

Rapport

Författare
Gyllenram, Walter
Ingham, Fiona
Telefon
+4610051935
Mobil
+46720837803
E-post
walter.gyllenram@afry.com
Granskare
Christin Eriksson

Datum
2023-12-08

Kund
Najaderna Offshore AB

Bedömning av Najaderna vindkraftparks påverkan på
omblandning, strömmar, vågor och sedimentspridning

Innehållsförteckning

1	Bakgrund	4
2	Dimensioner	5
3	Vindförhållanden	6
4	Oceanografiska förhållanden	8
5	Analys av data	8
5.1	Salinitet, temperatur och syrgashalt	8
5.2	Strömmar	11
5.3	Vågor	14
5.4	Isförhållanden.....	15
6	Påverkan på omblandning	15
6.1	Fundamentens påverkan på omblandning.....	15
6.2	Vindvakens påverkan på omblandning	17
6.3	Bedömning av Najaderna vindkraftparks påverkan på omblandning	18
7	Påverkan på strömmar.....	20
7.1	Fundamentens påverkan på strömmar	20
7.2	Vindvakens påverkan på strömmar.....	21
7.3	Bedömning av Najaderna vindkraftparks påverkan på strömmar	21
8	Påverkan på vågor.....	23
8.1	Bedömning av Najaderna vindkraftparks påverkan på vågor	24
9	Sedimentspridning i anläggningsfas	25
9.1	Sedimentegenskaper	26
9.2	Borrning för monopilefundament.....	27
9.2.1	Sedimentspridning vid borrning för monopilefundament.....	27
9.2.2	Pålagring vid borrning för monopilefundament.....	32
9.3	Kabelläggning	34
9.3.1	Sedimentspridning vid kabelläggning	34
9.3.2	Pålagring vid kabelläggning	37
9.4	Diskussion kring resultaten av sedimentspridning.....	37
	Referenser.....	38

Sammanfattning

Denna rapport redovisar bedömningar av hur Najaderna vindkraftpark påverkar omblandning, skiktning, vågor och strömmar samt beräkningar av sedimentspridning från borrhning för monopilefundament och nedspolning av kabel. Lokala mätdata extraherade ur SMHI:s databas SHARKweb och mätstation vid Finngrundet samt lokala modelldata hämtade från E.U. Copernicus Marine Service Information; <https://doi.org/10.48670/moi-00010> har använts som dataunderlag. Bedömningarna baseras på forskningsartiklar, överslagsberäkningar och en analys av ovan nämnda data. Sedimentspridningen i termer av koncentration av suspenderade sediment i vattenmassan och pålagring på botten är beräknad genom att kombinera resultat framtagna med spridningsmodellen CORMIX med en sedimentationsmodell internt utvecklad inom AFRY.

Najaderna bedöms kunna ha en liten lokal påverkan på omblandningen och skiktningen av vattenmassan. Viss ökad och minskad omblandning kan förväntas ske samtidigt, men på olika platser. Eftersom vattenmassan på dessa platser hela tiden byts ut, bedöms dock påverkan på regional skala bli liten.

Vindkraftparken bedöms påverka strömmarna lokalt och regionalt med maximalt 2 till 10 % inom begränsade och tidsmässigt varierande områden. Den största momentana påverkan bedöms ske i ytvattnet flera kilometer i lä om vindkraftparken. Inom vindkraftparken kan strömmarna komma att reduceras något, samtidigt som lokalt förhöjda strömhastigheter kan förväntas i nära anslutning till fundamenten. Förändringarna bedöms inte ha någon betydande påverkan på vattenmiljön. Den storskaliga cirkulationen i Bottenhavet bedöms ej kunna påverkas i någon mätbar utsträckning.

Reduktionen av våghöjd bedöms uppgå till omkring 5 % i ett begränsat område i lä om vindkraftparken. Det geografiska området som påverkas mest och oftast ligger på öppet vatten nordost om vindkraftparken. Närliggande kuster bedöms påverkas i betydligt mindre grad.

Utsläpp som sker i vatten av borrhkax vid borrhning för en monopile bildar en tung plym som kommer att sjunka mot botten för vidare spridning. Plymen som uppstår till följd av utsläppet kan bli uppemot 5 meter tjock. För en organism som passivt flyter med vattenmassan nära botten beräknas tiden för upplevd grumling aldrig kunna överstiga 70 timmar.

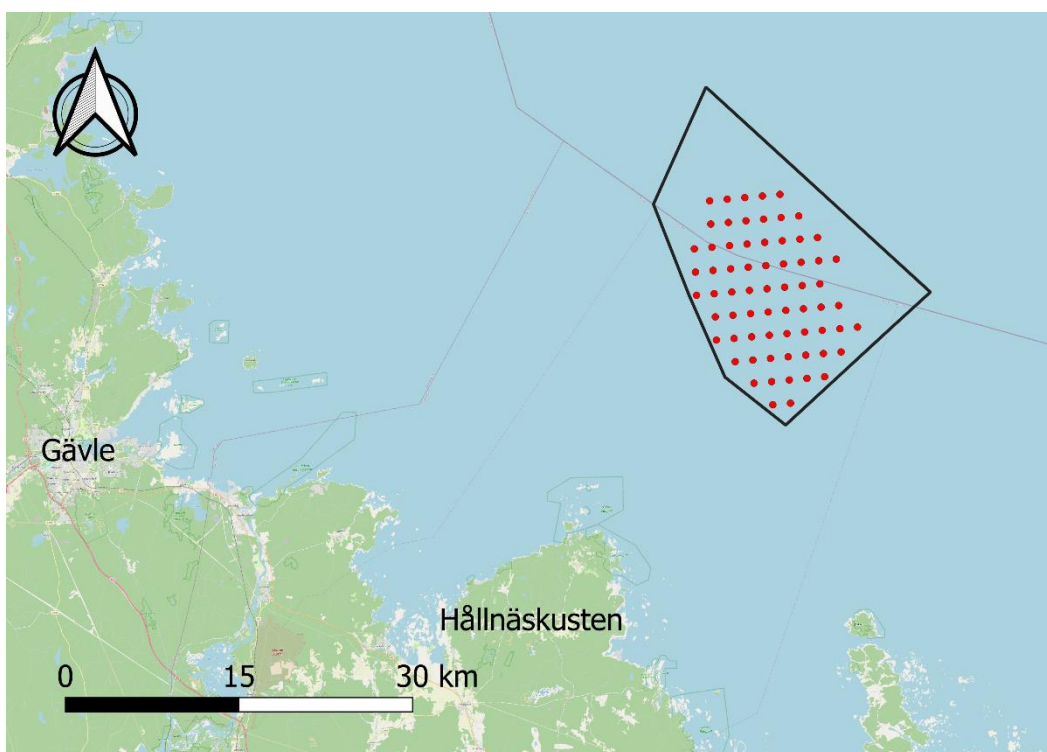
Det maximala spridningsavståndet av suspenderat sediment, till följd av borrhning för monopilefundament, beräknas till 12,5 km vid genomsnittliga strömhastigheter i recipienten. Koncentrationer på över 100 mg/l kan då förväntas på 2,5–4 km från arbetspositionen. En stationär organism nära botten som inte rör sig med vattenmassan bedöms kunna utsättas för sedimentkoncentrationer över 100 mg/l under maximalt 6 dygn i sträck. Dessa siffror baseras på beräkningar som utgår ifrån de mest finkorniga sediment som noterats i området och är således konservativa med avseende på koncentrationer, spridningslängd och varaktighet.

Pålagringen beräknas kunna bli över 1 dm över en yta av ca 3 till 4 ha vid 25 meters borrhning för en monopile vid normala strömhastigheter i recipienten. En yta på omkring 1,5 ha kan få en pålagring på över 3 dm, medan en yta på 25 ha kan få en pålagring på över 1 cm. Om det skulle borrh 25 meter djupt vid samtliga 67 planerade fundament, skulle den genomsnittliga pålagringen bli mindre än en halv cm om allt material skulle landa på botten inom projektområdet (35 000 ha).

1 Bakgrund

Najaderna Offshore AB (fortsättningsvis Najaderna Offshore), ett dotterbolag till Eolus Vind AB, avser att ansöka om tillstånd enligt bland annat miljöbalken och lagen (1992:1140) om Sveriges ekonomiska zon för etablering och drift av en havsbaserad vindkraftpark, Najaderna vindkraftpark (fortsättningsvis Najaderna). Den planerade vindkraftparken är belägen i Bottenhavet, delvis inom svenskt territorialvatten i Tierps kommun i Uppsala län samt delvis i svensk ekonomisk zon (SEZ). Projektområdet för vindkraftparken ligger som närmast ca 14 km nordöst om Björns Skärgård inom Tierps kommun och ca 45 km öster om Gävle och omfattar en yta av ca 350 km². Najaderna kommer maximalt att omfatta 67 vindkraftverk, med en totalhöjd på maximalt 365 meter.

På uppdrag av Najaderna Offshore har AFRY sammanställt en rapport vars syfte är att bedöma Najadernas påverkan på omblandning, strömmar och vågor i driftsfas, samt beräkningar av sedimenttransport under anläggningsfasen.



Figur 1-1: Lokalisering av Najaderna vindkraftpark. Röda punkter är enskilda vindkraftverk för en exempellayout. Närmaste kust är Hållnäs-kusten i sydväst. Bakgrundskarta © OpenStreetMaps bidragsgivare (openstreetmap.org).

Fundamenten planeras vara antingen av typen monopile eller av så kallade gravitationsfundament.

Avstånden mellan intilliggande vindkraftverk i exempellayouten är som minst ca 1500 meter. Djupet i projektområdet är 30–60 meter. Medeldjupet bedöms ligga mellan 40–50 meter.

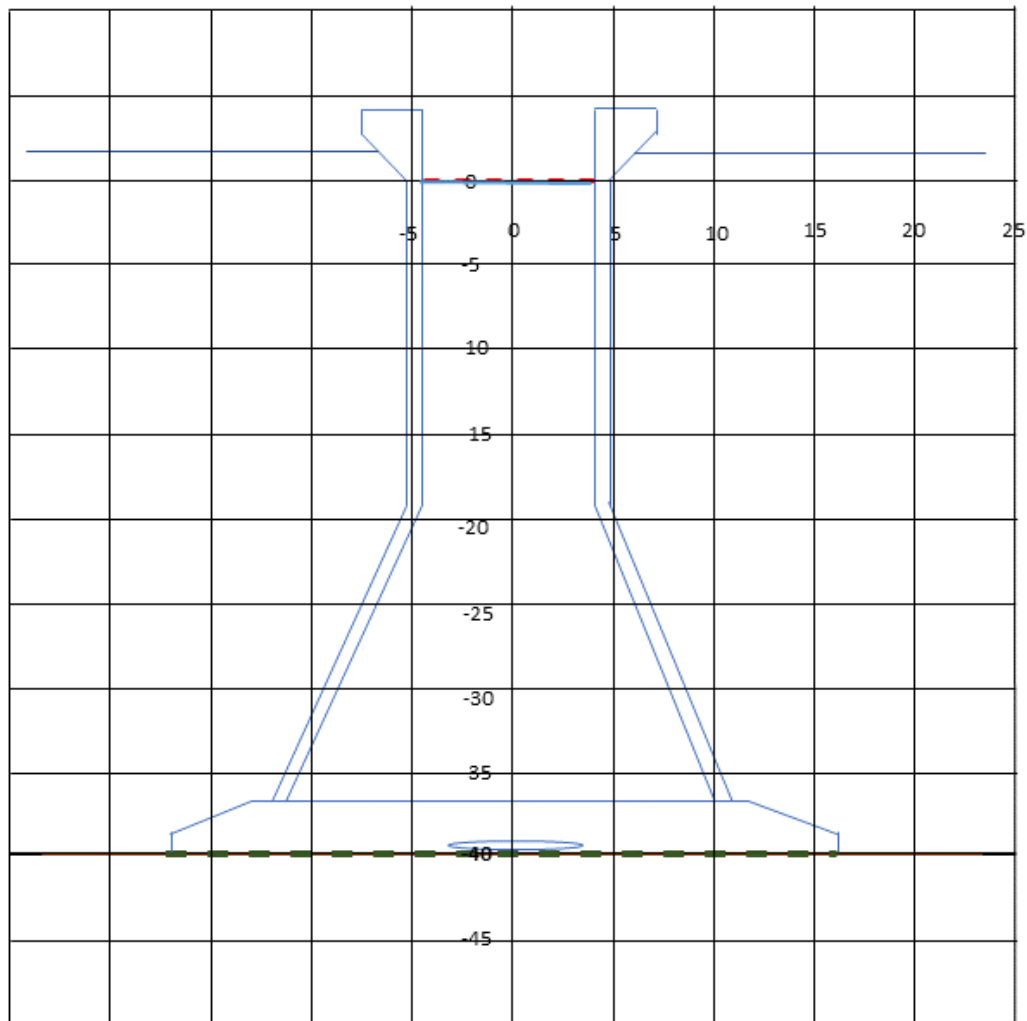
Inom ramen för genomfört avgränsningssamråd har yttranden inkommit. Relevanta yttranden för just denna utredning har inkommit från Havs- och vattenmyndigheten (HaV), Naturskyddsföreningen Tierp, Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI), Länsstyrelsen i Uppsala Län samt privatpersoner. Sammantaget efterfrågas a) spridningsmodelleringar som redovisar hur sediment sprids i anläggningsfasen, var de

sedimenterar och hur grumligt det kan bli, 2) en redogörelse för hur vindkraftparken under driftsfasen påverkar omblandning, strömmar, vågor, is, uppvällningsmönster och sedimentation, samt om något av ovan nämnda faktorer påverkar syresättningen av vattnet.

2 Dimensioner

Arean av det område som omfattar samtliga vindkraftverk i exempellayouten är ca 200 km², dvs mindre än projektområdet. Den mindre arean kommer att användas exempelvis för att relatera Najadernas påverkan på strömmar till den naturliga påverkan som sker på grund av vattnets friktion mot havsbotten och vindens friktion mot vattenytan. Genom att använda en mindre area än hela projektområdet fås mer konservativa mått på påverkan, relativt sett. Den area som används för den slutliga layouten kan med andra ord vara större än exempellayouten utan att den bedömda påverkan blir större. Vidare antas genomgående ett medeldjup på 40 eller 50 meter i beräkningarna, beroende på vilket djup som i sammanhanget ger mest konservativa resultat. Djupet motsvarar därmed också fundamentens våta höjd över botten.

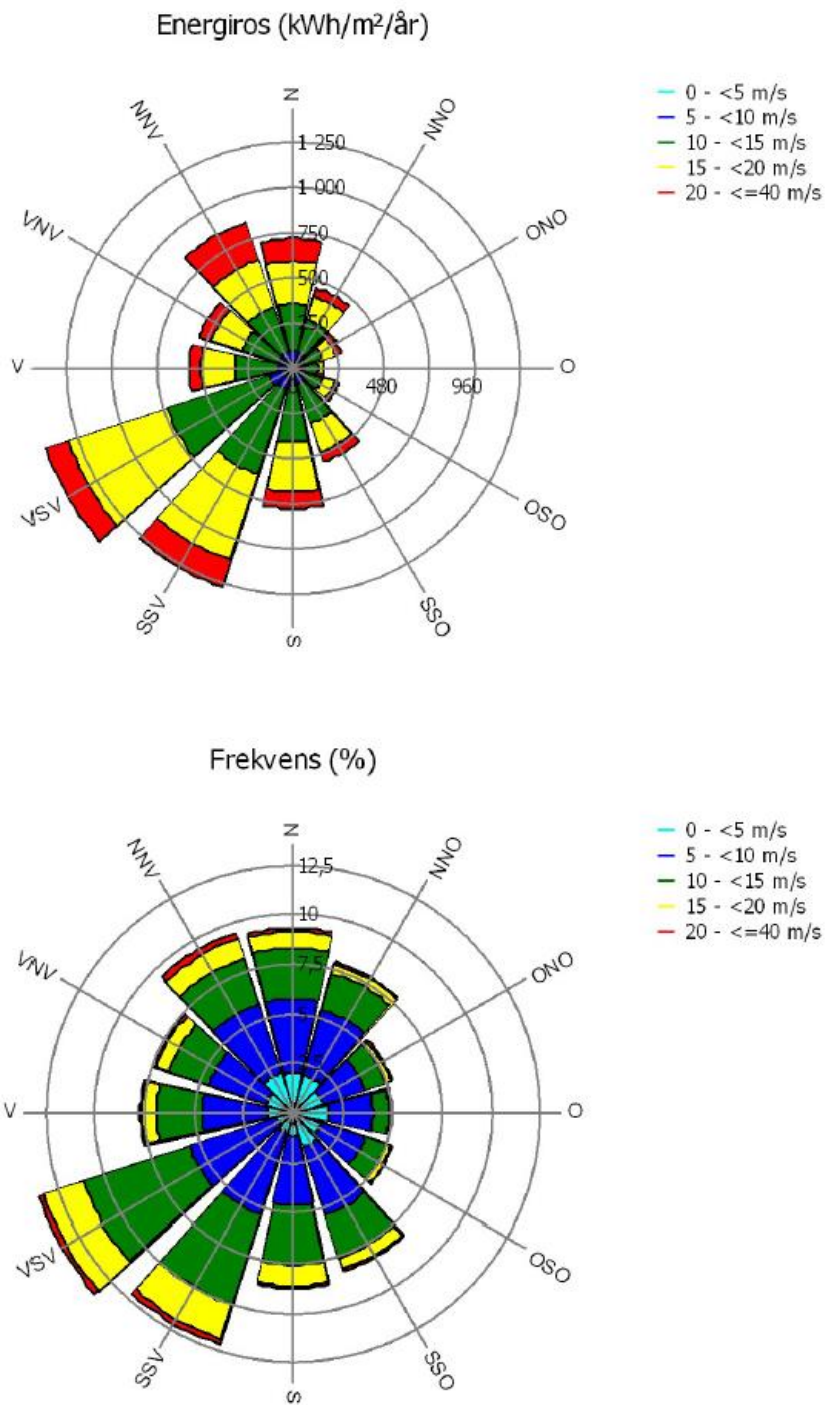
Enligt uppgift från Najaderna Offshore kommer de monopilefundament som är aktuella att ha en diameter på upp till 15 meter under vattnet. Diametern av de gravitationsfundament som är aktuella varierar med höjden över botten. I beräkningarna antas diametern variera linjärt från 30 meter vid botten till 10 meter vid 1/3 av vattendjupet. Ovanför detta antas diametern vara konstant 10 meter. Vid vattenytan kommer båda fundamenttyperna ha en så kallad iskon i syfte att mildra islaster. Konen är ungefär 5 meter hög och ökar diametern vid vattenytan med maximalt 5 meter vid höga vattenstånd. Figur 2-1 visar ett exempel på gravitationsfundament.



Figur 2-1: Exempel på gravitationsfundament. Bilden är skapad och tillhandahållen av Najaderna Offshore.

3 Vindförhållanden

Figur 3-1 beskriver energiinnehållet i vinden och vindhastigheten i tolv riktningar. Värdena gäller på 150 meters höjd, vilket ligger nära de aktuella vindkraftverkens navhöjd. Mest energi kommer från den sydvästliga sektorn, och minst energi i den östliga. Sydvästliga vindar dominerar, både sett till vindstyrka och frekvens, följt av nordliga vindar.



Figur 3-1: Energiros och vindros för Najadernas vindkraftpark på 150 meters höjd framtagna av EMD International A/S och tillhandahållna av Najaderna Offshore. Underlag till figurerna är data från EMP GASP för åren 2008–2017.

4 Oceanografiska förhållanden

Projektområdet ligger i sydvästra Bottenhavet som är en del av Bottniska viken. Bottniska viken omfattar, från norr till söder, Bottenviken, Kvarken, Bottenhavet, Ålands hav och Skärgårdshavet. De största djupen är på över 200 meter och finns i nordvästra delen av Bottenhavet och i Ålands hav. Vattnet är bräckt och salthalten i den södra delen av Bottenhavet ligger på omkring 5–6 psu.

På grund av jordens rotation cirkulerar ytvattnet i Bottenhavet motsols (Corioliseffekten), sett över hela året, även om vindarna tillfälligtvis driver strömmarna i andra riktningar beroende på vindriktningen (Fonselius, 1995). Via Skärgårdshavet fås ett tillskott av saltare vatten. Det huvudsakliga utflödet ur Bottniska viken sker via Ålands hav. Sammantaget innebär detta att ytströmmarna genom Najaderna i huvudsak är sydostgående med tanke på den närmaste kustlinjens sträckning.

Djupvattnet är mer stillastående. Inflöden av djupvatten sker enligt Fonselius (Fonselius, 1995) främst på vintern när egentliga Östersjöns ytvatten kyles ned, sjunker och strömmar in över tröskeln till Ålands hav.

5 Analys av data

I detta avsnitt analyseras lokala salthalter, temperaturer, syrgaskoncentrationer, strömmar och vågor.

5.1 Salinitet, temperatur och syrgashalt

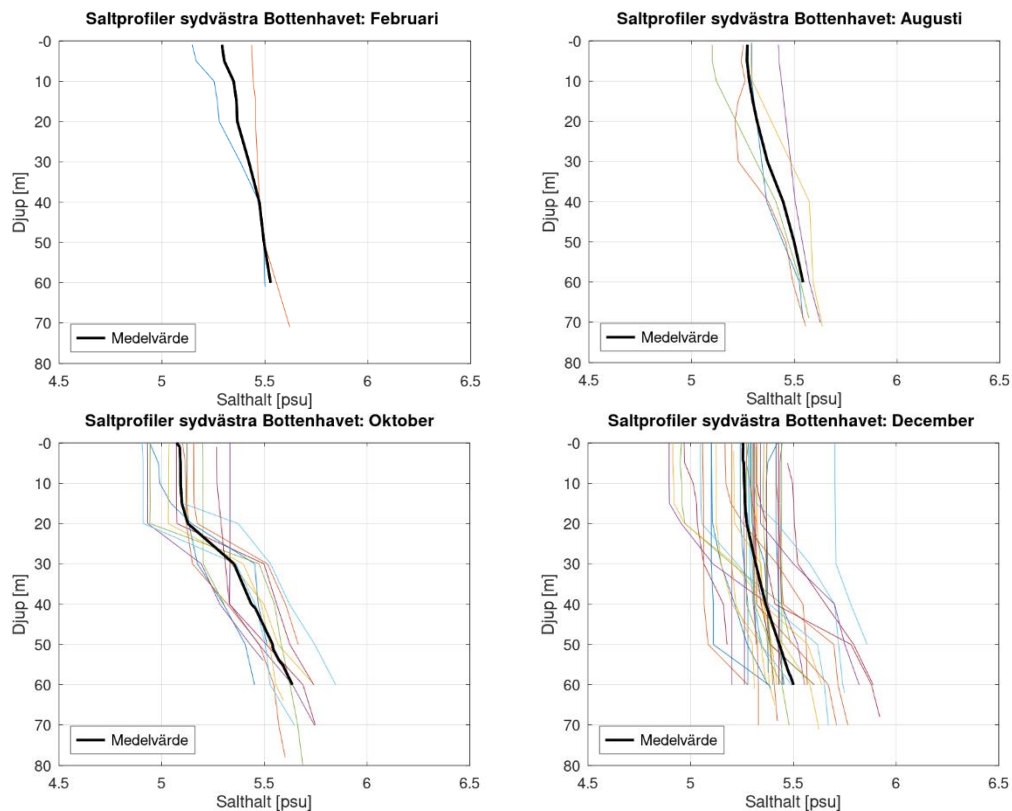
Mätvärden av bland annat salinitet, temperatur och syrgashalt har inhämtats från Svenskt HavsARKivs webbplats SHARKweb (Tillhandahålllet av Havs- och vattenmyndigheten och SMHI) från ett antal positioner inom ett rektangulärt område som omfattar projektområdet med god marginal, från Ost 17.46° till 18.88° och Nord 60.72° till 61.26°. Endast data märkta med "Nationell Miljöövervakning" har använts. Dessa mätningar är enligt metadata beställda av Fiskeriverket, Naturvårdsverket, Havs- och vattenmyndigheten och/eller SMHI.

Figur 5-1 och Figur 5-2 visar uppmätta profiler av salinitet och vattentemperatur för ett urval av olika månader under åren 2006 till 2022. Saliniteten ligger i regel mellan 5 och 6 psu över hela året. Salthalten i ytan är endast ca 0,5 psu lägre än vid botten, vilket ses i de i princip linjärt avtagande salinitetsprofilerna för alla månader utom oktober. I profilen för oktober syns en nära konstant salinitet mellan ytan och 20 meters djup vilket indikerar en ökad omblandning av ytskiktet. Denna omblandning är vanligt förekommande under höst och vinter när ytvattentemperaturen sjunker och vindstyrkorna är högre än på sommaren. I augusti finns ett tydligt temperatursprångskikt på 10–40 meters djup som bryts upp under hösten. Mätningar inom projektområdet i juni och augusti 2023 (Niras, 2023) visade på temperatursprångskikt på djup från vattenytan och ner till omkring 40 respektive 25 meter. Temperaturen i den underliggande vattenmassan (under temperatursprångskiktet i bottenlagret) var i mätningarna aldrig högre än 5°C. I oktober var vattnet oftast välomblandat ner till minst 20 meters djup och i december oftast något djupare. Mätningar inom projektområdet i november 2022 (Niras, 2023) visade en välomblandad vattenmassa ner till 30–40 meters djup.

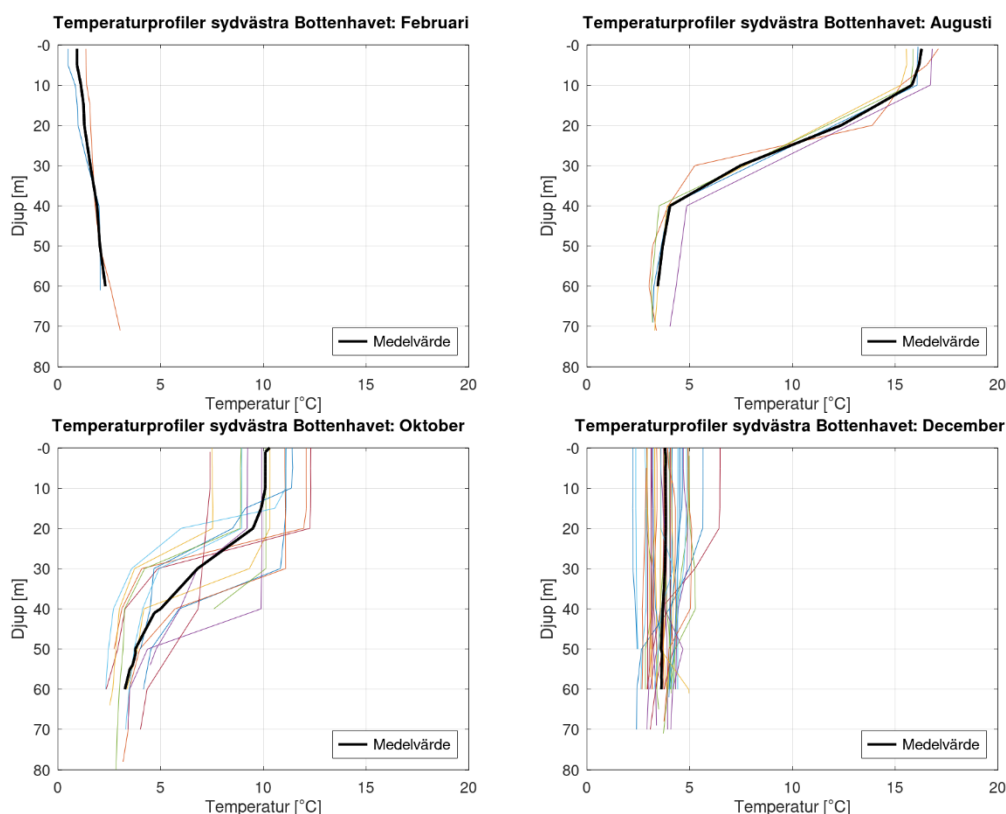
Mätningar hämtade från SHARKweb är stickprov tagna med olika frekvens under olika år och data saknas för flera månader. I syfte att komplettera bilden av vattentemperaturer har även öppna data från SMHI använts. Närmaste relevanta och aktiva utsjöstation med längre tidsserier av ytvattentemperatur är Finngrundet WR

(WaveRider) boj vars position är cirka 20 km nordost om projektområdet. Ytvattentemperaturen är registrerad varje timme, mer eller mindre kontinuerligt sedan 2006.

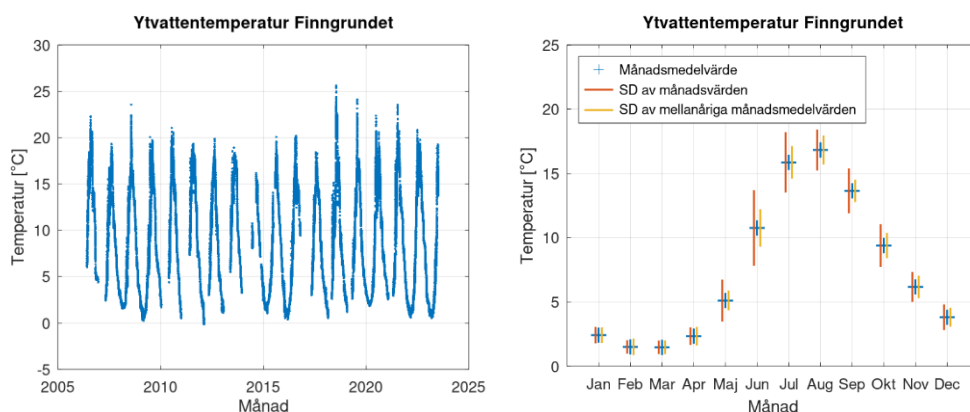
Figur 5-3 visar tidsserier (år 2006–2022) av ytvattentemperatur hämtad från SMHI:s boj Finngrundet WR. Ytvattentemperaturen varierar mycket över året, från 1–2 °C i februari och mars till i medeltal ca 17 °C i augusti. Data överensstämmer över lag väl med de ytvattentemperaturer som visas i Figur 5-2 och de som uppmätts av Niras (Niras, 2023). I och med att temperaturvariationerna i bottenvattnet visar en mindre variation bedöms även dessa vara väl beskrivna av data i SHARKweb. Variation i ytvattentemperatur är störst under försommaren. Standardavvikelsen av ytvattentemperatur under junimånader är ca 3 °C och standardavvikelsen av de olika årens junimånadsmedelvärden är ca 1,5 °C.



Figur 5-1: Saltprofiler hämtade från ett område som innefattar projektområdet (data hämtade från SHARKweb).

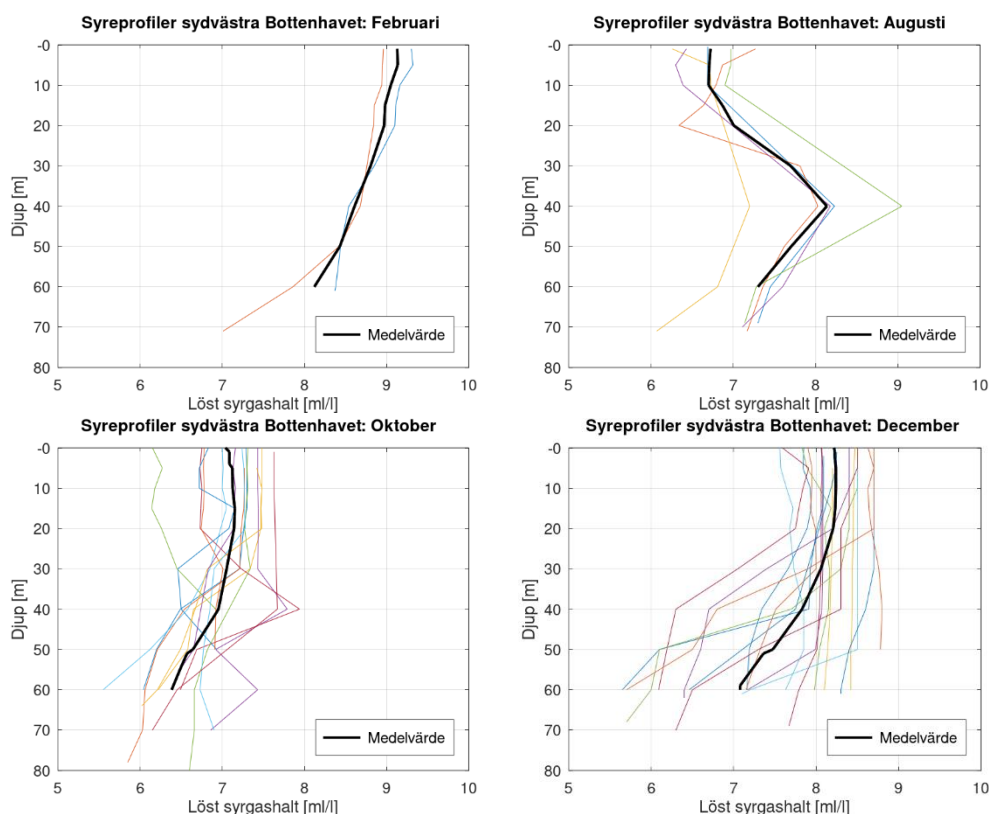


Figur 5-2: Temperaturprofiler hämtade från ett område som innefattar projektområdet (data hämtade från SHARKweb).



Figur 5-3: Till vänster: Tidsserie av ytvattentemperatur vid SMHI:s mätstation Finngrundet. Till höger: Månadsmedelvärden, standardavvikelse av månadsvärden samt standardavvikelse av mellanåriga månadsmedelvärden.

Figur 5-4 visar profiler av halten löst syrgas och är hämtade från SHARKweb. Halten av löst syrgas ligger inom 6–9 ml/l. Förutom i augusti varierade syrgashalten oftast svagt med djupet. Högst syrgashalt fanns i ytvattnet under vintern, vilket är direkt kopplat till vattentemperaturen eftersom vattentemperaturen bestämmer mättnadsgraden och ytvattnet var kallast under vintermånaderna. I augusti var syrgashalten som högst på ca 40 meters djup, vilket även har bekräftats av lokala mätningar inom projektområdet i augusti 2023 (Niras, 2023). Även detta bedöms vara kopplat till mättnadsgradens beroende av vattentemperaturen. Närmare botten var syrgashalten oftast lägre och

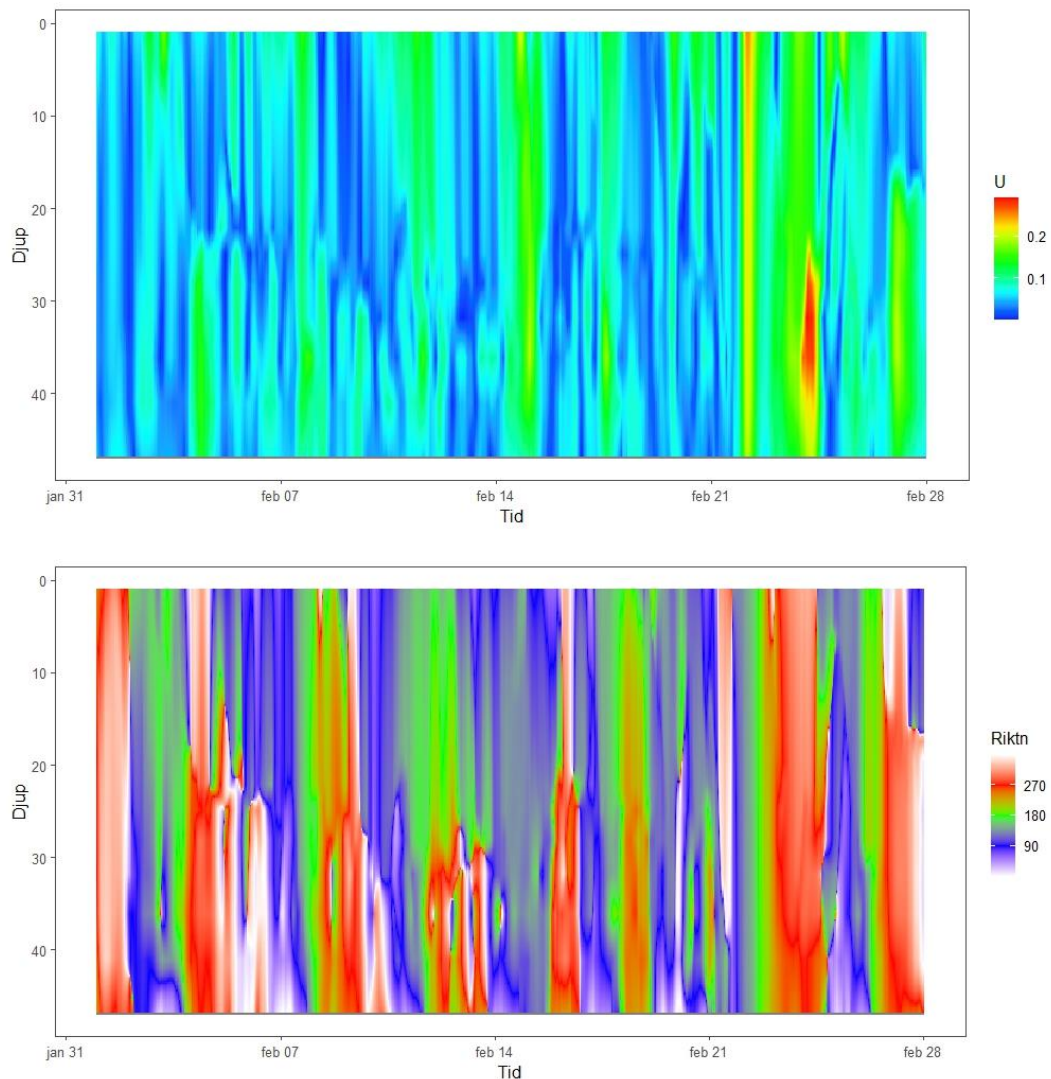


Figur 5-4: Syreprofiler hämtade från ett område som innefattar projektområdet (data hämtade från SHARKweb)

som lägst i augusti och oktober. Detta är normalt eftersom dött organiskt material sjunker mot botten där de förbrukar syre under nedbrytningsprocessen. Sammanfattningsvis indikerar uppmätta syrgashalter från SHARKweb att det inte råder syrebrist på något djup i området.

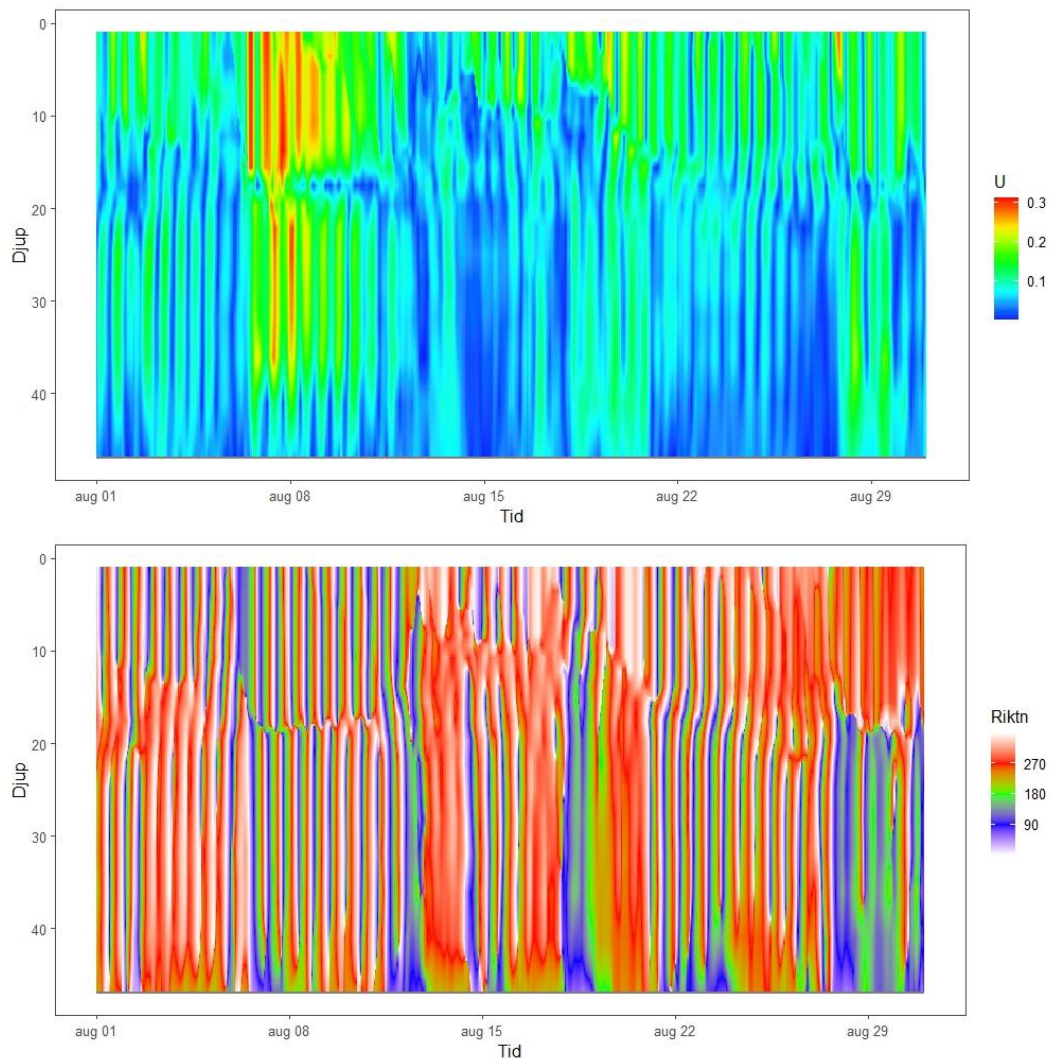
5.2 Strömmar

Ett exempel på hur strömmarna i en punkt (60.77°N, 18.26°O) ungefär mitt i projektområdet kan variera i februari och augusti år 2022 visas i Figur 5-5 respektive Figur 5-6. Dessa månader har valts för att representera ett vinter- respektive sommarfall. Bilderna är genererade utifrån E.U. Copernicus Marine Service Information; <https://doi.org/10.48670/moi-00010> som i sin tur är producerad av SMHI:s modelluppsättning av den oceanografiska modellen NEMOv4.0 över Östersjön. Den beräknade medelströmhastigheten nära botten var ca 7 cm/s i februari och 5 cm/s i augusti. Det är inte ovanligt att strömhastighet och strömriktning uppvisar stora gradienter i djupled vid vissa djup. I februarimånaden var gradienterna störst på djup mellan 20 och 30 meter medan gradienterna i augustimånaden oftast var störst på djup omkring 20 meter. Under sistnämnda månad ändrade strömmen dessutom ofta riktning cirka två gånger per dag och det var vanligt att strömriktningen i övre och undre lager är motriktade varandra. Variationerna intill botten var dock mindre. De dominerande strömriktningarna i ytskiktet under februarimånaden låg inom sektorn ost till syd. Is på vattenytan förekom under denna månad endast sporadiskt i modellen.



Figur 5-5: Strömhastighet (överst) och strömriktning (underst) som funktion av djup och tid under februari 2022 vid en punkt inom projektområdet. Bilderna är skapade utifrån E.U. Copernicus Marine Service Information (<https://doi.org/10.48670/moi-00010>)¹. Strömriktningen är definierad som den riktning strömmarna färdas mot. Under februari månad är det ovanligt att strömriktningarna i övre och undre lager är motriktade varandra.

¹ Generated using E.U. Copernicus Marine Service Information; <https://doi.org/10.48670/moi-00010>.

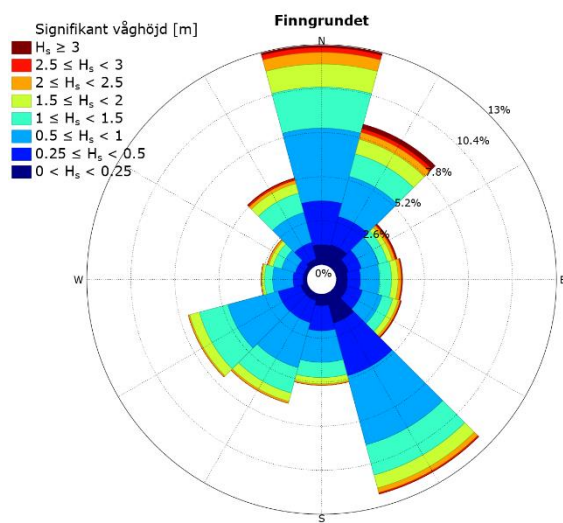


Figur 5-6: Strömhastighet (överst) och strömriktning (underst) under augusti 2022 som funktion av djup och tid vid en punkt inom projektområdet. Bilderna är skapade utifrån E.U. Copernicus Marine Service Information (<https://doi.org/10.48670/moi-00010>). Strömriktningen är definierad som den riktning strömmarna färdas mot. Under augusti månad är det vanligt att strömriktningarna i övre och undre lager är motriktade varandra.

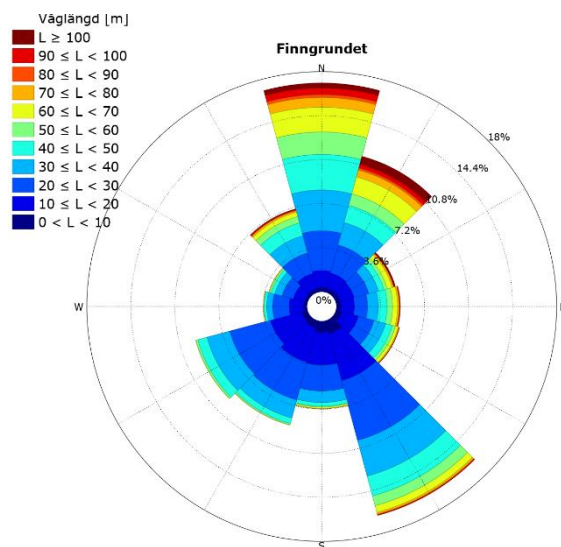
5.3 Vågor

Våghöjder, vågperioder och vågriktningar uppmätta vid SMHI:s boj Finngrundet WR har hämtats från SMHI:s öppna data. Bojen ligger där det är ca 60 meter djupt, positionerad sydost om Finngrundet och cirka 20 km nordost om projektområdet. Figur 5-7 visar fördelningen av signifikant våghöjd och Figur 5-8 visar beräknad våglängd baserad på uppmätt peak vågperiod (högsta registrerade vågen under en halvtimme) i tolv olika riktningar. Signifikant våghöjd definieras som medelvärdet av den högsta tredjedelen av alla våghöjder inom ett område eller tidsfönster. Vågriktningarna som registrerats är kopplade till peak vågperiod och motsvarar därmed riktningen av de allra längsta vågorna. Vågriktningen beskriver här den riktning varifrån vågorna kommer, dvs analogt med vindriktningen. De vågriktningar som registrerats oftast är nordliga och sydsydostliga, vilket sammanfaller med de riktningar åt vilka den så kallade stryklängden (avståndet till närmaste land) är som längst. De ovanligaste vågriktningarna är ostliga och väst- till nordvästliga vindar vilket kan förklaras av att dessa vindriktningar är relativt ovanliga (Figur 3-1).

Enligt uppmätta data är det ovanligt med signifikanta våghöjder högre än 3 meter och likaså med (peak) våglängder längre än 100 meter i detta område. Enligt linjär vågteori är vågor opåverkade av vattendjupet om djupet är större än en halv våglängd. Följaktligen bedöms stora delar av bottenarna inom projektområdet kunna vara påverkade av vågor eftersom medeldjupet endast är 40–50 meter.



Figur 5-7: Uppmätt signifikant våghöjd Finngrundet WR boj (SMHI). Riktningen beskriver varifrån vågorna kommer.



Figur 5-8: Uppmätt medelvärde av peak våglängd vid Finngrundet WR boj (SMHI). Riktningen beskriver varifrån vågorna kommer.

5.4 Isförhållanden

SMHI:s kartering av maximal isutbredning i Östersjön för åren 2013-2023 har använts som en indikation på maximal isutbredning i sydvästra bottenhavet. Enligt dessa kartor kan utbredning av nyis eller tät drivis vissa år sträcka sig från svenska kusten ut till Najaderna. De flesta år tycks dock vattnet i projektområdet vara öppet även när isutbredningen i Östersjön är som störst.

Endast tre av vintrarna mellan åren 2013-2023 har klassificerats som normala isvintrar (2013, 2018 och 2021). Resterande isvintrar har klassificerats som lindriga. De pågående klimatförändringarna talar för att normala och stränga isvintrar kommer bli ännu mer ovanliga i framtiden.

6 Påverkan på omblandning

Vindkraftparker till havs påverkar omblandningen i vattenmassan där de är placerade. Påverkan sker dels på grund av fundamenten som står i vattnet, dels på grund av att vindhastigheten reduceras i lä om vindkraftparken vilket leder till mindre vindskjuvning mot vattenytan. Båda dessa faktorer påverkar även hur vågorna utvecklas. Vinddriven omblandning i vattenmassan sker dock primärt genom skjuvning (Christiansen, Daewel, Djath, & Schrum, 2022) och inte genom vågrörelser.

6.1 Fundamentens påverkan på omblandning

När det strömmar omkring ett fundament till ett vindkraftverk bildas virvlar och turbulens som lokalt ökar omblandningen, både horisontellt och vertikalt, samtidigt som strömhastigheten nedströms fundamentet reduceras i medeltal. Det är främst den vertikala omblandningen som kan tänkas påverka vattenmiljön. Ökningen av den vertikala omblandningen undertrycks av vertikala skillnader i vattnets densitet som i sin tur är en följd av variationen i temperatur och salthalt. Under sommaren, då det

finns ett temperatursprångskikt, kommer effekten av omblandning därmed att bli mindre än annars. Närmare ytan bedöms effekten av fundamenten dessutom bli relativt sett mindre eftersom temperatursprångskiktet även påverkas av vågor och vind.

I en artikel av Carpenter och andra (Carpenter, o.a., 2016) görs bland annat uppskattningar kring hur/om ökad omblandning inom vindkraftparker kan förhindra uppbyggnaden av temperaturskiktningen under våren. Artikeln grundar sig på observationer i Nordsjön. Resultaten är känsliga för flera parametrar vars värden är osäkra. Slutsatsen som presenteras är dock att nuvarande exploatering (ett fåtal vindkraftparker med utsträckning <10 km) kan förväntas ha en liten påverkan på den storskaliga uppbyggnaden av temperaturskiktning. Om vindkraftparkernas utsträckning däremot når 100 km eller mer så kan märkbar påverkan på uppbyggnaden förväntas, dvs att temperaturskiktningen byggs upp senare än normalt på året och försvinner något tidigare. Denna studie inkluderar dock inte effekten av vindvaken som kan ha motsatt effekt och som diskuteras i följande avsnitt.

Schultze och andra (Schultze, Merckelbach, Horstmann, Raasch, & Carpenter, 2020) presenterar mätningar av temperaturvariationer nedströms monopilefundament i södra Nordsjön vid två olika skiktningar: $\Delta T = 0,5$ °C och $\Delta T = 2$ till 3 °C, där ΔT är temperaturskillnaden mellan yt- och bottenvatten. Endast temperaturskiktningen är relevant enligt artikeln, eftersom saliniteten i detta område i princip är konstant över hela vattenkolumnen. Vattendjupen vid de fundament som undersöktes var ca 24 meter respektive 27 till 30 meter, och strömhastigheten låg omkring 30 cm/s. Monopilefundamenten hade en diameter på 6 meter. Effekten av en monopile kunde i mätningarna noteras vid den svagare skiktningen ($\Delta T = 0,5$ °C). Den så kallade vaken (området nedströms fundamentet med förhöjd turbulens och reducerad strömhastighet) var upp till 70 meter bred och sträckte sig upp till 450 meter nedströms fundamentet.

I artikeln presenteras även högupplösta numeriska simuleringar av idealiserade fall, där omblandningen som skapas av vind och vågor exkluderats. Det tänkta avståndet mellan monopilefundamenten var i simuleringarna 1 024 meter och vattendjupet var 32 meter. Slutsatserna av dessa simuleringar var att ett enskilt monopilefundament bidrar med mellan 7 och 10 % ytterligare omblandning i vaken bakom fundamentet jämfört med den naturliga blandning som uppstår på grund av friktion mot botten. En annan slutsats i artikeln var att en stor vindkraftpark kan minska skiktningens potentiella energi med ca 13 till 18 % och i viss mån fördröja eller till och med förhindra uppbyggnaden av skiktningen om vindkraftparken är mycket stor (längdskalor omkring 100 km).

Ovanstående beräknade siffror kan justeras för att uppskatta effekten av Najaderna, där varje fundament kan vara upp till 15 meter i diameter. Fundamentens påverkan bör rimligtvis öka med ökande vattendjup eftersom deras våta yta blir större. Detta samband bedöms vara proportionellt mot vattendjupet. Om varje vak på liknande sätt skalas upp med den större diametern bedöms de bli upp till $15/6$ ggr bredare och $15/6$ ggr längre. En vak växer på bredden med avståndet till dess upphov. Om tillväxten på bredden antas vara linjär med avståndet kommer vaken att ha en triangulär form. Arean av denna blir därmed i detta fall omkring $70 \times 450 \times (15/6)^2 \approx 100\,000 \text{ m}^2$ eller ca $0,1 \text{ km}^2$. En ökning på 10 % av omblandningen inom varje vak kommer därmed att innebära en total ökning av omblandningen inom hela det bebyggda området (67 fundament på 50 meters djup inom 200 km^2) på $50/32 \times 10 \times 67 \times$

$0,1/200 \approx 0,5 \%$, som följd av de turbulenta vakarna nedströms fundamenten. Siffran gäller vid de fall det redan finns en uppbyggd skiktning (om än svag).

De temperaturskiktningar som undersöktes av Schultze och andra (2020) var svaga jämfört med de skiktningar som råder i det aktuella området (se avsnitt 5.1), åtminstone på sommaren då sydvästra Bottenhavet är temperaturskiktat med temperaturskillnader på $5\text{--}10^\circ\text{C}$ mellan vattenytan och 40 meters djup. Den högre temperaturskillnaden kommer tillsammans med saltskiktningen att dämpa den turbulens som skapas nedströms fundamenten.

6.2 Vindvakens påverkan på omblandning

Eftersom en vindkraftpark syftar till att extrahera energi ur vinden kommer vindhastigheten att vara lägre i lä av vindkraftparken. Luftvolymen med reducerad vind kallas vindvak. Vindvaken kan, beroende på vindkraftparkens storlek och effektuttag, sträcka sig tiotals kilometer från vindkraftparken. Utsträckningen blir störst vid stabila atmosfäriska förhållanden, dvs då temperaturgradienten i atmosfären är positiv (vilket ofta är fallet då vattnet är kallare än lufttemperaturen). Mätningar från flygplan visar att reduktionen av vindhastighet på navhöjd på läsidan i närheten av en vindkraftpark kan vara omkring 20 till 30 % beroende på de atmosfäriska förhållandena (Cañadillas, o.a., 2020). Mätningar från flygplan 25 km nedströms indikerar vindreduktioner på navhöjd om ca 15 % (Bärfuss, Schulz-Stellenfleth, & Lampert, 2021). Vid vattenytan är vindreduktionen mindre och börjar först en viss sträcka nedströms varje vindkraftverk eftersom vinden till en början är relativt ostörd då de passerar under rotorbladen. Gandara och Harris (Gandara & Harris, 2012) visar i en artikel att den största sammanlagda vindreduktionen vid vattenytan skedde så långt bort som på 5 km avstånd nedströms en vindkraftpark (Horns Rev 1 i Nordsjön) och att den maximala reduktionen av vindhastighet där var omkring 10 %. Det kan nämnas att den studerade vindkraftparken är en betydligt tätare och lägre vindkraftpark än Najaderna. Den maximala momentana vindreduktionen vid vattenytan nedströms Najaderna kan vid stabila atmosfäriska förhållanden² förväntas ske på längre avstånd eftersom Najaderna är högre. Uppskattningsvis kan det handla om minst än 5–10 km. Vid varje ändring av vindriktning kommer området med maximal påverkan att förflyttas sidledes relativt vindriktningen. Den enda vattenyta som kontinuerligt påverkas av vindvaken måste därmed ligga inom området för fundament och påverkan kan där förväntas vara mindre än 10 %.

En reduktion av vindhastigheten på 10 % leder till minskad omblandning, dels på grund av minskad skjuvkraft mot vattenytan men även på grund av att vågorna blir mindre. Skillnaden mellan områden med ostörd och reducerad vind kan också ge upphov till en så kallad dipol, ett fenomen där språngskiktet mellan ytvattnet och djupare liggande vatten lyfts upp på ena kanten av vindkraftparkens vindvak och trycks ner på den andra (Broström 2008). Detta sker på grund av divergens respektive konvergens av Ekmantransport (en kombination av vindens skjuvkrafter på vattenytan och jordens rotation) i vindvakens respektive kanter som lyfter upp respektive trycker ner språngskiktet. När språngskiktet lyfts upp eller trycks ner sker lokalt ökad omblandning mellan de två vattenmassorna på varsin sida av språngskiktet. Denna blandningseffekt förutsätter att storleken på vindkraftparken är samma som eller större än den så kallade interna Rossbyradien (eng: internal Rossby radius) vilken bland annat varierar med densitetsskillnaden över språngskiktet och djupet vid

² Stabila atmosfäriska förhållanden kan uppstå när vattnet är kallare än luften. Vid instabila atmosfäriska förhållanden är luften mer turbulent. Eftersom turbulens bidrar till omblandning blir vindvakar nedströms vindkraftparker generellt sett kortare vid instabila atmosfäriska förhållanden.

språngskiktet. Najaderna bedöms vara tillräckligt stor för att kunna ge upphov till en sådan dipol. En förutsättning för att en dipol ska kunna utvecklas är att vindriktningen är någorlunda konstant under en tid (i storleksordningen något dygn). Under de flesta förhållanden förflyttar sig alltså begynnande dipoler hela tiden då vindriktning och vindstyrka varierar.

Floeter och andra (Floeter, Pohlmann, Harmer, & Möllmann, 2022) presenterar empiriska bevis för existensen av dipoler i lä av en vindkraftpark. Detta görs genom högupplösta CTD-mätningar i ett flertal sektioner i vattenmassan tvärs vindvaken. Samtidigt tycks de naturliga variationerna av skiktningen i området vara av samma storleksordning resultaten av de dipoler som identifieras.

Påverkan på omblandning av bland annat dipoler diskuteras också av Christiansen och andra (Christiansen, Daewel, Djath, & Schrum, 2022). De har med hjälp av en numerisk modell beräknat bland annat hur skiktningens styrka påverkas av vindkraftparker i södra Nordsjön. Den parameter som används för att beskriva skiktningens styrka kallas på engelska potential energy anomaly och har enheten J/m^3 . Parametern beskriver hur mycket energi som krävs för att fullständigt bryta ner skiktningen (de Boer, Pietrzak, & Winterwerp, 2008). Christiansen och andra visar att vindkraftparkerna kan ge upphov till rumsliga variationer i potential energy anomaly på omkring $\pm 2 \text{ J/m}^3$ som månadsmedelvärde, vilket inte är obetydligt i södra Nordsjön där värdet på potential energy anomaly i de områden där många vindkraftparker ligger är lägre än 50 J/m^3 (Christiansen, Daewel, Djath, & Schrum, 2022). Samma artikel visar också att den minskade omblandningen i ytlagret kan leda till en förhöjd ytvattentemperatur på omkring $0,1^\circ\text{C}$, vilket lokalt motsvarade 10 % av de årliga variationerna i ytvattentemperatur. Som jämförelse är de årliga variationerna av yttemperatur vid SMHI:s mätstation Finngrundet högre än de som nämns i artikeln. Slutsatserna i artikeln är även i detta fall att de naturliga variationerna i salt- och temperatur är betydligt större än vindvakens påverkan. Däremot kan skiktningens styrka och medelströmmar komma att omfördelas på en större skala.

Enligt en artikel av Daewel och andra (Daewel, Akhtar, Christiansen, & Schrum, 2022) kan stora kluster av vindkraftparker påverka primärproduktionen, minska omblandningsdjupet och leda till mer syrefattiga bottenar. Deras artikel visar beräkningsresultat från en ekosystemmodell som kopplats till en hydrodynamisk modell. En förändrad primärproduktion på $\pm 10 \%$ noteras omkring kluster av vindkraftparker i Nordsjön (total installerad effekt 120 GW). Sett över regionala skalor (hela Nordsjön, södra Nordsjön respektive Tyska Bukten) noterades dock endast reduktioner ner till -0,5 %. Med andra ord tycks primärproduktionen framför allt påverkas genom att den lokalt omfördelas. I den modell som användes för studien togs dock inte hänsyn till fundamentens bidrag till omblandningen. Mer syrefattiga bottenar förklaras av en minskad återsuspension av organiskt material på grund av lokalt upp till 10 % minskning av botten-skjuvspänning (vattnets skjuvkraft mot botten per ytenhet). Minskade återsuspension av organiskt material innebär att en större fraktion av materialet ackumuleras på botten.

6.3 Bedömning av Najaderna vindkraftparks påverkan på omblandning

Den ökade turbulens som fundamenten lokalt kommer att ge upphov till, kan enligt beräkningar i avsnitt 6.1 vid svaga skiktningar (sen höst, vinter och vår) leda till omkring 0,5 % mer omblandning inom projektområdet än den omblandning som sker naturligt på grund av friktion mot botten. Å andra sidan är omblandningen sannolikt

ändå hög under denna säsong. Under sommarmånaderna, vilket är den tid då en ökad omblandning kan förväntas ha mest effekt på miljön, kan ökningen på grund av fundamenten förväntas vara betydligt mindre, speciellt i den biologiskt mest aktiva övre delen av vattenmassan.

Vindvaken kommer att ge upphov till såväl minskad omblandning på grund av reducerade vindar och vågor i lä, som ökad omblandning på grund av dipoleffekten. Att ytströmmen ofta ändrar riktning (se avsnitt 5.2) innebär sannolikt att dipoler sällan hinner utvecklas till fullo. Påverkan på grund av försvagad vind bedöms ske snabbare och vara större än påverkan av dipolerna.

Utifrån mätningar av salthalt och temperatur när skiktningen är som svagast kan skiktningens styrka i sydvästra Bottenhavet ha värde av potential energy anomaly neremot 25 J/m^3 . Den omfördelning av skiktningens styrka som noterats för kluster av vindkraftverk på $\pm 2 \text{ J/m}^3$ (Christiansen, Daewel, Djath, & Schrum, 2022) bedöms därmed inte vara försumbar. Den omfördelning av primärproduktion som predikerats av Daewel och andra (Daewel, Akhtar, Christiansen, & Schrum, 2022) för kluster av vindkraftverk i Nordsjön skulle därför potentiellt sett kunna uppstå även i sydvästra Bottenhavet. Den regionala effekten bedöms dock bli betydligt mindre. Daewel och andra studerade påverkan av vindkraftparker med en sammanlagd installerad effekt på totalt 120 GW, dvs 120 gånger större än Najadernas uppskattade maxeffekt, och fann att den regionala minskningen av primärproduktion blev 0,5 %. Eftersom Bottenhavet inte tillnärmelsevis är 120 gånger mindre än Nordsjön bedöms den regionala effekten av Najaderna bli betydligt mindre på regional skala.

Turbulens bakom fundamenten kan ge upphov till en viss ökad omblandning och försvagad skiktning inom det bebyggda området. Denna ökning är inte inkluderad i modelleringen som ligger till grund för studien av Daewel och andra (Daewel, Akhtar, Christiansen, & Schrum, 2022). Möjligen skulle den ökade omblandningen på grund av fundamenten till viss del motverka den höjning av omblandningsdjup och förstärkning av skiktningen som noterades, speciellt i slutet av sommaren. Carpenter och andra (Carpenter, o.a. 2016) som studerat effekten av fundamenten men försummat effekten av vindvaken, noterade att om vindkraftparkernas utsträckning når 100 km eller mer så kan märkbar påverkan på etableringen av temperaturskiktning förväntas på grund av turbulens bakom fundamenten. De fann att skiktningen byggs upp senare än normalt på året och försvinner tidigare, vilket är tvärtemot vad som visades av Daewel och andra (2022). En studie som tar hänsyn till både fundamentens och vindvakens påverkan samtidigt skulle sammanfattningsvis sannolikt visa på mindre påverkan än vad som visats i nyss nämnda artiklar. Oavsett så har Najaderna en utsträckning på ca 20 km och är således betydligt mindre än 100 km, och därmed förväntas även fundamenten ha liten påverkan på den storskaliga uppbyggnaden av temperaturskiktning, vilket också överslagsberäkningarna i avsnitt 6.1 visar.

Halten av löst syrgas bedöms utifrån uppmätta data vara god på alla djup i detta område. En något ökad eller minskad omblandning skulle därför inte ha någon betydande påverkan för tillgången på syrgas vid olika djup.

När vattnet som läas av Najaderna är täckt av fast is kommer vindvaken inte att påverka omblandningen. Drivis kommer sannolikt att begränsa påverkan av vindvaken. Samtidigt kan både fast is och drivis förväntas reducera omblandningen i vattenmassan betydligt mer än vad vindvaken skulle ha gjort om det var isfritt.

Sammanfattningsvis bedöms vindkraftparken kunna ha en liten påverkan på omblandningen och skiktningen av vattenmassan. Både ökad och minskad

omblandning kan förväntas ske samtidigt, men på olika platser. Detta skulle innebära att uppbyggandet av temperaturskiktning på våren inom det bebyggda området kan komma att fördröjas något, samtidigt som temperaturskiktningen kan komma att byggas upp tidigare i vindvaken. Det omvända skulle kunna ske på hösten. Men eftersom vattenmassan inom vindkraftsparken och vindvaken ständigt byts ut bedöms dessa båda effekter till största delen del ta ut varandra och inte få någon påverkan på regional skala.

7 Påverkan på strömmar

Najadernas påverkan på strömmar i vattenmassan kan härledas till fundamenten och vindvaken.

7.1 Fundamentens påverkan på strömmar

I analysen av omblandningseffekten i avsnitt 6.1 nämndes att fundamenten påverkar vattenmassan bland annat genom att de skapar turbulens och lokalt reducerad strömshastighet i vaken. Detta är en följd av ett strömningsmotstånd som uppkommer då vatten måste ändra riktning och stryka utmed fundamenten. Samtidigt skapar även havsbotten ett strömningsmotstånd på grund av varierande djup och friktion mellan det strömmande vattnet och botten.

I stationära fall är strömningsmotståndet den balanserande motkraften till strömmarnas drivkraft. Drivkraften kan exempelvis vara gravitation (vattenståndsskillnader eller densitetsskillnader) eller vind. Ett ökat strömningsmotstånd kan förväntas minska vattentransporten genom vindkraftparken.

Strömningsmotståndet omkring cylindrar kan uppskattas genom en formel baserat på en empiriskt framtagna motståndskoefficient, CD . Värdet på denna koefficient beror på det så kallade Reynoldstalet $Re = \rho u D / \mu$, där ρ är vattnets densitet, u är strömshastigheten, D är cylinderns diameter och μ är vattnets viskositet. Om CD är känd kan strömningsmotståndet F_c beräknas genom formeln $F_c = \frac{1}{2} \rho C_D u^2 L$, där L är cylinderns längd. Värdet på motståndskoefficienten CD för en mycket lång ($L/D > 50$) cylinder i laminär strömning varierar dock stort med Reynoldstalet. Om cylindern står i en laminär (icke turbulent) strömning är värdet som lägst ca 0,2 vid $Re = 4 \times 10^5$ och ökar sedan upp till ca 0,8 vid $Re = 1 \times 10^6$. Vid lägre Reynoldstal ($1 \times 10^3 < Re < 3 \times 10^5$) är CD ca 1,2. Men om strömningen i omgivningen är turbulent, cylindern är relativt kort och om cylinderns ena ände sitter monterad i en vägg är CD betydligt lägre. Dessutom påverkas CD av cylinderns ytråhet på ett icke-linjärt sätt (Wang, Zhou, & Mi, 2012).

Strömningsmotståndet mot botten kan uppskattas genom att först anta en logaritmisk hastighetsprofil $u(z) = u^* / \kappa \log(30 z / k_s)$ där u^* är friktionshastigheten, κ är en konstant (0,4) och k_s är ett mått på ytråheten längs botten. Utifrån friktionshastigheten kan botten-skjuvspänningen beräknas. Om denna integreras över vindkraftparkens area fås det totala strömningsmotståndet mot botten.

Om det antas att drivkrafterna innan och efter byggnation av vindkraftparken inte förändras, följer att det totala motståndet innan och efter byggnation ska vara samma. Detta innebär att strömshastigheterna genom vindkraftparken kommer att minska.

Spannet av relevanta Reynoldstal bedöms till $5 \times 10^5 < Re < 2 \times 10^6$ och ytråheten på fundamenten bedöms vara relativt stor då fundamenten, åtminstone över tid kan ha påväxt av organismer som exempelvis musslor. Utifrån undersökningar av hur CD beror på cylinderlängd, turbulens, ytråhet och väggar (Wang, Zhou, & Mi, 2012) bedöms $CD = 0,8$ vara ett rimligt värde för ett monopilefundament med 15 meters

diameter på 40 meters djup. Ett rimligt värde för ytråheten längs botten bedöms vara $k_s=0,1$ meter. Minskningen av vattentransport (strömhastighet) kan utifrån ovanstående data och genom en iterativ process beräknas till ca 2 % för 50–67 planerade cylinderformade fundament av typen monopile med diametern (D) 15 meter vid ett antaget medeldjup (L) på 50 meter.

Diametern av gravitationsfundament varierar med höjden över botten. Motståndskoefficienten CD bedöms vara densamma för cylindrar men eftersom gravitationsfundament är bredare vid botten och smalare högre upp kommer strömningsmotståndet att variera på ett annat sätt jämfört med monopilefundament. Med i övrigt samma antaganden och beräkningsmetod som ovan använts för monopilefundament beräknas minskningen av vattentransport (strömhastighet) dock bli lika stor, ca 2 %.

Vid vinddriven ström kan det extra strömningsmotståndet från fundamenten relateras till vindens friktion mot vattenytan. Friktionskraften ökar med vindhastigheten men ökar i detta fall snabbare än vindhastigheten i kvadrat, eftersom även vattenytans ojämnheter ökar med vindhastigheten (Gao, Zhou, Zhang, Zeng, & Bi, 2021). Vindfriktionen ger upphov till ytströmmar som kan antas vara omkring 3 % av vindhastigheten (Weber, 1983). Vid ihållande vind skapas så kallade Ekmanströmmar som snabbt minskar med avståndet från vattenytan. Strömmarna ändrar även riktning med avståndet från vattenytan på grund av Corioliseffekten, vilket innebär att den vinddrivna nettoströmmen har en riktning 90° tvärs vindriktningen. Vid normala förhållanden kan den vinddrivna nettoströmmen uppskattas till drygt 5 cm/s ner till ett djup på i storleksordningen 10 till 20 m (Ekmandjupet). Detta innebär att det sammanlagda strömningsmotståndet från 67 monopilefundament vid vinddriven ström endast utgör några promille av vindens drivkraft över det bebyggda området. Gravitationsfundament kommer att påverka de vinddrivna strömmarna i ännu mindre grad eftersom de i detta fall har en mindre diameter nära vattenytan. Vindens drivkraft påverkas dock även av den reducerade vindhastigheten som följer av energiuttaget, vilket diskuteras i följande avsnitt.

7.2 Vindvakens påverkan på strömmar

Den reducerade vinden i lä om vindkraftparken kommer att förändra den vinddrivna ytströmmen. Detta kommer att ske i hela vindvaken, även om den största momentana påverkan vid vattenytan kan uppskattas ske i storleksordningen 5–10 km i lä om vindkraftparken (se avsnitt 6.2).

En reduktion av vindhastigheten på ca 10 % (Gandara & Harris, 2012) (Christensen, o.a., 2013) kan förväntas medföra en motsvarande reduktion av den vinddrivna ytströmmen. Som nämntes i föregående avsnitt kan vinddrivna ytströmmar antas vara omkring 3 % av vindhastigheten (Weber, 1983). En reduktion av den vinddrivna delen av ytströmmen med 10 % kan därmed vid en vanlig vindstyrka på 7 m/s motsvara en minskning med upp till ett par cm/s, från 0,21 till 0,19 cm/s.

7.3 Bedömning av Najaderna vindkraftparks påverkan på strömmar

En reduktion med upp till 10 % av den vinddrivna ytströmmen i lä om vindkraftparken kan förväntas. Läområdet kommer dock att flyttas runt i och med att vindriktningen varierar, vilket innebär att samma geografiska område inte påverkas kontinuerligt eller i samma omfattning. De största energiuttagen sker vid sydvästliga vindar (Figur 3-1), dvs vinkelrätt ut från den närmaste svenska kusten. Därmed kommer den största

effekten av vindvaken ske på öppet vatten nordost om vindkraftparken. Det är möjligt att den sydostgående transporten av ytvatten blir något reducerad eftersom vindvaken oftast kommer att påverka en del av Bottenhavet där den vinddrivna transporten samverkar med Corioliseffekten. Den storskaliga cirkulationen moturs i Bottenhavet skulle därför teoretiskt sett kunna försvagas något. Nettotransporten av bräckt vatten ut ur Bottniska viken kommer inte att påverkas eftersom den drivs av tillflödet av sötvatten via älvar och åar och inte av vind. Påverkan på den storskaliga cirkulationen i Bottenhavet bedöms inte bli mätbar.

Det något förhöjda strömningsmotstånd som vindkraftparken ger upphov till bedöms inte heller kunna påverka den storskaliga cirkulationen i Bottenhavet. Möjligen skulle en lokal omfördelning av strömmarna kunna ske, men det bedöms knappast vara mätbart med tanke på hur mycket strömmarna varierar i tiden, både med avseende på hastighet och riktning (se Figur 5-5 och Figur 5-6). Strömhastigheterna kring varje enskilt fundament kan förväntas bli något förhöjda eftersom vattnet måste accelerera runt det blockerande fundamentet. Detta skulle kunna leda till lokal erosion av bottenarna omkring fundamenten om bottenarna inte skyddas.

Enligt Daewel och andra (Daewel, Akhtar, Christiansen, & Schrum, 2022) som har studerat effekten av kluster av vindkraftparker i Nordsjön kan etableringarna leda till mer syrefattiga bottenar. Detta ses som en följd av lokalt minskad återsuspension av organiskt material som i sin tur beror på minskad bottenskjuvspänning (vattnets skjuvkraft mot botten per ytenhet). Utifrån sina beräkningar noterades lokala minskningar på uppemot 10 %. Eftersom bottenskjuvspänningar (liksom andra strömningskrafter) skalar kvadratiskt med strömhastigheter, kan detta antas indikera att de botten nära strömmarna minskat med drygt 3 %, vilket är mer än 50 % högre men ändå i samma storleksordning som ovan beräknad reduktion av ytströmmarna för Najaderna. Om det förekommer naturlig sedimentation inom projektområdet finns det därmed risk att nettosedimentationen lokalt kommer att öka. Om materialet är organiskt finns det följaktligen en risk för större syreförbrukning på bottenarna när materialet bryts ned. Samtidigt kan strömhastigheterna nära botten närmast omkring det bebyggda området förväntas öka något, vilket i så fall skulle ha en motsatt effekt, dvs leda till mindre nettosedimentation. Runt omkring Najaderna är det överlag djupare än inom projektområdet. Följaktligen bedöms eventuell sedimentation och eventuell förekomst av syrefattiga bottenar vara mindre förekommande inom vindkraftparken än utanför. De uppmätta syreprofilerna indikerar dessutom inte att det under senare tid rått någon syrebrist vid bottenarna i sydvästra Bottenhavet, vilket i sin tur talar för att det inte heller gör det inom Najaderna. Utifrån tillgängliga data som djup samt kornstorlek och ansamlingen av miljögifter i de sedimentprov som tagits vid sju stationer inom territorialgränsen, bedöms bottenarna vid dessa stationer inte utgöras av ackumulationsbottenar (Niras, 2023).

När det förekommer fast is på vattenytan kommer denna påverka strömmarna betydligt mer än fundamenten eller vindvaken. Friktionen på undersidan av isen kan förväntas vara av samma storleksordning som friktionen mot havsbotten, dvs flera gånger större än fundamentens strömmotstånd. När det gäller ytströmmar kommer den fasta isen reducera dessa betydligt mer än vindvaken skulle ha gjort om det var isfritt.

Uppvällning vid kuster skapas av att ytvatten transporteras ut från kusten och ersätts av vatten från djupare liggande lager som då dras upp till ytan. Nedvällning är motsatsen till uppvällning. Vid vindriktningar parallellt med kusten skulle vindvaken kunna ge upphov till något mindre uppvällning längs kusten norr om vindkraftparken

och något mindre nedvällning längs kusten söder om densamma. Av dessa vindriktningar dominerar de nordnordostliga riktningarna. Nettoeffekten av detta bör därmed bli att nedvällningen längs kusten minskar.

Sammanfattningsvis kommer vindkraftparken att påverka strömmarna lokalt och regionalt med maximalt 2 till 10 % inom begränsade och varierande områden. Den största och vanligast förekommande påverkan bedöms ske i ytvattnet ca 5–10 km i lä om vindkraftparken. Reduktionen av strömhastigheter bedöms inte ha någon betydande påverkan på vattenmiljön.

8 Påverkan på vågor

Vindkraftparken kan påverka vågfältet dels direkt genom diffraktion eller reflektion av vågor inom vindkraftparken när vågor krockar med vindkraftverkens fundament, dels indirekt genom vindkraftparkens påverkan på vinden i lä av turbinerna (vindvaken).

Effekterna av diffraktion och reflektion är beroende på förhållandet mellan fundamentens diameter och våglängden. Diffraktion och reflektion blir märkbar om diametern är större än mellan en tiondel och en femtedel av våglängden. Till exempel kommer ett fundament med diametern 10 meter bara ge en signifikant reflektion och diffraktion om våglängden är kortare än 50–100 meter. Oftast är våglängderna i sydvästra bottenhavet betydligt kortare än så.

Gandara och Harris (Gandara & Harris, 2012) presenterar vind- och vågmodellering för en hypotetisk vindkraftpark i Mexikanska golfen, i ett försök att uppskatta storleken på den direkta och indirekta påverkan. Vindkraftparken placerades 12 km från kusten och bestod av $24 \times 18 = 432$ vindkraftverk om 7 MW styck. Fundamenten var gravitationsfundament med en effektiv (genomsnittlig) bredd på 33,5 meter placerade med 1700 meter inbördes avstånd. Navhöjden på verken var 120 meter och rotordiametern 164 meter. För att i detalj studera effekterna av diffraktion och reflektion använde Gandara och Harris först en högupplöst modell kring nio fundament arrangerade i ett mönster av 3×3 fundament, och sedan en mer storskalig regional modell. Modellberäkningarna med den högupplösta modellen visade att mellan 97 och 99 % av vågenergin gick rakt igenom den del av vindkraftparken som simulerades, beroende på vindriktning, vågfrekvens och vindstyrka. Resultaten kontrollerades mot analytiska beräkningar vilka visade på god överensstämmelse med de numeriska beräkningarna. Diffraktions- och reflektionskoefficienter togs fram och användes i en mer storskalig vågmodellering av hela vindkraftparken, med drivning av framtagna vindfält som inkluderade vindvaken.

Slutsatsen var att beroende på vindriktning och vindhastighet minskade den signifikanta våghöjden inne vid kusten med som mest knappt 7 %. Diffraktion och reflektion tycktes i detta fall (med gravitationsfundament med en diameter på över 30 meter) ha en större påverkan på våghöjden än den reducerade vinden i vindvaken.

I en annan artikel som tidigare refererats till (Bärfuss, Schulz-Stellenfleth, & Lampert, 2021) visas mätningar av vindvakars påverkan på vågfältet i lä av tre vindkraftparker väster om Danmark. Med hjälp av LiDAR-mätningar från ett flygplan uppskattas signifikanta våghöjder och vågornas energispektrum. Vid mätningarna blåste vinden från land (ostnordostlig vind, 80°), och vågorna utvecklades därmed både med avståndet ut från land och också med tiden som vinden blåst från land. Vågfältet var med andra ord inte fullt utvecklat, vilket är viktigt eftersom det är effekten av den lokala vindens förändring i lä av vindkraftparken som är av intresse. Om vågorna är

fullt utvecklade och inte längre påverkas av vinden kommer inte heller förändringar av vinden i lä av vindkraftparken ha någon påverkan på vågorna.

Mätningarna visade på en tydlig påverkan med både reducerad vindhastighet i navhöjd samt lägre vågenergi, speciellt i lä av den mest tätbyggda vindkraftparken med drygt 2,2 vindkraftverk per km² eller 9 MW/km². Påverkan var synlig hela vägen till den sista mättransekten som gjordes 65 km från vindkraftparken. Jämfört med våghöjden utanför det påverkade området var reduktionen mellan ca 5,5 och 11 % i de närmaste transekterna. Den största reduktionen (11 %) uppmättes på 45 km avstånd från vindkraftparken. På 65 km avstånd var skillnaden nere på ca 2 %. Reduktionen av våghöjd i lä av de båda mindre tätbebyggda vindkraftparkerna med knappt 1,8 vindkraftverk per km² eller 8,1 MW/km² var betydligt mindre. Som jämförelse är tätheten av Najaderna 0,3 vindkraftverk per km² eller 5 MW/km² om endast arean av det bebyggda området i exempellayouten används. Najaderna är därmed mindre tätbyggd än ovan studerade vindkraftparker både med avseende på antal verk och installerad effekt per ytenhet. Även om hänsyn tas till att fundamenten i Najaderna kan ha en diameter som är bortåt tre gånger större än diametern på de fundament som används i ovan nämnda vindkraftparkerna väster om Danmark, är det totala blockerande effekten per kvadratkilometer mindre i Najaderna.

Christensen och andra (Christensen, o.a., 2013) har också studerat olika typer av påverkan på vågor från en vindkraftpark. För studien har de använt en spektral vågmodell och tagit fram empiriska och teoretiska samband för vindvakens påverkan på skjuvningen, reflektion och diffraktion och implementerat dessa i modellen. Vindkraftparken som studerades var relativt låg och tät och fundamenten var av typen monopile. Vågfeltet uppströms parken var fullt utvecklat, dvs i balans med vinddrivningen. Deras slutsatser var bland annat att reduktion på grund av reflektion och diffraktion utgjorde ca 1/3 av den totala reduktionen ett par kilometer i lä om vindkraftparken. På större avstånd i lä dominerar dock effekten av reducerad vindhastighet i vindvaken allt mer. Reduktionen i våghöjd på 15 till 20 km avstånd beräknades vara mindre än 2 %. De såg också att reflektion och diffraktion skapar något högre vågor (2 till 3 %) intill lovartsidan av vindkraftparken. De noterar också att framtida vindkraftparker oftast kommer att utgöras av högre vindkraftverk som är mer glest utplacerade, vilket kommer innebära att våghöjdsreduktionen från reflektion och diffraktion kommer att bli betydligt mindre.

8.1 Bedömning av Najaderna vindkraftparks påverkan på vågor

Vindkraftparkens påverkan på vågor blir relativt mindre om vågorna är fullt utvecklade. För det aktuella fallet blir därmed påverkan störst främst vid vindar från sektorn syd till väst eftersom dessa vindriktningar ger kortast stryklängd. Dessa vindriktningar är också de vanligaste (se Figur 3-1) och förekommer över hälften av tiden. Våghöjden kommer dessutom att påverkas mer vid starka och ökande vindar än vid svaga och minskande vindar. Störst och mest frekventa reduktioner i våghöjd kan därmed förväntas ute på öppet vatten i sektorn nord till ost. Reduktionen av våghöjd bedöms där kunna uppgå till omkring 5 % i lä om vindkraftparken, och påverkan på vågorna bedöms kunna vara mätbar på avstånd upp till i storleksordningen 50 km. Således bedöms det inte kunna noteras någon reduktion i våghöjd längs Ålands eller Finlands stränder. Vid övriga vindriktningar bedöms påverkan på vågor bli mindre.

Reducerade vind och våghöjder skulle kunna påverka en kust som är känslig för förändringar i sedimenttransport. En grov bedömning utifrån tillgängliga flygbilder är

att den närmaste svenska kusten söder och öster om Najaderna främst består av klippor och grovt material. Den är dessutom mycket oregelbunden med många vikar och uddar. Både materialsammansättningen och geometrin talar för att kustens utseende inte kommer att påverkas av en viss reduktion av våghöjd. Om det lokalt finns ackumulationsbottenar på relativt grunt vatten skulle möjligen en något ökad sedimentation kunna noteras i sådana områden på lång sikt.

9 Sedimentspridning i anläggningsfas

Det finns olika typer av fundament för vindkraftverk till havs, och metoder för att placera eller förankra dessa fundament. För Najaderna är det två fundamentstyper som är aktuella: monopile- och gravitationsfundament.

Anläggning av fundament av typen monopile sker i första hand genom att de hamras ner i havsbotten. Om havsbotten visar sig vara alltför hård för att fundamentet ska kunna hamras ned hela djupet, krävs det att det hårda materialet borraras ur. I denna studie antas att allt urborrat material antas spolas ut i den omgivande vattenmassan under anläggningen. Med andra ord är detta ett worst case med avseende på utsläppta volymer sediment per tidsenhet. Vid borrarbete kan följaktligen stora volymer av sediment förflyttas och spridas i vattenmassan innan det återsedimenterar på botten. Inför placering av gravitationsfundament sker en schaktning och utjämning av botten. Även detta ger upphov till sedimentspridning, dock i betydligt mindre grad än borrarbete för monopilefundament. I detta avsnitt undersöks därför endast den sedimentspridning som kan uppstå vid anläggning av monopile.

Massflödet av urborrat slutt material beror på bottenmaterialets torrdensitet och borrhastigheten. Utifrån skillnaden mellan torr- och korndensitet kan bottenmaterialets vatteninnehåll beräknas. Avgörande för spridningsbilden är massflödet, utsläppsmetoden, förhållanden i det omgivande vattnet och sedimentets egenskaper som korndensitet och benägenhet att flockulera, dvs bilda aggregat som ökar sjunkhastigheten.

Finkorniga material som lera och silt har betydligt lägre sjunkhastigheter än sand och grus. De uppehåller sig följaktligen längre tid i vattenmassan och kan därför spridas över ett större område med rådande strömmar. Vilka partikelstorlekar som gäller för borrhaxen vid en viss position kan först avgöras efter att en provborrning skett. Det antas i denna utredning att borrhaxen är av samma typ som det finaste av de ytliga material som idag finns på botten inom projektområdet. Detta bedöms vara ett mycket konservativt antagande.

Vid förläggning av kablar mellan vindkraftverk och transformatorstationer samt från transformatorstationer in till landtagspunkt är det oftast önskvärt att kablarna hamnar under botten för att de ska ligga skyddade. Det är i dagsläget inte bestämt vilken metod som kommer att användas för detta arbete. Vanliga metoder är plogning eller nedspolning, men valet av metod beror på bottenmaterialet. I beräkningarna utgår ifrån att nedspolning kommer att användas, eftersom detta bedöms ge högre grad av spill än plogning och således mer omfattande miljöeffekter än övriga alternativ. Enligt en rapport från Nord Stream-projektet (Ramböll Danmark A/S 2008) är det rimligt att anta omkring 2 % spill vid nedspolning, men eftersom de ytliga sedimenten i detta fall (se avsnitt 9.1) är mycket finkorniga bedöms 20 % spill vara mer rimligt.

Det omgivande vattnet påverkar sedimentspridningen på flera sätt. Spillet formar en plyn när det dras iväg av strömmarna och denna plyn växer i bredd när avståndet

från utsläppspositionen ökar på grund av bland annat turbulens. Strömhastigheterna avgör hur långt spillet hinner spridas innan det når botten. Strömhastigheter och turbulens nära botten avgör om materialet sedimenterar eller fortsätter att förflyttas längs botten när det väl når dit.

9.1 Sedimentegenskaper

Enligt uppgifter från Najaderna Offshore består ytmaterialet inom projektområdet till största delen av morän, men det finns också inslag av glacial och postglacial lera samt inslag av isälvsavlagring. Provtagningar av ytsubstrat inom projektområdet har visat höga andelar silt och lera.

Inom ramarna för de naturvärdesinventeringar som utförts av Niras gjordes ytliga sedimentprovtagningar vid 7 punkter inom den del av projektområdet som ligger inom territorialhavet, se Niras (Niras, 2023) för exakta positioner. Indata till beräkningarna utgår ifrån data från den provpunkt som uppvisar högst andel finsilt och lera, eftersom detta ger mest konservativa resultat med avseende på spridning av höga koncentrationer suspenderat material.

I proverna inom projektområdet varierar andelen silt och lera (kornstorlekar $<0,063$ mm) mellan 30 och 92 %. Den provtagningspunkt som visar minst andel finkorniga sediment inom projektområdet är provpunkt Naj_45 som ligger på 50–55 meters djup i östra delen av projektområdet. Den provtagningspunkt som visar störst andel silt och lera är Naj_47 som ligger på ca 60 meters djup i sydöstra delen av projektområdet, relativt nära Naj_47. Provtagningspunkten Naj_48 har dock högst andel finsilt och lera, och beräkningarna kommer därmed att utgå ifrån mätvärden från Naj_48. Uppmätt kornstorleksfördelning vid Naj_48 visas i Tabell 1.

Torrdensitet är densiteten av det naturliga materialet borträknat vatteninnehållet. Korndensiteten är densiteten av själva sedimentkornen. En torrdensitet för konsoliderat material på 1850 kg/m^3 (Goldsmith, Fischenich, & Silva, 2001) som motsvarar hårt packad siltig jord och en korndensitet på 2650 kg/m^3 (Larsson, 2008), motsvarar kvartspartiklar, har antagits. Ju högre antagande om torrdensiteten av liggande material, desto större sedimentspridning fås. När material sprids i samband med borrning kommer olika partikelstorlekar att spridas olika långt på grund av sina olika sjunkhastigheter. Ju närmare arbetspositionen, desto grövre material kommer att landa på botten. Torrdensiteten för nyligen sedimenterad finsand och grövre material bedöms vara 1000 kg/m^3 , vilket är betydligt lägre än nu liggande material. Torrdensiteten för silt och lera precis efter att det landat på havsbotten bedöms vara ännu lägre, 300 kg/m^3 , eftersom små partiklar behöver längre tid på sig för att packa sig. En torrdensitet på 300 kg/m^3 innebär ett mycket löst lager med stort vatteninnehåll. Ju lägre antagande om torrdensiteten, desto tjockare pålagring fås. Med tiden kommer det spridda materialet att konsolidera och därmed att bilda tunnare lager.

Korndensiteten påverkar sjunkhastigheten. I Tabell 1 visas beräknade sjunkhastigheter för de olika kornstorleksfraktionerna. I beräkningarna av sjunkhastighet har en vattentemperatur och salthalt antagits på 4°C respektive 5,4 psu (se avsnitt 5). Sjunkhastigheterna är beräknade med en generaliserad form av Stokes' lag, som tar hänsyn till att strömningen kring större partiklar blir turbulent. Det har också tagits hänsyn till att finkornigt material i saltvatten flockulerar, dvs bildar aggregat vilket ger en snabbare sjunkhastighet än de annars skulle ha haft (Portela, Ramos, & Teixeira, 2013). Utifrån en konservativ tolkning av experimentellt framtagna data (Portela, Ramos, & Teixeira, 2013) antas i detta arbete att endast

partiklar mindre än 6 µm flockulerar och att de får en sjunkhastighet på 0,02 mm/s. Att sätta en konservativ undre gräns för sjunkhastigheten innebär att partiklarna uppehåller sig längre i vattenmassan än vad de annars hade gjort.

Tabell 1: Kolumn 1 och 2 visar uppmätta kornstorleksintervall och viktandel inom respektive intervall, för provtagningspunkt Naj48 i södra delen av projektområdet. Kolumn 3 visar de medelvärden av kornstorlekar inom respektive intervall som använts i beräkningen av sjunkhastigheterna. Kolumn 4 visar beräknade sjunkhastigheter för dessa kornstorlekar.

Kornstorlek (mm) uppmätt	Andel (%)	Kornstorlek (mm) i beräkning	Sjunkhastighet (mm/s)
<0,002	47,0	0,001	0,02
0,002–0,0037	4,4	0,00285	0,02
0,0037–0,006	2,3	0,00485	0,02
0,006–0,011	4,0	0,0085	0,05
0,011–0,020	4,8	0,0155	0,17
0,020–0,037	9,4	0,0285	0,56
0,037–0,063	14,0	0,05	1,73
0,063–0,125	6,1	0,094	5,73
0,125–0,25	4,1	0,1875	18,8
0,25–0,50	0,5	0,375	48,5
0,50–1,0	0,3	0,75	106,2
1,0–2,0	0,5	1,5	212,3
2,0–4,0	0,9	3,0	361,7
4,0–8,0	1,5	6,0	540,2
8,0–20,0	0,5	14	861,4

9.2 Borrning för monopilefundament

I detta avsnitt redovisas beräkningarna för hur koncentrationen av sedimentspill avtar med avståndet från positionen där det släpps ut, och hur långt partiklarna hinner färdas innan de landar på botten. Plymberäkningar har utförts med närfältsmodellen CORMIX³, vilket är en välbeprövad modell som stöds av USEPA (United States Environmental Protection Agency). Koncentrationer av suspenderat sediment och pålagring har utifrån CORMIX-resultaten därefter beräknats med en sedimentationsmodell utvecklad inom AFRY.

9.2.1 Sedimentspridning vid borrning för monopilefundament

Vindkraftverkens cylindriska fundament (monopile) förmodas ha en diameter på maximalt 15 meter och planeras i första hand att hamras ner ca 50 meter i havsbotten. Om botten i någon nivå skulle vara alltför hård, exempelvis om morän, block eller berg skulle omöjliggöra att fundamenten kan hamras ner, kommer det behöva borras inuti och under fundamenten. Om ett fundament exempelvis kan hamras ner 25 meter innan det behöver borras, måste först de översta 25 meter av mjukare material borras ur innan borren når ner till det hårda materialet. Det

³ <http://www.cormix.info/>

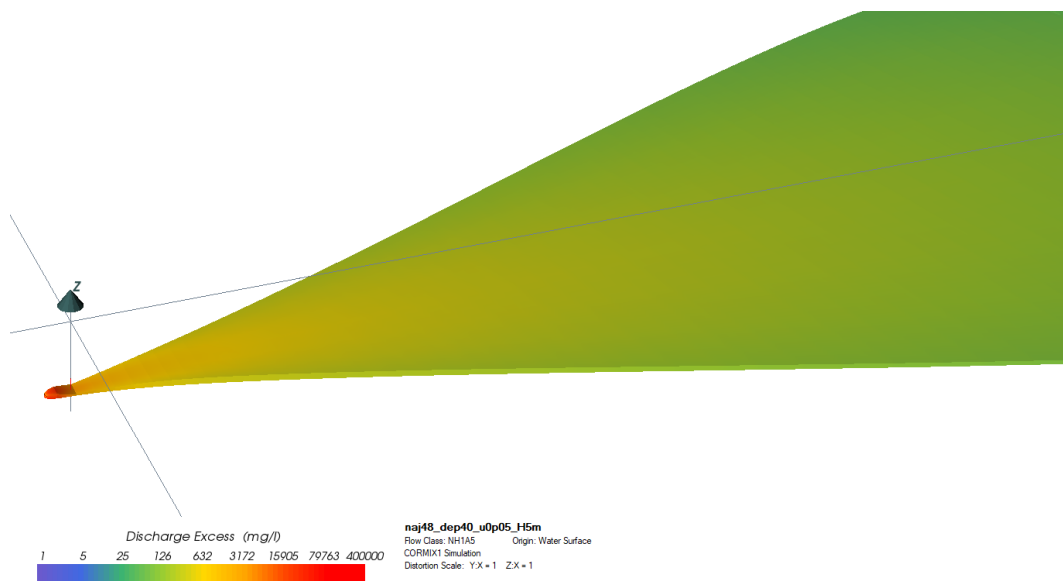
urborrade materialet (lösare sediment och krossat hårt material) kommer att släppas ut i omgivande vatten.

En stor osäkerhet är borrhastigheten, eftersom tillgången på data från installationer av monopilefundament med dessa dimensioner är mycket begränsad. En borrhastighet om 1 m/h bedöms dock vara rimlig (Spagnoli & Weixler, 2013). Givet en innerdiameter på 15 meter ger detta en borrhkapacitet på 177 m³/h. Utifrån torrdensiteten kan massflödet av solitt material beräknas till drygt 90 kg/s som släpps ut i vattenmassan. Om det antas att ett tunt lager av hårt material påträffas 25 meter ner i havsbotten, kommer allt material ovanför att behöva borraras ur. Men en borrhastighet på 1 m/h kommer detta att kräva drygt ett dygns arbete.

Det urborrade materialet inuti fundamenten behöver transporteras bort under arbetets gång. Det är vanligt att materialet sugas ut tillsammans med tillsatt vatten genom ett rör. Ett rimligt volymflöde av suspenderat urborrat sediment bedöms vara ca 0,2 m³/s. Densiteten av blandningen av vatten och suspenderat urborrat sediment blir därmed ca nästan 1300 kg/m³. Detta motsvarar extremt grumligt vatten med halter av suspenderat solitt material på omkring 460 000 mg/l. Sett till volymen består blandningen av 15–20 % solitt material. Om utloppsrörets innerdiameter är 0,5 meter ger det antagna volymflödet en strömhastighet på 1 m/s.

Efter diskussioner med Najaderna Offshore antas utsugsrörets mynning placeras 5 meter ovanför havsbotten och vara nedåtriktad. Genom att placera mynningen nära botten undviks onödig grumling i den biologiskt mest aktiva (övre) delen av vattenmassan. Utloppshastigheten och den utspolade blandningens höga densitet kommer att samverka till att det snabbt når havsbotten. Mynningens exakta höjd är inte avgörande ur utspädningssynpunkt, eftersom det oavsett höjden kommer att bildas ett område omkring utsläppspunkten med väl omblandat och mycket grumligt vatten på grund av den turbulens som uppstår när det utspolade vattnet når botten.

Spridningen från mynningen och närområdet sker genom en dynamisk plym som snabbt når botten. På grund av sin höga densitet breder den ut sig med gravitationens hjälp medan den späds ut. Utspädningen leder till att densiteten gradvis sjunker, och efter en viss utspädning kommer plymen passivt att spridas vidare längs botten med hjälp av det omgivande vattnets naturliga strömmar. Det som driver initialutspädningen är med andra ord gravitation och det omgivande vattnets strömmar, som båda ger tillgång till spädvatten. I plymens passiva fas är det däremot den naturliga turbulensen i recipienten som bidrar till dispersion. Den horisontella dispersionen som är kopplad till plymens tillväxt på bredden och hämtas från simuleringar med CORMIX. För att vara på den konservativa sidan med avseende på koncentrationer har den vertikala dispersionen satts till noll i sedimentspridningsberäkningarna.

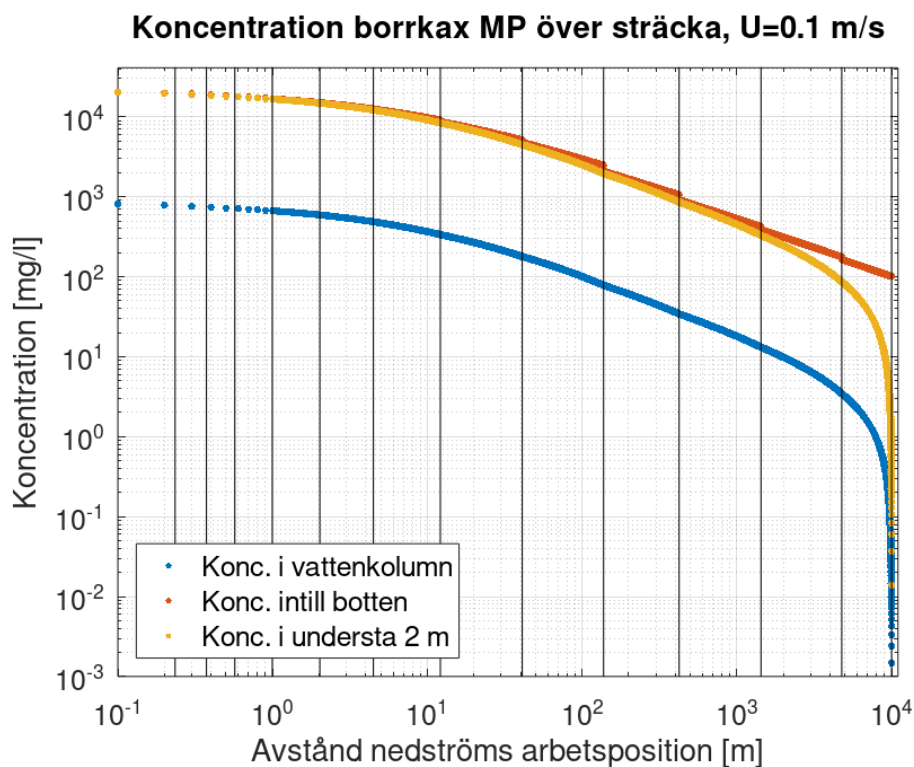


Figur 9-1: Figuren visar ett exempel på en plym som sprider sig längs botten beräknad med mjukvaran CORMIX. Färgskalan visar här koncentrationen av suspenderat sediment.

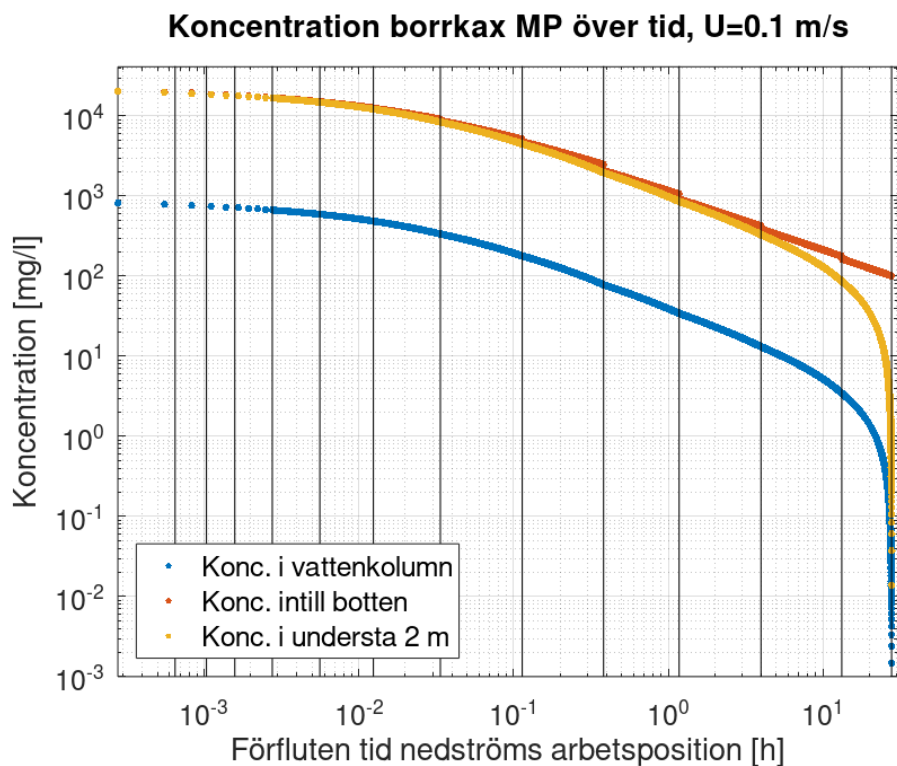
Simuleringar av plymens form och initiala utspädning visar att plymen snabbt sjunker mot botten och breder ut sig horisontellt så att den inom 100 meter från utsläppspunkten är över 100 meter bred. Figur 9-1 visar ett exempel på detta. Tjockleken på plymen beror på strömhastigheten i recipienten. Vid en strömhastighet på 5 cm/s fås en tjocklek på 5 meter på hundra meters avstånd, medan tjockleken endast blir 2 meter på samma avstånd vid en högre strömhastighet på 10 cm/s. Densiteten i plymen kommer vid detta avstånd vara ca 1005–1020 kg/m³ och halten suspenderat solitt material kommer att vara omkring 2000 mg/l. Koncentrationerna i det direkta närområdet till utsläppet kommer med andra ord att ligga i ett spann mellan 2000 och 460 000 mg/l.

Figur 9-2 visar beräknad koncentration av suspenderat solitt material vid en strömhastighet i recipienten på 10 cm/s, som funktion av avstånd från arbetspositionen. Koncentrationen intill botten skapad av primärplymen blir då över 1000 mg/l fram till omkring 400 meter från arbetspositionen. Som medelvärde över den understa två metrarna närmast botten kan koncentrationer på över 100 mg/l förväntas på avstånd upp till ca 4 km från arbetspositionen. Efter ca 9 km beräknas sedimentkoncentrationerna vara lägre än 10 mg/l. Den maximala spridningssträckan vid denna strömhastighet är 10 km, vilket kan relateras till avståndet till närmaste kust som är 17 km.

De 15 olika kornstorleksfraktionerna kommer att uppehålla sig väsentligt olika lång tid i vattenmassan. Finsand och grövre material (>0,063 mm) kommer snabbt att falla mot botten och landa inom drygt 30 meter från arbetspositionen. Figur 9-3 visar att de finkornigaste suspenderade sedimenten uppehåller sig knappt 30 timmar i vattenmassan vid en strömhastighet på 10 cm/s i recipienten. Detta är några timmar längre än den beräknade tiden för borrhningen. När partiklarna har transporterats 10 km har borrhningen alltså redan upphört. Med andra ord blir plymen aldrig fullt utvecklad eftersom de alla beräknade koncentrationerna längs sträcka och tid i Figur 9-2 och Figur 9-3 inte kommer att existera samtidigt.



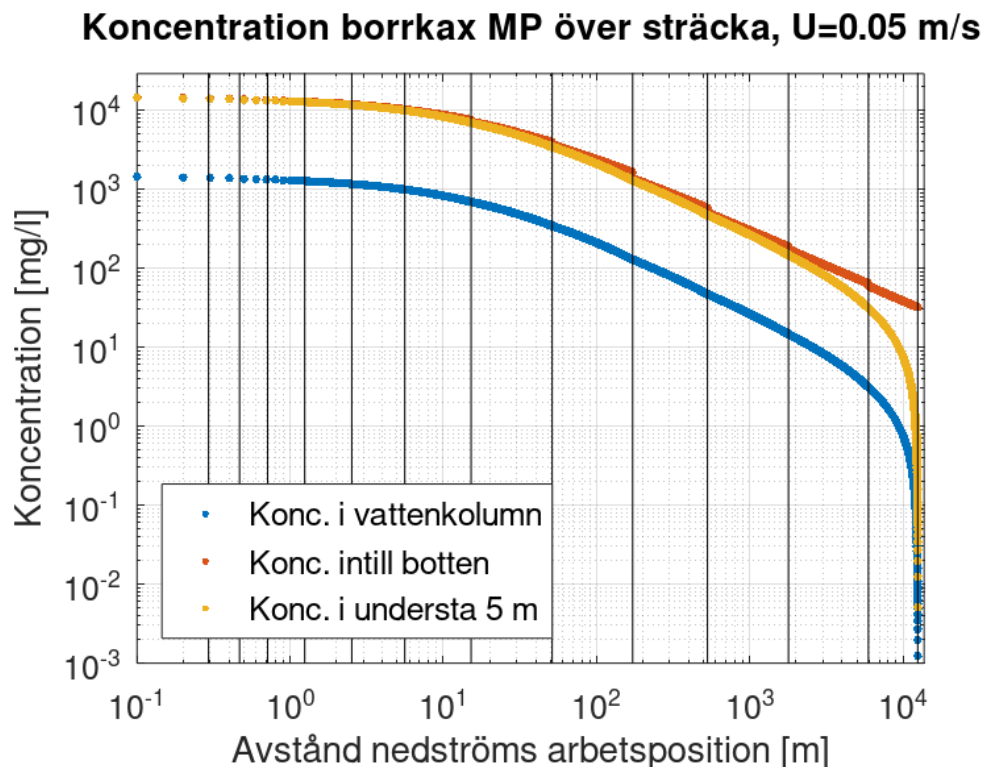
Figur 9-2: Koncentration av sedimentspill vid borring av monopile (MP), beräknat för en strömhastighet på 10 cm/s. De svarta lodräta strecken markerar vid vilken sträcka partiklar av respektive kornstorlek nått botten.



Figur 9-3: Koncentration av sedimentspill vid borring av monopile (MP), beräknat för en strömhastighet på 10 cm/s. De svarta lodräta strecken markerar efter vilken tid partiklar av respektive kornstorlek nått botten. Detta kan också tolkas som maximala varaktigheten av olika sedimentkoncentrationer för organismer som passivt följer strömmarna.

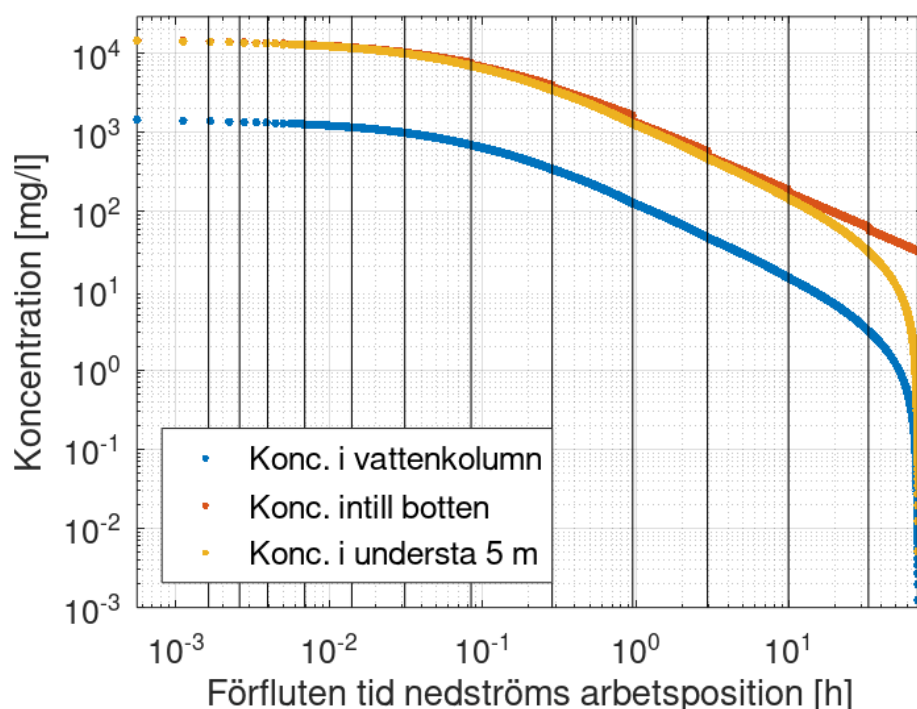
Figur 9-4 och Figur 9-5 visar samma sak som Figur 9-2 och Figur 9-3, men vid en strömhastighet på 5 cm/s. Det maximala spridningsavståndet beräknas till 12,5 km från arbetspositionen och förutsätter att plymen aldrig ändrar riktning, vilket är osannolikt och konservativt med tanke på hur strömriktningarna varierar (se Figur 5-5 och Figur 5-6). Att spridningsavståndet blir något högre trots att strömhastigheten är lägre beror på att plymen initialt är tjockare, 5 meter i stället för 2 meter. Koncentrationer på över 100 mg/l kan förväntas på 2,5–4 km från arbetspositionen. Efter drygt 10 km beräknas sedimentkoncentrationerna vara lägre än 10 mg/l förutom i de understa 1–2 metrarna närmast botten.

Figur 9-5 visar att de finkornigaste suspenderade sedimenten uppehåller sig knappt 70 timmar i vattenmassan vid en strömhastighet på 5 cm/s i recipienten. Detta är betydligt längre än de 25 timmar borrhningen förväntas kräva. Med andra ord kommer plymen att driva vidare med strömmarna i nästan två dygn efter avslutad borrhning, allt medan den krymper på längden i uppströms ände när de grövsta fraktionerna av kornstorlekar sedimenterar på botten. I än högre grad än vid den högre strömhastigheten (Figur 9-2 och Figur 9-3) kommer koncentrationerna i Figur 9-4 och Figur 9-5 därmed inte att existera samtidigt.



Figur 9-4: Koncentration av sedimentspill vid borrhning av monopile (MP), beräknat för en strömhastighet på 5 cm/s. De svarta lodräta strecken markerar vid vilken sträcka partiklar av respektive kornstorlek nått botten.

Koncentration borrhax MP över tid, $U=0.05$ m/s



Figur 9-5: Koncentration av sedimentspill vid borrhning av monopile (MP), beräknat för en strömhastighet på 5 cm/s. De svarta lodräta strecken markerar efter vilken tid partiklar av respektive kornstorlek nått botten. Detta kan också tolkas som maximala varaktigheten av olika sedimentkoncentrationer för organismer som passivt följer strömmarna.

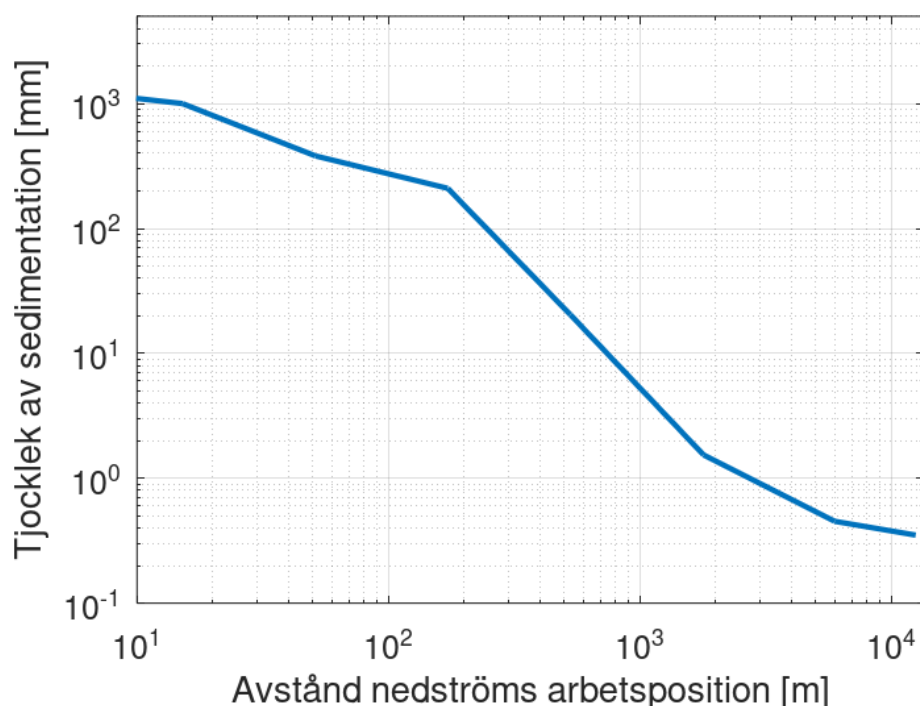
9.2.2 Pålagring vid borrhning för monopilefundament

De olika fraktionerna av suspenderat solitt material kommer att sedimentera och pålagras över olika stora bottenytor. Storleken på dessa ytor bestäms av plymens riktning och sjunkhastigheterna samt strömhastigheten och turbulensen i recipienten.

I ett osannolikt extremfall skulle plymen kunna ha exakt samma riktning under hela tiden för borrhning. Vid en relativt låg strömhastighet på 5 cm/s med konstant riktning fås den påverkan som visas i Figur 9-6. Nära arbetspositionen kommer det att ansamlas tjockare lager eftersom vi här får kumulativ pålagring av alla kornstorleksfraktioner. Inom 10 meters avstånd från arbetspositionen kan det därför bildas över 1 meter tjocka lager. Sannolikt bildas en hög av grovkornigt material under utloppsrörets mynning. På 100 och 1000 meters avstånd från arbetspositionen är pålagringen nere i 3 dm och 5 mm, respektive. Siffrorna grundar sig på att det behöver borras 25 meter ner i sedimentlagret för att installera en monopile.

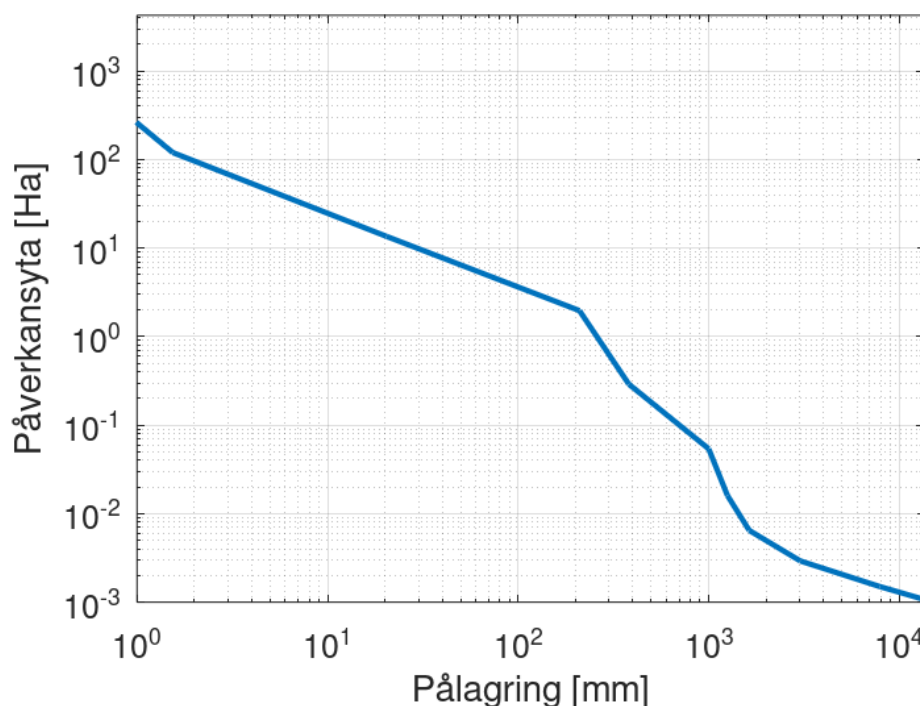
De olika ytor som påverkas av pålagring av sediment vid en strömhastighet på 5 cm/s visas i Figur 9-7. En pålagring av 1 dm och högre kan maximalt uppnås över en yta av ca 3 till 4 ha. Omkring 2 ha kan få en pålagring på över 2 dm, medan 25 ha kan få en pålagring på över 1 cm.

Pålagring (mm) nedströms arbetsposition, $U=0.05$ m/s



Figur 9-6: Pålagring av sediment som följd av 25 meters borrhning för monopilefundament, mätt i mm, vid en strömhastighet i recipienten på 5 cm/s. Inom 10 meters avstånd från arbetspositionen kan det bildas ca 1 meter tjocka lager. På 100 och 1000 meters avstånd är pålagringen ca 30 respektive 5 cm.

Pålagringens påverkansyta, $U=0.05$ m/s



Figur 9-7: Påverkansyta av pålagring efter borrhning för monopilefundament, mätt i hektar (ha), vid en strömhastighet i recipienten på 5 cm/s. En pålagringstjocklek över 100 mm kan då maximalt uppnås över en yta av ca 3 ha.

Även beräkningarna av pålagring har baserat sig på data från provtagningspunkt Naj_48 som innehöll störst andel finkorniga sediment. Övriga uppmätta kornstorleksfördelningar kan därmed förväntas ge tjockare pålagring på korta avstånd, och tunnare på större avstånd.

Ungefär hälften av materialet kan förväntas landa inom avstånd som är kortare än avståndet mellan individuella fundament. Med andra ord kan pålagring från olika borrhningar överlappa varandra och ge en kumulativ effekt och jämna ut pålagringen på större avstånd. Variationer i strömhastighet och framför allt strömriktning kommer också att jämna ut pålagringen och fördela materialet i tunnare lager över en större yta. Om det skulle borraras 25 meter djupt vid 67 fundament skulle den totala pålagrade volymen bli ca 1,6 miljoner m³ innan konsolidering. Om allt detta material skulle landa på botten inom projektområdet skulle den genomsnittliga pålagringen bli mindre än en halv cm.

I de punkter där det tagits sedimentprover bedömdes botten inte utgöras av ackumulationsbotten (Niras, 2023). Sannolikt kommer därför de finkornigaste fraktionerna av det spridda materialet inte att stanna kvar på botten när det väl når dit, utan transporteras vidare vid tillfällena då bottenströmmarna är relativt starka. Detta gäller framförallt i den grundare delarna av projektområdet. I de djupare delarna kan en större del av materialet förväntas ligga kvar.

9.3 Kabelläggning

Den totala längden av internkabelnätet uppskattas grovt av Najaderna Offshore till ca 135 km. Vid kabelläggningen antas kabeln spolas ner i ett v-format dike med en övre bredd på maximalt 2 meter och ett djup på 1 meter, med en hastighet av 150 m/h. Omräknat till massflöde blir detta 77 kg/s. I beräkningarna antas 20 % spill, dvs att 80 % av det uppspolade materialet snabbt sjunker tillbaka över kabeln i diket. Spillflödet blir då drygt 15 kg/s. Detta spill antas forma ett moln vid arbetspositionen som sträcker sig två meter över botten och är två meter brett. Med den hastighet som antas (150 m/h) kommer det sammanlagt att spillas sediment under minst cirka fem veckors tid under detta arbete.

Kabelläggningens hastighet är i samma storleksordning som de naturliga strömhastigheterna. Om det exempelvis strömmar tvärs kabeldiket kommer därför plymen att peka med en vinkel snett bakåt i förhållande till den riktning kabeln nedspolas. Om strömmen och kabelläggningen går åt samma håll, kommer det att bildas en kortare plym med högre koncentration suspenderat material. Om de går åt motsatt håll kommer det att bildas en mer utdragen plym med lägre koncentrationer eftersom den relativa hastigheten mellan strömmen och kabelläggningen blir högre. I beräkningarna utgår vi ifrån att strömmen går tvärs diket, vilket ger koncentrationer som motsvarar ett genomsnitt av alla möjliga förhållanden. Högst koncentrationer fås då strömmen och nedspolningen går i samma riktning och hastighet, men då bildas det å andra sidan ingen plym vilket begränsar spridningssträckan och det yta som påverkas mest av pålagring är samma yta som spolats bort.

9.3.1 Sedimentspridning vid kabelläggning

Figur 9-8 visar beräknad koncentration av sedimentspill utgående ifrån kornstorleksfördelningen i Tabell 1. En strömhastighet i recipienten på 10 cm/s har använts. Liksom i fallet med borrhning för monopilefundament vid denna strömhastighet beräknas den finaste fraktionen komma att färdas upp till 4 km från

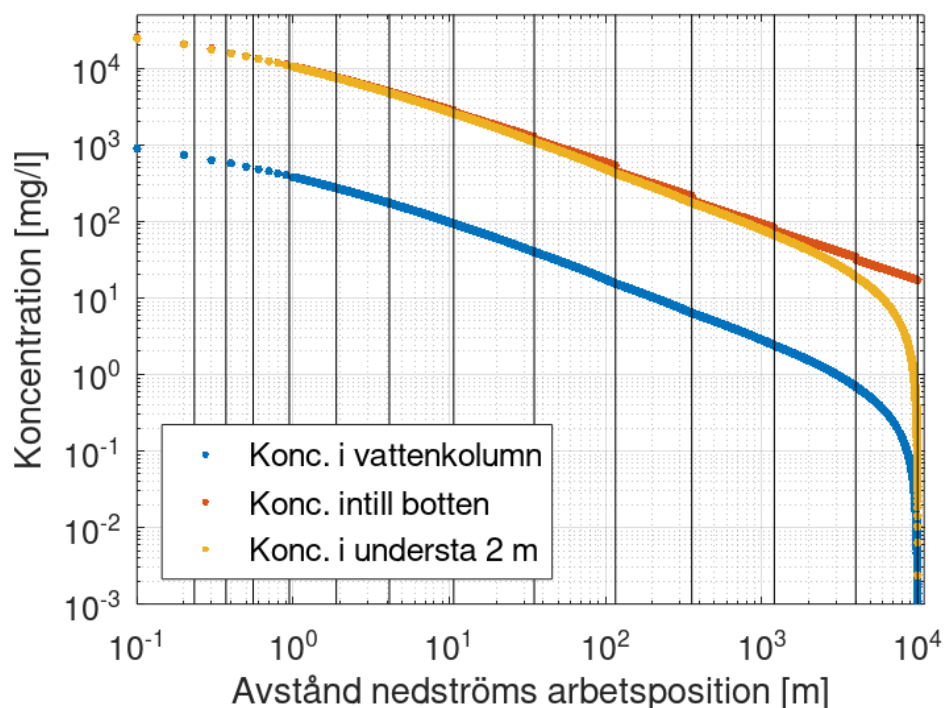
arbetspositionen och har då uppehållit sig knappt 30 timmar i vattenmassan. Resultaten blir identiska i detta avseende eftersom plymens tjocklek vid kabelläggningen antas vara densamma som den som beräknats för borrarngen vid denna strömhastighet. Koncentrationerna av suspenderat sediment är dock inledningsvis något högre i fallen med nedspolning och avtar snabbare. Vid avstånd på 100 och 1000 meter har koncentrationerna sjunkit till 500 och 100 mg/l, respektive.

Figur 9-9 visar samma sak som Figur 9-8, men vid strömhastighet på 5 cm/s. Om strömhastigheten i recipienten minskar, kommer koncentrationen att öka proportionerligt, men tiden för sedimentation kommer att vara oförändrad eftersom denna enbart bestäms av sjunkhastigheterna och fallhöjden.

I beräkningarna ansätts ett spill på 20 %, vilket är en grov men rimlig bedömning. En övre teoretisk gräns för hur stort spillet av silt och lera skulle kunna bli, kan vara att välja en andel spill som ger en koncentration av suspenderat sediment som motsvarar den antagna torrdensiteten av nyligen deponerad silt och lera: 300 kg/m³. Denna densitet kan också ses som en koncentration suspenderat solitt material på 300 000 mg/l. Vid en strömhastighet på 10 cm/s ger detta en övre teoretisk gräns på 90 % spill. Vid 5 cm/s blir den övre teoretiska gränsen dock endast 45 % spill. De teoretiska spillmängderna ger en plym med bulkdensitet (inklusive sitt vatteninnehåll) på ca 1200 kg/m³, vilken snabbt skulle breda ut sig och tunnas ut på grund av gravitation.

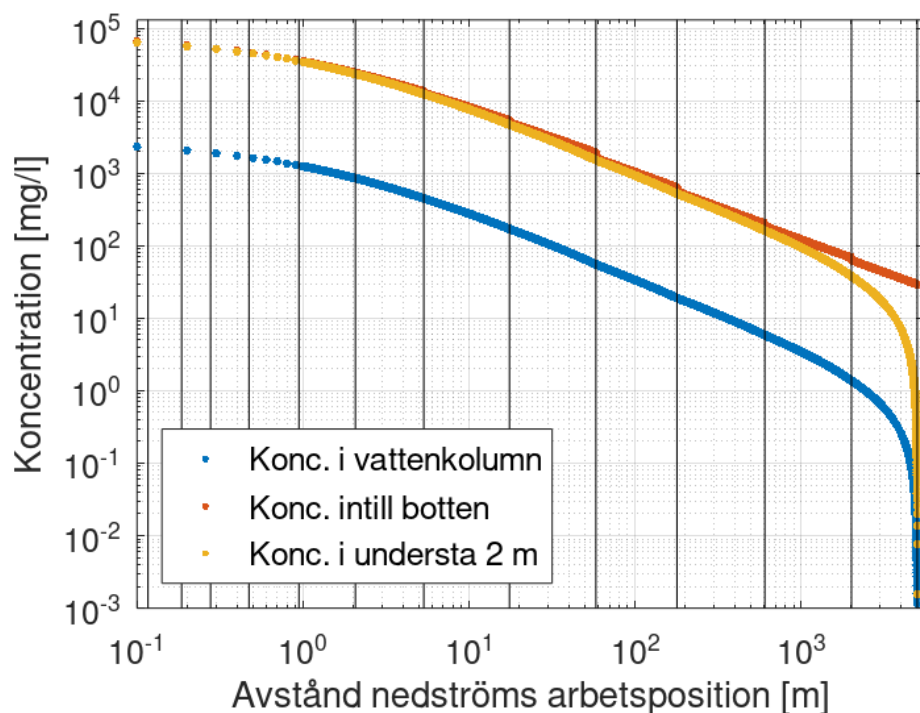
En organism som flyter passivt med strömmarna nära botten kan komma att påverkas av suspenderade sediment från nedspolning av kabel under maximalt 30 timmar, då det är den tid det tar för att allt sediment ska hunnit sjunka till botten. Observera dock att varaktigheten av sedimentmolnet på en viss plats är mycket kort. Nära kabeldiket antas plymen vara 2 meter bred och varaktigheten blir därmed endast 48 sekunder eftersom plymen förflyttar sig med ca 150 m/h. Vid en strömhastighet på 10 cm/s och med den plymtillväxt som predikteras av CORMIX blir plymens nedströmsände ca 1300 meter bred, vilket ger en varaktighet av grumling på mindre än 9 timmar. Varaktigheten av grumling över ett visst område vid nedspolning av kabel kan därmed inte bli längre än 9 timmar.

Konc. spill kabelläggning över sträcka, $U=0.1\text{m/s}$



Figur 9-8: Koncentration av sedimentspill vid nedspolning av kabel, beräknat för en strömhastighet på 10 cm/s. De svarta lodräta strecken markerar vid vilken sträcka partiklar av respektive kornstorlek nått botten.

Konc. spill kabelläggning över sträcka, $U=0.05\text{m/s}$



Figur 9-9: Koncentration av sedimentspill vid nedspolning av kabel, beräknat för en strömhastighet på 5 cm/s. De svarta lodräta strecken markerar vid vilken sträcka partiklar av respektive kornstorlek nått botten.

9.3.2 Pålagring vid kabelläggning

Eftersom nedspolningsarbetet hela tiden flyttar på sig, i kombination med att sedimenten färdas mycket långt från diket, blir tjockleken av pålagringen mindre än en millimeter redan på 200 meters avstånd från kabeldiket. Kablarna kommer bitvis läggas relativt nära varandra, vilket kommer leda till att samma bottenyta påverkas flera gånger av olika nedspolningar. Men även om en kumulativ pålagring skulle tas hänsyn till kommer denna vara relativt liten.

9.4 Diskussion kring resultaten av sedimentspridning

Beräkningarna bygger på en serie av antaganden om ingående parametrar, exempelvis när det gäller borrhastighet och urspolningshastighet. De resultat som bedöms vara mest osäkra är de som gäller borrning för monopilefundament. Eftersom tekniken för att borra i monopile av denna storlek ännu inte är utvecklad, finns i skrivande stund ingen data att tillgå. Det kan dock tilläggas att borrning för monopile är något som undviks i högsta grad av installationsbolagen eftersom det är väldigt kostsamt. Sannolikt är detta också en anledning till den begränsade tillgången på data även för de dimensioner som till dags dato varit aktuella.

Resultaten pekar emellertid som ovan redovisats på att påverkan av sedimentspridning vid borrning och kabelspolning främst är lokal och sannolikt inte sprider sig till kusten under normala förhållanden.

Borrning skulle kunna ske på två positioner samtidigt. I teorin skulle dock spädvattnet vid den borrning som sker direkt nedströms en annan borrning kunna innehålla 100–200 mg/l suspenderat sediment som kommer från uppströms borrning, vid antagande av ett rimligt avstånd mellan intilliggande fundament. Relativt de initiala koncentrationerna vid arbetspositionen är detta en marginell ökning. Dessutom baseras beräkningarna på den provtagningspunkt där störst andel fina sediment påträffats. I övriga delar av området sprids följaktligen inte sedimenten lika långt, vilket ytterligare minskar risken för kumulativa effekter med avseende på koncentrationer av suspenderade sediment.

Om utsläppen av uppborrat material sker i undre delen av vattenmassan blir påverkansområdet betydligt mer lokalt och temporärt, jämfört med om utsläppen hade skett vid ytan. Detta beror främst på att de tunga plymerna snabbt sjunker till botten. Närheten till botten innebär att de inte hinner transportera material särskilt långt innan materialet landat.

En organism som flyter passivt med strömmarna nära botten kan komma att påverkas av suspenderade sediment från nedspolning av kabel under maximalt 30 timmar, eftersom det är den tid det tar för allt sediment att sjunka till botten. Vid borrning av monopilefundament vid låga strömhastigheter kan påverkanstiden uppgå till ca 3 dygn. En viss geografisk plats nära botten, i eller i närheten av projektområdet, kan dock komma att påverkas av koncentrationer av suspenderade sediment på omkring 100 mg/l under längre tid än 3 dygn, eftersom en ny plym av suspenderade sediment från borrning eller nedspolning av kabel skulle kunna överlappa en äldre plym. Det är dock mycket osannolikt att en ny plym skulle överlappa två redan överlappande äldre plymer. Organismer som lever på eller nära botten och inte kan förflytta sig bedöms därmed inte komma att påverkas av koncentrationer på över 100 mg/l under mer ca 6 dygn i sträck.

Referenser

- Bärfuss, K., Schulz-Stellenfleth, J., & Lampert, A. (2021). The Impact of Offshore Wind Farms on Sea State Demonstrated by Airborne LiDAR Measurements. *J.Mar. Sci. Eng.* 9(6), 644. Hämtat från <https://doi.org/10.3390/jmse9060644>
- Cañadillas, B., Foreman, R., Barth, V., Siedersleben, S., Lampert, A., Platis, A., . . . Neumann, T. (2020). Offshore wind farm wake recovery: Airborne measurements and its representation in engineering models. *Wind Energy*, 23, 1249– 1265. doi:<https://doi.org/10.1002/we.2484>
- Carpenter, J. R., Merckelbach, L., Callies, U., Clark, S., Gasilikova, L., & Baschek, B. (2016). Potential Impacts of Offshore Wind Farms on North Sea Stratification. doi:10.1371/journal.pone.0160830
- Christensen, E., Johnson, M., Sørensen, O., Hasager, C., Badger, M., & Larsen, S. (2013). Transmission of wave energy through an offshore wind turbine farm. *Coastal Engineering*, 82, 25-46. doi:10.1016/j.coastaleng.2013.08.004
- Christiansen, N., Daewel, U., Djath, B., & Schrum, C. (2022). Emergence of Large-Scale Hydrodynamic Structures Due to Atmospheric Offshore Wind Farm Wakes. *Front. Mar. Sci.* 9:818501. doi:10.3389/fmars.2022.818501
- Daewel, U., Akhtar, N., Christiansen, N., & Schrum, C. (2022). Offshore wind farms are projected to impact primary production and bottom water deoxygenation in the North Sea. *Communications Earth Environment*(3:292).
- de Boer, G. J., Pietrzak, J. D., & Winterwerp, J. C. (2008). Using the potential energy anomaly equation for tidal straining and advection of stratification in a ROFI. *Ocean Modeling*, 22(1-2), 1–86. doi:10.1016/j.ocemod.2007.12.003
- Floeter, J., Pohlmann, T., Harmer, A., & Möllmann, C. (2022). Chasing the offshore wind farm wind-wake-induced upwelling/downwelling dipole. *Front. Mar. Sci.*, 28. Hämtat från <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.884943>
- Fonselius, S. (1995). *Västerhavets och Östersjöns Oceanografi*. SMHI.
- Gandara, R., & Harris, J. M. (2012). Nearshore wave damping due to the effect on winds in response to offshore wind farms. *Coastal Engineering Proceedings No.* 33. doi:10.9753/icce.v33.waves.55
- Gao, Z., Zhou, S., Zhang, J., Zeng, Z., & Bi, X. (2021). Parameterization of Sea Surface Drag Coefficient for All Wind Regimes Using 11 Aircraft Eddy-Covariance Measurement Databases. *Atmosphere*, 12(1485). doi:<https://doi.org/10.3390/atmos12111485>
- Goldsmith, W., Fischenich, C., & Silva, M. (2001). *Determining Optimal Degree of Soil Compaction for Balancing Mechanical Stability and Plant Growth Capacity*. Ecosystem Management and Restoration Research Program (EMRRP).
- Larsson, R. (2008). *Jords egenskaper*. Linköping: Statens Geotekniska Institut (SGI).
- Niras. (2023). *Fältundersökningar inom vindpark Najaderna*. Niras Sweden AB, Stockholm.
- Portela, L. I., Ramos, S., & Teixeira, A. T. (2013). Effect of salinity on the settling velocity of fine sediments of a harbour basin. i D. C. Conley, G. Masselink, P.

- E. Rusell, & T. J. O'hare (Red.), *Proceedings 12th International Coastal Symposium*. 65, ss. 1188-1193. Plymouth: Journal of Coastal Research. doi:ISSN 0749-0208
- Schultze, L. K., Merckelbach, L. M., Horstmann, J., Raasch, S., & Carpenter, J. R. (2020). Increased mixing and turbulence in the wake of offshore wind farm foundations. *Journal of Geophysical Research*: . doi.org/10.10. Hämtat från <https://doi.org/10.1029/2019JC015858>
- Spagnoli, G., & Weixler, L. (2013). Drilling Technologies for Offshore Foundation Engineering. *ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. OMAE2013-10305*. Nantes, France: ASME.
- Sutherland, B. R., Gingras, M., & Barrett, K. J. (June 2014). Clay settling in fresh and salt water. *Environmental Fluid Mechanics*. doi:DOI: 10.1007/s10652-014-9365-0
- Wang, H. F., Zhou, Y., & Mi, J. (2012). Effects of aspect ratio on the drag of a wall-mounted finite-length cylinder in subcritical and critical regimes. *Ex. Fluids*, 53, 423-436. Hämtat från <https://doi.org/10.1007/s00348-012-1299-z>
- Weber, J. E. (March 1983). Steady Wind- and Wave-Induced Currents in the Open Ocean. *J. Phys. Oceanography*, 13, 524-530.