



Notat om scenarier for havvindudbygning frem mod 2050

Nærværende notat beskriver scenarier for den danske udbygning af havvind i 2050, som lægges til grund for vurderingen af de kumulative effekter i Screeningen af Danmarks havvindspotentiale (FL22 screeningen) – herefter 'Følsomhedskortlægningen'. Det er vigtigt at understrege, at scenarierne er udviklet specifikt til nærværende opgave, og dermed ikke er udtryk for Energistyrelsens officielle holdning til den kommende havvindudbygning i de danske farvande.

Den nationale havvindudbygning frem mod 2050

Der er ikke konkrete planer for havvindudbygning ud over de allerede besluttede 6 GW som udbygges i 2024-25 samt Energjø Bornholm og Energjø Nordsøen. Til brug for simuleringer i DTU Vind's meso-scale vindmodel er der derfor udviklet fire hypotetiske scenarier for udbygning efter disse parker. Scenarierne koncentrerer sig om mulige konfigurationer (størrelse, tæthed og placering) af havvindmølleparker i Nordsøen, som er det største sammenhængende areal og derfor mest udsat for skyggeeffekter mellem parker. Den antagne udbygning i de indre farvande ændres således ikke fra scenarie til scenarie. Den yderligere udbygning frem mod 2050 i Nordsøen kan potentielt tage sig ud på mange måder, idet det udlagte areal til VE-produktion er langt større end de nuværende politiske ambitioner for havvindudbygningen.

De hypotetiske scenarier afspejler væsensforskellige tilgange til havvindudbygningen, idet de er baseret på vidt forskellige strategier for reduktion af hhv. skyggeeffekter mellem parker og investeringsomkostningerne, og udspænder således et udfaldsrum for udbygningen. Der er således tale om plausible scenarier, selvom fremtidens virkelige udbygning sandsynligvis vil komme til at bestå af en blanding af de mulige layouts.

Scenariernes overordnede koncepter er beskrevet i nedenstående tabel.

Scenarie	Strategi for minimering af skyggeeffekter	Strategi for minimering af investeringsomkostninger	Mulige tekniske havvindkoncepter i scenariet
Scenarie 1 'Store og spredte parker'	Lav effektæthed (5,2 MW/km ²) Spredte parker	Parkerne er placeret på lavbundede arealer, som reducerer	Hubs og relativt store parker. I alt 35 GW i Nordsøen.

Energistyrelsen

Carsten Niebuhrs Gade 43
1577 København V

T: +45 3392 6700
E: ens@ens.dk

www.ens.dk



		omkostninger til fundamentet.	
<u>Scenarie 2</u> 'Mindre parker med høj effekttæthed'	Mindre parkstørrelser – men høj effekttæthed [10 MW/km ²] Spredte parker, som ligger forskudt af hinanden	Høj tæthed reducerer omkostninger til kabler internt i parken (array kabler).	Mindre parker – ikke velegnet til hubs. I alt 35 GW i Nordsøen.
<u>Scenarie 3</u> 'Nærhed til dansk og tysk kyst'	Lav effekttæthed (5 MW/km ²)	Nærhed til kysten reducerer omkostninger til ilandføring af havvinden (AC/ DC-kabler)	Hubs og parker ilandført i Tyskland og Danmark. I alt 35 GW i Nordsøen.
<u>Scenarie 4</u> 'Skyggeeffekter på vej til de 35 GW'	Defineres på baggrund af læringen fra ovenstående scenarier.	Endnu ikke defineret.	Ikke endeligt defineret, men muliggør undersøgelse af skyggeeffekterne i en udbygning med mindre end 35 GW i Nordsøen, som et 'trin på vejen'.

2050-scenarierne medtager samtlige parker, der allerede er inkluderet i følsomhedskortlægningens 2030-scenarie¹. Det antages, at udbygningen med havvind fra 2030 til 2050 vil finde sted i Nordsøen, og at kapaciteten i de øvrige farvande vil være konstant i samme periode.

Strategier for minimering af skyggeeffekter

DTU Vinds tidligere forskning af skyggeeffekter inden for enkelte vindmølleparker peger på, at der ved storskala udbygning af havvind kan være to strategier for at reducere skyggeeffekter:

1. Bygge mindre parker med høj tæthed
2. Bygge større parker med lav tæthed

¹ Der er ikke taget højde for evt. nedlagte parker i 2050. Dette skyldes, at vi på nuværende tidspunkt ikke ved hvorvidt parkerne får levetidsforlængelse eller bliver erstattet af nye møller.



De to strategier er dog endnu ikke undersøgt ved simuleringer af geografiske placeringer i DTU's meso-scale vindmodel, hvor skyggeeffekter mellem parker undersøges. Således kan de udvalgte scenarier også understøtte den internationale forskning på området.

Strategier for minimering af investeringsomkostninger

Følgende strategier er anvendt for minimering af parkernes investeringsomkostninger:

1. Anvendelse af lavbundede arealer reducerer omkostninger til fundamenter.
2. Høj tæthed reducerer omkostninger til kabler internt i parken.
3. Nærhed til kysten reducerer omkostninger til ilandføring af havvinden.

Generelt kan skyggeeffekternes påvirkning af parkernes økonomi langt overstige f.eks. øgede omkostninger til kabler. Alligevel er det relevant også at skele til, hvorledes udbygningen kan ske på en økonomisk rationel måde, således at de udvalgte scenarier i højere grad vil være relevante for virkelighedens verden.

Kapaciteter

Der tages i scenarie 1-3 udgangspunkt i ambitionerne i den langsigtede politiske aftale *Danmark kan mere II* (Klimaaftale om grøn strøm og varme 2022), hvor der for den danske del af Nordsøen skal udnyttes mindst 35 GW havvind. Det fjerde scenarie undersøger en mulig fremtid, hvor der bygges mindre havvind i dansk farvand. Det er endnu ikke udviklet, men skal defineres på baggrund af læring fra de tre første scenarier. Fælles for alle scenarierne er, at parkerne er placeret i Havplanens udlagte VE-områder (anno 2024) og uden for de eksisterende sejladsruter.

Scenarie 1 – store og spredte parker

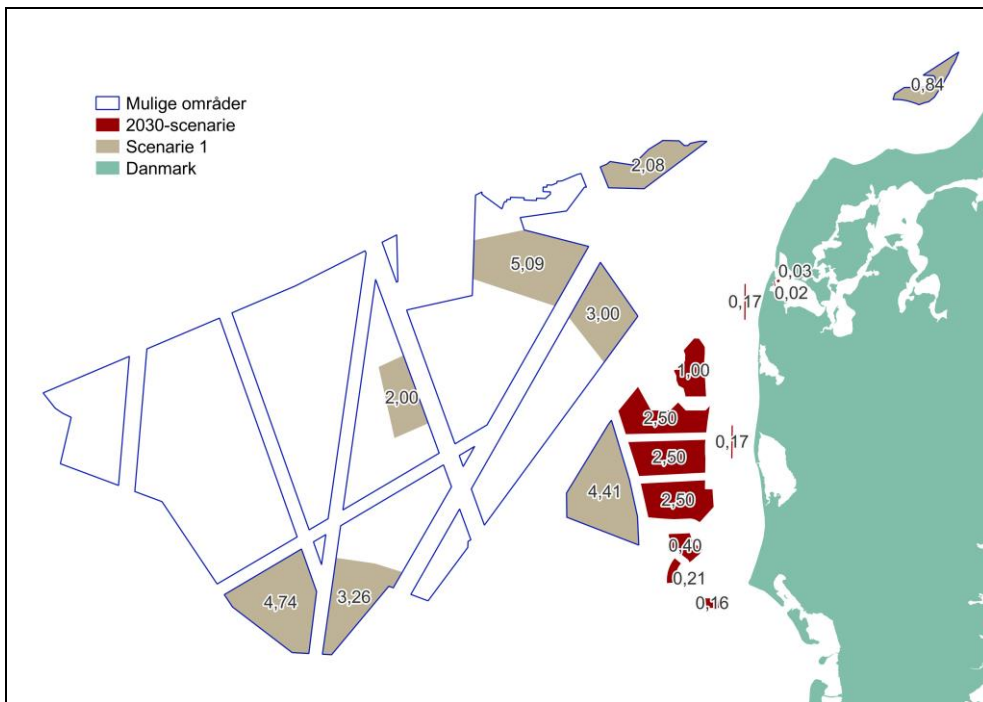
Dette scenarie undersøger den første strategi for reduktion af skyggeeffekter: større parker med lav effekttæthed. Parkerne er primært placeret på lavbundede områder for at reducere omkostningerne til vindmøllernes fundamenter; herunder Dogger Banke, Vikinge Banke, Jyske Banke og dele af Nordsøen III. Scenariet anvender ligeledes Nordsøarealer indenfor 70 km fra den jyske vestkyst, da dette giver lavere omkostninger til ilandføring af strømmen i Danmark. Det antages, at parkerne længere fra kysten vil kunne indgå i mere eksportorienterede projekter, såsom radiale parker til udlandet og hubkoncepter.

Hensyn til vindressourcen

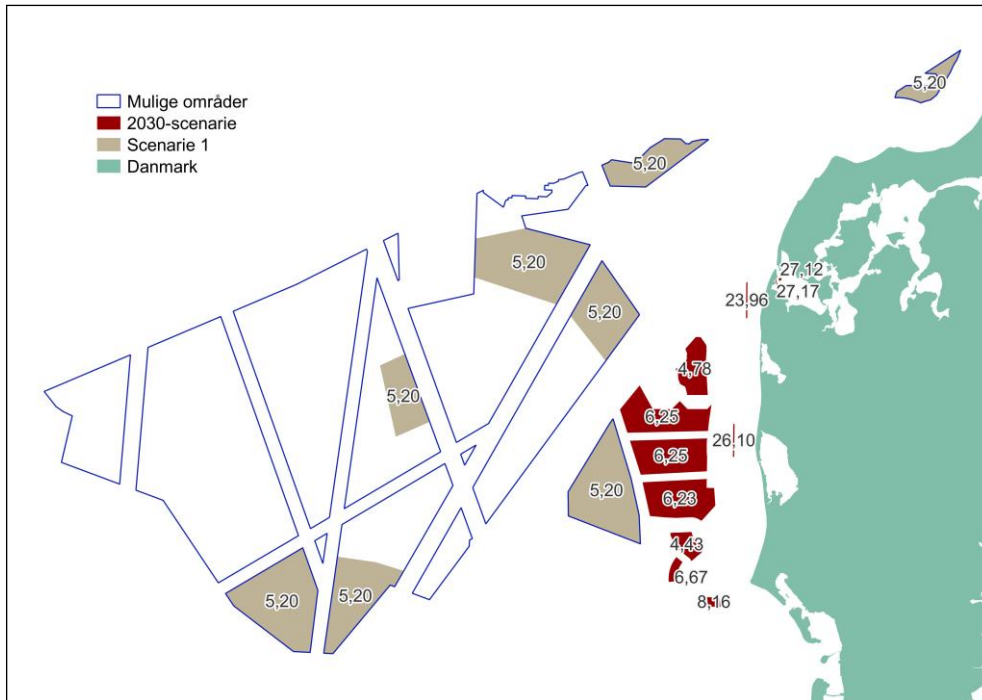
Der er valgt relativt store parkstørrelser, som er spredt ud på det danske havareal. Der er til en vis grad taget højde for den dominerende vindretning (hhv. sydvest, vest og nordvest) på de konkrete arealer, således at parkerne så vidt muligt vender vinkelret på denne, og dermed opnår mindre skyggetab inden for parken. Den fremherskende vindretning i den danske del af Nordsøen går fra sydvest i syd til nordvest i nord.



Scenariet søger dog ikke at minimere potentielle skyggeeffekter mellem udenlandske og danske parker. Tværtimod vil placeringen på Dogger Banke sandsynligvis i høj grad påvirkes af skyggeeffekter fra de tyske parker. Simuleringerne vil give et bud på kvantificering af skyggeeffekten på tværs af dansk og tysk havterritoire for denne placering.



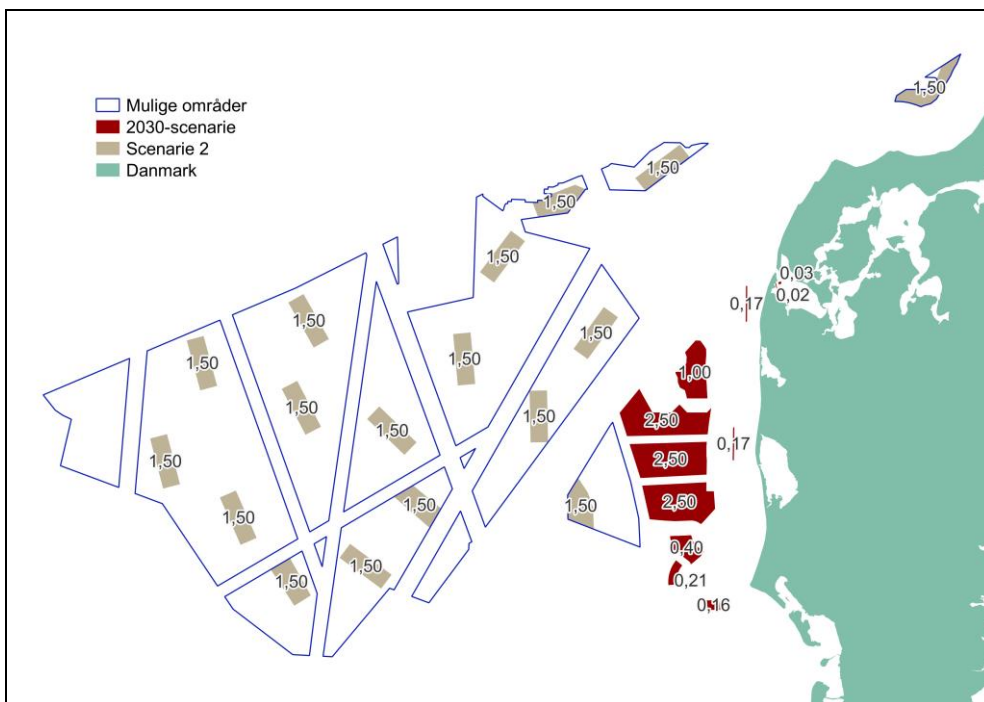
Figur 2 Kapaciteter i Scenarie 1



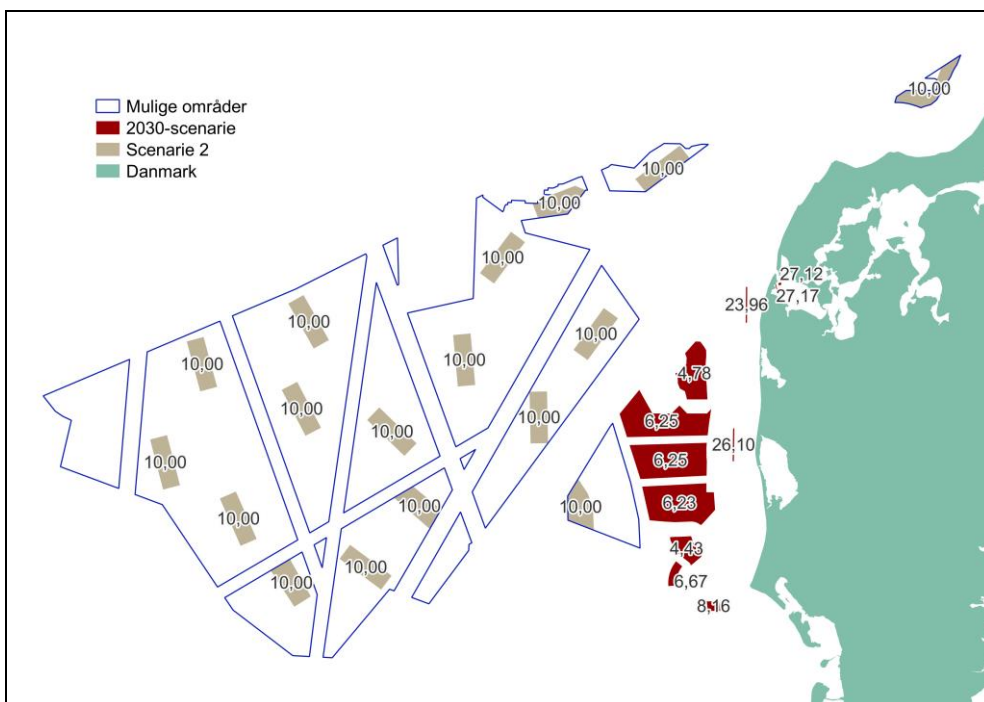
Figur 3 Effekttætheder i Scenarie 1

Scenarie 2 'Mindre parker med høj effekttæthed'

Dette scenarie undersøger den anden strategi for reduktion af skyggeeffekter: mindre parker med høj effekttæthed. Derudover er parkerne placeret forskudt af hinanden, så de i mindre grad skygger for hinanden – og så vidt muligt vinkelret på den fremherskende vindretning i de enkelte områder. Kapaciteterne og effekttætheden af de enkelte parker fremgår af figur 4 og 5.



Figur 4 Kapaciteter i Scenarie 2



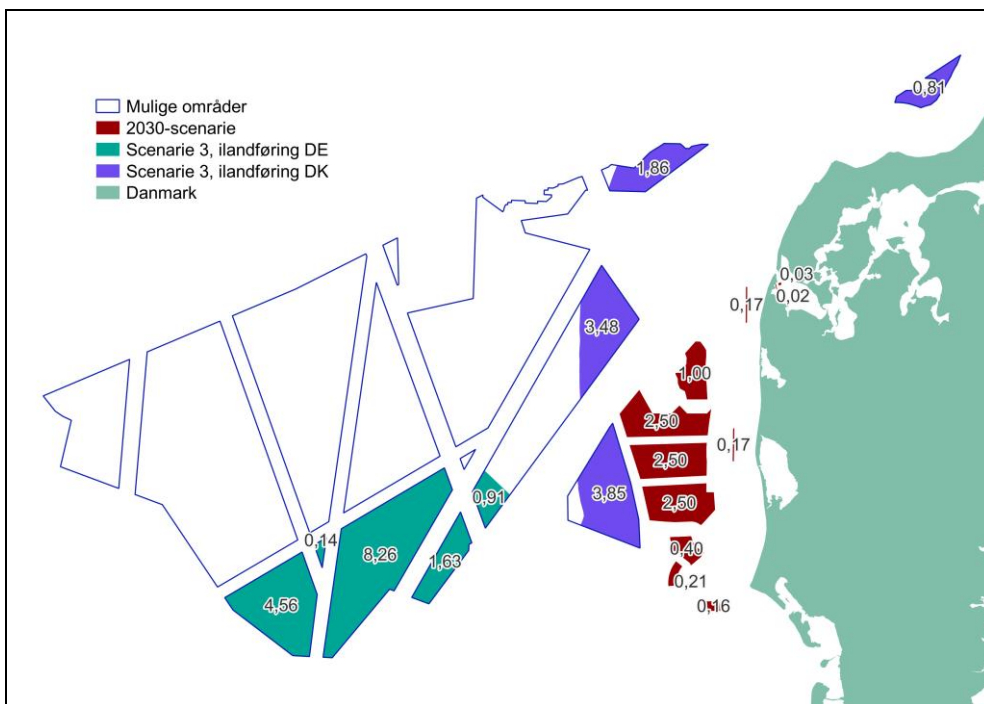
Figur 5 Effekttætheder i Scenarie 2

Scenarie 3 'Nærhed til dansk og tysk kyst'

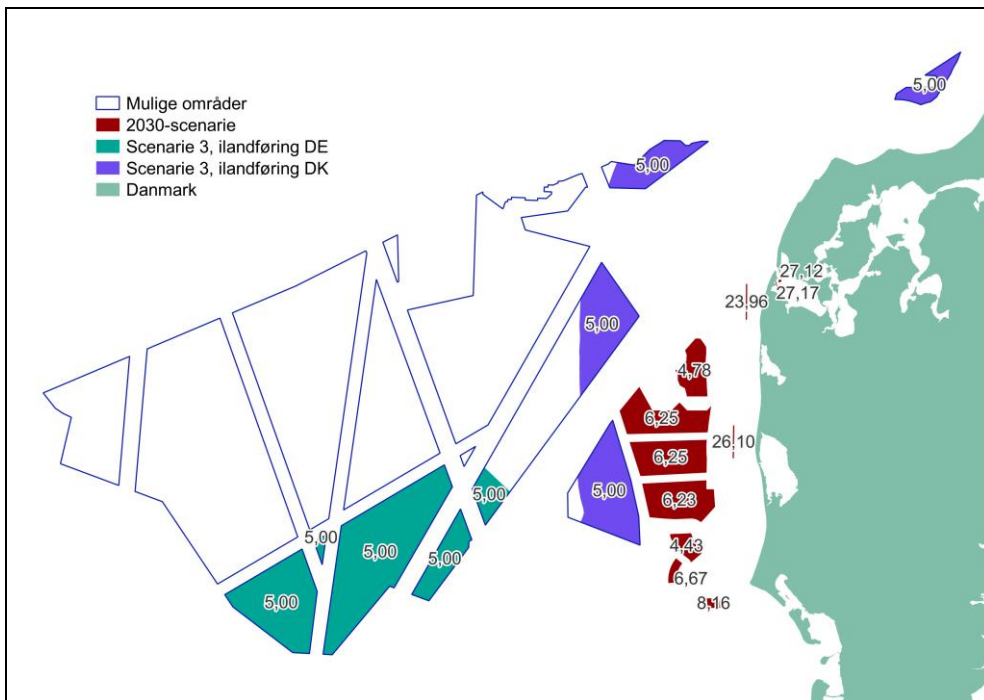
Selvom dette scenarie er væsensforskelligt fra scenarie 1, undersøger det samme strategi for reduktion af skyggeeffekter: større parker med lav effekttæthed. Der er



dog ellers ikke taget særligt højde for skyggeeffekter i dette scenarie, hvis primære formål er at undersøge en tilgang til dansk havvindudbygning, hvor afstandene til kysterne minimeres. Således ligger de parker, der ilandføres i Danmark, så tæt på den jyske vestkyst, som den gældende havplan tillader. Ligeledes ligger parkerne som ilandføres i Tyskland, så tæt som muligt på tilkoblingspunkterne i Tyskland. Snittet mellem parker til hhv. Tyskland og Danmark er i overensstemmelse med antagelserne bag Energistyrelsens publikation 'Analyseforudsætninger til Energinet 2024'. Kapaciteterne og effekttætheden af de enkelte parker fremgår af figur 6 og 7.



Figur 6 Kapaciteter i Scenarie 3



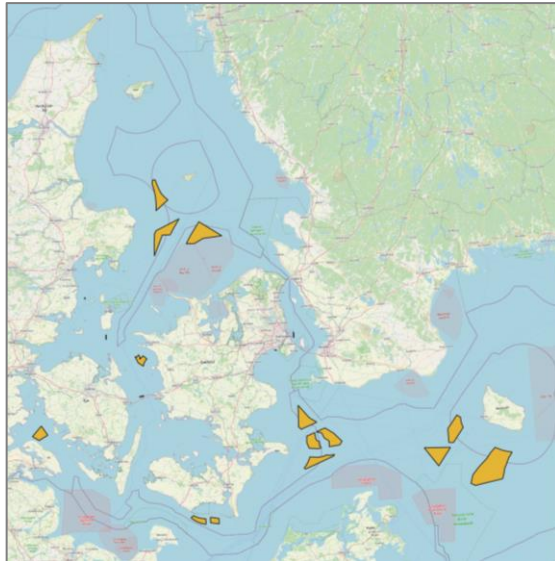
Figur 7 Effekttætheder i Scenarie 3

Scenarie 4 'Mindre havvindkapacitet i 2050'

Scenarie 4 udarbejdes efter simuleringerne af scenarie 1-3 er kørt, så det giver mulighed for læring og så vidt muligt lavest mulige skyggeeffekter på tværs af parker. Det foreslås derudover, at scenariet indeholder mindre kapacitet end de øvrige scenarier, for at afspejle en fremtid med mindre potentiale for havvind i Danmark - eller alternativt en trædesten fra 2030-scenariet til de øvrige scenarier.

Antagelser om parker i de indre danske farvande og Østersøen

Parkerne i de indre danske farvande og Østersøen er ens på tværs af 2050-scenarierne. De fremgår af nedenstående figur og er identiske med parkerne i 2030-scenariet.



Figur 7 Parker i øvrige danske farvande i 2050

Udlandsscenariet: Den internationale havvindudbygning frem mod 2050

Alle 2050-scenarier anvender samme scenarie for havvind uden for Danmarks grænser.

For udbygningsscenariet for 2050 i vores nabolande er foruden de områder, der allerede fremgår i 2030 scenariet², medtaget parker i planlægningsfasen og udviklingszoner for 2050. Der er taget udgangspunkt i projekter, der fremgår af 4C offshore-kortet³. For Østersøen afgrænses projektområdet lige øst for Bornholm.

For Nordsøen er scenariet desuden sammenholdt med det udbygningsscenario, der fremgår af rapporten fra Wageningen Marine Research Center; " *Quick scan of cumulative impacts on the North Sea biodiversity*"⁴ (se Figur 2). Rapporten indeholder en analyse af de fremtidige kumulative effekter af havvind i Nordsølandene. Rapporten tager udgangspunkt i et fremtidsscenario, der er baseret på oplysninger leveret af hollandske Rijkswaterstaat i 2023. Scenariet minder meget om 4C offshore-kortet, men der er nogle få af polygonerne, som har en anden status og derfor skal inkluderes i 2050-scenariet.

Møllespecifikationer og –placeringer for allerede etablerede parker er kendte og tilstræbt gengivet så nøjagtigt som muligt i simuleringerne. For fremtidige parker, er møllernes størrelser og placeringer inden for parken dog ikke offentliggjort, hvorfor det antages at de tilføjede parker i 2030-scenariet består af 15 MW møller og at

² Energistyrelsen 2025, Notat om scenarier for havvindudbygning frem mod 2030

³ <https://map.4coffshore.com/offshorewind/> [november 2023]

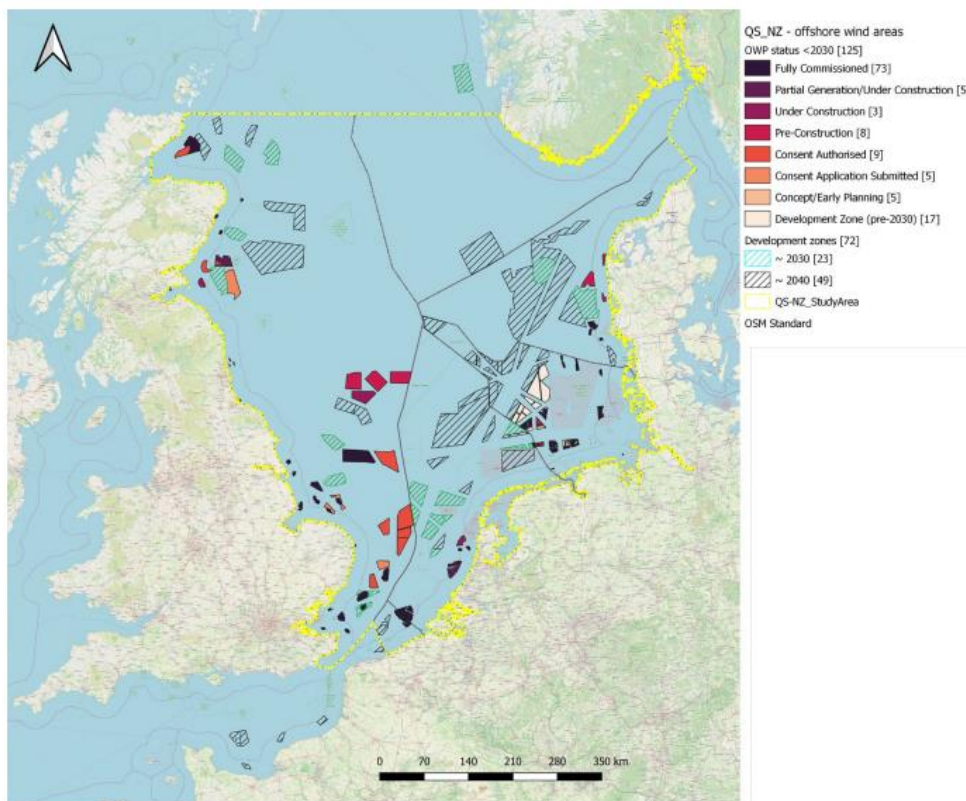
⁴ Jongbloed *et al*, 2023. Quick scan of cumulative impacts on the North Sea biodiversity - With a focus on selected species in relation to future developments in offshore wind energy. <https://research.wur.nl/en/publications/quick-scan-of-cumulative-impacts-on-the-north-sea-biodiversity-wi>



parkerne, som bygges mellem 2030 og 2050, består af 27 MW møller. I alle de tilføjede parker er møllerne placeret jævnt fordelt ud over områderne.

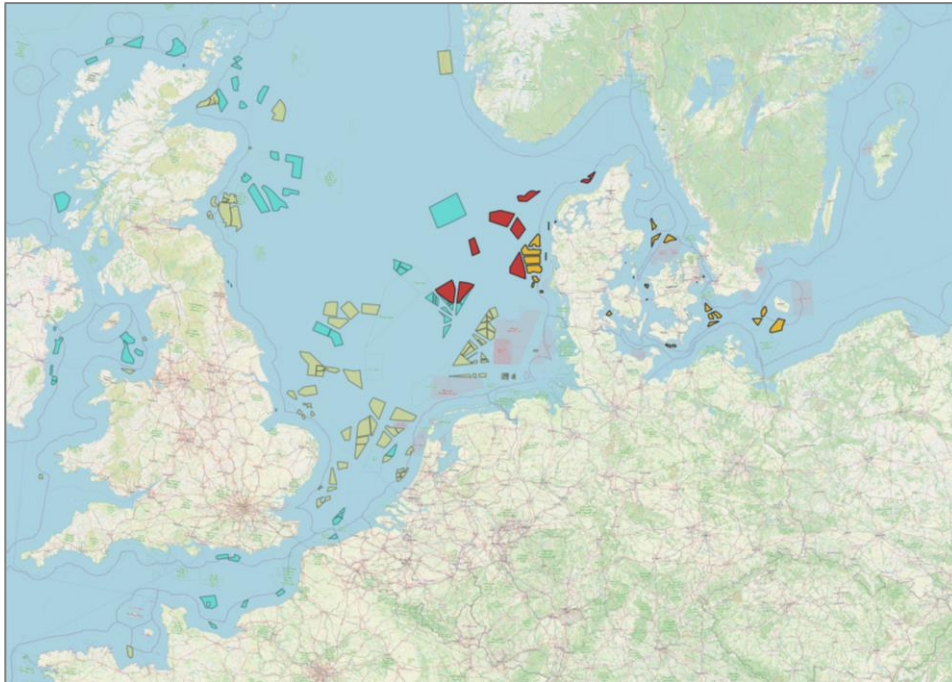
Der gøres opmærksom på, at scenariet brugt i nærværende opgave sandsynligvis overestimerer kapaciteterne i 2030 og 2050. Det skyldes at samtlige udenlandske udviklingszoner er medtaget som simplificerende antagelse, da det ikke er muligt at forudsige hvilke områder, der vil blive udbygget frem mod 2050. Dermed kan udlandsscenarioet betegnes som et 'worst case' ift. skyggeeffekter fra udenlandske parker ind i det danske havterritoire.

Studiets antagelser om havvindudbygningen i 2030 og 2050 fremgår af nedenstående figurer.



Figur 8 Kort der angiver status for havvindmølleområder i Nordsøen med angivelse af forskellige udviklingsstadier. I 2050-scenariet medtages allerede etableret parker, parker under etablering, projekter der er i gang med at ansøge om tilladelse, samt udviklingszoner for 2030 og 2050. For områder, der medtages for den danske del af Nordsøen henvises til tidligere afsnit. Kilde: Wageningen Quick Scan rapport⁵

⁵ Jongbloed, RH, JE Tamis, JT van der Wal, P de Vires, A Grundlehner, GJ Piet. 2023, Quick scan of cumulative impacts on the North Sea biodiversity. Wageningen, Marine Research.



Figur 9 Oversigtskort over alle områder medtaget i udbygningsscenariet for hhv. 2030 (orange og gulgrøn) og 2050 (rød og blå). Kilde: Energistyrelsen.

I figur 9 angiver de orange områder danske vindmølleparker frem mod 2030, røde områder er dansk udbygning i scenarie 1 for 2050, mens de gulgrønne og blå områder viser antagelser om udbygning i udlandet frem mod hhv. 2030 og 2050.

Vindmølle typer

Det antages at møllestørrelsen øges med tiden, hvorfor der for 2050 scenariet antages, at der etableres 27 MW møller i de nye områder (de røde polygoner anført på Figur 1). For de områder, der blev medtaget i 2030 scenariet (de orange polygoner anført på Figur 1), bruges antagelsen om en 15 MW mølle (dette er dog kun gældende for parker i pipeline, for de eksisterende parker, er der benyttet den specifikke mølletype). Da der på nuværende tidspunkt ikke eksisterer en 27 MW mølle bruges i stedet fiktive power curves produceret af DTU Vind til brug for opgaven. Størrelsen af møllen er ligeledes et estimat. Møllespecifikationerne fremgår nedenfor.



Figur 10 Illustration af en 15 MW (til venstre) og en 27 MW (til højre) vindmølle

For 2030 scenariet anvendes en 15 MW mølle, se nedenstående Figur 4, med dimensionerne: totalhøjde 263 m, navhøjde (hub height) 146.5 m, roterdiameter 233 m og en fundament diameter (diameter af monopæl) på 13 m.

For 2050 scenariet anvendes en 27 MW mølle, se nedenstående Figur 9, med dimensionerne: totalhøjde 330 m, navhøjde (hub height) 180 m, roterdiameter 300 m og en fundament diameter (diameter af monopæl) på 18 m.