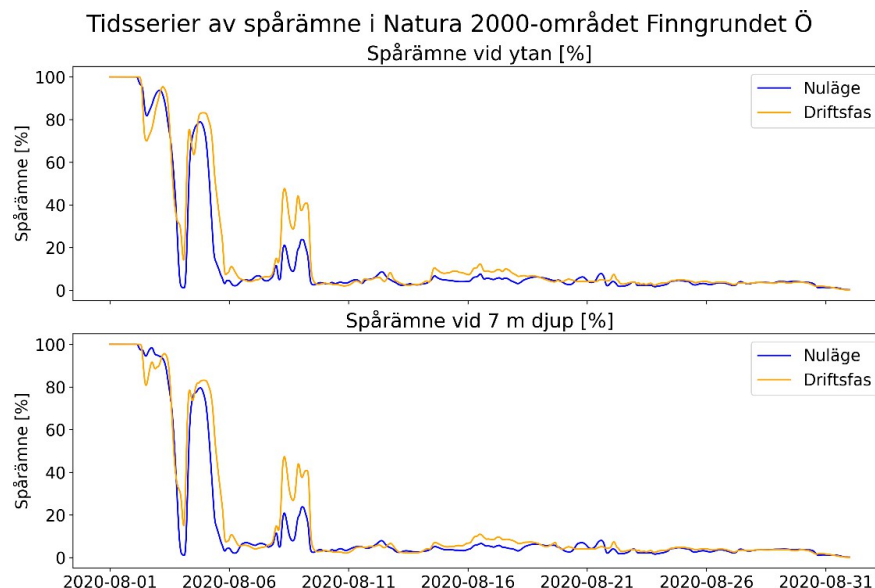
Kuva 4.13 Veden vaihtuvuuden visualisointi, jossa Finngrundet Östran Natura2000-alueella olevan veden arvo on 100 % simuloinnin alussa, syvyyskeskiarvo, nykytilanteessa (vasemmalla) ja toimintavaiheessa (oikealla). Finngrundet Östra on merkitty punaisella ääriviivalla.



Kuva 4.14 Veden vaihtuvuuden visualisointi, jossa Natura2000-alueen Finngrundet Östra veden arvo on 100 % simuloinnin alussa, syvyyskeskiarvo, nykytilanteessa (vasemmalla) ja toimintavaiheessa (oikealla). Finngrundet Östra on merkitty punaisella ääriviivalla.



Kuva 4.15 Veden vaihtuvuuden visualisointi, jossa Finngrundet Östran Natura2000-alueen veden arvo on 100 % simuloinnin alussa pinnalla nykytilassa (vasemmalla) ja toimintavaiheessa (oikealla). Finngrundet Östra on merkitty punaisella ääriviivalla.



Kuva 4.16 Aikasarja, joka osoittaa pisteen vaihtumisaikaa Natura 2000 -alueella Finngrundet Östra (ks. kuva 4.8), pinnalla ja pohjassa, kahdessa skenaariossa: perustilanteessa (sininen) ja toimintavaiheessa (oranssi viiva).

4.5 Keskustelu ja päätelmät

Korjattu tuulikenttä osoittaa lee-ilmiöitä, joiden seurauksena tuulennopeudet ovat pienentyneet tuulipuiston ollessa toiminnassa. Tuulen suunta on suurimman osan ajasta lounaasta, mikä tarkoittaa, että vaikutus keskimääräiseen tuulennopeuteen tapahtuu pääasiassa puistoalueella ja suoraan puistoalueen pohjois- ja koillispuolella. Vaikutus on suhteellisen paikallinen, mutta keskimääräinen tuulennopeus pienenee 1 % noin 20 km:n etäisyydelle tuulipuiston pohjoisrajasta pohjoiseen/koilliseen.

Alue, jolla kuukausittainen keskimääräinen merkitsevä aallonkorkeus pienenee 1-2 prosenttia (elokuussa), ulottuu tuulipuiston pohjoispuolelle ja Finngrundet Östra bankenin Natura 2000 -alueen yli. Paikallisesti vähennys on jopa 2,4 prosenttia Natura 2000 -alueen siinä osassa, joka on lähimpänä tuulipuiston itäistä turbiiniryhmää.

Aallot ja virtaukset on simuloitu yhdistetyssä mallissa, jotta voidaan ottaa huomioon aaltojen ja virtausten välinen vuorovaikutus, jota esiintyy esimerkiksi matalilla alueilla, joilla aallot murtuvat.

Virtausmalli ja virtausnopeudet puiston sisällä ja Finngrundetin yllä ovat hyvin samankaltaisia sekä toiminta- että perusvaiheessa, mutta nopeuksien voidaan olettaa hieman pienentyneen toimintavaiheessa.

Tulokset eivät osoita pysyvää merkittävää vaikutusta lämpötila- ja suolapitoisuusprofiileihin elokuussa.

Finngrundetin vedenvaihtoa koskevat laskelmat osoittavat, että veden vaihtuvuus vähenee, mutta se on hyvin vähäistä, ja 90 prosenttia vedestä vaihtuu kuudessa päivässä molemmissa skenaarioissa.

Simuloinnit on tehty kuukaudelle, jolloin herkkyys virtausten vaikutuksille Natura2000-alueilla on suurin. Erot perusskenaarion ja toimintavaiheen välillä ovat hyvin pieniä kaikkien fysikaalisten parametrien osalta ja paljon pienempiä kuin luonnolliset vaihtelut päivästä toiseen.

Simuloinneissa käytetyt turbiinit ovat hieman matalampia kuin puiston enimmäiskorkeus (330 m). Tämä 8 prosentin korkeusero on niin pieni, että sillä ei ole vaikutusta tuulivoima-laskelmiin, vaikka tuulienergian määrä kasvaa hieman, mitä korkeammalla turbiinit teoriassa ovat. Kuvasta 3.11 käy ilmi, että tuuliprofiili on suhteellisen vakio roottorin lavan korkeudella, ja siksi tuulikentästä poistetun tuulienergian määrässä on hyvin marginaalinen ero, jos roottori sijaitsee 25 metriä korkeammalla kuin laskelmissa. Tuulensuojan ominaisuudet määräytyvät pääasiassa halkaisijan perusteella, ja tämä on laskelmissa sama kuin haetun enimmäiskoon osalta. Tämän vuoksi oletetaan, että tämän tutkimuksen tuloksia voidaan soveltaa myös 10 prosenttia korkeammalla sijaitseviin tuulivoimaloihin, joiden halkaisija on muuten sama kuin laskelmissa.

Mittauksia on ollut saatavilla hyvin vähän, ja tärkeintä on, että malli osoittaa fysikaalisten parametrien vaihtelun, joka on odotettavissa kyseisellä paikalla ja kyseisenä vuodenaikana. Erityisesti Finngrundetin matalat alueet ovat herkkiä pienentyneille virtauksille, joten matalien olosuhteiden tarkka esittäminen on tärkeintä. Finngrundetin yli kulkeviin virtauksiin vaikuttaa suurelta osin pinnan tuulivirtaus, ja suola- ja lämpötilagradienttimittausten perusteella ei ole kerrostuneisuutta alle 10 m:n syvyydessä. Syvemmällä on heikko suolakerrostuneisuus, jossa pinnan ja pohjan välinen ero on noin 0,5 psu.

On olemassa mittauksiin perustuvia tieteellisiä tutkimuksia merituulipuistojen vaikutuksesta virtauksiin ja ravinteiden vaihtoon Pohjanmeren Saksanlahden alueella (/1/, /2/ ja /3/). Tutkimukset osoittavat, että perustusten takana oleva turbulenssi lisää pystysuuntaista sekoittumista, kun taas tuulen aallokko vähentää tuulen energiaa ja vaikuttaa päinvastoin. Aluetta on vaikea verrata Finngrundetiin, koska Saksanlahdelle on ominaista hyvin voimakas horisontaalinen suolapitoisuusgradientti, jonka pohjan arvot ovat yli 30 psu, ja pinnalla on makeaa ravinteikasta vettä, joka on peräisin suurten jokien virtauksista. Sen vuoksi ei ole mahdollista tehdä selkeitä johtopäätöksiä siitä, miten tuulipuisto Perämerellä vaikuttaa ravinteiden vaihtuvuuteen, koska se vaikuttaa kerrostumiseen.

SMHI on mallintanut Itämeren ja Ruotsin länsirannikon suolapitoisuuserroksen syvyyteen kohdistuvia vaikutuksia, jos kaikki nimetyt merituulivoima-alueet rakennetaan (/9/). Tässä yhteydessä tuuliaallosta on tehty hyvin yksinkertaistettu esitys, joka perustuu Pohjanmerellä tehtyihin tutkimuksiin, joissa tuuli vähenee 8 prosenttia 30 kilometrin etäisyydellä tuulivoimaloista. Tuulen vähennyksen on siis oletettu olevan 5-10 kertaa suurempi kuin mitä tässä tutkimuksessa tehdyissä paljon yksityiskohtaisemmissa laskelmissa on esitetty. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että Pohjanmeren tuuliolosuhteet ovat huomattavasti tuulisemmat kuin Perämeren olosuhteet. Lisäksi SMHI osoittaa, että vaikutus pohjan suolapitoisuuteen on Perämerellä pieni, vaikka tuulen aallokkoefekti on yliarvioitu. Suurin vaikutus on Itämeren syvemmillä alueilla. SMHI osoittaa myös, että laskelmat ovat herkimpiä sille, miten tuulen aallokko on arvioitu.

SMHI:n mallinnuksen tulokset vahvistavat siten, että sovellettavan laitoksen vaikutuksen alueelliseen vertikaaliseen tiheyskerrostuneisuuteen pitäisi olla pieni, minkä myös yksityiskohtaiset laskelmamme osoittavat.

5 Viitteet

- /1/ Christiansen, N., Daewel, U., Djath, B., & Schrum, C., 2022, Emergence of large-scale hydrodynamic structures due to atmospheric offshore wind farm wakes. *Frontiers in Marine Science*, 9, 818501.
- /2/ Christiansen, N., Carpenter, J. R., Daewel, U., Suzuki, N., & Schrum, C., 2023. The large-scale impact of anthropogenic mixing by offshore wind turbine foundations in the shallow North Sea. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1178330.
- /Daewel, U., Akhtar, N., Christiansen, N., & Schrum, C., 2022. Offshore-tuulipuistojen ennustetaan vaikuttavan Pohjanmeren primäärituotantoon ja pohjaveden hapettomuuteen. *Communications Earth & Environment*, 3(1), 292.
- /4/ DHI, "Scientific documentation of MIKE 3 Flow Model FM", 2023, https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Coast_and_Sea/MIKE_3_Flow_FM_Scientific_Doc.pdf.
- /5/ DHI, "MIKE 21 - Spectral Wave Module - Scientific Documentation", 2024, https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Coast_and_Sea/M21SW_Scientific_Doc.pdf.
- /6/ Haakenstad, H. *et al.* "NORA3: A non-hydrostatic high-resolution hindcast for the North Sea, the Norwegian Sea and the Barents Sea", 2021. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **60**, 1443-1464, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-21-0029.1>
- /7/ Fairall, C.W., E.F. Bradley, J.E. Hare, A.A. Grachev ja J.B. Edson (2003), Bulk parameterisation of air sea fluxes: updates and verification for the COARE algorithm, *J. Climate*, 16, 571-590.
- /8/ Edson, J. B., and Coauthors, 2013: On the Exchange of Momentum over the Open Ocean. *J. Phys. Oceanogr.* 43, 1589-1610, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-0173.1>.
- /9/ SMHI, 2021: Hydrographic effects in Swedish waters of future offshore wind power scenarios, *Report Oceanography* No. 77.

