

Modellering av påverkan på vind, vågor och strömmar vid vindkraftparken Olof Skötkonung

Modellerad påverkan från vindkraftpark, som del av miljökonsekvensbeskrivning (MKB)

Slutlig 1.0

2024-06-12

Framtagen för Deep Wind Offshore AS



Modellering av påverkan på vind, vågor och strömmar vid vindkraftparken Olof Skötkonung

Modellerad påverkan från vindkraftpark, som del av miljökonsekvensbeskrivning (MKB)

Slutlig 1.0

Framtagen för: Deep Wind Offshore AS

Representerade av: Sara Barkevall

Kontaktperson: Cecilia Gustafsson Gombrii
Projektansvarig: Cecilia Gustafsson Gombrii
Kvalitetsansvarig: Martin Johnsson
Författare: Thomas Heggem, Cecilia Gustafsson Gombrii, Martin Johnsson, Sina Saremi
Projekt No.: 12805833-01
Godkänd av: Henrik Fjørtoft
Datum för godkännande: 2024-06-12
Revision: Slutlig 1.0
Klassifikation: **Confidential:** This document is only accessible to the project team members and sharing it outside the project team is subject to the client's prior approval.
Filnamn: Impact on wind waves and currents at Olof Skötkonung.docx

Sammanfattning

Den här rapporten beskriver modellering av påverkan på vind, vågor och strömmar för den havsbaserade vindkraftparken Olof Skötkonung. Modellresultaten som beskrivs här avser påverkan under vindkraftsparkens driftsfas och är framtagna som underlag till miljökonsekvensbeskrivningen (MKB) för vindkraftparken. Denna rapport kompletterar tidigare studie om modellering av sedimentspridning vid installationsarbeten vid vindkraftparken, som redovisats i underlagsrapport i inlämnad ansökan.

Olof Skötkonung planeras bestå av 70 vindkraftverk, en transformatorstation samt kabelnät. Vindkraftverken tar ut en del av vindenergin vilket reducerar vindhastigheter lokalt kring parken. Reduceringen av vinden beror bland annat på vindkraftverkens dimensioner och tekniska egenskaper. Information om vindkraftverken och vindkraftparkens utformning har erhållits från Deep Wind Offshore AS. Uttaget av vindenergi ger lä-effekter som till viss del kan påverka lokal drivning av vågor, strömmar och omblandning.

Modelleringen av påverkan på vind, vågor och strömmar har utgått från en lokal tredimensionell hydrodynamisk modell, som satts upp för området kring vindkraftparken i det tidigare arbetet med sedimentspridningsmodellering. För att beskriva påverkan har modellering av två scenarion ("baseline" och driftsfas) utförts. Baseline för strömförhållanden och skiktning utgörs av den befintliga hydrodynamiska modellen som sattes upp i tidigare sedimentspridningsmodellering. Baseline-scenariot har kompletterats med en spektralvågmodell för området. För scenariot under parkens driftsfas har ett korrigerat vindfält tagits fram baserat på vindkraftparkens utformning och vindkraftverkens tekniska egenskaper. Hydrodynamik och vågor har sedan modellerats för driftsfas-scenariot med den korrigerade vinden. Dessutom har vindkraftverkens fundament inkluderats i modelleringen av driftsfas, för att inkludera strukturernas påverkan på vågor och strömmar. Resultaten från baseline- och driftsfas-scenariona har sedan jämförts med avseende på vind, vågor, ström och skiktning.

Modellresultaten av påverkan på vind, vågor och strömmar visar att:

- Påverkan på vinden är relativt lokal, men reduktionen av medelvindhastigheten med 10 cm/s sträcker sig upp mot 20 km nord/nordost om vindkraftparken.
- Området med reducerat årsmedel av signifikant våghöjd sträcker sig ungefär över ytan där medelvindhastigheten är reducerad. Reduktionen om 1–1,5 cm utgör ca 1–2% av årsmedel signifikant våghöjd, och påverkan sträcker sig över Natura 2000-området Finngrundet Östra banken. Reduktionen om 1 cm (årsmedel signifikant våghöjd) sträcker sig upp emot ca 25 km nord-nordost om vindkraftparken.
- I medeltal påverkas strömhastigheten i ytan framför allt inom vindkraftparken samt i närområdet vid Natura 2000-området Finngrundet Östra banken. Skillnaden mellan årsmedel av strömhastighet i ytan är liten vid jämförelse av driftsfas mot referensförhållandet. Lokalt mitt i Finngrundet Östra banken orsakas dock en reduktion av årsmedlet om 0,5–1 cm/s, vilket motsvarar ungefär 2–5% av medelströmhastigheten i ytan som förekommer där (20–25 cm/s).
- Ingen signifikant varaktig påverkan på skiktningen under vår- och sommarsäsongen sker vid vindkraftparken, baserat på analyserade månadsmedel av modellerade temperatur- och salinitetsprofiler.

Innehållsförteckning

1	Introduktion	6
2	Data	7
2.1	Batymetri.....	7
2.2	Vindkraftparken.....	7
3	Modellbeskrivning	10
3.1	Hydrodynamisk modell (baseline)	10
3.1.1	Modelleringsperiod	10
3.1.2	Beräkningsnät.....	10
3.1.3	Drivning av den hydrodynamiska modellen	12
3.1.4	Validering.....	13
3.2	Vågmodell (baseline).....	16
3.2.1	Drivning av vågmodellen	16
3.2.2	Validering.....	17
3.3	Modellering av hydrodynamik och vågor under driftsfas	19
3.3.1	Antaganden om vindkraftverken.....	19
3.3.2	Korrigerig av vindfält under driftsfas.....	20
3.3.3	Hydrodynamisk modell (driftsfas)	21
3.3.4	Vågmodell (driftsfas).....	21
4	Resultat från modellering av påverkan på vind, vågor och strömmar	22
4.1	Vindpåverkan.....	22
4.2	Vågpåverkan.....	25
4.3	Strömpåverkan	30
4.4	Påverkan på skiktning och omblandning.....	32
4.5	Diskussion och slutsatser.....	34
5	Referenser	35

Figurer

Figur 1.1	Område och batymetri i modellering av hydrodynamik vid vindkraftparken Olof Skötkonung (röd streckad kontur).....	6
Figur 2.1	Schematisk skiss över "jacket"-fundament.	8
Figur 2.2	Batymetri och utformning av vindkraftparken (överst), samt batymetri för hela modellområdet (underst).	9
Figur 3.1	Beräkningsnät för den lokala modellen vid Olof Skötkonung.	11
Figur 3.2	Vertikal upplösning bestående av 20 sigmalager. Lagren är tunnast närmast ytan och botten. Tvärsnittet visar en sektion från väst till öst genom parkområdet, markerad med blå streckad linje i infälld bild (överst).	11
Figur 3.3	Vindros år 2020 vid SMHI's station Eggegrund för regionala data från NORA3 (till vänster) och observerad vind från SMHI (till höger).	12
Figur 3.4	Stationer med observerade data: vattenstånd och temperatur (grön markör), samt profiler över salinitet (röd markör).	13
Figur 3.5	Vattenstånd relativt medelvattenstånd, observerad (svart) och modellerad (blå) vid mätstationer Bönan, Forsmark och Ljusne.	14

Figur 3.6	Temperatur, observerad (svart) och modellerad (grön) vid mätstationer Bönan, Finngrundet, Forsmark och Ljusne.	15
Figur 3.7	Modellerade och observerade djupprofiler av salinitet.	15
Figur 3.8	Modellerade och observerade djupprofiler av temperatur.	16
Figur 3.9	Utdrag av observerad (svart) och modellerad (blå) signifikant våghöjd (Hs, överst), peak vågperiod (Tp, mitten) och vågriktning (nederst).	17
Figur 3.10	Signifikant våghöjd och vågriktning vid Finngrundet under 2020, modellerad (överst) och observerad (underst).	18
Figur 3.11	Schematisk skiss över representation (i gult) av bottenfundament i modellering av påverkan på vågor och strömmar (ej skalenlig).	20
Figur 4.1	Ögonblicksbild över vindhastighet utan vindkraftpark (överst) och med vindkraftpark (underst). Tidssteget som visas är 21 juli 2020, kl 08:00. Lila ellips i den nedre bilden markerar exempel på numeriska skillnader som uppstår nära gränsen av vektorfältet som tas fram vid korrigering av vind under driftsfas (se avsnitt 3.3.2).	23
Figur 4.2	Vindens medelhastighet över året.	24
Figur 4.3	Reduktion av vindens medelhastighet över året.	24
Figur 4.4	Årsmedel av signifikant våghöjd.	26
Figur 4.5	Skillnad i årsmedel av signifikant våghöjd för de två scenarierna.	26
Figur 4.6	Maxvärde av signifikant våghöjd över året.	27
Figur 4.7	Skillnad i årsmax av signifikant våghöjd för de två scenarierna. Position för tidsserie i Figur 4.8 markeras av grön cirkel, i området med störst reduktion av maximal signifikant våghöjd.	28
Figur 4.8	Utdrag ur tidsserie över modellerad signifikant våghöjd för de två scenarierna, baseline (svart) och driftsfas (blå). Peak-tillfället visas med en utdragen skala på y-axeln i infällningen, för förtydligande.	29
Figur 4.9	Årsmedel av strömhastighet i ytan.	30
Figur 4.10	Skillnad mellan årsmedel av strömhastighet i ytan för de två scenarierna.	30
Figur 4.11	Maximal strömhastighet över året i ytan.	31
Figur 4.12	Skillnad mellan årsmax av strömhastighet i ytan för de två scenarierna.	31
Figur 4.13	Översiktskarta med positionen för djupprofiler markerad med lila cirkel.	32
Figur 4.14	Djupprofil av temperatur som månadsmedel under vår- och sommarmånader, för de två scenarierna: baseline (blå) och driftsfas (orange linje).	33
Figur 4.15	Djupprofil av salinitet som månadsmedel under vår- och sommarmånader, för de två scenarierna: baseline (blå) och driftsfas (orange linje).	33

Tabeller

Tabell 2-1	Fördelning av fundament och dimensioner för pålar, enligt information som tillhandahållits från DWO.	8
------------	---	---

1 Introduktion

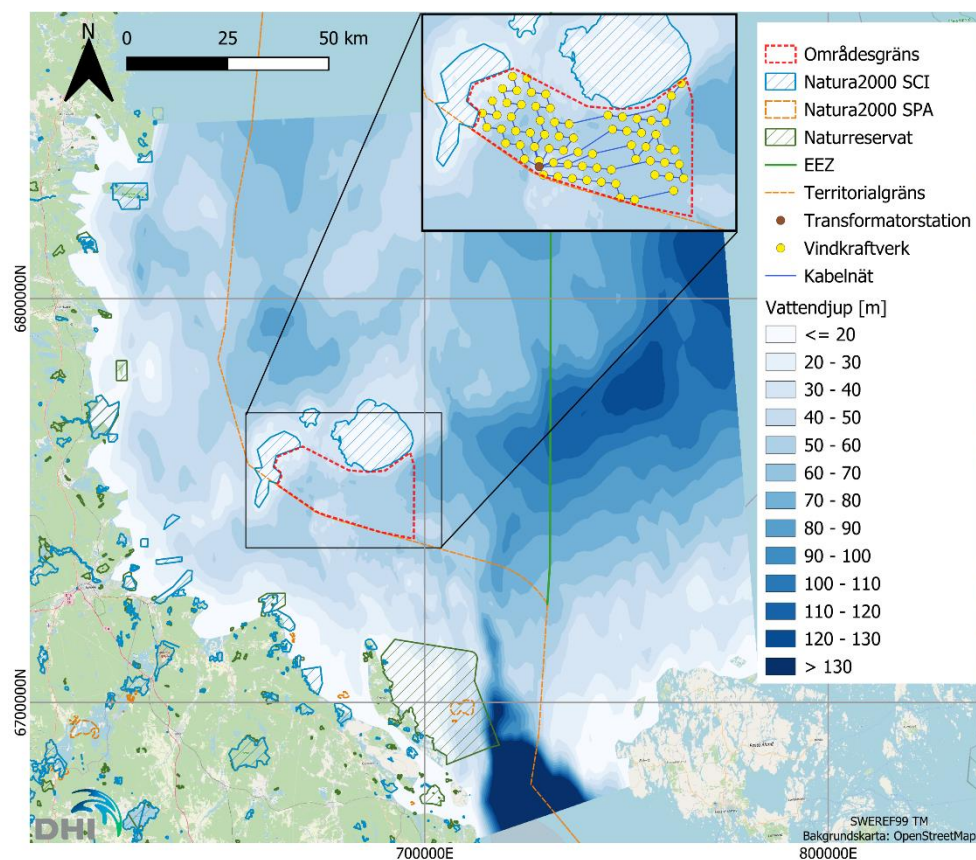
DHI Sverige AB (DHI) har fått i uppdrag av Deep Wind Offshore AS (DWO) att modellera påverkan på vind, vågor och strömmar för den planerade havsbaserade vindkraftparken Olof Skötkonung. Modellresultaten har tagits fram som underlag till miljökonsekvensbeskrivningen (MKB) för vindkraftparken.

Sedimentspridningen vid installationsarbeten i parkområdet har modellerats och redovisats i tidigare rapport, som bifogats ansökan.

Denna rapport beskriver modellering av vindkraftparkens påverkan på vind, vågor och strömmar under parkens driftsfas. Vindkraftparken är markerad med röd kontur i Figur 1.1, där modellområde och djupförhållanden visas.

Rapporten är uppbyggd enligt följande:

- Kapitel 2 beskriver indata till modellen och erhållen information om den planerade vindkraftparken.
- Kapitel 3 beskriver uppställningarna för modellerad påverkan på vind, vågor och strömmar.
- Kapitel 4 presenterar resultaten för modellerad vind-, våg- och strömpåverkan.



Figur 1.1 Område och batymetri i modellering av hydrodynamik vid vindkraftparken Olof Skötkonung (röd streckad kontur).

2 Data

I det här avsnittet beskrivs batymetri och erhållen information om vindkraftparken som har använts för att ta fram de lokala modellerna för påverkan på vind, vågor och strömmar vid Olof Skötkonung.

2.1 Batymetri

För att representera djupförhållanden kring vindkraftparken i modellen har djupdata från EMODnet använts, [EMODnet Product Catalogue \(europa.eu\)](https://emodnet.europa.eu/).

Djupförhållanden i modellen visas i Figur 2.2. I vindkraftparken varierar djupet mellan ungefär 20–70 m. Vindkraftparkens yttre kontur är markerad av streckad röd linje. I de grundare områdena norr och väster om vindkraftparken ligger tre Natura 2000-områden. Positioner för vindkraftverk, transformatorstation (OSS) samt internt kabelnät (IAC) visas i infällda figurer, enligt tillhandahållen information från DWO som beskrivs nedan i avsnitt 2.2.

2.2 Vindkraftparken

Vindkraftparken har representerats i modelleringen enligt erhållen information från DWO.

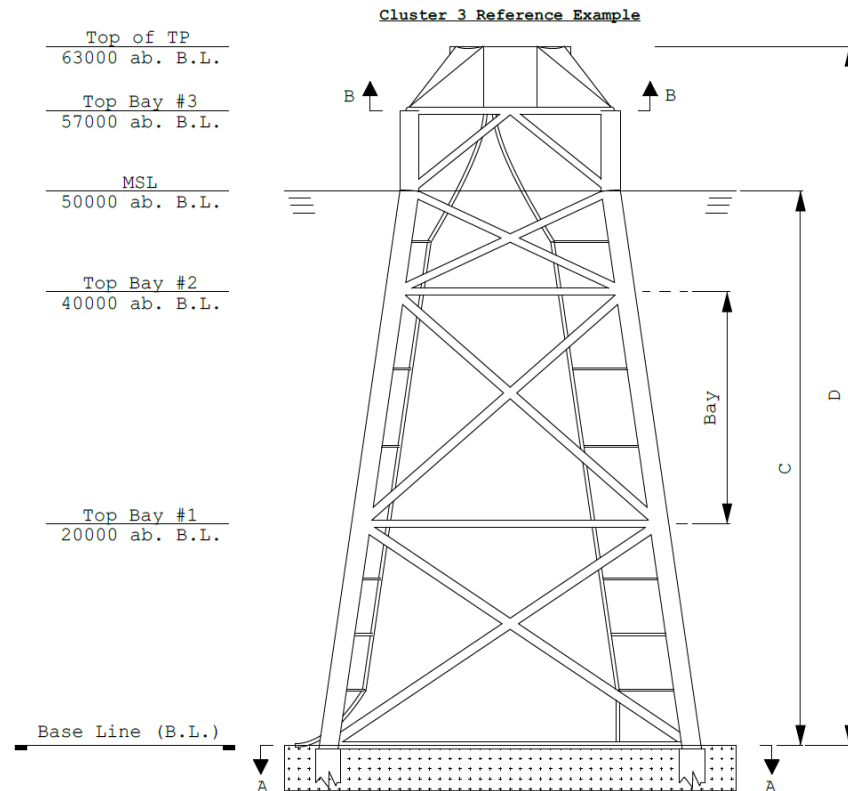
Erhållen teknisk information om turbinerna listas av följande:

- Turbine rotor swept diameter: 280 m
- Turbine hub height: 165 m
- Cut-in wind speed: 3,5 m/s
- Cut out wind speed: 28 m/s
- Fördelning av power coefficient och thrust coefficient över vindhastighet har erhållits som underlag men listas ej här.

Fundamenten som ska installeras är av typ "jacket", som står på botten förankrade med 4 pålar som pålas och borraras ned i botten. En schematisk skiss av fundamenten visas i Figur 2.1. Sidlängden mellan fundamentets ben vid botten är 36 m (som medelvärde för de olika delområdena i parken), se markör "A" i Figur 2.1. Sidlängden mellan fundamentets ben vid toppen av fundamentet (ovanför vattenytan, se markering "B" i Figur 2.1) är 20 m. Fördelningen av fundament på respektive delområde i parken och pålarnas ytterdiameter listas i Tabell 2-1. DWO har anvisat att dimensioner för transformatorstationen ska antas vara samma som för vindkraftverkens fundament i delområde 2.

Parkområdet täcker en area om 485 km² och visas i Figur 2.2.

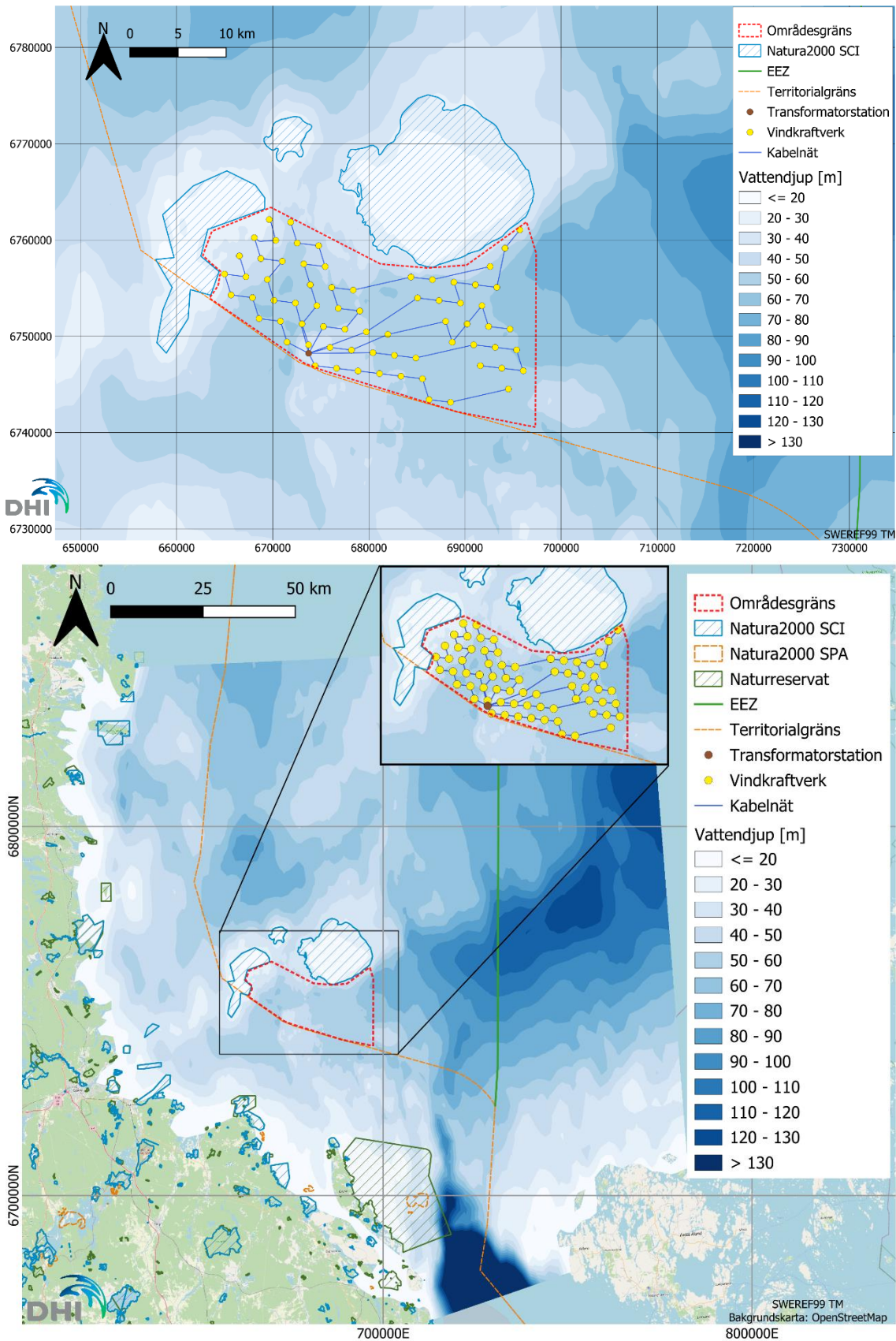
Antaganden om vindkraftverken som gjorts i modellen baserat på erhållen information beskrivs i avsnitt 3.3.1.



Figur 2.1 Schematisk skiss över "jacket"-fundament.

Tabell 2-1 Fördelning av fundament och dimensioner för pålar, enligt information som tillhandahållits från DWO.

<i>Antal</i>	Delområde				Total
	1	2	3a	3b	
Vindkraftverk	24	14	13	19	70
Transformatorstation		1			1
<i>Dimensioner pålar</i>					
Ytterdiameter (m)	2.5	4	2.5	2.5	



Figur 2.2 Batymetri och utformning av vindkraftparken (överst), samt batymetri för hela modellområdet (underst).

3 Modellbeskrivning

Modelleringen har utförts för att beskriva påverkan på vind, vågor och strömmar under vindkraftparkens driftsfas. Två modellscenarion har satts upp; 1) utan vindkraftpark (baseline) samt 2) med vindkraftpark i driftsfas. Med hjälp av modellering av dessa två scenarion (baseline och driftsfas) beskrivs vindkraftparkens påverkan på vind, vågor och strömförhållanden.

Modelleringen av hydrodynamik och vågor har utförts med hjälp av modelleringsverktygen MIKE 3 FM (/1/) och MIKE 21 SW (/2/). Korrigering av vindfält under driftsfas har tagits fram med hjälp av PyWake ([Welcome to PyWake — PyWake 2.5.0 documentation \(dtu.dk\)](#)).

I följande avsnitt beskrivs modelluppsättningen för de två scenariona.

3.1 Hydrodynamisk modell (baseline)

Den lokala hydrodynamiska modellen för baseline-scenariot (utan vindkraftpark), sattes upp för området kring vindkraftparken i tidigare arbete med sedimentspridningsmodellering som presenterats och bifogats ansökan. Följande stycken återger beskrivningen av modelleringsperiod, beräkningsnät, drivning och validering av den hydrodynamiska modellen.

3.1.1 Modelleringsperiod

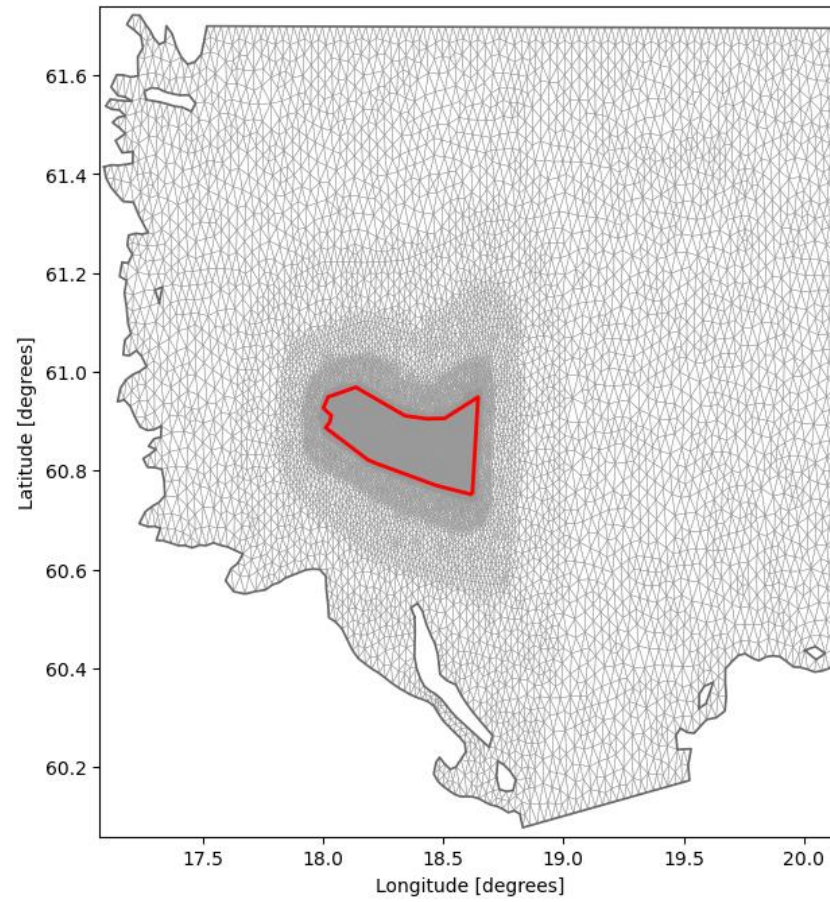
Modellen simulerar väderåret 2020. Detta år har valts som ett representativt år för normala förhållanden, utan historiska stormar.

3.1.2 Beräkningsnät

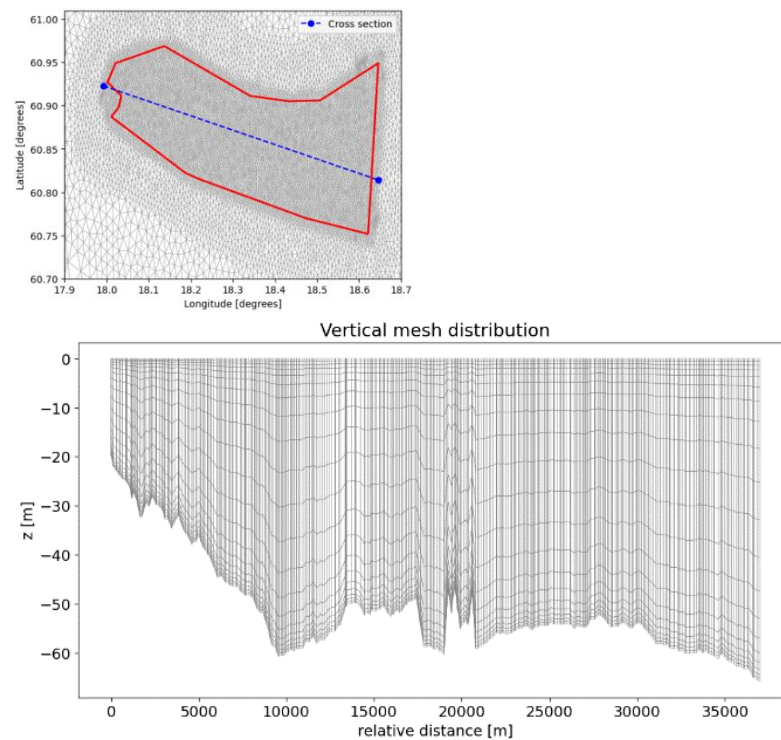
Den lokala modellens beräkningsnät visas i Figur 3.1.

Beräkningscellerna inom parkområdet har tilldelats en sidlängd om ca 200–400 meter, vilket bedöms vara tillräcklig upplösning för att simulera strömmarnas horisontella gradient i området och sedimentspridning. De mest högupplösta cellerna finns i området för vindkraftparken, för att gradvis bli grövre i riktning mot modellens yttre ränder. Sidlängden på beräkningscellerna vid de yttre ränderna har storleksordningen 3 km.

Modellens vertikala upplösning består av 20 så kallade sigma-lager. Lagren närmast ytan och botten är tunnare, för att säkerställa en tillräcklig upplösning i de nivåer där sedimenten sprids och för att fånga skiktning i temperatur och salinitet. Sigma-lagren följer batymetrin så att tjockleken ökar för samtliga lager på djupare områden. Figur 3.2 visar ett tvärsnitt över beräkningsnätet, genom parkområdet. Elementen nära botten i parkområdet är ca 0,5 m tjocka vid 55 m djup. På djupare områden är elementen vid botten tjockare. Vid de största djupen i domänen (ca 348 m, se den södra randen i Figur 2.2) är elementen vid botten ca 2 m tjocka (men detta är på ett längre avstånd från intresseområdet).



Figur 3.1 Beräkningsnät för den lokala modellen vid Olof Skötkonung.



Figur 3.2 Vertikal upplösning bestående av 20 sigmalager. Lagren är tunnast närmast ytan och botten. Tvärsnittet visar en sektion från väst till öst genom parkområdet, markerad med blå streckad linje i infälld bild (överst).

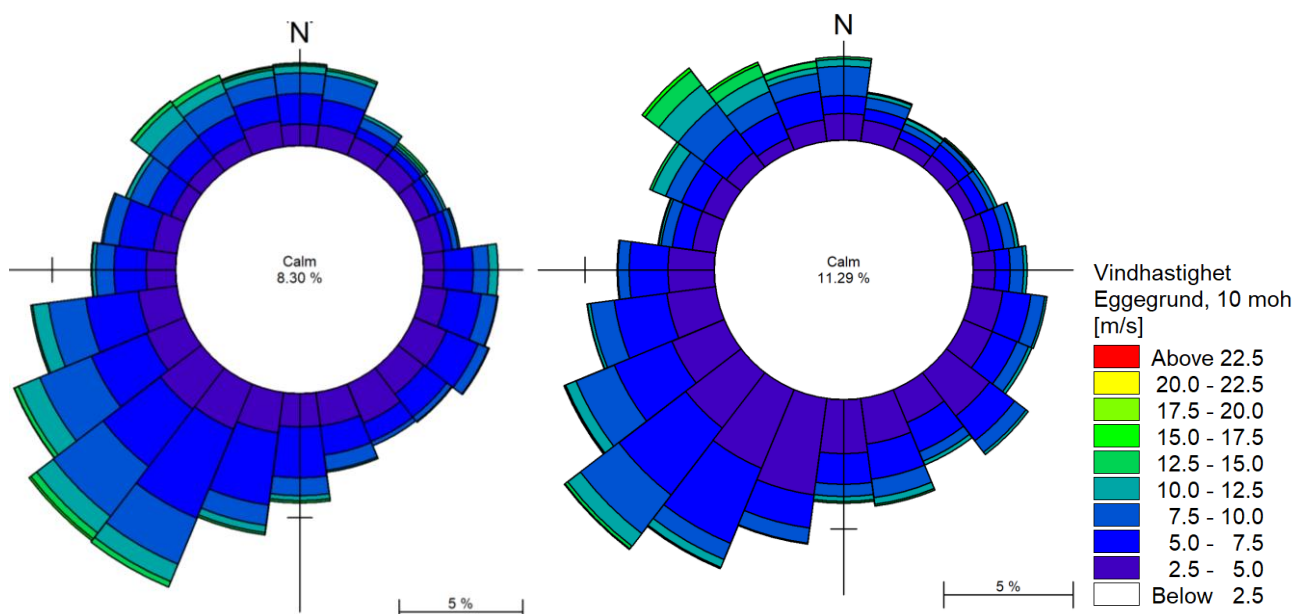
3.1.3 Drivning av den hydrodynamiska modellen

Drivning (randvillkor) för den lokala hydrodynamiska modellen har hämtats från regionala data.

Meteorologiska fält med vindhastighet och riktning, lufttryck och lufttemperatur, har hämtats från NORA3, /3/. För jämförelse med observerad vind visas en vindros vid SMHI's mätstation Eggegrund utanför Gävle i Figur 3.3, med fördelningen av vindhastighet och riktning året 2020.

Oceanografiska randvillkor (vattenstånd, samt dygnsmedel av strömmar, salinitet och vattentemperatur) vid den lokala modellens yttre ränder har hämtats från CMEMS (<https://doi.org/10.48670/moi-00010>).

Flöde från vattendragen Delångersån, Dalälven, Nianån, Norralåån, Ljusnan, Skärjån, Hamrådeån, Testeboån, Gavleån, Forsmarksån, Tamnrån, Olandsån och Skeboån har hämtats från SMHI's S-HYPE (<https://www.smhi.se/data/hydrologi/vattenwebb>).

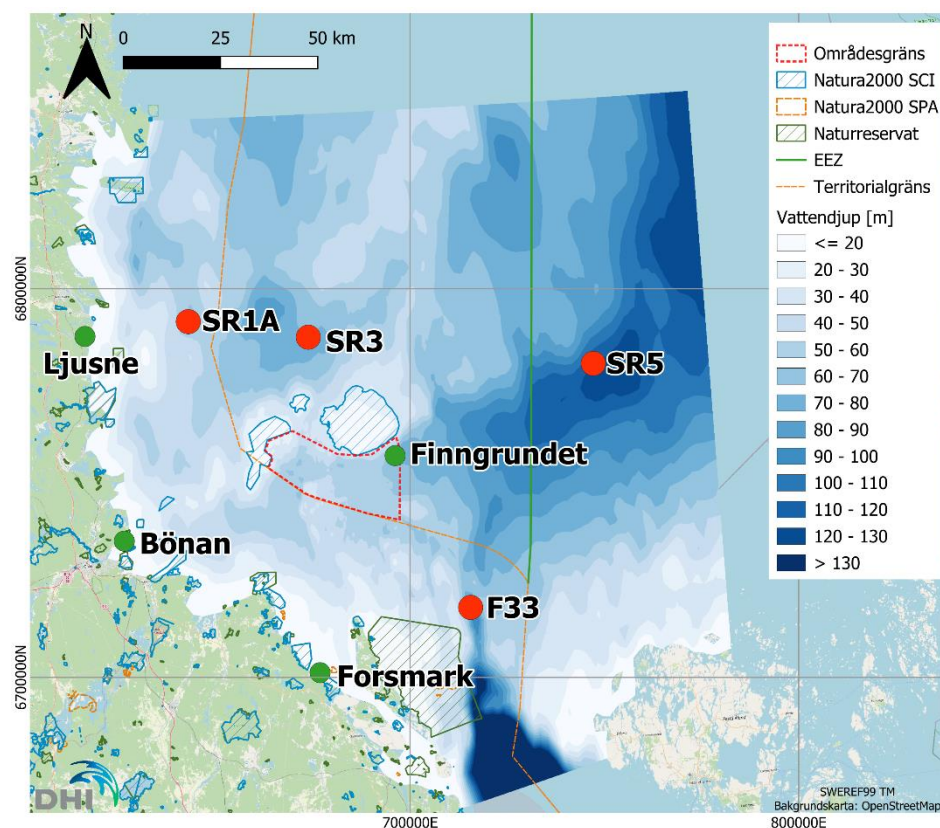


Figur 3.3 Vindros år 2020 vid SMHI's station Eggegrund för regionala data från NORA3 (till vänster) och observerad vind från SMHI (till höger).

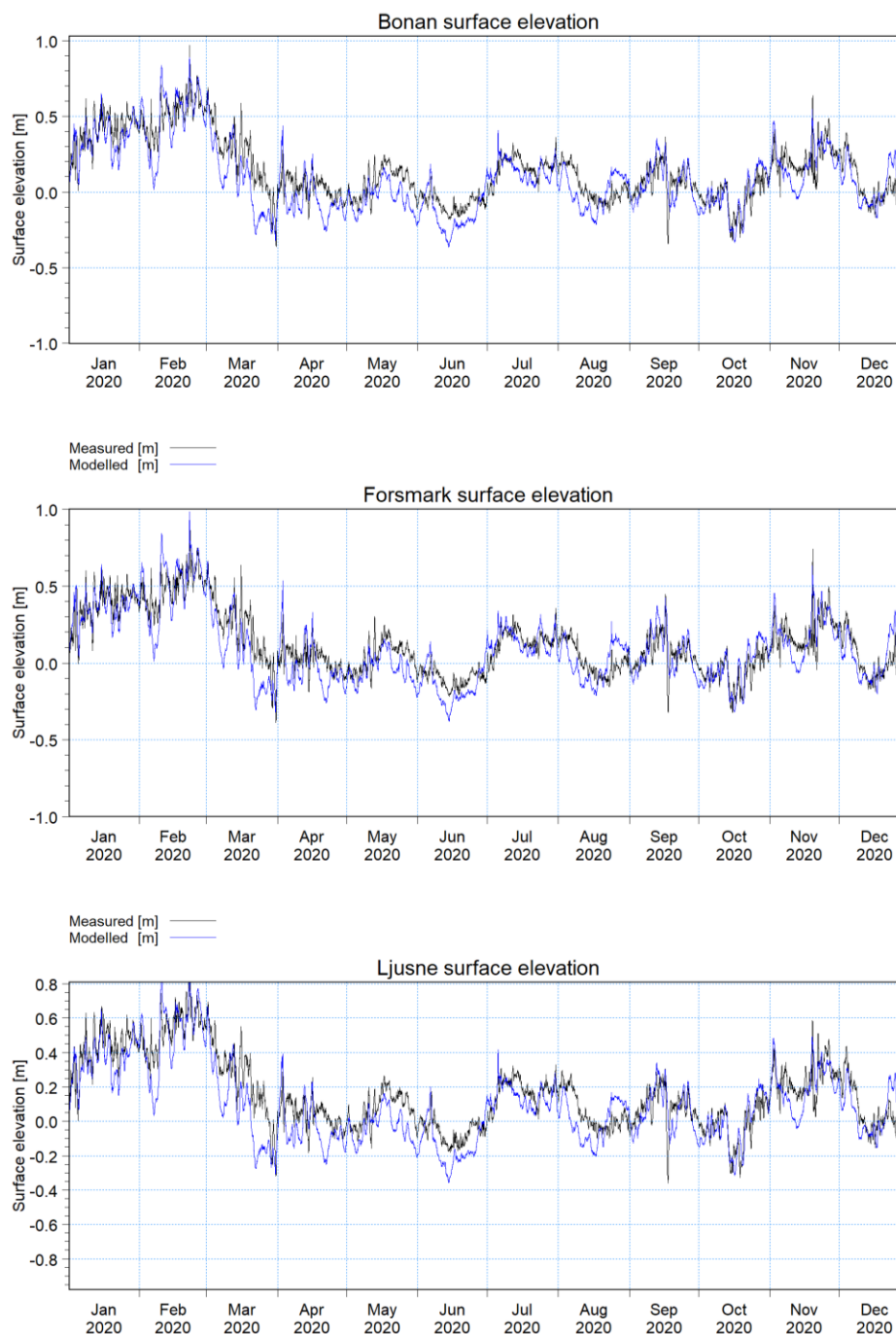
3.1.4 Validering

Validering av den lokala hydrodynamiska modellen har gjorts genom att jämföra modellresultaten med observationer från området. Stationer med observerade data visas i Figur 3.4, där gröna markörer visar stationer med observerat vattenstånd samt temperatur och röda markörer visar stationer med observerade profiler av salinitet.

Vattenståndsvariationer validerades mot tidsserier över observerade värden hämtade från SMHI vid mätstationer Bönan SJÖV, Forsmark och Ljusne. Modellerade och observerade tidsserier visas i Figur 3.5. Modellen fångar vattenståndsvariationerna väl.



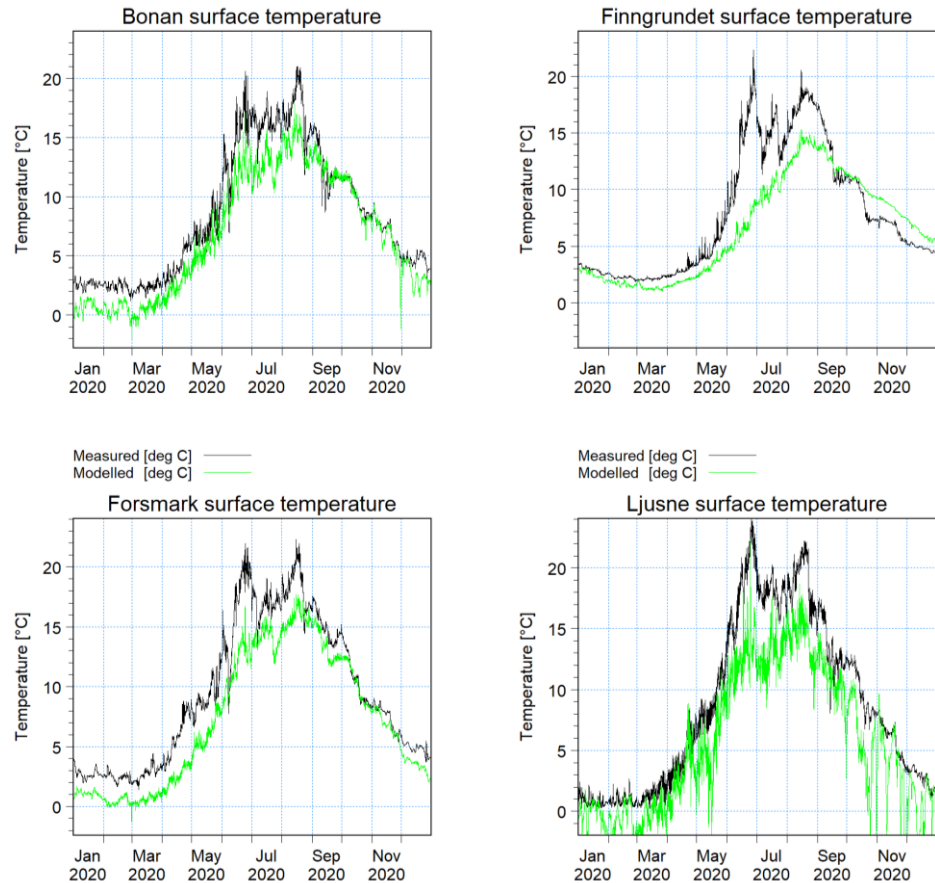
Figur 3.4 Stationer med observerade data: vattenstånd och temperatur (grön markör), samt profiler över salinitet (röd markör).



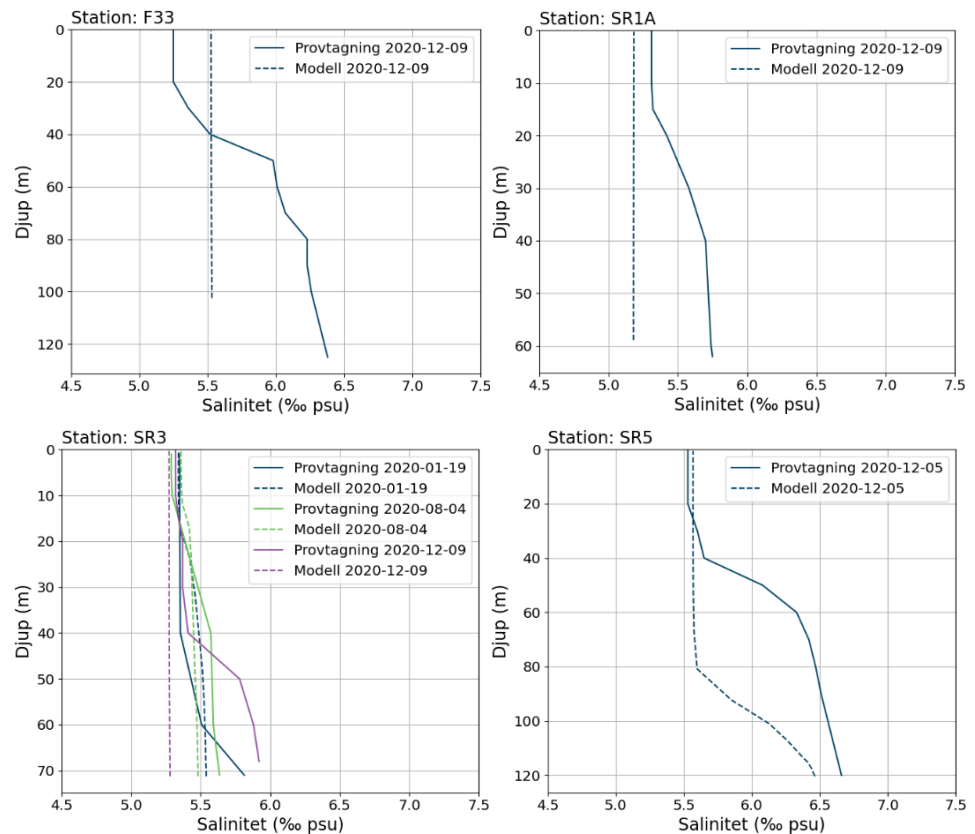
Figur 3.5 Vattenstånd relativt medelvattenstånd, observerad (svart) och modellerad (blå) vid mätstationer Bönan, Forsmark och Ljusne.

Temperatur i havsytan validerades mot observerade tidsserier hämtade från SMHI vid mätstationer nämnda ovan, samt vid Finngrundet SJÖV. Modellerade och observerade tidsserier visas i Figur 3.6. Modellen ligger något lägre i temperatur vid havsytan än observerade värden, men fångar dynamiken över tid väl.

Salinitet validerades mot observerade profiler hämtade från SMHI ([SharkWeb \(smhi.se\)](https://sharkweb.smhi.se)). Modellerade och observerade profiler visas i Figur 3.7. Modellerad salinitet ligger nära observerade värden runt 5,5 psu.

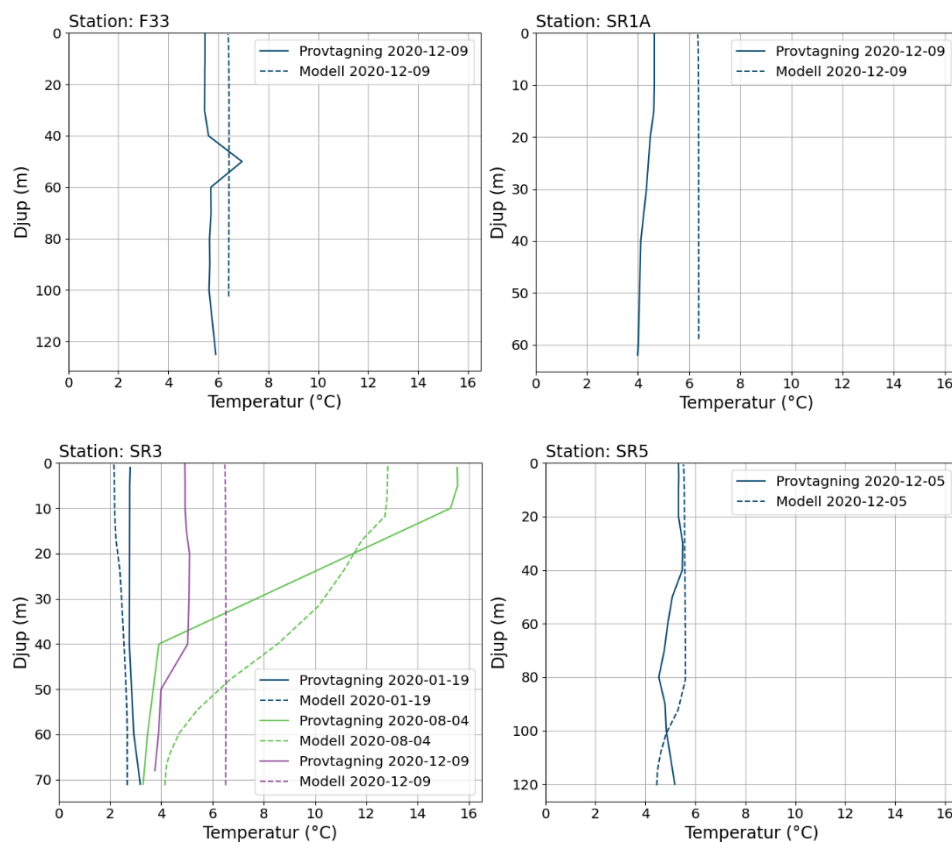


Figur 3.6 Temperatur, observerad (svart) och modellerad (grön) vid mätstationer Bönan, Finngrundet, Forsmark och Ljusne.



Figur 3.7 Modellerade och observerade djupprofiler av salinitet.

Djupprofiler av modellerad och observerad temperatur visas i Figur 3.8. Modellerad temperaturskiktning fångar överlag variationen över året. Observerade profiler har hämtats från SMHI ([SharkWeb \(smhi.se\)](http://SharkWeb.smhi.se))



Figur 3.8 Modellerade och observerade djupprofiler av temperatur.

3.2 Vågmodell (baseline)

Den lokala vågmodellen har satts upp i modelleringsverktyget MIKE 21 SW (/2/). MIKE 21 SW är en spektral-vågmodell som beräknar vågdynamiken i området. De fysikaliska processerna som inkluderas i den numeriska modellen är bland annat: våggenerering baserat på rådande vindar, interaktioner mellan vågor, uppgrundning och djupinducerad vågbrytning, samt hur vågenergin dissiperas av bottenfriktion m.m.

Modelleringsperiod (väderåret 2020), batymetri och beräkningsnät för vågmodellen är samma som för den hydrodynamiska modellen. Följande stycken beskriver drivning och validering av vågmodellen.

3.2.1 Drivning av vågmodellen

Vågmodellen drivs bland annat av randvillkor för inkommande vågor som genererats utanför det lokala modellområdet. Dessa beskrivs av vågdata (signifikant våghöjd, peak vågperiod, vågriktning och riktningarnas standardavvikelse) som hämtats ur en regional vågmodell (DHI metocean data portal <https://www.metocean-on-demand.com/>).

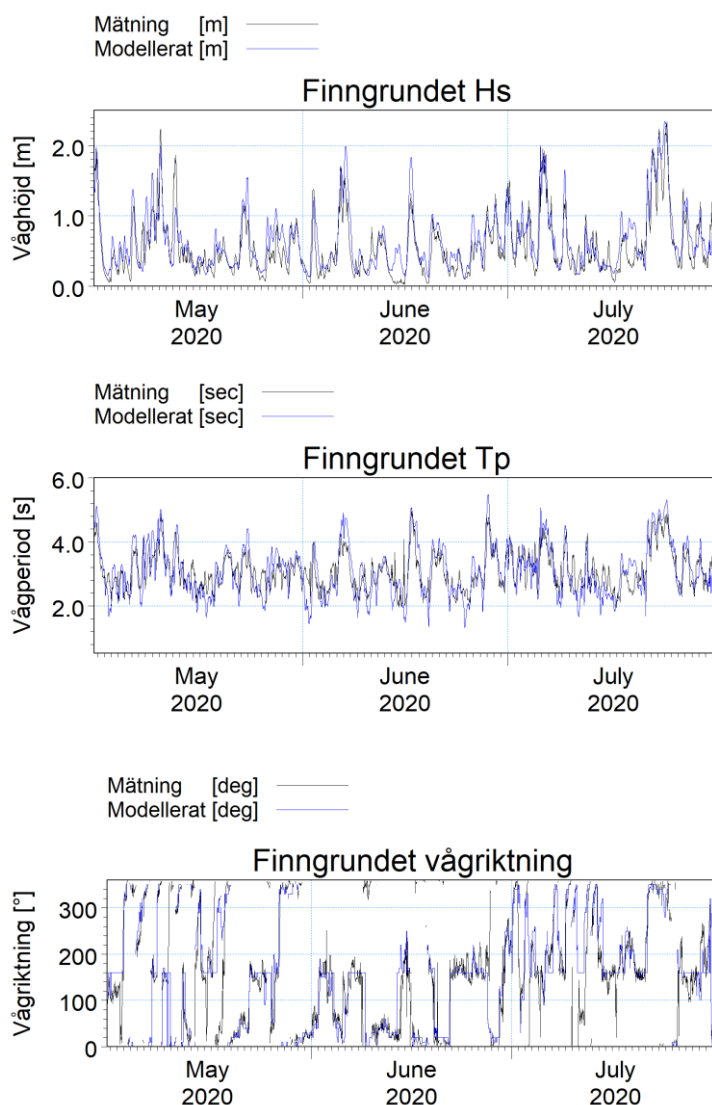
Samma meteorologiska drivning har använts i vågmodellen som i den hydrodynamiska modellen för baseline, det vill säga vindhastighet och riktning, lufttryck och lufttemperatur, från NORA3, /3/.

Randvillkor för vattenståndsvariationer är hämtade från CMEMS (<https://doi.org/10.48670/moi-00010>) och är samma som i den hydrodynamiska modellen.

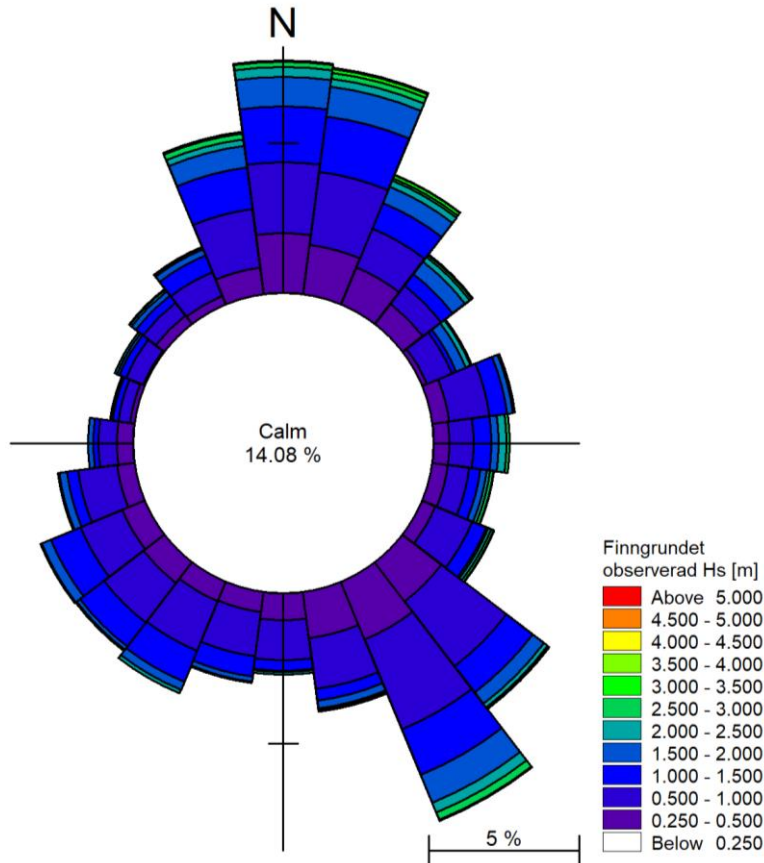
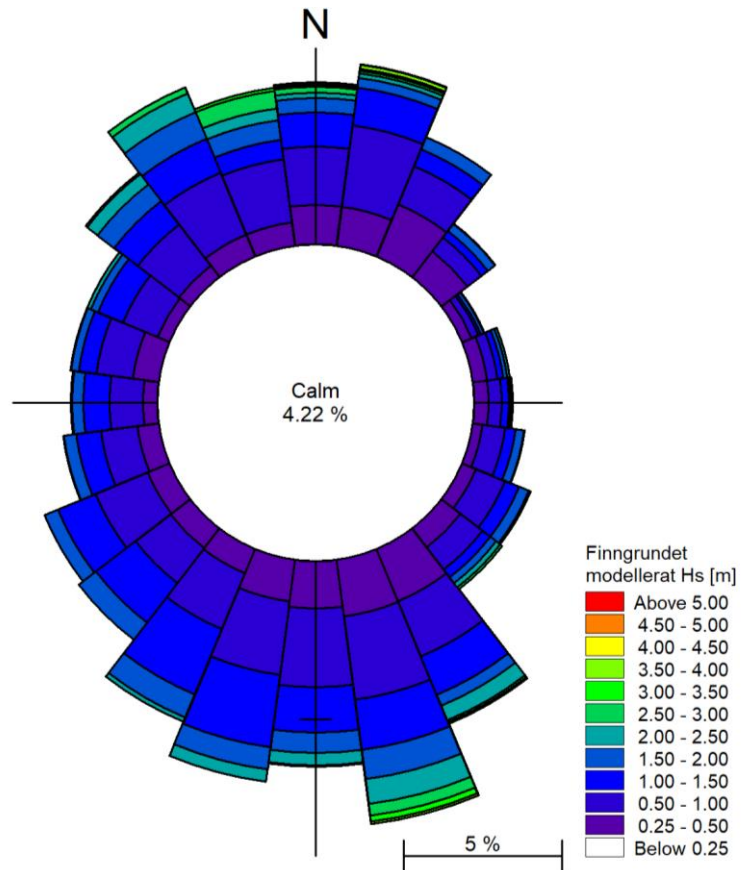
3.2.2 Validering

Vågmodellen har validerats genom en jämförelse med observerade vågor. Observerade tidsserier har hämtats från SMHI's station Finngrundet, se Figur 3.4. Ett utdrag från observerade och modellerade tidsserier (signifikant våghöjd, peak vågperiod och vågriktning) visas i Figur 3.9. Utdraget visar att vågornas dynamik representeras väl i modellen nära vindkraftparken.

Våghöjd och vågriktning vid Finngrundet under hela det modellerade året 2020 visas av vågrosorna i Figur 3.10, modellerad (överst) och observerad (underst). Figuren visar att modellen generellt fångar de dominerande nordliga och sydostliga vågriktningarna vid vindkraftparken.



Figur 3.9 Utdrag av observerad (svart) och modellerad (blå) signifikant våghöjd (Hs, överst), peak vågperiod (Tp, mitten) och vågriktning (nederst).



Figur 3.10 Signifikant våghöjd och vågriktning vid Finngrundet under 2020, modellerad (överst) och observerad (underst).

3.3 Modellering av hydrodynamik och vågor under driftsfas

För scenariot under parkens driftsfas har ett korrigerat vindfält tagits fram baserat på vindkraftparkens utformning och vindkraftverkens tekniska egenskaper. Det korrigerade vindfältet inkluderar uppskattade lä-effekter med reducerad vindhastighet, som uppstår då vindkraftverken är i bruk. Hydrodynamik och vågor har modellerats för driftsfas-scenariot med den korrigerade vinden. Dessutom har vindkraftverkens fundament inkluderats i modelleringen av driftsfas, för att inkludera strukturernas påverkan på vågor och strömmar. Antaganden, korrigering av vindfält och modelluppställning för hydrodynamik och vågor under driftsfas beskrivs i följande stycken.

3.3.1 Antaganden om vindkraftverken

Information om vindkraftverken i parkområdet har tillhandahållits av DWO, se avsnitt 2.2. Ett par antaganden har gjorts baserat på erhållen information och beskrivs här.

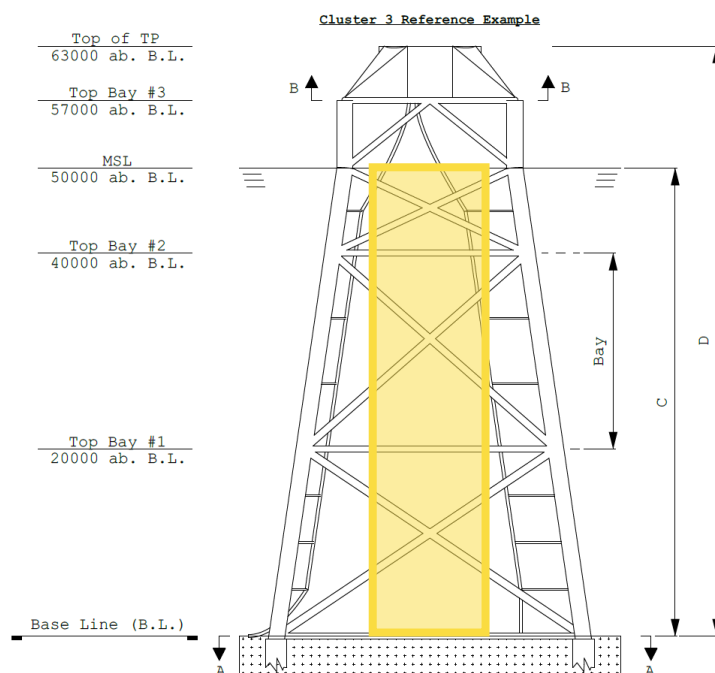
Diametern på vindkraftverkens torn (ovanför vattenytan) har uppskattats till 14 m, baserat på skiss av fundament och sidlängden 20 m vid toppen av fundamenten (se 2.2).

Vindkraftverkens och transformatorstationens fundament ("jacket") representeras i den hydrodynamiska modellen som ett motstånd mot flödet, genom en enkel cylinder med dimensioner baserat på fundamentens tvärsnittsarea. Den effektiva tvärsnittsarean, som används i modellen, är baserad på avståndet mellan konstruktionens botten-pålar och vattendjupet vid respektive vindkraftverk. Medelavståndet för botten-pålarna är 36 m, för de olika fundament som förekommer i vindkraftparken (se 2.2). Konstruktionen har antagits vara 30% solid, så att den effektiva diametern är 12 m för cylindern som representerar fundament i modellen.

Även i vågmodellens driftsfas-scenario representeras varje fundament som en enkel cylinder med effektiv diameter 12 m.

En schematisk skiss av representation av fundament i modellering av påverkan på vågor och strömmar visas i Figur 3.11 (ej skalenlig).

Eventuella urgröpningskydd (scour protection) vid botten har inte inkluderats i modellen, eftersom de ger en relativt liten effekt jämfört med fundamenten i övrigt.



Figur 3.11 Schematisk skiss över representation (i gult) av bottenfundament i modellering av påverkan på vågor och strömmar (ej skalenlig).

3.3.2 Korrigering av vindfält under driftsfas

Korrigering av vindfält under driftsfas baserat på erhållen information om turbiner (avsnitt 2.2) har beräknats med hjälp av PyWake ([Welcome to PyWake — PyWake 2.5.0 documentation \(dtu.dk\)](https://www.dtu.dk/en/Research/PyWake)). PyWake är ett Python-baserat verktyg som bland annat kan användas för att beräkna vindfält vid vindkraftparker, med reducerade vindhastigheter på lä-sidan om vindkraftverken. PyWake har utvecklats av DTU.

För att beräkna reduktionen av vindhastighet på lä-sidan om turbinerna och ta fram ett korrigerat vindfält krävs meteorologiska indata. Dessa har hämtats från NORA3, /3/. En tidsserie av meteorologiska parametrar plockades ut i en punkt i vindkraftparken, bland annat vindhastighet, vindriktning, lufttemperatur, luftfuktighet, havsytans temperatur och genomsnittligt atmosfärstryck vid havsytan. Med hjälp av dessa parametrar beräknas vindhastigheten vid turbinhöjden (genom så kallad COARE bulk luft-hav strömning, se exempelvis /4/ och /5/). I PyWake beräknas sedan reduktionen av vindhastigheten på lä-sidan av vindturbinen. Reduktionen beror på flera turbinparametrar, bland annat diameter och energikoefficienter. Vissa koefficienter beror i sin tur på vindhastigheten, och uppdateras i PyWake för att återspegla detta. Resultatet blir ett vektorfält som täcker vindkraftparken och dess närområde, där den reducerade vindhastigheten är angiven för varje gridcell och tidssteg. Detta lokala vektorfält nästas sedan in i modellen, så att de reducerade vindhastigheterna på lä-sidan om vindkraftverken representeras.

Beräkningarna av den reducerade vindhastigheten är en förenklad modell, som bygger på en del konservativa antaganden. Till exempel i beräkning av vindhastighet vid turbinhöjden, genom COARE, samt att vinddata från en enskild punkt används i PyWake. När beräkningen av reducerad vind vid turbinhöjd har blivit utförd blir vinden vid 10 m höjd uppskattad genom antagandet att vindhastigheten följer en logaritmisk profil. Detta innebär att

vindfältet som nästas in i omgivande griddad vind, har en lite lägre hastighet vid randen av det nästade området (med en skillnad i storleksordningen ca 1 cm/s). Men denna effekt är liten relativt den reducering som sker i lä om vindkraftverken.

3.3.3 Hydrodynamisk modell (driftsfas)

Den korrigerade vinden som tagits fram (se beskrivning i avsnitt 3.3.2) har applicerats i den hydrodynamiska modelleringen av strömmar och skiktning under driftsfas-scenariot. Dessutom har fundamenten i vindkraftparken inkluderats i modellen.

Fundamentens påverkan på flödet modelleras genom att beräkna ett effektivt flödesmotstånd vid varje enskilt fundament, enligt följande ekvation:

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

där ρ_w är vattnets densitet, γ är en konstant faktor som beaktar ökade flödeshastigheter till följd av blockeringseffekter, C_D är en flödesmotståndskoefficient, A_e är den effektiva tvärsnittsarean av fundamentet i vattenpelaren på respektive plats och v är strömhastigheten. När motståndet, F , är större än noll utgör den en kraft i motsatt riktning mot strömmen. Modellering av strukturer i MIKE 3 FM beskrivs i /1/.

I övrigt är uppställningen av den hydrodynamiska modellen gjord på samma sätt som för baseline-scenariot, se beskrivning i avsnitt 3.1.

3.3.4 Vågmodell (driftsfas)

Den korrigerade vinden som tagits fram (se beskrivning i avsnitt 3.3.2) har applicerats i vågmodellen för driftsfas-scenariot. Dessutom har fundamenten i vindkraftparken inkluderats i vågmodellen.

Fundamentens påverkan på vågorna simuleras genom att beräkna en minskning av vågenergin bakom respektive fundament. Minskningen av vågenergin beräknas vid varje fundament, enligt följande ekvation:

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

, där A_i är arean av cellen i beräkningsnätet där fundamentet står, c är en reflektionsfaktor, c_g är våggruppens hastighet och $E_{i,l,m}$ är vågspektrumets energidensitet. För fundamenten som representeras av en enkel cylinder fås reflektionsfaktorn genom $c = D \cdot r$, där D är cylinderns diameter och $0 \leq r \leq 1$ är reflektionskoefficient. Reflektionskoefficienten, r , beror på djupet och vågperioden. Detta beskrivs ytterligare i /2/.

I övrigt är uppställningen för vågmodellen gjord på samma sätt som för baseline-scenariot, se beskrivning i avsnitt 3.2.

4 Resultat från modellering av påverkan på vind, vågor och strömmar

I detta avsnitt presenteras resultaten för simuleringen av påverkan på vind, vågor och strömmar under vindkraftparkens driftsfas. Resultat som presenteras visar följande:

- Skillnad i vindförhållanden.
- Skillnad över signifikant våghöjd.
- Skillnad över strömhastighet.
- Skiktning och omblandningsförhållanden visas genom djupprofiler över temperatur och salinitet under vår- och sommarmånader.

4.1 Vindpåverkan

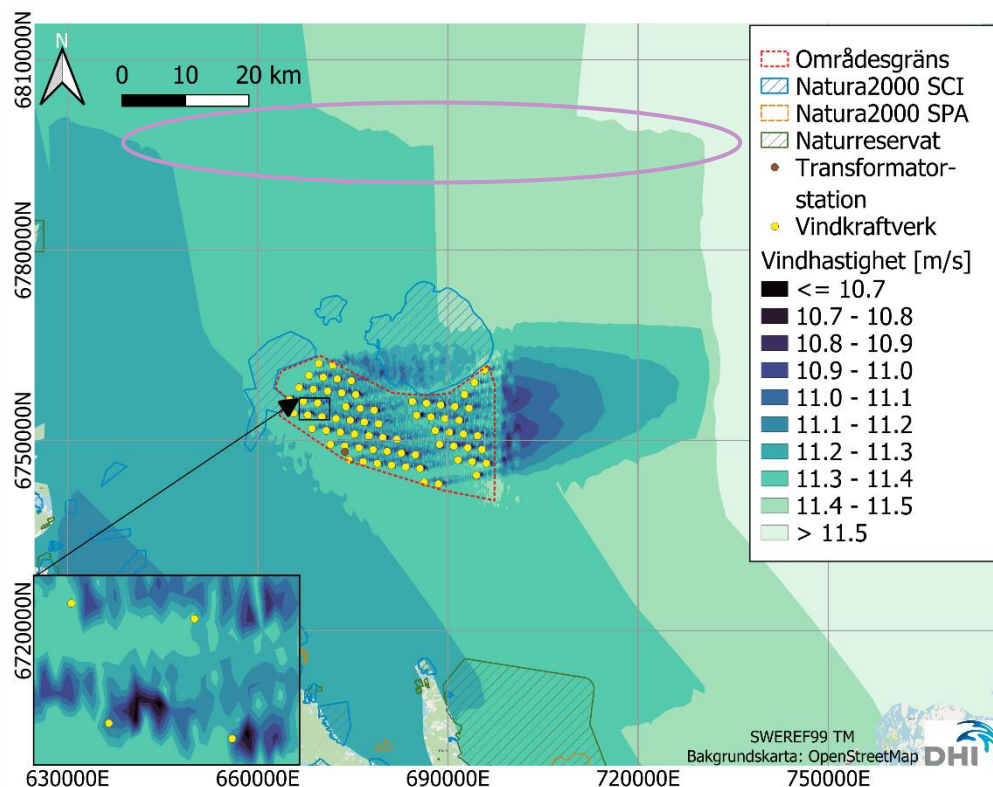
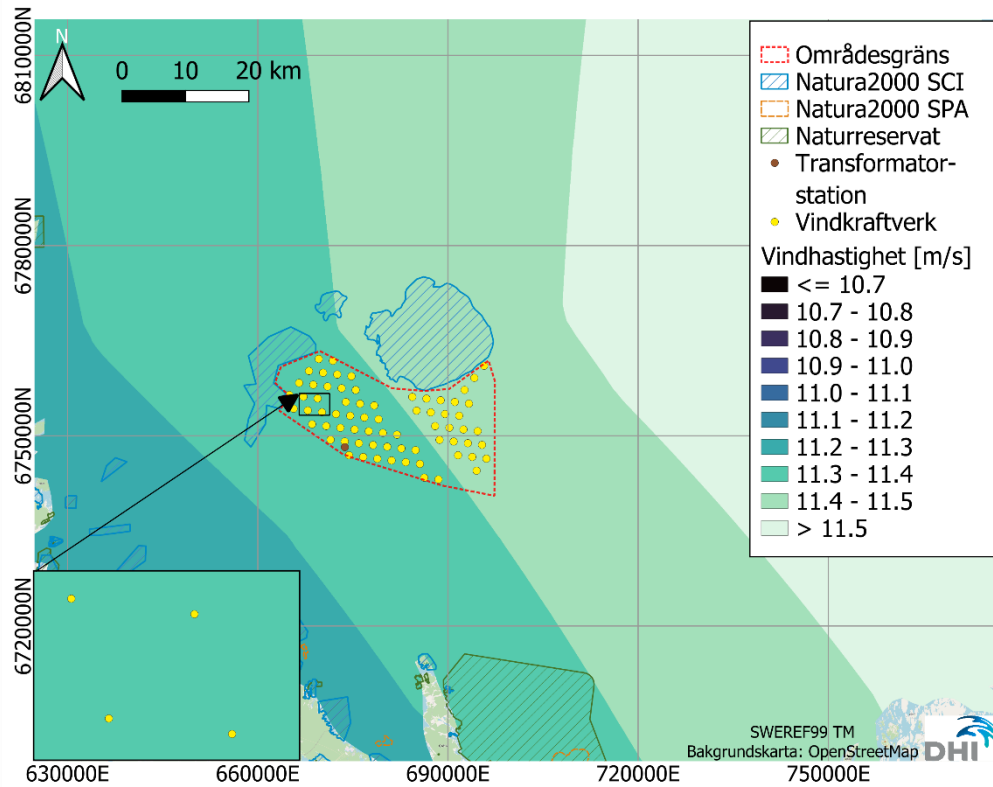
En ögonblicksbild över vindhastighet utan respektive med vindkraftpark visas i Figur 4.1. Den nedersta bilden visar alltså korrigerad vindhastighet under driftsfas, med reducerade vindhastigheter i lä om vindkraftverken. Isolinjerna i den översta bilden kröks i den nedersta bilden (se exempel markerat med lila ellips), vilket sker vid gränsen av det vektorfält som tas fram för den korrigerade vinden (se beskrivning i 3.3.2).

Vindens medelhastighet över året (baseline) visas i Figur 4.2.

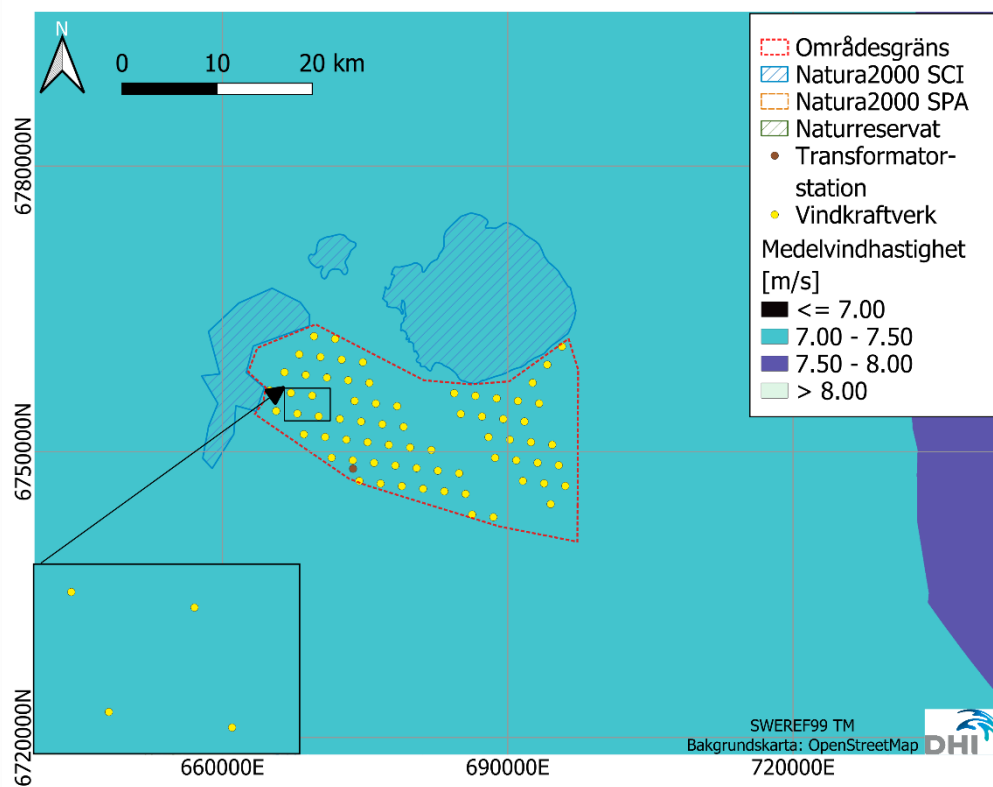
Differens över vindens medelhastighet över året, i jämförelse mellan de två scenariona (baseline och driftsfas), visas i Figur 4.3.

Rådande vindförhållanden vid vindkraftparken präglas till stor del av vindar från sydvästlig riktning (Figur 3.3). Detta innebär att reduktionen av medelvindhastigheten framför allt sker nord/nordost om parkområdet, samt lokalt inom parkområdet. Vindhastighetens årsmedel reduceras med 10 cm/s med avstånd på upp till ca 20 km nord/nordost om vindkraftparkens områdesgräns (Figur 4.3). Reduktioner på 30 cm/s på årsmedlet infaller med ett avstånd om upp mot ca 5 km nord/nordost om vindkraftparkens områdesgräns. Reduktion av medelvindhastighet på mer än 30 cm/s sker väsentligen innanför parkområdet, men ett litet område ca 2 km norr om parken visar också denna reduktion av medelhastighet över året (Figur 4.3).

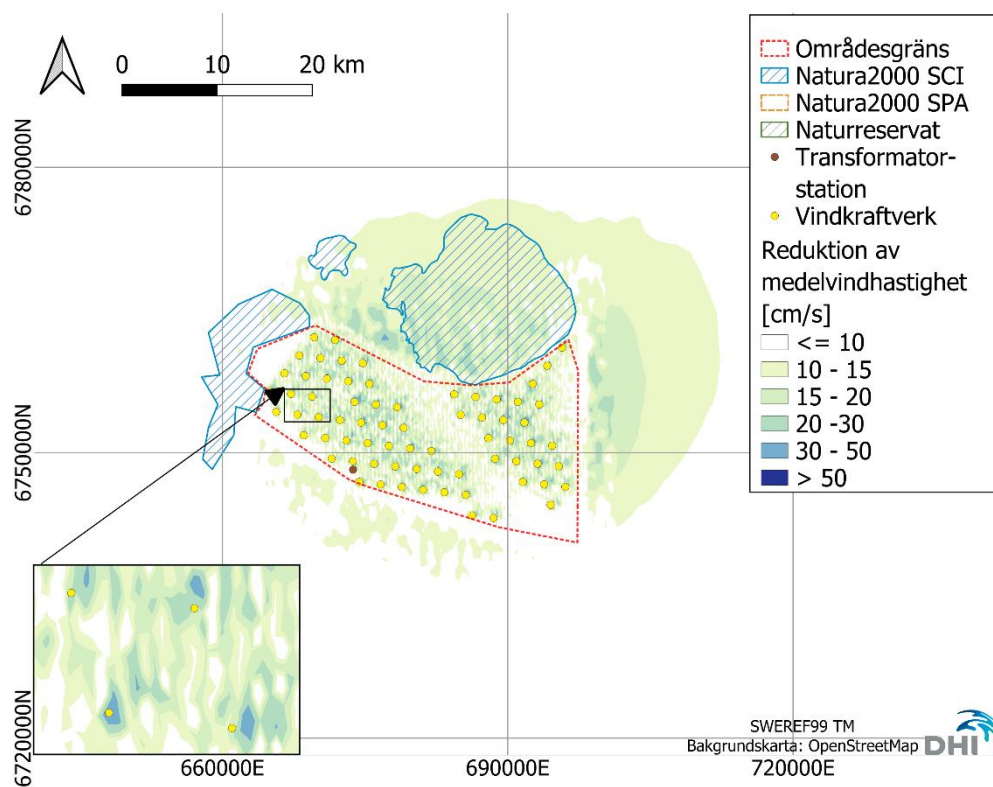
Även vindar från nord/nordväst är vanligt förekommande i området (Figur 3.3). Söder om parkområdet reduceras vindhastighetens årsmedel med 10 cm/s med avstånd på upp till ca 10 km från vindkraftparkens södra områdesgräns (Figur 4.3).



Figur 4.1 Ögonblicksbild över vindhastighet utan vindkraftpark (överst) och med vindkraftpark (underst). Tidssteget som visas är 21 juli 2020, kl 08:00. Lila ellips i den nedre bilden markerar exempel på numeriska skillnader som uppstår nära gränsen av vektorfältet som tas fram vid korrigering av vind under driftsfas (se avsnitt 3.3.2).



Figur 4.2 Vindens medelhastighet över året.

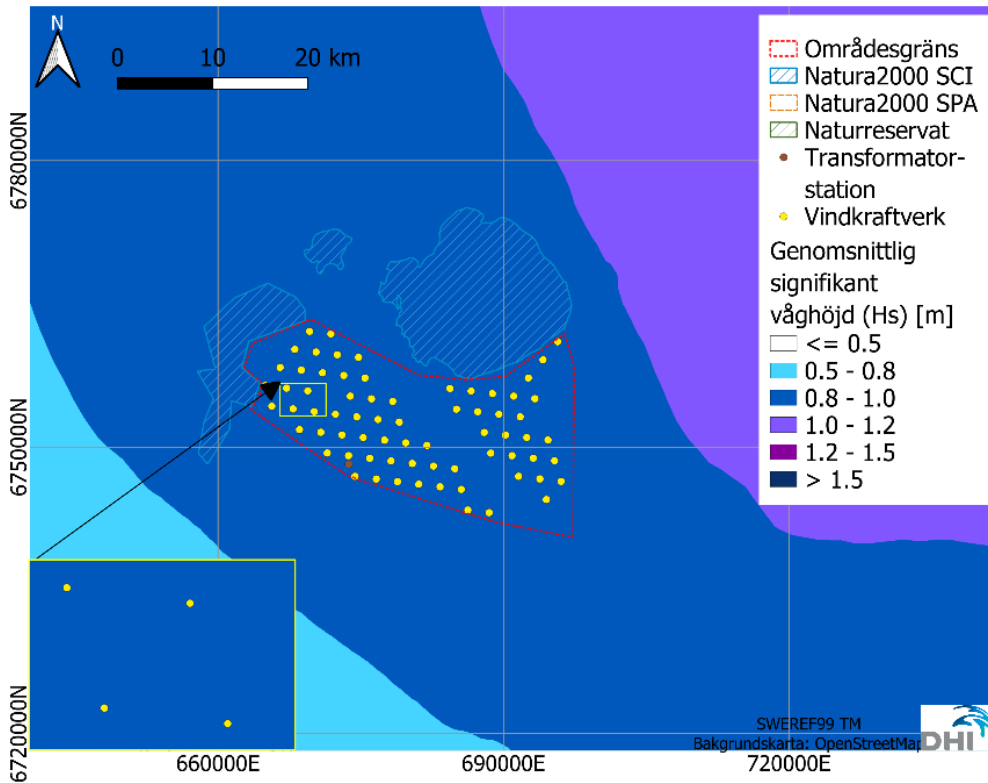


Figur 4.3 Reduktion av vindens medelhastighet över året.

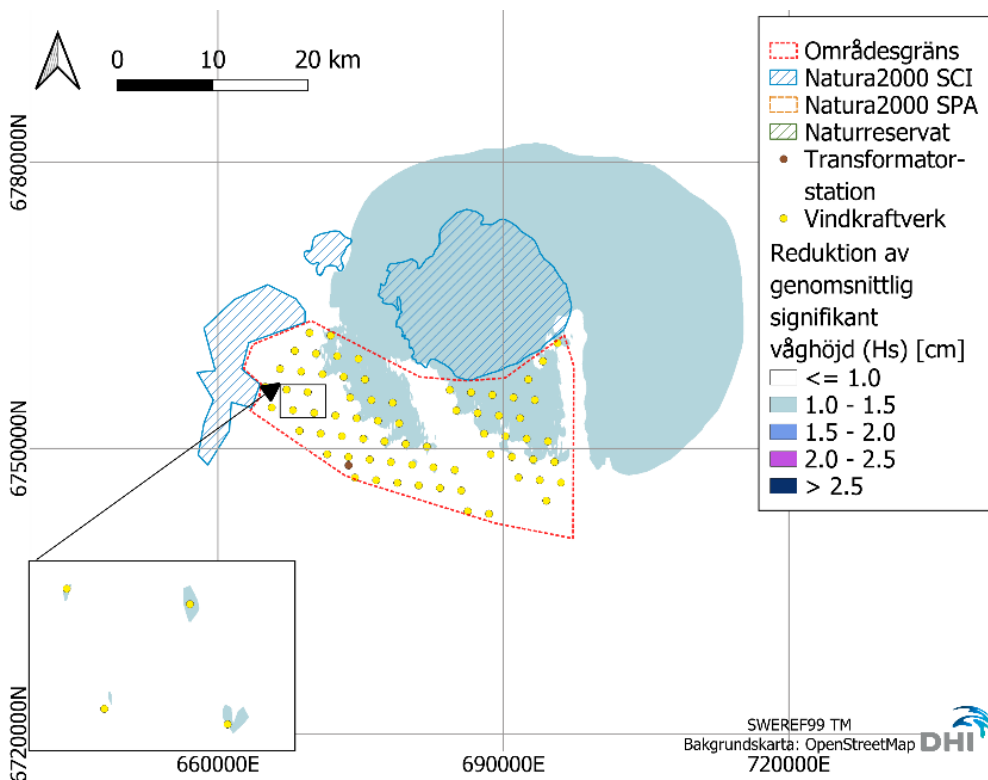
4.2 Vågpåverkan

Medelvärde av signifikant våghöjd (baseline) över året visas i Figur 4.4. I västra delen av vindkraftparken är årsmedlet av signifikant våghöjd ca 0,9 m. I östra delen av parken är den ungefär 1 m. Observerade vågor vid Finngrundet (i nordöstra delen av parken, se Figur 3.4) visar ett årsmedel över signifikant våghöjd på 0,9 m under 2020.

Skillnaden mellan årsmedel av signifikant våghöjd för de två scenarierna (baseline och driftsfas) visas i Figur 4.5. Reduktionen på 1–1,5 cm (ljusblå färg i Figur 4.5) utgör ca 1–2% av den signifikanta våghöjden (som årsmedel) kring vindkraftparken. Området med reducerade våghöjder i Figur 4.5 sträcker sig ungefär över ytan där medelvindhastigheten är reducerad (se Figur 4.3), det vill säga inom och nord-nordost om vindkraftparken samt över Natura 2000-området Finngrundet Östra banken. Konturen med en reduktion om 1 cm av genomsnittlig signifikant våghöjd (i Figur 4.5) sträcker sig upp emot ca 25 km nord-nordost om vindkraftparken.



Figur 4.4 Årsmedel av signifikant våghöjd.

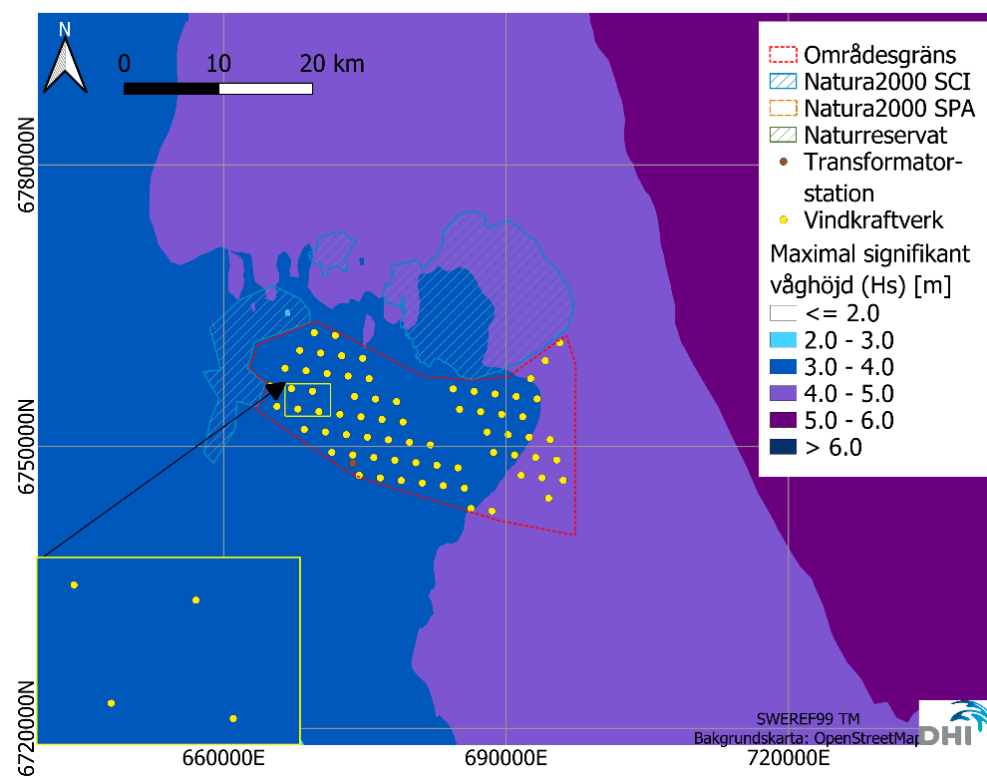


Figur 4.5 Skillnad i årsmedel av signifikant våghöjd för de två scenariona.

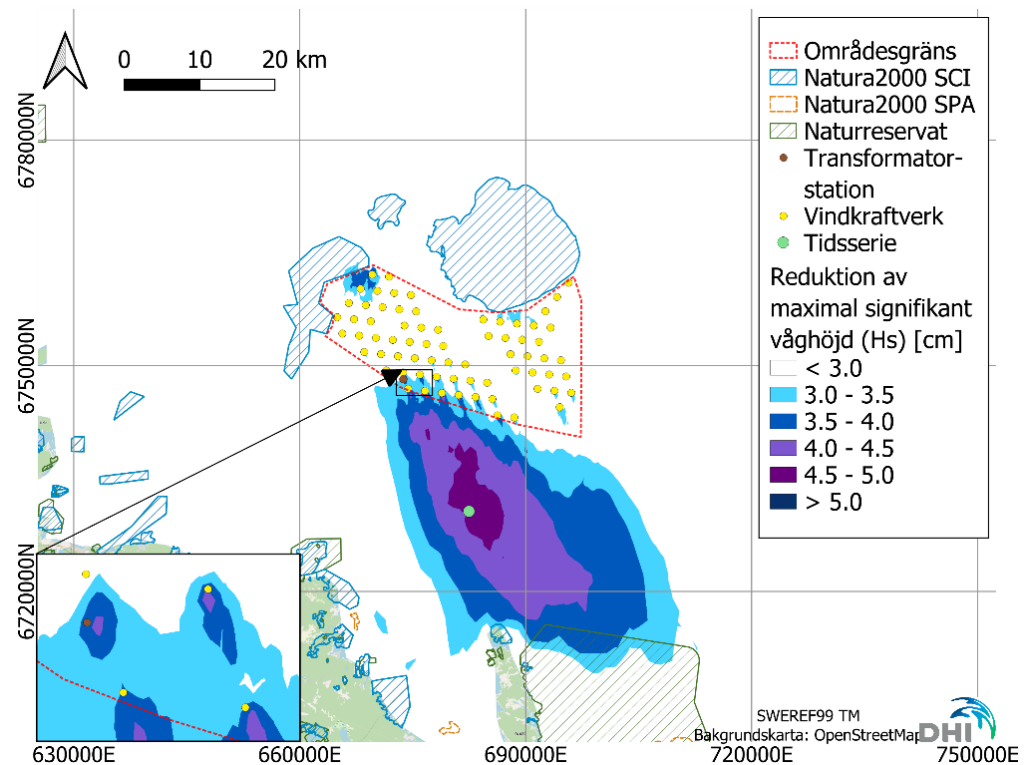
Maxvärdet av signifikant våghöjd över året (baseline) visas i Figur 4.6. Maximal signifikant våghöjd är ca 3,6 m i den västra delen av vindkraftparken och ca 4,2 m i den östra delen, under det modellerade året. Observerade vågor vid Finngrundet (i nordöstra delen av parken, se Figur 3.4) visar en maximal signifikant våghöjd på 3,7 m under 2020.

Skillnad mellan årsmax av signifikant våghöjd för de två scenarierna (baseline och driftsfas) visas i Figur 4.7. Kartan visar inte ett enskilt tillfälle då tillfällena för maxhöjd inte sker vid samma tillfälle inom området. Reduktionen på ca 3–5 cm som förekommer söder om vindkraftparken, utgör ca 1–1,5 % av den maximala signifikanta våghöjden (ca 4 m) under det modellerade året.

Reduktionen av maximal signifikant våghöjd (Figur 4.7) sker framför allt söder om vindkraftparken. Dessa högsta vågor, har kommit norrifrån och gått igenom parken för att reduceras som mest på läsidan, ett antal kilometer från parkens södra kant.

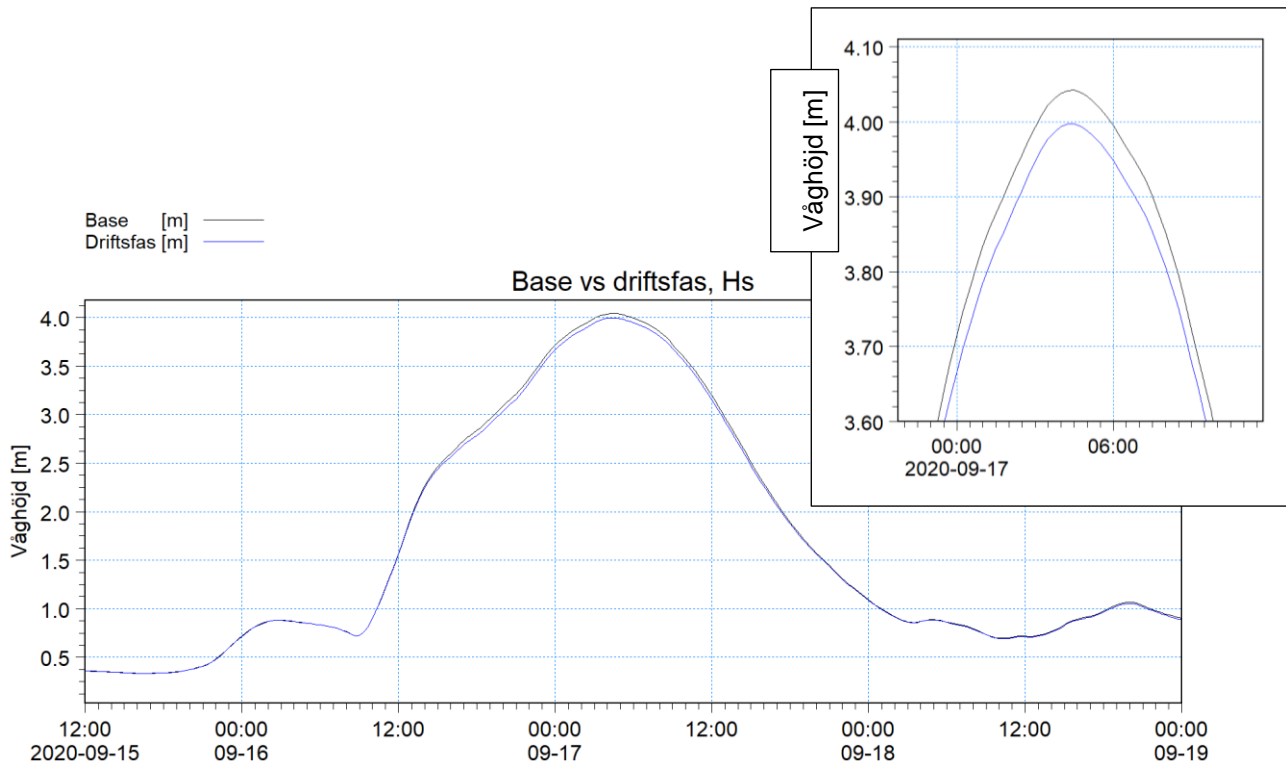


Figur 4.6 Maxvärde av signifikant våghöjd över året.



Figur 4.7 Skillnad i årsmax av signifikant våghöjd för de två scenarierna. Position för tidsserie i Figur 4.8 markeras av grön cirkel, i området med störst reduktion av maximal signifikant våghöjd.

Figur 4.8 visar ett tillfälle med hög signifikant våghöjd för de två modellerade scenarierna, söder om vindkraftparken (se position markerad i Figur 4.7). Våghöjden är mycket lik i de två scenarierna, men vid peak-tillfället (den 17 sep) är våghöjden under driftsfas (blå linje) reducerad med upp mot 5 cm under en period om ca 3 timmar (jämfört med baseline, svart linje).

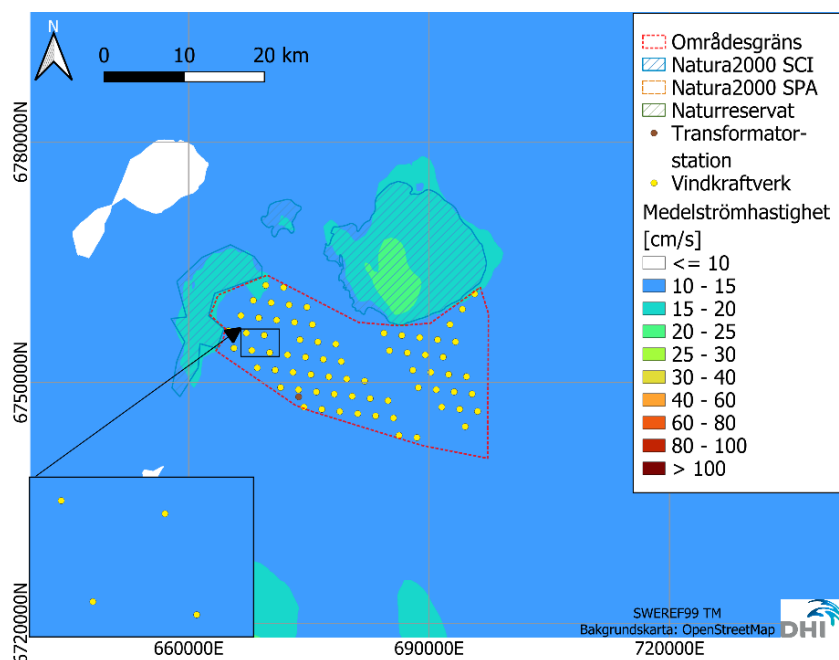


Figur 4.8 Utdrag ur tidsserie över modellerad signifikant våghöjd för de två scenarierna, baseline (svart) och driftsfas (blå). Peak-tillfället visas med en utdragen skala på y-axeln i infällningen, för förtydligande.

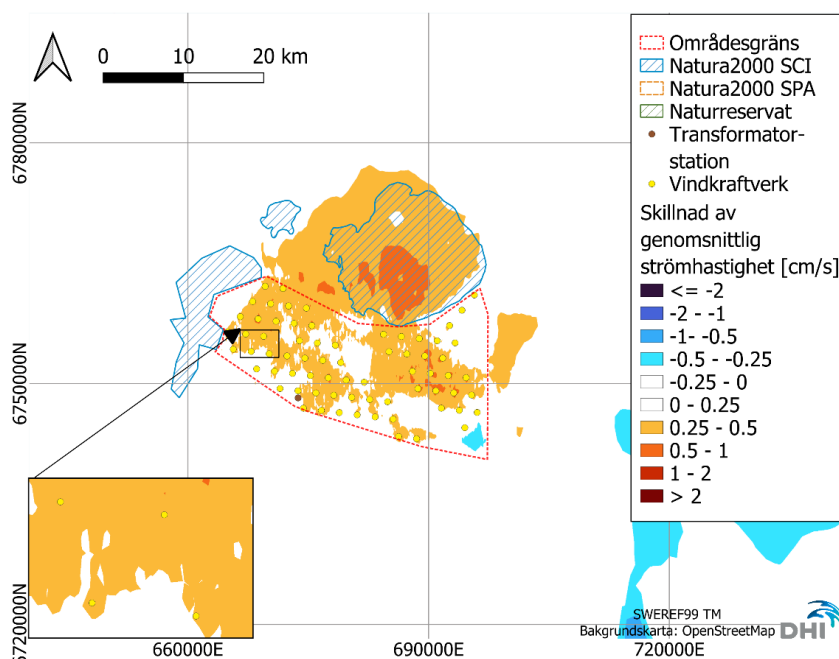
4.3 Strömpåverkan

Årsmedelvärde av strömhastighet i ytan (baseline) visas i Figur 4.9. Medelströmhastigheten inom vindkraftparken är ca 0,1–0,15 m/s över året, i ytan. De närliggande Natura 2000-områdena (norr och väster om parken) är något grundare och medelhastigheten är högre (0,15–0,25 m/s, i ytan). Detta beror på att strömmen accelererar något då den passerar grundare områden.

Skillnad mellan årsmedel av strömhastighet i ytan för de två scenariona (baseline och driftsfas) visas i Figur 4.10. Den lokala reduktionen om 0,5–1 cm/s mitt i Natura 2000-området Finngrundet Östra banken, motsvarar ungefär 2–5% av medelströmhastigheten i ytan som förekommer där (20–25 cm/s).



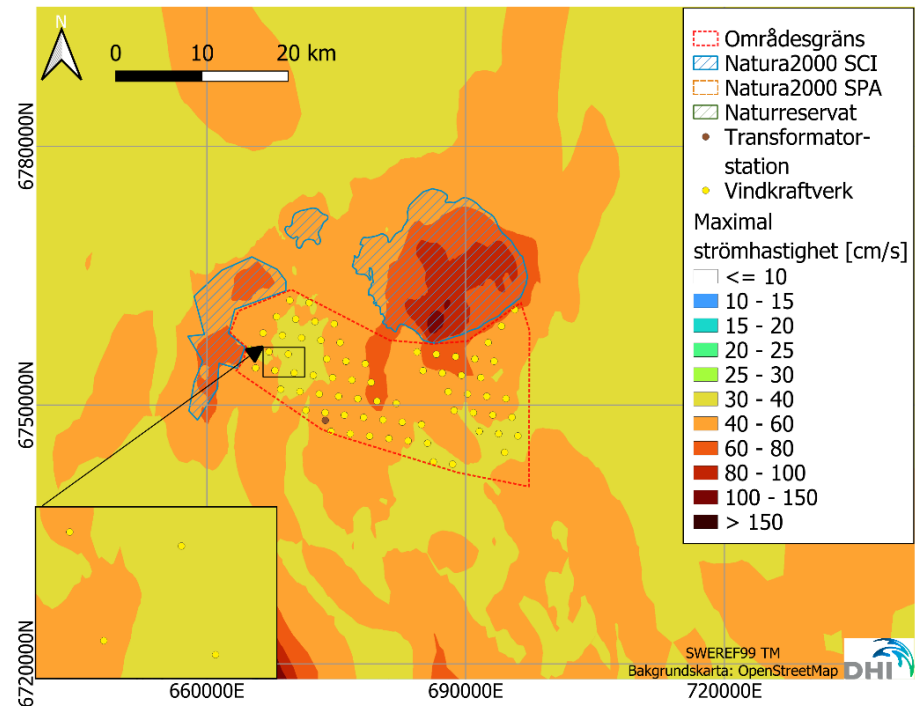
Figur 4.9 Årsmedel av strömhastighet i ytan.



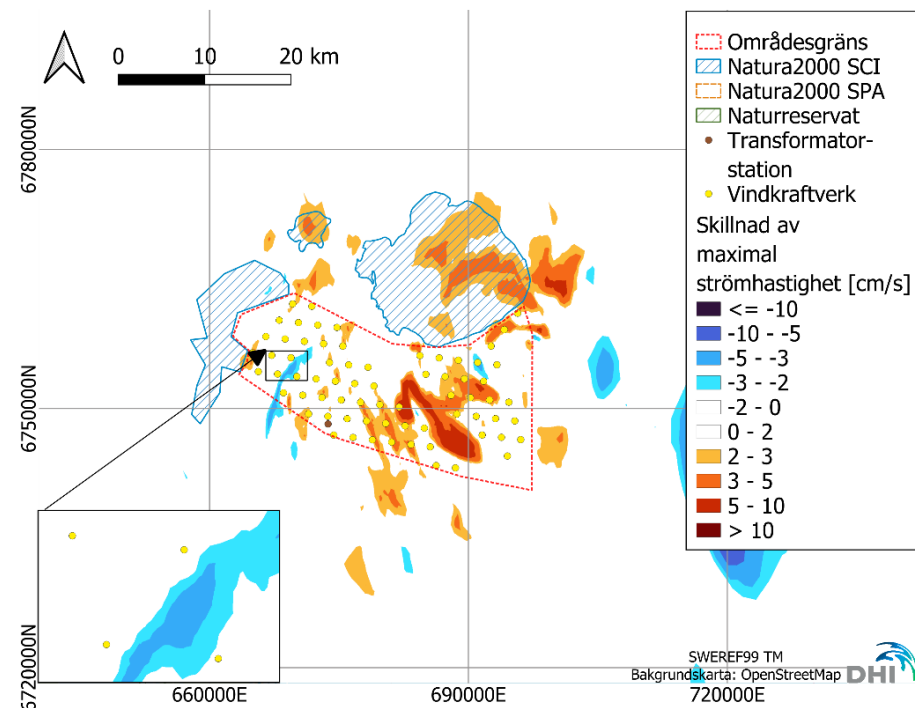
Figur 4.10 Skillnad mellan årsmedel av strömhastighet i ytan för de två scenariona.

Maximal strömshastighet över året i ytan (baseline) visas i Figur 4.11.

Skillnad mellan årsmax av strömshastighet i ytan för de två scenariona (baseline och driftsfas) visas i Figur 4.12.



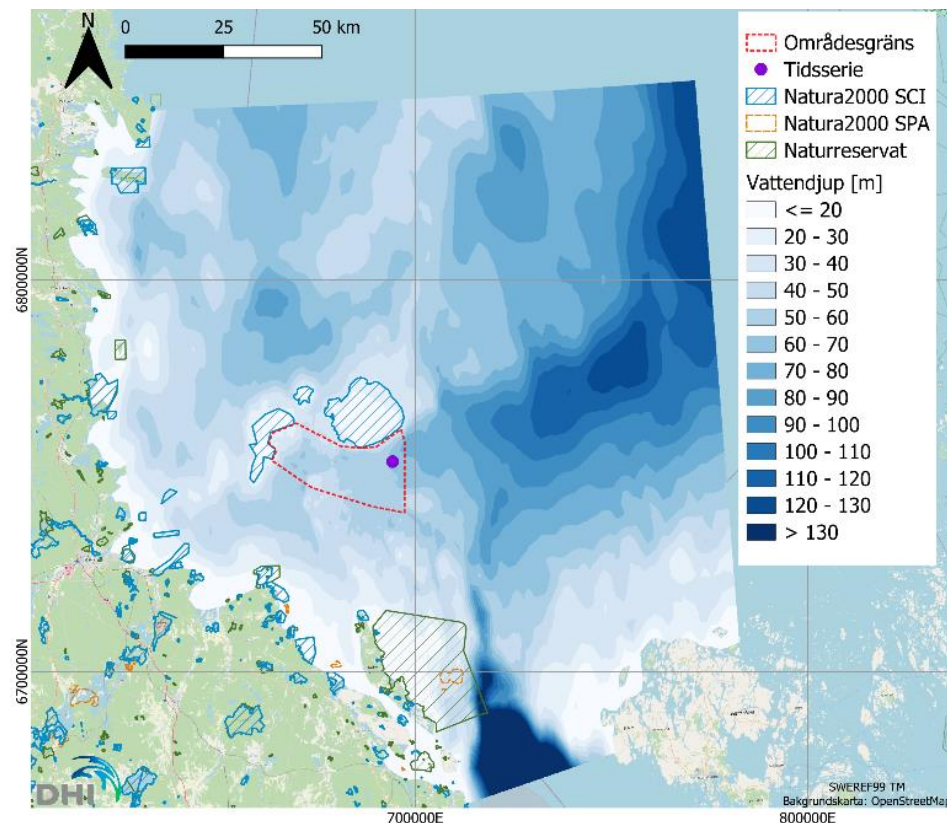
Figur 4.11 Maximal strömshastighet över året i ytan.



Figur 4.12 Skillnad mellan årsmax av strömshastighet i ytan för de två scenariona.

4.4 Påverkan på skiktning och omblandning

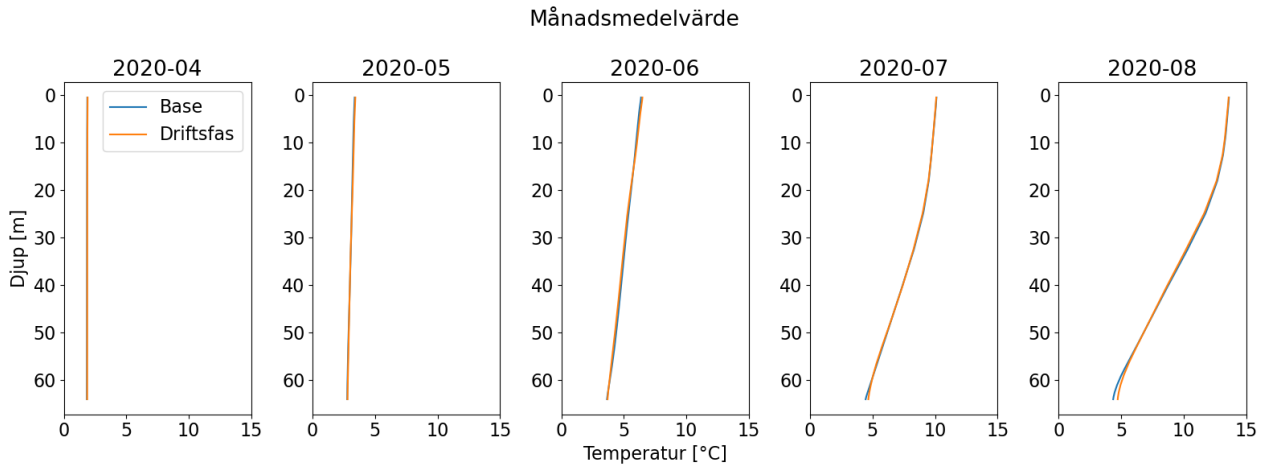
För att visualisera påverkan på skiktning och omblandning har djupprofiler över temperatur och salinitet tagits ut för de två scenarierna. Positionerna för djupprofilerna visas i Figur 4.13.



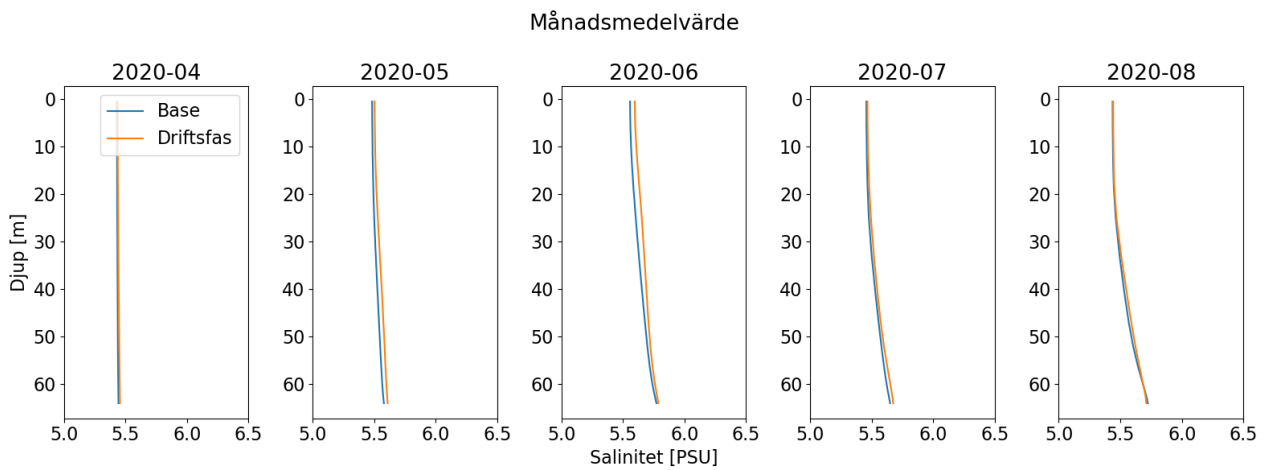
Figur 4.13 Översiktsskarta med positionen för djupprofiler markerad med lila cirkel.

I Figur 4.14 visas djupprofiler över temperatur, som månadsmedel under vår- och sommarmånader (april – augusti). Motsvarande månadsmedel över salinitet visas i Figur 4.15. Sommarmånader valdes eftersom skiktningen generellt är starkare då (högre yttemperatur och mindre omblandning av vindar). Månadsmedel för april och maj har också visualiserats som referens.

Profilerna ligger mycket nära varandra för de två scenarierna (blå och orange i Figur 4.14 och Figur 4.15). I flera av profilerna överlappas blå linje (baseline) nästan helt av orange linje (driftsfas). Avståndet mellan medelvärdena för de två scenarierna är mindre än 0,1 grad respektive 0,1 PSU.



Figur 4.14 Djupprofil av temperatur som månadsmedel under vår- och sommarmånader, för de två scenarierna: baseline (blå) och driftsfas (orange linje).



Figur 4.15 Djupprofil av salinitet som månadsmedel under vår- och sommarmånader, för de två scenarierna: baseline (blå) och driftsfas (orange linje).

4.5 Diskussion och slutsatser

Det korrigerade vindfältet visar lä-effekter med reducerade vindhastigheter då vindkraftparken är i drift. Vindriktningen är den största delen av tiden sydvästlig, vilket innebär att påverkan på medelvindhastighet framförallt sker inom parkområdet samt direkt norr och nordväst om parkområdet. Påverkan är relativt lokal, men medelvindhastigheten reduceras med 10 cm/s upp mot 20 km nord/nordost om vindkraftparken.

Området med reducerat årsmedel av signifikant våghöjd sträcker sig ungefär över ytan där medelvindhastigheten är reducerad. Reduktionen om 1–1,5 cm utgör ca 1–2% av årsmedel signifikant våghöjd, och påverkan sträcker sig över Natura 2000-området Finngrundet Östra banken. Reduktionen om 1 cm (årsmedel signifikant våghöjd) sträcker sig upp emot ca 25 km nord-nordost om vindkraftparken.

Reduktionen på den maximala signifikanta våghöjden sker inte i samma områden som för årsmedlet. Tillfället med de högsta vågorna sammanfaller med en kortare episod med vågor från norr, där vinden har en lång stryklängd. Effekten blir därför en reduktion av denna våghöjd på sydsidan om parkområdet.

Vågorna och strömmarna har simulerats i separata modeller. Interaktion mellan vågor och strömmar beskrivs därför inte av modellerna som tagits fram. Resultaten som beskriver påverkan på våghöjder och strömhastigheter avser därmed heller inte interaktionen mellan vågor och strömmar.

I medeltal påverkas strömhastigheten i ytan framför allt inom vindkraftparken samt i närområdet vid Natura 2000-området Finngrundet Östra banken. Skillnaden mellan årsmedel av strömhastighet i ytan är liten vid jämförelse av driftsfas mot referensförhållandet. Lokalt mitt i Finngrundet Östra banken orsakas dock en reduktion av årsmedlet om 0,5–1 cm/s, vilket motsvarar ungefär 2–5% av medelströmhastigheten i ytan som förekommer där (20–25 cm/s).

Delar av de skillnader i ytströmmens medel- och maxhastighet över året som modellerna visar överlappar gränsen för det korrigerade vindfältet som nästas in i modellen för att representera vindförhållanden under driftsfas. Resultaten nära gränsen för det korrigerade vindfältet (se markering som förtydligar gränsen i Figur 4.1) ska tolkas med försiktighet.

Beräkningarna av den reducerade vindhastigheten under vindkraftparkens driftsfas är en förenklad modell, som beskrivs i avsnitt 3.3.2.

Tillförlitligheten hos modellresultaten är högst i och nära vindkraftparken, där modellens upplösning är som högst. Eftersom modellens upplösning blir grövre med avstånd från vindkraftparken ska resultaten tolkas med försiktighet längre bort.

Det syns ingen varaktig väsentlig påverkan på temperatur- och salinitetsprofilerna som analyserats gällande månadsmedel under vår och sommar vid vindkraftparken.

5 Referenser

- /1/ 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.
- /2/ DHI, “MIKE 21 – Spectral Wave Module – Scientific Documentation”, 2024, https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Coast_and_Sea/M21SW_Scientific_Doc.pdf.
- /3/ 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>
- /4/ Fairall, C.W., E.F. Bradley, J.E. Hare, A.A. Grachev, and J.B. Edson (2003), Bulk parameterization of air sea fluxes: updates and verification for the COARE algorithm, *J. Climate*, 16, 571-590.
- /5/ 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>.

