

Kunnskapsstatus om påvirkning av flytende havvindparker på det fysiske marine miljøet

Av Angelika Renner, Jon Albertsen, Anne Britt Sandø, Havforskningsinstituttet

Sammendrag

Offshore vindkraftproduksjon er på vei oppover globalt. Stor innsats, spesielt i Europa og Asia, forventes å øke antallet havvindparker og deres kapasitet betydelig i de neste årene. Ettersom arealet av grunne sokkelhav vil være begrenset, er det et press mot installasjoner på dypere vann i form av flytende turbiner. Kunnskapen om den potensielle påvirkningen av vindparker på det fysiske miljøet og lavere trofiske organismer er imidlertid begrenset, spesielt i disse regionene. I denne rapporten gjennomfører vi en semistrukturert litteraturgjennomgang for å vurdere dagens kunnskapsstatus om effekter og påvirkninger av havvindparker på regional og lokal hydrografi og sirkulasjon, næringssalt-fordeling og tilgjengelighet, primærproduksjon, og sedimentbelastning i vannsøylen i driftsfasen av anleggene. Vi ønsker også å identifisere kritiske kunnskapshull.

Mens litteraturen om emnet har vokst raskt de siste årene, fokuserer flertallet av studiene om vindparker på relativt grunt (mindre enn 60 m vanndybde) og for det meste ustratifisert eller sesongmessig lagdelt sokkelhav. Over halvparten av artiklene undersøker den nordeuropeiske sokkelen, etterfulgt av sokkelen rundt Kina. In situ observasjoner er begrenset, og i stedet bruker de fleste artikler analytiske eller numeriske modeller. Flytende vindparker har først blitt operative ganske nylig, derfor er det svært få studier som er direkte fokusert på effekten av disse installasjonene.

Modellerings-, laboratorie- og observasjonsstudier viser hvordan turbulens dannes når strømmene passerer turbinfundamenter og hvordan dette påvirker blanding og lagdeling. Dette forsterkes spesielt av sterke tidevannsstrømmer. Vind som bremses pga. vindparken i selve anlegget og nedstrøms vil påvirke overflatelaget og da potensielt redusere turbulens og blanding som igjen kan forsterke lagdelingen. Samtidig kan modifisert vindpåvirkning føre til divergerende og konvergerende overflatestrømmer, forårsake opp- og nedstrømning og med det endre lagdelingen. Mens det er enighet om den lokale påvirkningen, er konsekvensene på regional skala mindre klare. Imidlertid er de fleste studier enige om at den omfattende dekingen av et sokkelhav med vindkraftverk vil endre sirkulasjonsmønstre, vannsøylestruktur og potensielt vertikalbevegelse, vertikal næringsfluks og primærproduksjon.

Selv om det har vært betydelig forbedring i modellering av vindturbiner og -parker i ulike skalaer, er det et kritisk behov for observasjonsdata for validering og målrettede konsekvensstudier. Spesielt tidsmessige og romlige skalaer for sirkulasjon og hydrografiske endringer og deres effekter og innvirkning på primærprodusenter, vertikal fluks og pelagisk-bentisk kobling er lite forstått, spesielt i lagdelte og dype sokkelområder. Gitt den raskt akselererende veksten i havvindparkindustrien, er dette et avgjørende kunnskapsgap for pålitelige miljøkonsekvensvurderinger og bærekraftig utvikling av denne fortsatt relativt nye energisektoren.

Introduksjon

Offshore vindkraftproduksjon spiller en stor rolle i overgangen fra fossilt brensel til grønnere og mer bærekraftige industrier. Den første kommersielle havvindparken ble satt i drift utenfor kysten av Danmark i 1991 (og tatt ut av drift i 2017) med en total installert effekt på 5 MW. Utviklingen gikk sakte frem til tidlig på 2000-tallet, men akselererte siden 2009 til drøyt 68 GW installert kapasitet innen utgangen av 2023 (McCoy et al., 2024). Størst installert kapasitet, høyeste antall havvindparker og størst årlig økning i kapasitet i 2023 (2,9 GW) var i Kina, etterfulgt av Storbritannia (ny kapasitet 1,1 GW). Andre store aktører er Tyskland og Nederland når det gjelder nåværende kapasitet, men andre land som Taiwan og Vietnam med henholdsvis 671 og 335 MW installert i 2023, slutter seg til markedet.

Planer fra EU og Storbritannia tar sikte på en total kapasitet på 110 GW innen 2030 (European Commission, General Directorate-General for Energy, 2023; TCE, 2022). Den totale kapasiteten til den globale offshore vindkraftbransjen (dvs. inkludert alle prosjekter innen planlegging, stedskontroll, tillatelse, økonomisk lukking og drift) utgjorde ved utgangen av 2023 over 453 GW, hvorav 35,6 GW var under bygging (McCoy et al., 2024). Prosjekter med flytende installasjoner utgjorde i overkant av 104 GW, hvorav 14,2 GW er planlagt i drift innen utgangen av 2028.

Utviklingen av havvindparker i norske farvann har gått sent så langt med en nåværende kapasitet på 95 MW, men er planlagt å øke betydelig for å bli en stor aktør i det europeiske havvindmarkedet (<https://www.regjeringen.no/no/tema/energi/landingssider/havvind/id2830329/> ; sist besøkt 5. april 2025). På grunn av de geografiske begrensningene på norsk sokkel der store områder er dype vil en stor del av denne utbyggingen omfatte flytende installasjoner. Verdens største flytende vindpark i dag, Hywind Tampen, bestående av 11 turbiner med en total kapasitet på 88 MW, ble satt i drift i 2023 og leverer strøm til de omkringliggende olje- og gassinstallasjonene til havs i den norske delen av Nordsjøen. Vindparker fra pilotprosjekt er på plass i britiske farvann (Hywind Scotland) og utenfor kysten av Frankrike i Middelhavet, og enkeltflytende turbiner er installert i Kina og Spania.

Arbeidet med vindkraft til havs vil kreve omfattende arealer, med potensiell konflikt med andre brukere samt påvirkning på økosystemer. Det er begrenset plass tilgjengelig i grunne og ofte ustratifiserte eller svake, sesongmessige lagdelte sokkelhav med sterke tidevannsstrømmer, hvor turbiner kan monteres fast i bunnen (dybder på opptil 60 m), som den sørlige Nordsjøen eller Gulehavet utenfor Kina. Med utviklingen av flytende vindturbiner kan det etableres vindparker i dypere områder med ulike lagdelingsregimer og svakere tidevannsstrømmer, men der det eventuelt er sterkere havstrømmer.

Med den anslåtte økningen i antall, kapasitet og areal som dekkes av havvindparker i henhold til prosjekter som er under planlegging, er det et presserende behov for en bedre forståelse av påvirkningene på det marine miljøet og økosystemene. I denne rapporten gjennomgår vi den eksisterende litteraturen for å vurdere dagens kunnskap og kunnskapshull angående effekter og påvirkninger av havvindparker på lokale og regionale oseanografiske forhold (dvs. hydrografi og hydrodynamikk), næringssalt-fordeling og tilgjengelighet, primærproduksjon, og sedimentbelastning i vannsøylen. Vi fokuserer på endringer i vindfeltet fra turbinkonstruksjoner som er i drift. Studier fra flytende vindparker er begrenset gitt den korte tidsperioden siden teknologien ble tilgjengelig og operativ. Det meste av litteraturen som brukes her stammer derfor

fra bunnmonterte vindparker. Selv om slike vurderinger har blitt utført tidligere (f.eks. Farr et al., 2021; Van Berkel et al., 2020), fokuserer de sjelden på oseanografi, biogeokjemi og lavere trofiske nivåer. Antall artikler har økt raskt de siste par årene, og en oppdatert oversikt er betimelig.

Vi skisserer vår tilnærming i neste avsnitt, etterfulgt av en generell oversikt over tilgjengelig litteratur. Deretter presenterer vi den nåværende kunnskapen om offshore vindparker på oseanografi, næringssalter, planteplankton og suspenderte partikler. Vi avslutter med en oppsummering av de viktigste kunnskapshullene og forskningsbehovene.

Metodikk

Vi gjennomførte et semistrukturert litteratursøk bestående av to tilnærminger:

1. Et systematisk søk i fagfellevurdert litteratur (se f.eks. Pullin & Stewart, 2006; Farr et al., 2021; Watson et al., 2024) ved å bruke søkeportalen Clarivate Web of Science Core Collection. Vi brukte spesifikke nøkkelord for å identifisere potensielt relevante artikler, etterfulgt av vurdering av artikkeltittel og sammendrag, om nødvendig introduksjon og metodeseksjon, for å begrense listen over artikler. Nøkkelord og søkeordsetninger samt antall søkeresultater og identifiserte relevante artikler er gitt i tabell 1.

Tabell 1: Nøkkelord brukt i det systematiske litteratursøket og antall resultater.

Keywords	Number of search results	Number of relevant papers
floating AND "offshore wind farm"	319	3
"offshore wind farm" NOT floating AND hydrography	3	2
"offshore wind farm" NOT floating AND stratification	34	16
"offshore wind farm" NOT floating AND circulation	41	12
"offshore wind farm" NOT floating AND "ocean current"	166	19
"offshore wind farm" NOT floating AND upwelling	15	5
"offshore wind farm" NOT floating AND "water column"	25	8
"offshore wind farm" NOT floating AND mixing	188	13
"offshore wind farm" NOT floating AND turbulen*	208	16
"offshore wind farm" NOT floating AND nutrient*	20	4
"offshore wind farm" NOT floating AND resuspension	3	3
"offshore wind farm" NOT floating AND "suspended particulate"	7	4
"offshore wind farm" NOT floating AND phytoplankton	13	4
"offshore wind farm" NOT floating AND "primary producti*"	13	6

Mens uttrykket "offshore wind farm" ser ut til å være det mest brukte, bruker noen forfattere litt andre begreper. Vi foretok derfor ytterligere søk med uttrykkene «offshore windfarm*», "offshore wind park*", "offshore wind" AND (facility ELLER facilities), samt "offshore wind power" og "offshore wind everygy" i kombinasjon med spesifikke nøkkelord som i tabell 1, noe som resulterte i en ekstra relevant artikkel.

Bruk av brede begreper som «offshore wind» skilte ikke med generelle studier som involverer vind langs kysten eller lignende, og resulterte derfor i for mange resultater som krevde ytterligere filtrering som ovenfor. Generelt var det høyeste antallet artikler assosiert med tekniske aspekter ved vindparkene (turbindesign, belastning og utmatting, parkdesign, operasjonelle aspekter), og

artikler som undersøkte atmosfæriske forhold (f.eks. blanding og oppstrømning i det atmosfæriske grenselaget, turbulens, påvirkning av atmosfærisk lagdeling) var flere enn marin-fokuserte studier. Totalt identifiserte det systematiske søket 46 unike, relevante artikler.

2. Siden Web of Science Core Collection ikke inkluderer potensielt relevante rapporter eller artikler i ikke-indekserte tidsskrifter, ble det utført et generelt søk på Google Scholar med lignende søkeord som det som er oppført i tabell 1. I tillegg ble tidligere kjente artikler, rapporter og tilleggskilder identifisert fra referanselister og i artikler generelt inkludert. Søkemønsteret ble videreført til det ble sirkulært og ingen nye relevante artikler ble identifisert.

Grå litteratur som rapporter, bøker og avhandlinger ble bare inkludert hvis de tilførte ytterligere innsikt utover rene litteraturgjennomganger, og hvis de rapporterte resultatene ikke ble publisert i senere fagfellevurderte artikler. Szostek et al. (2024) undersøkte den potensielle skjevheten i rapportering i grå- og primærlitteratur for Ocean Wind Farm (OWF)-relaterte studier og i) viste en skjevhet mot negative effekter i grå litteratur, ii) identifiserte manglende bevis i begge typer litteratur, iii) advarte om problemer knyttet til tilgjengelighet for både grå- og primærlitteratur og mangel på fagfellevurdering for grå litteratur. Siden mange oppdragsrapporter og dataene de er basert på ikke er offentlig tilgjengelige, har vi ikke utført et generelt søk etter slik litteratur utover Google Scholar og referanselistesøk.

Dette semi-systematiske søket identifiserte ytterligere 18 relevante artikler.

I valget av relevante artikler og rapporter inkluderte vi ikke studier utført på de store innsjøene i Nord-Amerika, sedimentbelastning i vannsøylen rundt fundamenter, eller studier fokusert på effektene av hydrodynamisk last, slitasje av sediment eller lignende stress på turbinstrukturer. Studier av potensielle virkninger av OWF-er i områder der vindparker er planlagt, men ikke etablert ennå (f.eks. Mediterranean Sea – Lloret et al., 2023; California Coast – Dalsin et al., 2025) ble heller ikke inkludert. På grunn av det eksplisitte fokuset på virkningen av operative OWF-er, ble ikke studier av påvirkninger og effekter under bygging eller avvikling vurdert. Vurderinger ble inkludert bare hvis de eksplisitt inkluderer en eller flere fysiske parametere, og ekskluderer dermed vurderinger som kun fokuserer på virkninger på marine arter (unntatt planteplankton).

Det finnes en stor mengde litteratur om strømmen forbi hindringer og generering av for eksempel von Kármán-virvler og turbulens, ved bruk av idealiserte væskedynamikkmodeller og laboratorieeksperimenter. Her inkluderer vi kun studier som direkte gjelder havvindrelaterte omgivelser.

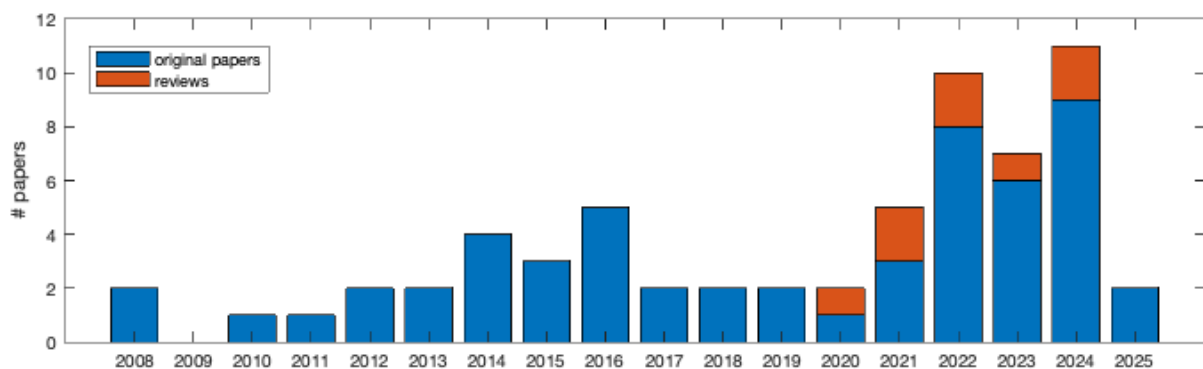
Som en forenkling vil vi i det følgende referere til «artikler» hvor både fagfellevurderte artikler, avhandlinger og rapporter er inkludert.

Tilgjengelighet av litteratur

Generell litteratur og bunnmonterte kontra flytende havvindparkstudier

Gitt den nylige etableringen av vindparker til havs, så har den vitenskapelig litteratur om miljøeffekter og påvirkninger så vidt å begynt å se dagens lys, spesielt når det gjelder det fysiske miljøet. Konsekvensstudier og vurderinger for karismatiske arter som sjøfugl og sjøpattedyr ble

utført allerede tidlig i utviklingen av havvindindustrien. Fysiske effekter har stort sett vært sentrert rundt de som er relevante for strukturelle integritetsbehov og utfordringer. Det store avviket mellom søketreff og lavt antall artikler som er relevante for problemstillingene som undersøkes her (tabell 1) skyldes den store mengden litteratur som er opptatt av ingeniørspørsmål og problemer hvor f.eks. strømmer, bølger eller sedimenter (spesielt skuring) undersøkes utelukkende på grunn av deres innvirkning på turbinstrukturen, levetid og effektivitet. Økningen i relevante artikler spesielt de siste fem årene (Figur 1), viser imidlertid at det haster med bedre forståelse av miljøpåvirkninger i lys av den akselererende, massive utvidelsen som er planlagt i store deler av det globale kystområdet.



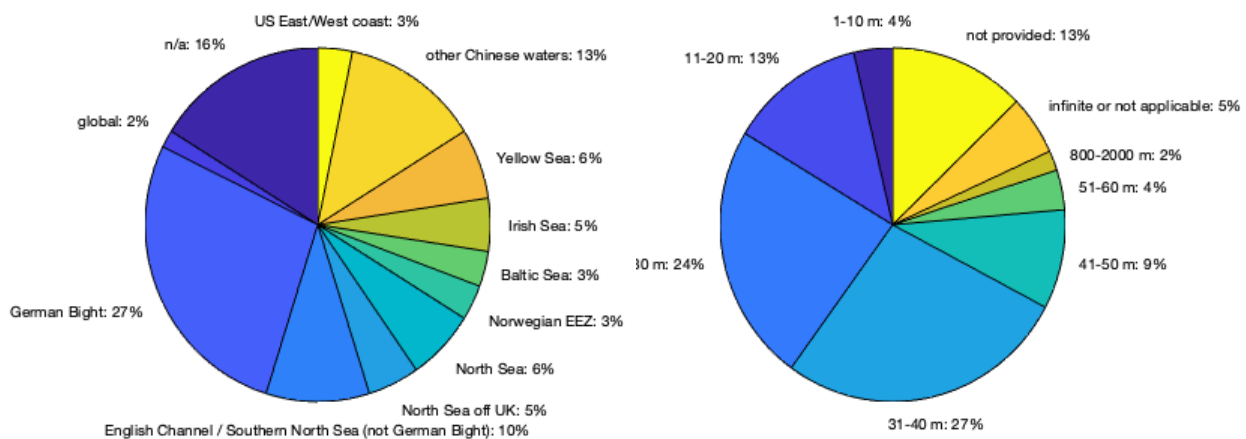
Figur 1: Antall artikler etter år.

Av de 63 identifiserte relevante artiklene var 8 review-artikler, 2 rapporter, 2 avhandlinger (1 PhD og en masteroppgave) og 51 originalartikler. En artikkel undersøkte turbulens fra en bropel, men er inkludert på grunn av dens relevans for vindturbinmonopæle i samme region. Litteratur om flytende havvindparker utover den tekniske litteraturen (en oversikt er gitt av Hong et al., 2024) er sterkt begrenset, noe som forventes gitt den begrensede tiden siden utviklingen startet. Kun en fagfelleurdert artikkel kunne identifiseres med målinger fra en flytende havvindpark (Hywind Scotland; Karlsson et al., 2022), men er ikke inkludert i oversikten på grunn av fokuset på hardbunnsfauna. De tre identifiserte relevante artiklene er enten oversikter eller originale studier på bunnmonterte turbiner med anvendelse på flytende havvindparker. En rekke konsekvensanalyser ble ekskludert på grunn av deres eksklusive økosystemfokus og manglende inkludering av det fysiske miljøet (f.eks. Lloret et al., 2022, 2023; Wawrzynkowski et al., 2025).

Geografisk fokus etter verdensregion, vanndybde og lagdelingsregime

Av de åtte review-artiklene hadde seks globalt fokus, én var fokusert på den amerikanske nordøstkysten (Mid-Atlantic Bight) og én på Nordsjøen og Østersjøen. Av de originale forskningsoppgavene var det bare én som hadde et globalt perspektiv. Mesteparten av forskningen ble utført i forskjellige deler av Nordsjøen, med overvekt på Tyskebukten som utgjorde fokuset i mer enn en fjerdedel av alle artikler (Figur 2). Nylig ble Kinesiske hav mer fremtredende.

Nesten alle artikler undersøkte bunnmonterte havvindmøller eller parker i grunt sokkelhav. Kombinert med den store prosentandelen av artikler som fokuserer på den sørlige Nordsjøen og Tyskebukten, var dybdeområdene inkludert i studiene derfor svært begrenset, med over halvparten av dem adressert til turbiner i dybdeområdet 21-40 m (Figur 2). Bare én studie undersøkte et dyphavsområde (800-2000 m; Raghukumar et al., 2023), selv om det var uklart fra artikkelen på hvilke dybder (flytende) turbiner ville bli montert. Noen av de analytiske eller idealiserte numeriske modellartiklene brukte teorier som antar uendelige havdyp, mens et stort antall andre idealiserte modellartikler ikke spesifiserte et dybdeområde i det hele tatt. Svært grunne dybder ble undersøkt i elvemunningsregioner som Yangtze- eller Pearl River-elvemunningene (Cai et al., 2023; Hong et al., 2024). To artikler tok for seg vindturbineffekter utenfor norskekysten på det tidligere foreslåtte stedet for vindparker ved Havsul og plasserte de modellerte turbinene på opptil 30 m dypt vann (Ponce De León et al., 2011; Segtnan & Christakos, 2015).



Figur 2: Relative proporsjoner av originale artikler (ikke inkludert peer-review) etter geografisk fokusområde (venstre) og maksimal vannsøyle/vindturbindybde vurdert i artikkelen (høyre).

Både geografiske områder og dybdeområder vurdert i litteraturen så langt er sterkt begrenset. Særlig dypere sokkelområder mangler undersøkelser hvilket gjelder den nordlige delen av Nordsjøen, men også andre europeiske sokkelregioner (f.eks. Atlanterhavssokkelen, Middelhavet), og dypere sokkelregioner globalt. Eksempler på potensielle miljøkonsekvensvurderinger finnes for noen av disse regionene (f.eks. Dalsin et al., 2025; Lloret et al., 2022, 2023; Wawrzynkowski et al., 2025), og de må utvides geografisk og følges opp av dedikerte modellerings- og observasjonsstudier.

Det geografiske fokuset på grunne sokkelregioner gjenspeiles i stratifiseringsregimene som er vurdert i litteraturen, med flertallet av studiene utført i sesongmessige lagdelte farvann som Tyskebukten (tabell 2). Ustratifiserte forhold er ofte påtruffet i de grunneste delene av sokkelen eller i elvemunninger, men også flere idealiserte eller analytiske modellstudier tok ikke hensyn til lagdeling. Sistnevnte var også en stor del av artiklene som ikke spesifiserte stratifiseringstilstand i sin studie, og den andre delen var hovedsakelig satellittstudier begrenset til havoverflatesignaler. Svært få artikler beskriver permanent lagdelt farvann; disse inkluderte

studier som undersøkte påvirkninger på den dype, saltholdige tilstrømningen til Østersjøen (Lass et al., 2008; Rennau et al., 2012) eller påvirkninger på oppstrømningssystemer (Raghukumar et al., 2023). Ellers presiserte artikler eksplisitt at modellene deres var satt opp med lagdelt strømning/stratifisert vannsøyle (f.eks. Bakhoday-Paskyabi, 2015; Broström, 2008; Schultze et al., 2020) eller observasjoner ble samlet under sommerstratifiserte forhold (f.eks. Floeter 20 et al.).

Datakilder og parametere behandlet i litteraturen

Datakildene som ble brukt i artiklene demonstrerte behovet for flere in situ observasjoner fra både innenfor og rundt havvindparker. Mindre enn 20 % av artiklene var utelukkende basert på in situ-observasjoner, mens mer enn halvparten baserte seg utelukkende på numeriske eller analytiske modeller og ytterligere 10 artikler kombinerte modeller med in situ-observasjoner og/eller satellittdata (tabell 2). Det er klart at tilgang til vindparkområdene er vanskelig å få, men avgjørende for validering og evaluering av modellytelser og resultater. Satellittbaserte studier gir informasjon om havoverflatens tilstand, men må kombineres med modeller eller in situ observasjoner for ytterligere innsikt i vannsøyleprosesser.

Hoveddrivere for potensielle effekter og påvirkninger fra havvindmøller og -parker er i) strukturen til turbinene, og ii) påvirkningen på vindfeltet både innenfor anlegget og nedstrøms (vindskygge). Spesielt i grunne sokkelhav kan tidevannsstrømmen være en tredje driver gjennom dens interaksjon med turbinstrukturene, men påvirkes også både av strukturene og vindfeltendringene (f.eks. Austin et al., 2025; Cazenave et al., 2016; Christiansen, Daewel, & Schrum, 2022, Ivanov, et al., 202 et al., 202 et al.). Mange av de idealiserte eller analytiske modelleringsstudiene fokuserte på strukturelle effekter, for eksempel ved å undersøke virvelgenerering eller turbulens bak monopeler (f.eks. Bailey et al., 2024; Grashorn & Stanev, 2016; Pang et al., 2024), men generelt sett er både effekter av strukturer og vindskygge relativt godt dekket (Tabell 2).

Tabell 2 viser fordelingen av artikler etter parametere som inngår i analysene av effekter og virkninger. Fremtredende temaer var stratifisering og vannmasseegenskaper, turbulens og blanding, og opp- og nedstrømning. På den annen side undersøkte svært få studier påvirkninger på næringssalter (distribusjon, transport, fluks) eller primærproduksjon, som allerede indikert av tabell 1. Vertikal fluks ble for det meste inkludert når man diskuterte vertikal vannbevegelse knyttet til turbulens og/eller opp- og nedstrømning. Gapet blir enda mer uttalt for stratifiserte forhold og observasjonsstudier.

Tabell 2: Antall originalartikler som adresserer forskjellige drivere og berørte parametere. Totalt antall artikler tildelt per kategori er oppgitt i parentes.

	Driver		Driver/ affected parameter	Affected parameter								
	turbine structure	wind wake	tidal current	turbulence / mixing	waves	water mass properties	stratifi- cation	up-/ down- welling	vertical flux	nutrients	resuspension / suspended particle load	phyto- plankton
Overall (#55)	39	28	31	17	13	17	22	17	10	4	15	10
By stratification												
stratified (#10)	5	7	4	4	2	7	8	5	2	1	0	0
seasonally stratified (#19)	12	12	14	8	2	9	14	9	7	2	4	4
unstratified (#8)	7	2	4	4	3	0	0	0	0	1	6	3
any (#3)	1	2	0	1	0	1	0	2	0	0	1	1
not specified (#15)	14	5	9	0	6	0	0	1	1	0	4	2
By data source												
observations (#10)	9	6	8	5	3	3	3	2	1	1	2	3
model (#30)	17	16	15	9	7	11	15	13	8	2	6	4
model & observations (#6)	5	3	4	2	1	2	4	1	0	1	1	1
satellite (#4)	3	2	1	0	0	1	0	1	0	0	3	1
satellite & model or observations (#3)	3	1	3	0	1	0	0	0	1	0	2	1
observations, model and satellite (#1)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
lab (#1)	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0

Offshore vindkraftverks effekter og påvirkninger på fysisk oseanografi, partikkelbelastning, næringstilførsel og planteplankton

Påvirkning på blanding og stratifisering

Det er godt etablert at peler som bropeler eller vindturbinfundamenter induserer turbulens og innblanding i en strøm forbi disse hindringene. Lass et al. (2008) målte denne blandingen i en lagdelt strømning forbi en bropel ved inngangen til Østersjøen, og demonstrerte fremveksten av virvler og von Kármán virvelgater og den påfølgende endringen i saltholdighet på grunn av oppblanding av saltholdig bunnvann og reduksjon av lagdeling. Rett nedstrøms ble dette deretter modellert av Rennau et al. (2012) for å undersøke den potensielle påvirkningen av vindkraftverk på tungt bunnvannstilsig til Østersjøen. De fant en mindre reduksjon av saltinnhold i bunnvannet under realistiske utviklingsscenarier for havvindparker som var innenfor området for naturlig variasjon. De advarte imidlertid om at omfattende dekning av den vestlige Østersjøen med vindparker til havs i betydelig grad kan endre bunnvannsegenskaper med potensiell innvirkning på ventilasjonen av selve Østersjøen.

Observasjoner langs transekter gjennom ikke-operative vindparker i Tyskebukten bekreftet redusert stratifisering og en doming (heving) av termoklinen i anleggene (Floeter et al., 2017). Schultze et al. (2020), også i Tyskebukten, var i stand til å identifisere forstyrrelse av bakgrunnstemperaturstrukturen i svak temperaturstratifisering på grunn av en monopole-kjøling ved å bruke en Conductivity-Temperature-Depth (CTD) og tidsseriedata fra en nærliggende fast plattform. Lagdeling ble redusert med 35 % 250 m nedstrøms, men så ut til å reetableres ved 500 m. De antydte at med sterk stratifisering ville signalet være innenfor den naturlige variasjonen. Fra store virvelsimuleringer av forskjellige stratifiseringsscenarier, estimerte de at havvindparker måtte være av størrelsesorden ~100 km for å forhindre dannelse av stratifisering. Turbulens og blanding var fokusert på et smalt område nedstrøms vindparken og bakgrunnsforholdene var dominert av naturlig turbulens og blanding. Austin et al. (2025) samlet inn høyfrekvente strøm- og turbulensmålinger i tidevannskjølvannet til en monopole i Irskesjøen. De viste virkningen av friksjon med havbunnen på hastighetsstrukturen i vannsøylen og påvirkningen på turbulens og blanding. De antydte potensielle implikasjoner for dannelse/sammenbrudd og styrken av lagdeling og havbunnsmobilitet.

I grunne sokkelhav er turbulens og blanding på grunn av strømning forbi vindturbinstrukturer ofte drevet av tidevann. Carpenter et al. (2016) kombinerte idealisert modellering med observasjoner for å vurdere betydningen av tidevannsdrevet blanding på (sesongbestemt) lagdeling i Tyskebukten. De fant at tidsskalaen for nedbrytningen av stratifisering ved blanding var sammenlignbar med sommerstratifiseringsperioden, noe som indikerer potensielle effekter for utviklingen av stratifisering på forsommeren. Ved nåværende kapasitet i Tyskebukten i Nordsjøen (fra november 2015), er blandingsnivåer forårsaket av vindkraftverk imidlertid lave. Med fremtidige scenarier der store deler av Tyskebukten vil bli fylt med vindparker, vil dette endre seg selv om det fører til potensielt signifikante reduksjoner i lagdelingen. Cazenave et al. (2016) brukte en numerisk havmodell med ustrukturert rutenett for Irskesjøen og Den engelske kanal-regionen for å vurdere virkningene av havvindparker i den østlige Irskesjøen. De fant lignende effekter der tidevannsstrøm forbi monopeler øker vertikal blanding, spesielt fører denne blandingen til oppadgående vannbevegelse nedstrøms for monopelen og nedadgående

bevegelse oppstrøms. Den påfølgende nedgangen i stratifisering er merkbar i et område på ca. 250 km² der ustratifiserte regioner ikke viser endringer, men stratifiserte regioner er betydelig påvirket. De foreslo potensielt store effekter med fremtidig vindparkutvikling, og effekter på næringsfordeling og økosystemer, i likhet med Carpenter et al. (2016). Christiansen et al. (2023) testet ulike implementeringsmetoder og parametriseringer for å modellere virkningen av turbinstrukturer på strømmer, blanding og lagdeling i Tyskebukten. De fant forskjellige signaler i dypt versus grunt vann som var relatert til vertikale tetthetsgradienter og blandingshastigheter i vannsøylen. Den monopol-induserte turbulensen førte til mer vertikalt blandet tetthet og horisontal hastighet, noe som forårsaket positive anomalier i områder med sterke vertikale gradienter og negative anomalier andre steder. I grunne områder med sterkere tidevann induserte tidevann større turbulens og dominerte over vinddrevne effekter ved havvindparker. Til tross for at turbulent blanding for det meste var lokal, ble temperaturstratifiseringen svekket eller kunne til og med kollapse over større romlige skalaer.

På overflaten av havet påvirker atmosfære-hav-interaksjon overflatetemperaturen. Atmosfærisk blanding er påvirket av havvindparker og kan derfor endre varmevekslingen ved hav-atmosfæregrensen. Wang & Prinn (2011) antydte i en global studie at vindparker til havs fører til avkjøling av overflatelufttemperatur på grunn av økt latent varmefluks fra havoverflaten til den nedre atmosfæren drevet av økt turbulent blanding fra vindturbinene, og dette kan igjen indikere en nedgang i havoverflatetemperaturen. Men Deng et al. (2024), som undersøkte atmosfære-havdynamikk i Sør-Kinahavet forbundet med utvikling av tropiske sykloner, fant at vindparkindusert vindskygge forårsaket en økning i havoverflatetemperaturen gjennom økt latent varmefluks fra atmosfæren til havet og redusert adveksjon av kaldere overflatevann inn i regionen, som igjen bidro til intensivering av en tropisk syklon. Disse tilsynelatende motstridende funnene viser viktigheten av regionale og sesongmessige forhold og prosesser for å endre retningen på påvirkningene.

Virkninger på horisontal sirkulasjon (inkludert tidevann)

Samspill mellom strøm og havvindparkstrukturer kan føre til reduksjon av strømhastighet. Christiansen et al. (2023) sine modelleksperimenter om påvirkningen av turbinstrukturer resulterte i en reduksjon av dybdemidlet strømhastighet innenfor offshore vindparker og nedstrøms, og påvirket hele Tyskebukten. Endringene var små sammenlignet med de gjennomsnittlige tidevannsstrømhastighetene, men utgjorde omtrent 10 % av midlere strøm, sammenlignbart med endringen grunnet vindskyggeeffekter (Christiansen, Daewel, Djath, et al., 2022; Christiansen, Daewel, & Schrum, 2022). Carpenter & Guha (2024) utledet tilsvarende reduksjon i en idealisert modellstudie som undersøkte blokkeringseffekten av havvindparker på middelstrømmen og effekten av forskjellige metoder for å implementere friksjon av turbinene. Det var stor variasjon i strømhastighetsreduksjoner avhengig av tetthet og geometri til turbinene i de enkelte vindparkene, hvor enkelte konfigurasjoner førte til ubetydelige effekter. Observasjoner av strøm og turbulens nær en havvindpark i Tyskebukten viste kun svake signaler i strømmene, men en sterkere respons i blanding og turbulens (Bakhoday-Paskyabi et al., 2018). Dette ligner på en modellstudie av Hosseini et al. (2025) som brukte en hydrodynamisk modell med ustrukturert-grid koblet til en bølgemodell for Tyskebukten. De fant en reduksjon på 5 % av

månedlig gjennomsnittlig strømhastighet (og betydelig bølgehøyde) ved interaksjon med turbinfundamenter under svakt lagdelte forhold om våren. I tillegg førte vindskyggen til en økning av turbulent kinetisk energi og påfølgende lagdeling nær monopelene. Interessant nok viste modellresultatene deres et annet mønster på regionale skalaer der strømhastigheten og lagdelingen økte litt utenfor vindparken. Endringer i strømhastighet påvirker sirkulasjon og transport av materiale, inkludert planktoniske organismer. Chen et al. (2024) undersøkte transport og spredning av kamskjelllarver på den nordøstlige sokkelen i USA og antydte at monopeler genererte en netto offshore mesoskalastrøm rundt turbiner som kunne forbedre offshore-transporten av larvene. Stratifisering spilte en stor rolle i strømendringen.

Påvirkning på oppvelling og nedsynking

Flere studier demonstrerte hvordan vindparker til havs endrer det lokale og regionale vindfeltet basert på målinger i luft (f.eks. Platis et al., 2018), fra satellitt (f.eks. Christiansen & Hasager, 2005) og modellering (f.eks. Akhtar et al., 2021), og beskrev og kvantifiserte vindhastighetsreduksjon innenfor og nedstrøms vindparker i såkalte vindskygger. I sin banebrytende artikkel ga Broström (2008) analytiske og idealiserte modellresultater for den oseaniske responsen på en havvindparkgenerert vindskygge. De fant at vindhastigheter på 5-10 m s⁻¹ med tilstrekkelig reduksjon i vindskyggen kan generere oppvelling og nedsynking i et dipolmønster grunnet Ekman-transport som resulterer i havoverflatedivergens og konvergens i vindskyggen. Dette krever imidlertid at bredden på vindskyggen er minst den indre Rossby-radiusen for deformasjon. Modellene deres estimerte vertikal bevegelse induert i størrelsesorden 1 m dag⁻¹, avhengig av vindstyrke og parkstørrelse, og de antydte potensielle målbare effekter på oseanisk sirkulasjon og dermed transport av næringssalter. Videre bemerket de at modellene deres ikke inkluderte effekter av interaksjoner med havbunnen og en skrånende batymetri, der vindparker kan gi ytterligere kraft til et barotropt (ikke-lagdelt) strømsystem. Flere modelleringsstudier bekreftet og utvidet Broström (2008) sine resultater, og demonstrerte også hvordan vindskyggeindusert oppvelling kan påvirke kystoppvelling og lagdeling (f.eks. Bakhoday-Paskyabi, 2015; Bakhoday-Paskyabi & Fer, 2012; Christiansen, Daewel, et al., Djath, et al. 2023).

Ludewig (2015), som modellerte vindkraftvirkninger i Tyskebukten, fant at vindene måtte blåse konsekvent fra en konstant retning med moderate hastigheter (5-10 m s⁻¹) i minst 8-10 timer for å indusere en opp-/nedgående dipol i havet, men da kunne disse opp-/nedgående cellene spenne over omtrent 30x30 km og vertikale hastigheter nådde opp til 3-4 m dag⁻¹, noe som førte til betydelige avvik av termoklinen med opptil 10 m og intensivert vertikal blanding. Christiansen, Daewel, Djath, et al. (2022) brukte en eksplisitt vindskyggeformulering for det atmosfæriske pådrivsfeltet på en ustrukturert-grid hydrodynamisk modell av den sørlige Nordsjøen for å undersøke vindskyggeeffekter fra alle idriftsatte vindparker på sommerstratifiserte forhold. Resultatene inkluderte en 5 % reduksjon i overflatahavstrømhastigheter, som tilsvarte opptil 10-25 % av den årlige og dekadiske variabiliteten, reduserte blandingsrater som førte til grunnere blandingslagsdyp. Dette motvirket blandingseffekten fra turbinstrukturene, men på forskjellige romlige skalaer, og dipoler i havoverflatehøyde som påvirket opp- og nedvelling på skalaer sammelignbare med effekter fra klimaendringer. Signalene var forskjellige etter sesong og styrken til den underliggende stratifiseringen. Selv om effekter var vanskelig å skille fra naturlig,

mellomårlig variasjon, kan strukturelle endringer i stratifisering etter opp-/nedstrømning og advektive prosesser grunnet omfattende havvindparkutvikling påvirke transportveier for næringsssalter og økosystemer. Tidevann kan ha potensial til å dempe vindskyggeeffekter, avhengig av tidevannsellipsens innretning med bakgrunnsstrømmer og vindpåvirkning (Christiansen, Daewel, & Schrum, 2022). Den store naturlige variasjonen, spesielt i svært dynamiske, tidevannspåvirkede systemer, gjør det ofte vanskelig å oppdage signaler i observasjoner. Likevel kunne Floeter et al. (2022) identifisere opp- og nedstrømningseffekter på pyknoklinen i observasjoner ved to vindparker i Tyskebukten ved å studere både operasjonelle og ikke-operative perioder. De rapporterte vertikale ekskursjoner av termoklinen og endringer i lagdeling knyttet til vindbølger og påvirket av tidevann. De advarte imidlertid også om at ytterligere vurdering var nødvendig for å trygt skille dette signalet fra naturlig variasjon.

I en studie lokalisert utenfor norskekysten har Segtnan & Christakos (2015) undersøkt effekten av vindbølger i en region med skrånende batymetri og dominert av en persistent kyststrøm. De fant en reduksjon i den horisontale strømmen og en endring i vertikal hastighet som ikke var rent Ekman-drevet, noe som bekrefter forslagene fra Broström (2008) og Bakhoday-Paskyabi & Fer (2012). I de grunne delene av modellen deres nådde overflaten av Ekman-laget til havbunnen, vertikal blanding resulterte i et barotropisk (ikke lagdelt) hav, og de foreslo at Coriolis-effekten skulle være ubetydelig for de horisontale skalaene som ble vurdert, noe som ville forhindre dannelse av dipoler som i Broström (2008). I en annen kystlokalitet med bratt batymetri utenfor kysten av California, modellerte Raghukumar et al. (2023) effektene av vindparker til havs med en størrelse som tilsvarer den lokale Rossby-radiusen og skalaen som kyst- og vindstress-virvlingdrevet oppvelling skjer ved i regionen. Vindparkene ble simulert på mye dypere vann enn andre studier, etter den foreslåtte etableringen av flytende parker på vanddyb på 800 til 2000 m. Resultatene deres indikerte beskjeden reduksjon i oppvelling på inshoresiden av vindparkene versus økt oppstrømning på offshoresiden grunnet Ekman-pumping. Disse endringene i oppvellingsstrukturen på tvers av land overskred naturlig variasjon og kan påvirke vannsøyleegenskaper og næringsflukser som er relevante for det lokale økosystemet.

Påvirkning på bølger

Havoverflatebølger påvirkes av vindparker til havs gjennom både interaksjon med strukturene og endringer i vindfeltet, og reduksjon av signifikant bølgehøyde og bølgeenergi innenfor og nedstrøms offshore vindparker, med synlige effekter så langt som 55 km, er direkte observert i Tyskebukten ved bruk av luftbårne LiDAR-målinger (Bärfuss et al., 2021). Ved å bruke en tank satt opp i et laboratorium, viste Miles et al. (2017) en reduksjon i bølgehøyde nedstrøms av en monopol på grunn av interaksjon med strukturen samtidig som bølgehøyden økte umiddelbart oppstrøms av pelen. Flere studier brukte SWAN-modellen (Simulating Waves Nearshore; Booij et al., 1999) for å undersøke bølgefeltet rundt havvindparker eller inkludere deres effekt på andre parametere. Nesten alle studier var fokusert på havoverflaten og tok ikke hensyn til potensiell lagdeling. Ponce De León et al. (2011) fant, som i laboratorieresultatene, en lignende reduksjon nedstrøms og svak økning oppstrøms en monopol. De fant at retningsbestemtheten til det innkommende bølgespekteret samt diffraksjon og refleksjon påvirket reduksjonen av bølgehøyde og bølgeenergi, slik at grupper av monopeler som i offshore vindparker kan føre til blokkering av

bølgeenergiforplantning. En annen faktor å vurdere kan være typen turbinstruktur som brukes: Mens de fleste modelleringsstudier undersøkte effekten av monopeler, så brukte Wang et al. (2021) fundamentet av kappetype og fant ganske lokaliserte effekter på bølger (innenfor og areal på 4-5 ganger diameteren til fundamentstrukturen) og strømmer (ca. 8 ganger peldiameteren). Van Der Molen et al. (2014) demonstrerte at parkavstand og størrelse (dvs. antall parker og areal dekket av dem) bestemte størrelsen på reduksjonen i signifikant bølgehøyde, og i alle simuleringer skjedde de største reduksjonene innenfor parkene, men med begrensede fjernfeltseffekter. Ytterligere endringer i bakgrunnsvindfelt hadde mindre effekter, men kunne dempe reduksjonen i signifikant bølgehøyde. Christensen et al. (2013) gjennomførte en parameterstudie av den relative betydningen av friksjonsmotstand på grunn av turbinstrukturene, refleksjon og diffraksjon, og endringen i vindfeltet for bølgeforholdene inne, rundt og nedstrøms i en havvindpark. De antydte at friksjonsmotstanden var liten og dermed ubetydelig sammenlignet med de andre effektene. I stedet kan refleksjon og diffraksjon fra strukturer ha bidratt med en tredjedel, og redusert vindskjær på grunn av vindfeltendringen forårsaket to tredjedeler av den lokale reduksjonen av bølgehøyden, mens lenger nedstrøms er redusert vindskjær hoveddriveren. Maksimal reduksjon av bølgehøyden var omtrent 5 %, noe som førte til en bølgeenergireduksjon på 10 %, og dette stemmer overens med andre studier. Christensen et al. (2013) advarte imidlertid eksplisitt om at resultatene deres gjelder vindparkstørrelsen som ble undersøkt i deres studie som ble modellert etter Horns Rev I utenfor Danmark i Nordsjøen, ca. 5x5 km i størrelse. De fleste studier fokuserte på struktur- eller vinddrevne endringer av bølgefeltet. Fischereit et al. (2022) fant gjennom koblet atmosfære-bølge-modellering at den bølgeinduserte overflateruheten bidro til et større vindhastighetsunderskudd i vindparker på grunn av økt turbulent blanding, som imidlertid også førte til en raskere nedbrytning og dermed mindre område av vindskyggen bak parken. Larsén et al. (2024) hadde motstridende resultater og advarte om at det er behov for bedre forståelse av atmosfære-bølge-vindskygge-interaksjonene for å sikre korrekt representasjon og parameterisering i modeller.

Påvirkning på næringsfordeling og planteplankton

Som angitt i tabell 2 er studier som direkte tar for seg næringssalter og planteplankton eller primærproduksjon begrenset. Vi kunne bare identifisere én studie som tok prøver av næringssalter og klorofyll a-konsentrasjoner ved en operativ vindpark (Floeter et al., 2017) og én prøvetaking av klorofyll a og planteplanktonmengde og artssammensetning (Hong et al., 2024). Floeter et al. (2017) gjennomførte en sommerundersøkelse i Tyskebukten, dvs. forhold med utarmet overflatenæring. De fant litt forhøyede silikat- og fosfatkonsentrasjoner i vindparken, sannsynligvis på grunn av den forbedrede vertikale blandingen av fundamentene (se ovenfor) som førte til redusert lagdeling og en oppbøyning av termoklinen. Samtidige klorofyll a-prøver viste ikke konklusive mønstre og viste i stedet store flekker og variasjoner. Hong et al. (2024) analyserte årelange observasjoner av vannkvalitetsindikatorer, inkludert temperatur, saltholdighet, pH, gjennomsiktighet, oppløst oksygen, klorofyll-a konsentrasjon av planteplankton og sammensetning, fra Pearl River-elvemunningen i Sør-Kinahavet, et tidevannssystem sterkt påvirket av ferskvannsavrenning, monsunesesongen og forekomsten av tropiske sykloner. De fant en reduksjon i klorofyll a-konsentrasjoner i vindparker og sammenlignet med nivåer før konstruksjon. Klorofyll-a-konsentrasjonene var imidlertid lave i vindparkregionen

sammenlignet med utenfor parken også før bygging. De antydte at dette skyldes en naturlig barriereeffekt av små øyer som omgir regionene og begrenser sirkulasjonen i området, og at denne effekten ble forsterket av vindparkene.

Floeter et al. (2022) og Plonus & Floeter (2024) antydte at turbulens, virvler, opp- og nedstrømninger induisert av havvindmølleparker kan påvirke primærproduksjonen og generere flekker av planteplankton. Effektene er imidlertid komplekse på grunn av samspillet med fysiske forhold som påvirker tilgjengeligheten av næringssalter, sedimentbelastningen som påvirker lysnivåene, og usikre påvirkninger av vindparker på beitedyr (zooplankton) og dermed ukjente topp-ned-kontroller på planteplankton. Van Der Molen et al. (2014) benyttet en biogeokjemisk modell til den sørlige Nordsjøen med vindparker utenfor den engelske kysten. De fant en økning i netto primærproduksjon etter reduksjoner i avsatte sedimentkonsentrasjoner og lysnedgang som resulterte i reduserte næringssaltkonsentrasjoner, økt sekundærproduksjon og økt vertikal eksport av organisk materiale til havbunnen. Øijorden (2016) med lignende modelloppsett, også for Nordsjøen, fant kun små endringer i absolutt produksjon, men endringer i romlig fordeling som var knyttet til stratifiseringsstyrke og blandingslagdybde. Ved å bruke en Ecopath-modell for det kystnære Gulehavet, beskrev Wang et al. (2019) også økt primærproduksjon, men fant i tillegg betydelige endringer i trofisk flyt og økosystemstruktur, og fremhevet de bredere implikasjonene av potensielle endringer ved bunnen av næringsnettene. Daewel et al. (2022) modellerte et scenario med havvindparkkapasitet i Nordsjøen tilsvarende forventede nivåer nådd i 2037. De antydte at mens vindskyggeeffekter fremkalte lokale endringer på $\pm 10\%$ i den årlige primærproduksjonen rundt vindparker og reduserte nivåer av oppløst oksygen i enkelte regioner, forble regionale gjennomsnitt av primærproduksjon nesten uendret. Imidlertid kan endringer i romlige mønstre av primærproduktivitet på grunn av endringer eller storskala sirkulasjon og næringstilførsel nedenfra, påvirke trofiske interaksjoner. Kombinert med endringer i resuspensjon av sediment kan dette påvirke eksporten av organisk karbon, noe som fører til en økning i organisk karbon i sedimenter i store deler av den sørlige Nordsjøen og reduserte oksygenkonsentrasjoner i bunnvannet gjennom enkelte områder.

Påvirkning på svevestøv i vannsøylen og resuspensjon

Mens et betydelig antall studier ble utført for å undersøke skuring rundt vindturbinfundamenter på grunn av innvirkningen på strukturell stabilitet og integritet, er litteraturen som vurderer sediment eller suspendert partikkelmateriale i vannsøylen begrenset. Overflatesignaturer eller sedimentbelastning i vindskyggen av havvindparker kan sees fra satellitt som har blitt brukt i flere artikler. Vanhellemont & Ruddick (2014) brukte for eksempel Landsat 8-bilder av vindparkområder utenfor elvemunningen til Themsen og sammenlignet lysstyrkespektra til vindparkskyggene med de som er forårsaket av skip. De fant at monopelene forårsaket grumsete vann som gikk parallelt med tidevannsstrømmen. I disse var konsentrasjonene av suspendert sediment betydelig høyere, og kjølvannene strakte seg til ca. 30-150 km i bredden og 1 til 10 km i lengde, avhengig av den tidsintegrerte strømmen siden siste tidevannsreversering og partikkelavsetningshastigheten. På grunn av kjølvannsstørrelsene antydte Vanhellemont & Ruddick (2014) at det kan være potensielle for vedvarende endringer så vel som implikasjoner for lysfeltet under vann som kan påvirke primærproduksjon og visuell predasjon, og for

sedimentasjonsmønstre. Bailey et al. (2024) kombinerte satellittidsserier med in situ observasjoner fra samme sted og demonstrerte at suspendert materiale var konsentrert i den øvre vannsøylen (overflaten og øvre 10 m) i kjølvannet, men den totale sedimentbelastningen var ikke forhøyet. De antydte at sirkulasjonsmønstrene rundt monopelene førte til omfordeling av materiale mot overflaten i stedet for ytterligere erosjon fra havbunnen rundt fundamentene. Dette var lik funn av Cai et al. (2023) i Yangtze-elvemunningen, men i kontrast til resultatene fra en tidligere studie i den sørlige Nordsjøen utenfor kysten av Belgia hvor Baeye & Fettweis (2015) rapporterte økt belastning av suspendert partikkelmateriale som stammet fra turbinfundamentene. Bailey et al. (2024) antydte at dette er forårsaket av forskjeller i sediment og strømegenskaper på de to lokalitetene. De indikerte også at sesong og mellomårlig variasjon i sedimentbelastning i kjølvannene er forenlig med variasjoner utenfor parkspåvirket vann og konsentrasjoner under driftsfasen hadde kommet seg til innenfor rekkeviden av observasjoner før konstruksjon. Brandao et al. (2023) hadde lignende resultater med høy naturlig variasjon i sedimentbelastning og komplekse miljødrivere som førte til at bare få satellittscener fanget opp vindparkrelaterte sedimentplumer utenfor den nederlandske kysten, noe som også stemmer overens med variabel deteksjon av satellittmålte klorofyll a-signaler i vindkjøling av Yu et al. (2024). Som foreslått av Bailey et al. (2024), viser modelleringsstudier også flekker i distribusjon og avsetning av sediment på grunn av von Kármán-virvler og submesoskala virvler (f.eks. Ivanov et al., 2021). Det har vært flere indikasjoner på at sedimentbelastning over tid påvirkes av at filterbeitere (organismer som ernærer seg ved å filtrere ut små partikler, som plankton, fra vannmassene) setter seg på turbinstrukturene, og effektivt endrer vannkvalitet, karbonfluks og næringsfordeling (f.eks. Baeye & Fettweis, 2015; Brandao et al., 2023; Ivanov et al., 2021 som påvirker primærproduksjonen i tillegg til, 01). Imidlertid fant Huang (2022) at grumsete kjølvann forårsaket av havvindparker i det østlige Taiwanstredet og utvidet til over 4 km, sannsynligvis bidro til en drastisk reduksjon i observasjoner av pukkeldelfiner sammenlignet med antallet før konstruksjon, og endret delfinenes habitat betraktelig. Ivanov et al. (2021) understreket viktigheten av plassering kontra parkstørrelse for den potensielle utbredelsen av sedimentskyer og innvirkning på verdifulle habitater og biodiversitets hotspots.

Konklusjon

Den eksisterende litteraturen gir en ganske god, oversikt over effekter av bunnmonterte havvindparker på fysiske forhold, inkludert lagdeling og hydrodynamikk i grunne, ustratifiserte eller sesongmessige lagdelte sokkelhav. Farr et al. (2021) konkluderte med at virkningene sannsynligvis ville være små til moderate. Van Berkel et al. (2020) advarte om at det gjenstår et betydelig kunnskapshull når det gjelder regionale effekter og identifisering av relevante romlige (og tidsmessige) skalaer. Diskusjonen i Miles et al. (2021) om potensielle effekter på den nordlige amerikanske østkysten fremhever mangelen på spesifikke studier for regioner som er relevante for utvikling av offshore vindindustri utenfor de grunne nordeuropeiske og kinesiske sokkelhavene og mangelen på informasjon om virkningen av regionale forhold som Mid-Atlantic Cool Pool (Miles et al., 2021), California kystoppvellingssystem (Raghukumar et al., 2023), eller de dypere sokkelhav generelt, inkludert norsk sokkel. Implikasjoner av forskjellige stratifiseringsregimer i dypere, ikke så mye tidevannspåvirkede regioner, skrånende topografi og topografisk styrte

bakgrunnsstrømmer, endringer i breddegrad som påvirker den lokale Rossby-radiusen, og barokliniske (lagdelt) versus barotrope (ikke lagdelt) forhold må utforskes.

Austin et al. (2025) fremhevet at den for tiden mest utbredte praksisen med å simulere effekten av turbinstrukturer ved å tilnærme dem som sylindriske monopeler innebærer en barotropisk respons. Flytende strukturer kan imidlertid forårsake barokliniske effekter på grunn av at strukturene ikke strekker seg hele veien gjennom vannsøylen. I tillegg vil ulike design av flytende turbiner (f.eks. Hong et al., 2024) føre til ulike responser på havstrømmer og tidevann avhengig av hvor dypt de når, deres diameter og deres motstand, og krever derfor dedikerte studier.

Modellering av monopeler i hydrodynamiske modeller er utfordrende på grunn av skalaene som kreves for å løse samspillet mellom strømningsfeltet og pelen, turbulensen, men også fjernfeltseffekter (påvirkning som skjer langt unna kilden). Studier som Pang et al. (2024) som innlemmer en dynamisk modell i generelle havsirkulasjonsmodeller er svært interessante, men krever validering mot passende observasjonsdata, som også er vanskelig å få tak i. Det er et kritisk behov for mer omfattende observasjonsdatasett av havdynamikk (strømmer, turbulens) og hydrografi (vertikale temperatur- og saltholdighetsprofiler og horisontal dekning) fra både nær turbinene, innenfor vindparkene og i de omkringliggende områdene, som dekker ulike tidsperioder, stratifiseringstilstander og årstider over flere år for å kunne vurdere virkningen av naturlige variasjonsrelaterte signaler på riktig måte.

Behovet for målinger og observasjoner er enda mer alvorlig for biogeokjemiske parametere og lavere trofiske nivåer (planteplankton, men også dyreplankton). Denne gjennomgangen demonstrerte mangelen på observasjoner og modelleringsstudier, noe som sterkt påvirker vår evne til å vurdere konsekvenser av endringer i hydrografi og sirkulasjon på næringsfordeling og tilgjengelighet, primærproduksjon og påfølgende effekter på marine økosystemer (Tweddle et al., 2018). Dette gjelder også påvirkninger på rollen til marine økosystemer for karbonbinding, spesielt i høyproduktive sokkelregioner, ettersom forståelsen av potensielle endringer i vertikal fluks og pelagisk-bentisk kobling på grunn av turbinindusert turbulens, endringer i lagdeling eller vindskyggeeffekter er sterkt begrenset og i utgangspunktet ikke eksisterer for dypere sokkelregioner. Review-artikler som Danovaro et al. (2024), Farr et al. (2021), Rezaei et al. (2023) og Watson et al. (2024) viser hvordan primærprodusenter, dyreplankton og mikrobiell aktivitet så langt har blitt neglisjert i de fleste konsekvensanalyser av økosystemer. Et større fokus må settes på sammenhengen mellom fysiske forhold og produktivitet ved bunnen av næringsnettet og potensielle nedenfra og opp-effekter på de høyere trofiske nivåene inkludert fisk, sjøpattedyr og sjøfugl. Ettersom utviklingen av vindkraftverk til havs strekker seg inn i nye regioner, må konsekvensvurderinger ta hensyn til variasjonen i økosystemer og deres funksjon utover tempererte sokkelhav på midlere breddegrad.

Referanser

- Akhtar, N., Geyer, B., Rockel, B., Sommer, P. S., & Schrum, C. (2021). Accelerating deployment of offshore wind energy alter wind climate and reduce future power generation potentials. *Scientific Reports*, 11(1), 11826. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91283-3>

- Austin, M., Unsworth, C., Van Landeghem, K., & Lincoln, B. (2025). Enhanced bed shear stress and mixing in the tidal wake of an offshore wind turbine monopile. *OCEAN SCIENCE*, 21(1), 81–91. <https://doi.org/10.5194/os-21-81-2025>
- Baeye, M., & Fettweis, M. (2015). In situ observations of suspended particulate matter plumes at an offshore wind farm, southern North Sea. *GEO-MARINE LETTERS*, 35(4), 247–255. <https://doi.org/10.1007/s00367-015-0404-8>
- Bailey, L., Dorrell, R., Kostakis, I., McKee, D., Parsons, D., Rees, J., Strong, J., Simmons, S., & Forster, R. (2024). Monopile-induced turbulence and sediment redistribution form visible wakes in offshore wind farms. *FRONTIERS IN EARTH SCIENCE*, 12. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1383726>
- Bakhoday-Paskyabi, M. (2015). Offshore Wind Farm Wake Effect on Stratification and Coastal Upwelling. *Energy Procedia*, 80, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.415>
- Bakhoday-Paskyabi, M., & Fer, I. (2012). Upper Ocean Response to Large Wind Farm Effect in the Presence of Surface Gravity Waves. *Energy Procedia*, 24, 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.06.106>
- Bakhoday-Paskyabi, M., Fer, I., & Reuder, J. (2018). Current and turbulence measurements at the FINO1 offshore wind energy site: Analysis using 5-beam ADCPs. *Ocean Dynamics*, 68(1), 109–130. <https://doi.org/10.1007/s10236-017-1109-5>
- Bärfuss, K., Schulz-Stellenfleth, J., & Lampert, A. (2021). The Impact of Offshore Wind Farms on Sea State Demonstrated by Airborne LiDAR Measurements. *JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND ENGINEERING*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/jmse9060644>
- Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- Brandao, I. L. S., Van Der Molen, J., & Van Der Wal, D. (2023). Effects of offshore wind farms on suspended particulate matter derived from satellite remote sensing. *Science of The Total Environment*, 866, 161114. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161114>
- Broström, G. (2008). On the influence of large wind farms on the upper ocean circulation. *Journal of Marine Systems*, 74(1–2), 585–591. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.05.001>
- Cai, L., Hu, Q., Qiu, Z., Yin, J., Zhang, Y., & Zhang, X. (2023). Study on the Impact of Offshore Wind Farms on Surrounding Water Environment in the Yangtze Estuary Based on Remote Sensing. *REMOTE SENSING*, 15(22). <https://doi.org/10.3390/rs15225347>
- Carpenter, J., & Guha, A. (2024). Blocking effects on mean ocean currents by offshore wind farm foundations. *PHYSICAL REVIEW FLUIDS*, 9(10). <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.9.103802>
- Carpenter, J. R., Merckelbach, L., Callies, U., Clark, S., Gaslikova, L., & Baschek, B. (2016). Potential Impacts of Offshore Wind Farms on North Sea Stratification. *PLOS ONE*, 11(8), e0160830. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160830>
- Cazenave, P., Torres, R., & Allen, J. (2016). Unstructured grid modelling of offshore wind farm impacts on seasonally stratified shelf seas. *PROGRESS IN OCEANOGRAPHY*, 145, 25–41. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2016.04.004>
- Chen, C., Zhao, L., Lin, H., He, P., Li, S., Wu, Z., Qi, J., Xu, Q., Stokesbury, K., & Wang, L. (2024). Potential impacts of offshore wind energy development on physical processes and scallop larval dispersal over the US Northeast shelf. *PROGRESS IN OCEANOGRAPHY*, 224. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2024.103263>
- Christensen, E. D., Johnson, M., Sørensen, O. R., Hasager, C. B., Badger, M., & Larsen, S. E. (2013). Transmission of wave energy through an offshore wind turbine farm. *Coastal Engineering*, 82, 25–46. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.08.004>
- Christiansen, M. B., & Hasager, C. B. (2005). Wake effects of large offshore wind farms identified from satellite SAR. *Remote Sensing of Environment*, 98(2–3), 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.009>

- Christiansen, N., Carpenter, J. R., Daewel, U., Suzuki, N., & Schrum, C. (2023). The large-scale impact of anthropogenic mixing by offshore wind turbine foundations in the shallow North Sea. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1178330. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1178330>
- Christiansen, N., Daewel, U., Djath, B., & Schrum, C. (2022). Emergence of Large-Scale Hydrodynamic Structures Due to Atmospheric Offshore Wind Farm Wakes. *Frontiers in Marine Science*, 9, 818501. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.818501>
- Christiansen, N., Daewel, U., & Schrum, C. (2022). Tidal mitigation of offshore wind wake effects in coastal seas. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1006647. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1006647>
- 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(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00625-0>
- Dalsin, M., Walter, R., & Mazzini, P. (2025). Offshore wind farms could impact coastal marine heatwaves in eastern boundary upwelling systems. *ESTUARINE COASTAL AND SHELF SCIENCE*, 313. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2024.109102>
- Danovaro, R., Bianchelli, S., Brambilla, P., Brussa, G., Corinaldesi, C., Del Borghi, A., Dell'Anno, A., Frascchetti, S., Greco, S., Grosso, M., Nepote, E., Rigamonti, L., & Boero, F. (2024). Making eco-sustainable floating offshore wind farms: Siting, mitigations, and compensations. *RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114386>
- Deng, S., Chen, S., Sui, Y., & Hu, Z. (2024). Intensification of an Autumn Tropical Cyclone by Offshore Wind Farms in the Northern South China Sea. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-ATMOSPHERES*, 129(21). <https://doi.org/10.1029/2024JD041489>
- European Commission, Directorate-General for Energy. (2023). *Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions, delivering on the EU offshore renewable energy ambitions* (Technical Report COM(2023) 668, Document 52023DC0688,). European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2020:741:FIN&qid=1605792629666>
- Farr, H., Ruttenberg, B., Walter, R. K., Wang, Y.-H., & White, C. (2021). Potential environmental effects of deepwater floating offshore wind energy facilities. *Ocean & Coastal Management*, 207, 105611. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105611>
- Fischereit, J., Larsen, X., & Hahmann, A. (2022). Climatic Impacts of Wind-Wave-Wake Interactions in Offshore Wind Farms. *FRONTIERS IN ENERGY RESEARCH*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.881459>
- Floeter, J., Pohlmann, T., Harmer, A., & Moellmann, C. (2022). Chasing the offshore wind farm wind-wake-induced upwelling/downwelling dipole. *FRONTIERS IN MARINE SCIENCE*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.884943>
- Floeter, J., Van Beusekom, J. E. E., Auch, D., Callies, U., Carpenter, J., Dudeck, T., Eberle, S., Eckhardt, A., Gloe, D., Hänselmann, K., Hufnagl, M., Janßen, S., Lenhart, H., Möller, K. O., North, R. P., Pohlmann, T., Riethmüller, R., Schulz, S., Spreizenbarth, S., ... Möllmann, C. (2017). Pelagic effects of offshore wind farm foundations in the stratified North Sea. *Progress in Oceanography*, 156, 154–173. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.07.003>
- Grashorn, S., & Stanev, E. V. (2016). Kármán vortex and turbulent wake generation by wind park piles. *Ocean Dynamics*, 66(12), 1543–1557. <https://doi.org/10.1007/s10236-016-0995-2>
- Hong, S., McMorland, J., Zhang, H., Collu, M., & Halse, K. (2024). Floating offshore wind farm installation, challenges and opportunities: A comprehensive survey. *OCEAN ENGINEERING*, 304. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117793>

- Hosseini, S., Pein, J., Staneva, J., Zhang, Y., & Stanev, E. (2025). Impact of offshore wind farm monopiles on hydrodynamics interacting with wind-driven waves. *OCEAN MODELLING*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2025.102521>
- Huang, S. (2022). Unstated impacts of the green energy industry on the habitat of a coastal delphinid: Turbid-turbulent wakes induced by offshore wind turbine foundations. *AQUATIC CONSERVATION-MARINE AND FRESHWATER ECOSYSTEMS*, 32(11), 1787–1796. <https://doi.org/10.1002/aqc.3888>
- Ivanov, E., Capet, A., De Borger, E., Degraer, S., Delhez, E., Soetaert, K., Vanaverbeke, J., Grégoire, M., Delhez, E., Soetaert, K., Vanaverbeke, J., & Grégoire, M. (2021). Offshore Wind Farm Footprint on Organic and Mineral Particle Flux to the Bottom. *FRONTIERS IN MARINE SCIENCE*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.631799>
- Karlsson, R., Tivefålh, M., Duranovic, I., Martinsson, S., Kjolhamar, A., & Murvoll, K. (2022). Artificial hard-substrate colonisation in the offshore Hywind Scotland Pilot Park. *WIND ENERGY SCIENCE*, 7(2), 801–814. <https://doi.org/10.5194/wes-7-801-2022>
- Larsén, X., Fischereit, J., Hamzeloo, S., Bärfuss, K., & Lampert, A. (2024). Investigation of wind farm impacts on surface waves using coupled numerical simulations☆. *RENEWABLE ENERGY*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121671>
- Lass, H., Mohrholz, V., Knoll, M., & Prandke, H. (2008). Enhanced mixing downstream of a f in an estuarine flow. *JOURNAL OF MARINE SYSTEMS*, 74(1–2), 505–527. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.04.003>
- Liu, K., Du, J., Larsén, X., & Lian, Z. (2023). Spatiotemporal Variations of Ocean Upwelling and Downwelling Induced by Wind Wakes of Offshore Wind Farms. *JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND ENGINEERING*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/jmse11102020>
- Lloret, J., Turiel, A., Solé, J., Berdalet, E., Sabatés, A., Olivares, A., Gili, J.-M., Vila-Subirós, J., & Sardá, R. (2022). Unravelling the ecological impacts of large-scale offshore wind farms in the Mediterranean Sea. *Science of The Total Environment*, 824, 153803. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153803>
- Lloret, J., Wawrzynkowski, P., Dominguez-Carrió, C., Sardá, R., Molins, C., Gili, J., Sabatés, A., Vila-Subirós, J., Garcia, L., Solé, J., Berdalet, E., Turiel, A., & Olivares, A. (2023). Floating offshore wind farms in Mediterranean marine protected areas: A cautionary tale. *ICES JOURNAL OF MARINE SCIENCE*. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsad131>
- Ludewig, E. (2015). *On the Effect of Offshore Wind Farms on the Atmosphere and Ocean Dynamics* (Vol. 31). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08641-5>
- McCoy, A., Musial, W., Hammond, R., Mulas Hernando, D., Duffy, P., Beiter, P., Perez, P., Baranowski, R., Reber, G., & Spitsen, P. (2024). *Offshore Wind Market Report: 2024 Edition* (NREL/TP-5000-90525). National Renewable Energy Laboratory. <https://doi.org/10.2172/2434294>
- Miles, J., Martin, T., & Goddard, L. (2017). Current and wave effects around windfarm monopile foundations. *Coastal Engineering*, 121, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.01.003>
- Miles, T., Murphy, S., Kohut, J., Borsetti, S., & Munroe, D. (2021). Offshore Wind Energy and the Mid-Atlantic Cold Pool: A Review of Potential Interactions. *MARINE TECHNOLOGY SOCIETY JOURNAL*, 55(4), 72–87.
- Øijorden, I. (2016). *Influence of offshore wind farms on primary production in the North Sea*.
- Pang, J., Ge, J., Tao, Y., Zhou, Q., & Zhou, Z. (2024). Simulating cross-scale flow dynamics around offshore monopile foundations with a GFD-CFD coupled model. *OCEAN ENGINEERING*, 312. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119200>
- Platis, A., Siedersleben, S. K., Bange, J., Lampert, A., Bärfuss, K., Hankers, R., Cañadillas, B., Foreman, R., Schulz-Stellenfleth, J., Djath, B., Neumann, T., & Emeis, S. (2018). First in situ

- evidence of wakes in the far field behind offshore wind farms. *Scientific Reports*, 8(1), 2163. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20389-y>
- Plonus, R., & Floeter, J. (2024). Identification of plankton habitats in the North Sea. *ECOLOGY AND EVOLUTION*, 14(10). <https://doi.org/10.1002/ece3.70342>
- Ponce De León, S., Bettencourt, J. H., & Kjerstad, N. (2011). Simulation of irregular waves in an offshore wind farm with a spectral wave model. *Continental Shelf Research*, 31(15), 1541–1557. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2011.07.003>
- Pullin, A. S., & Stewart, G. B. (2006). Guidelines for Systematic Review in Conservation and Environmental Management. *Conservation Biology*, 20(6), 1647–1656. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00485.x>
- Raghukumar, K., Nelson, T., Jacox, M., Chartrand, C., Fiechter, J., Chang, G., Cheung, L., & Roberts, J. (2023). Projected cross-shore changes in upwelling induced by offshore wind farm development along the California coast. *COMMUNICATIONS EARTH & ENVIRONMENT*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00780-y>
- Rennau, H., Schimmels, S., & Burchard, H. (2012). On the effect of structure-induced resistance and mixing on inflows into the Baltic Sea: A numerical model study. *COASTAL ENGINEERING*, 60, 53–68. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.08.002>
- Rezaei, F., Contestabile, P., Vicinanza, D., & Azzellino, A. (2023). Towards understanding environmental and cumulative impacts of floating wind farms: Lessons learned from the fixed-bottom offshore wind farms. *OCEAN & COASTAL MANAGEMENT*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106772>
- Schultze, L., Merkelbach, L., Horstmann, J., Raasch, S., & Carpenter, J. (2020). Increased Mixing and Turbulence in the Wake of Offshore Wind Farm Foundations. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-OCEANS*, 125(8). <https://doi.org/10.1029/2019JC015858>
- Segtnan, O. H., & Christakos, K. (2015). Effect of Offshore Wind farm Design on the Vertical Motion of the Ocean. *Energy Procedia*, 80, 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.424>
- Slavik, K., Lemmen, C., Zhang, W., Kerimoglu, O., Klingbeil, K., & Wirtz, K. W. (2019). The large-scale impact of offshore wind farm structures on pelagic primary productivity in the southern North Sea. *Hydrobiologia*, 845(1), 35–53. <https://doi.org/10.1007/s10750-018-3653-5>
- Szostek, C. L., Edwards-Jones, A., Beaumont, N. J., & Watson, S. C. L. (2024). Primary vs grey: A critical evaluation of literature sources used to assess the impacts of offshore wind farms. *Environmental Science & Policy*, 154, 103693. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103693>
- TCE. (2022). *Offshore Wind Report* [Technical report]. The Crown Estate. https://www.thecrownestate.co.uk/media/4378/final-published_11720_owoperationalreport_2022_tp_250423.pdf
- Tweddle, J. F., Gubbins, M., & Scott, B. E. (2018). Should phytoplankton be a key consideration for marine management? *Marine Policy*, 97, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.08.026>
- Van Berkel, J., Burchard, H., Christensen, A., Mortensen, L., Petersen, O., & Thomsen, F. (2020). The Effects of Offshore Wind Farms on Hydrodynamics and Implications for Fishes. *Oceanography*, 33(4), 108–117. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.410>
- Van Der Molen, J., Smith, H. C. M., Lepper, P., Limpenny, S., & Rees, J. (2014). Predicting the large-scale consequences of offshore wind turbine array development on a North Sea ecosystem. *Continental Shelf Research*, 85, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.05.018>
- Vanhellemont, Q., & Ruddick, K. (2014). Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8. *Remote Sensing of Environment*, 145, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.009>
- Wang, C., & Prinn, R. G. (2011). Potential climatic impacts and reliability of large-scale offshore wind farms. *Environmental Research Letters*, 6(2), 025101. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/2/025101>

- Wang, H., Fang, H., & Chiang, Y. (2021). Study on the Coexistence of Offshore Wind Farms and Cage Culture. *WATER*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/w13141960>
- Wang, J., Zou, X., Yu, W., Zhang, D., & Wang, T. (2019). Effects of established offshore wind farms on energy flow of coastal ecosystems: A case study of the Rudong offshore wind farms in China. *OCEAN & COASTAL MANAGEMENT*, 171, 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.01.016>
- Watson, S., Somerfield, P., Knights, A., Edwards-Jones, A., Nunes, J., Pascoe, C., McNeill, C., Schratzberger, M., Thompson, M., Couce, E., Szostek, C., Baxter, H., & Beaumont, N. (2024). The global impact of offshore wind farms on ecosystem services. *OCEAN & COASTAL MANAGEMENT*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107023>
- Wawrzynkowski, P., Molins, C., & Lloret, J. (2025). Assessing the potential impacts of floating Offshore Wind Farms on policy-relevant species: A case study in the Gulf of Roses, NW Mediterranean. *MARINE POLICY*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.106518>
- Yu, W., Guo, P., Du, J., & Lian, Z. (2024). Detecting offshore wind farm-induced wind wake signatures on sea surface using MODIS data. *FRONTIERS IN MARINE SCIENCE*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1465634>