Danish Energy Agency

Scenarier for havvindudbygning frem mod 2050 til brug for DTU Vinds studie af fremtidige skyggeeffekter

Udarbejdet ifm. 'Screening af områder til havvind i Danmark 2022-2025'

Kontor/afdeling
Havvind
Systemanalyse

Dato
19-12-2025

J nr. 2022 - 25260

Indhold

Baggrund 2
Hvad er skyggeeffekter? 2
Den danske havvindudbygning frem mod 2050 2
Scenarieopbygning 5
Scenarie 1 'Store og spredte parker' 6
Scenarie 2 'Mindre parker med høj mølletæthed' 7
Scenarie 3 'Nærhed til dansk og tysk kyst' 7
Den internationale havvindudbygning frem mod 2050 7
Vindmølletyper 8
Kortbilag 1 – havvindmølleparker i scenarie 1 9
Kortbilag 2 – havvindmølleparker i scenarie 2 10
Kortbilag 3 – havvindmølleparker i scenarie 3 11
Kortbilag 4 - parker i indre danske farvande og Østersøen 12
Kortbilag 5 - udenlandske parker 13

Danish Energy Agency

Carsten Niebuhrs Gade 43
1577 København V

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

www.ens.dk

Baggrund

Nærværende notat beskriver scenarier for den danske udbygning af havvind i 2050, som lægges til grund for vurderingen af de kumulative effekter på vind i projektet 'Screening af Danmarks havvindspotentiale'. Scenarierne er input til simuleringer i DTU Vinds atmosfæriske mesoscale model, som beregner skyggeeffekter indenfor og mellem havvindmølleparker. Analysens fokus er alternative scenarier for udbygningen i den danske Nordsø og forskellen i det samlede produktionstab som følge af skyggeeffekter.

Notatets scenarier er opdateret ift. tidligere version af notatet, idet minimumseffekttætheden for Nordsøen I er reduceret ifm. *'Aftale om udbudsrammer for tre havvindmølleparker'* af 19. maj 2025.

Der lægges vægt på, at scenarierne er udviklet specifikt til screeningen, og dermed ikke er udtryk for Energistyrelsens officielle holdning til den kommende havvindudbygning i de danske farvande.

Hvad er skyggeeffekter?

Skyggeeffekter opstår, når vinden bremses af en vindmølle og dermed efterlader mindre energi til vindmøllerne som er placeret nedstrøms. Skyggeeffekter påvirker parkernes produktion og økonomi.

Groft sagt kan kilderne til skyggeeffekter i en havvindmøllepark opdeles i to kategorier:

- Havvindmølleparkens layout, størrelse, effekttæthed og mølletype
- Skyggeeffekter fra andre havvindmølleparker, som er placeret opstrøms

Ydermere påvirkes skyggeeffekterne af vejr og atmosfæren, hvilket gør estimering af skyggeeffekterne meget kompleks. Ved lave vindhastigheder er skyggeeffekterne mere udtalte end ved høje vindhastigheder. Den atmosfæriske stabilitet påvirker, hvor hurtigt vinden genvinder sin styrke igen – det sker hurtigere ved lav stabilitet.

Til vurdering af skyggeeffekterne den langsigtede udbygning er der benyttet en mesoscale model, som modellerer hele atmosfæren hhv. med og uden vindmøller, så vindmøllernes påvirkning på vindressourcen kan isoleres.

Den danske havvindudbygning frem mod 2050

Den fremtidige havvindudbygning i Nordsøen kan potentielt tage sig ud på mange måder, afhængigt af tæthed og sameksistens med andre arealanvendelser.

Til brug for simuleringerne er der udviklet tre hypotetiske scenarier for havvindudbygningen frem mod 2050. Fælles for alle scenarierne er, at parkerne er placeret i Havplanens udlagte VE-områder (anno 2024).

Scenarierne koncentrerer sig om mulige konfigurationer (størrelse, tæthed og placering) af havvindmølleparker i Nordsøen, som indeholder det største sammenhængende areal udlagt til VE i dansk farvand og derfor er mest udsat for skyggeeffekter mellem parker.

De hypotetiske scenarier er baseret på vidt forskellige strategier for reduktion af skyggeeffekter og investeringsomkostninger, og udspænder således et muligt udfaldsrum for udbygningen.

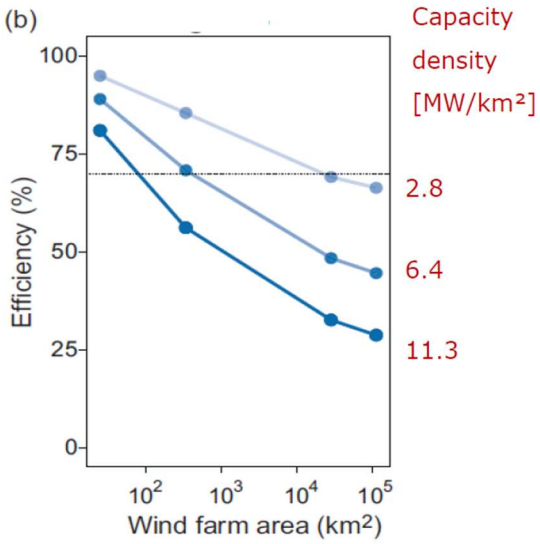
I virkelighedens verden vil havvindudbygningen formes af en lang række hensyn, herunder miljø og andre arealinteresser såsom fiskeri, olie- og gasudvinding, militære formål mv. Disse hensyn er der dog ikke taget højde for i udarbejdelsen af de hypotetiske scenarier, ligesom der ikke er taget højde for internationale sejladsruter.

Strategier for minimering af skyggeeffekter

DTU Vinds tidligere forskning[1] indenfor skyggeeffekter peger på, at der ved storskala udbygning af havvind kan være to primære strategier for at reducere skyggeeffekter:

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

[1] Volker, P., Hahmann, A.N., Badger, J. & Ejsing Jørgensen (2017). *Prospects for generating electricity by large onshore and offshore wind farms: Letter*, Environmental Research Letters, vol. 12, no. 3, 034022 https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5d86



Figur 1. Bud på produktionstabet som funktion af mølletæthed og areal. Kilde: DTU Vind[1]

Dette er illustreret i figur 1 som viser resultatet af et tidligere studie. En park på 100 km² med en mølletæthed på 11,3 MW/km² har ifølge studiet ca. samme procentuelle skyggetab som en park på ca. 500 km² med en tæthed på 6,4 MW/km² eller en park på over 10.000 km² med en tæthed på 2,8 MW/km².

Studiet tog dog ikke højde for skyggeeffekter mellem parker og lokale atmosfæriske forhold. Dermed er det relevant at se, om ovenstående konklusion kan efterprøves i DTU Vinds nyere og mere avancerede mesoscale model.

Strategier for minimering af investeringsomkostninger

Følgende alternative strategier er anvendt for at minimere parkernes investeringsomkostninger i de tre scenarier:

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

En omkostningseffektiv udbygning af havvind vil være et trade-off mellem produktionstabet fra skyggeeffekter og de øgede omkostninger til f.eks. længere arraykabler og ilandføringskabler, som kræves hvis skyggeeffekterne skal reduceres.

Derfor er det relevant at skele til, hvorledes selve opførelsen af vindmølleparkerne kan ske på en økonomisk rationel måde.

Scenarieopbygning

Scenariernes overordnede rationaler er opsummeret i tabel 1 og beskrevet i de følgende afsnit.

Scenarie	Strategi for minimering af skyggeeffekter	Strategi for minimering af investeringsomkostninger	Mulige tekniske havvindkoncepter i scenariet
Scenarie 1 'Store og spredte parker'	Relativt lav mølletæthed (5,2 MW/km²) Spredte parker	Parkerne er fortrinsvis placeret på lavbundede arealer, som reducerer omkostninger til fundamenter.	Hubs og parker til radial ilandføring i Danmark og udlandet.
Scenarie 2 'Mindre parker med høj mølletæthed'	Mindre parkstørrelser, men højere mølletæthed (10 MW/km²) Spredte parker, som ligger forskudt af hinanden.	Høj tæthed reducerer omkostninger til kabler internt i parken (array kabler).	Alle koncepter er mulige, men hubs vil kræve længere kabelføring fra park til platforme.
Scenarie 3 'Nærhed til dansk og tysk kyst'	Relativt lav mølletæthed (5 MW/km²)	Nærhed til kysten reducerer omkostninger til ilandføring af havvinden.	Hubs og parker til radial ilandføring i Danmark og udlandet.

Tabel 1. Scenariernes skyggerelaterede, økonomiske og tekniske rationaler

Kapaciteter på tværs af scenarier

Der tages i scenarie 1-3 udgangspunkt i 2030 scenariet og ambitionerne i den langsigtede politiske aftale *Danmark kan mere II* (Klimaaftale om grøn strøm og varme 2022), hvori der indgår en ambition om at udnytte mindst 35 GW havvind i dansk Nordsø.

2050-scenarierne medtager samtlige parker, der allerede er inkluderet i 2030-scenariet[2]. Derudover udvides parkerne i Nordsøen 1 (Syd, Midt og Nord) med 0,5 GW yderligere kapacitet ift. 2030 scenariet, således at kapaciteten i den enkelte park øges til 1,5 GW. Det følger antagelserne for områdernes kapacitet i Energistyrelsens 'Analyseforudsætninger til Energinet 2025'. Da der tages udgangspunkt i Havplanens områder, svarer denne kapacitet til en mølletæthed på 3,7 MW/km². Dermed er der rum til, at områderne kan tilskæres som led i den mere detaljerede

[2] 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.

planlægning, samtidig med at mølletætheden holdes omkring de 4,0 MW/km^2, som er den nedre grænse i udbudsmaterialet for Nordsøen Midt og Nordsøen Syd.

Det må i den forbindelse nævnes, at 2030 scenariet blev fastlagt inden udbudsrunden i december 2024, hvor der ikke indkom bud. Derfor er kapaciteten i 2030 scenariet overestimeret ift. den forventede udbygning i 2030.

Parkerne i de indre danske farvande og Østersøen er ens på tværs af 2030 og 2050-scenarierne. Se kortbilag 4 for placeringerne af disse parker.

Valg af effekttætheder

Tilgangen til effekttætheder er valgt ud fra flere betragtninger. I den historiske havvindudbygning i Danmark har man hidtil hældt til relativt lave tætheder på 4-5 MW/km² ud fra en betragtning om at høj effekttæthed vil føre til et for stort produktionstab. I flere Nordsølande med begrænset areal til havvindudbygning har man dog etableret parker med højere tætheder (omkring 10 MW/km²) ud fra en tankegang om, at der samlet set kunne produceres mere per site, hvis man stiller møllerne tættere. Dansk havvind kan dog opføres ved relativt lave tætheder eller mindre parkstørrelser, hvilket giver en økonomisk fordel.
Scenariernes tætheder på ca. 5 og 10 MW/km² er valgt ud fra disse historiske tilgange i Danmark og udlandet. I fremtiden vil den foretrukne effekttæthed muligvis afhænge af andre parametre, herunder øget viden om skyggeeffekter ved storskala udbygning.

Scenarie 1 ’Store og spredte parker’

Dette scenarie undersøger den første strategi for reduktion af skyggeeffekter: større parker med relativt lav mølletæthed. Parkerne er primært placeret på lavbundede områder for at reducere omkostningerne til vindmøllernes fundamenter; herunder Dogger Banke, Vikinge Banke, Jyske Banke og området udpeget til Energiø Nordsøen. Scenariet anvender ligeledes Nordsøarealer som er placeret tæt på 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.

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 således give et bud på kvantificering af skyggeeffekten på tværs af tysk og dansk territorie for parker placeret omkring Dogger Banke. Parkernes placeringer, kapaciteter og mølletæthed fremgår af kortbilag 1.

Scenarie 2 'Mindre parker med høj mølletæthed'

Scenarie 2 undersøger den anden mulige strategi for reduktion af skyggeeffekter, nemlig mindre parker med høj mølletæthed. Derudover er parkerne placeret forskudt af hinanden, så de i mindre grad skygger for hinanden. Det medfører, at parkerne er jævnt spredt ud over hele området udlagt til VE i Nordsøen, hvilket dog i praksis forventes at være uhensigtsmæssigt af hensyn til andre arealinteresser og den længere kabelføring til land.

Der er til en vis grad taget højde for den dominerende vindretning (hhv. sydvest, vest og nordvest) på de konkrete arealer, således at parkerne 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.

Kapaciteterne og mølletætheden af de enkelte parker fremgår af kortbilag 2. Der er valgt parkstørrelser på 1,5 GW, som svarer til kapaciteten af nogle af de planlagte havvindmølleparker i engelsk farvand.

Scenarie 3 'Nærhed til dansk og tysk kyst'

Scenarie 3 undersøger den samme strategi for reduktion af skyggeeffekter som scenarie 1, nemlig større parker med relativt lav mølletæthed. Der er dog ikke taget yderligere højde for skyggeeffekter i dette scenarie, hvis primære formål er at undersøge en tilgang til dansk havvindudbygning, hvor afstanden til kysterne minimeres for at minimere omkostningerne til ilandføring. 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 den tyske kyst. Fordelingen mellem kapaciteter som ilandføres i hhv. Tyskland og Danmark er i overensstemmelse med antagelserne bag Energistyrelsens publikation 'Analyseforudsætninger til Energinet 2024'. Kapaciteterne og mølletætheden af de enkelte parker fremgår af kortbilag 3.

Den internationale havvindudbygning frem mod 2050

Alle 2050-scenarier anvender samme scenarie for havvindudbygning uden for Danmarks grænser, som bl.a. bygger på rapporten fra Wageningen Marine Research Center; "*Quick scan of cumulative impacts on the North Sea biodiversity*"[3]. Polygonerne i det tyske farvand er opdateret ift. seneste 'Flächenentwicklungsplan' fra BSH[4]. Kortbilag 5 viser den antagne internationale havvindudbygning kombineret med scenarie 1 i dansk farvand.

[3] 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.*
[4] Bundesamt für Seeschiffahrt und Hydrographie (2025). *Flächenentwicklungsplan 2025.* https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresfachplanung/Flaechenentwicklungsplan_2025/flaechenentwicklungsplan_2025_node.html

Følgende kapaciteter lægges til grund for 2050 scenariet indenfor mesoscale modellens domæne. Dermed tæller havvindmølleparker i den nordligste del af Østersøen og Atlanterhavet ikke med i opgørelsen nedenfor.

	Kapacitet i 2050 [GW]
Danmark	47,4
Sverige	2,4
Tyskland	70,0
Storbritannien	93,7
Holland	40,2
Norge	19,0
Belgien	5,1
Frankrig	8,5

Tabel 2. Analysens havvindkapacitet fordelt på Nordsølandene

Vindmølletyper

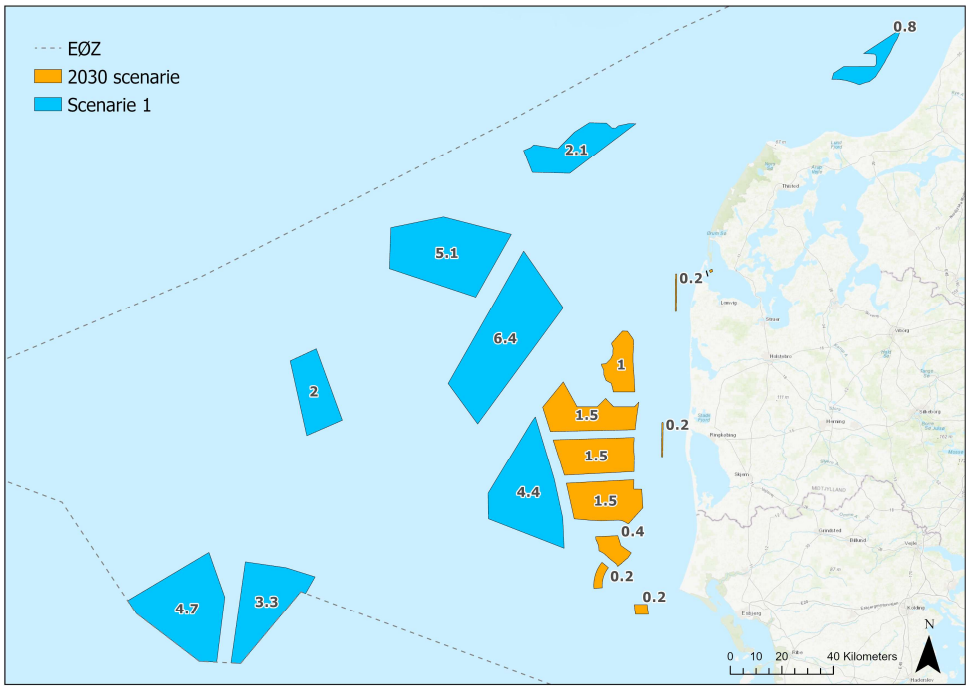
Møllespecifikationer og –placeringer for allerede etablerede parker er kendte og tilstræbt gengivet så nøjagtigt som muligt i simuleringerne. For fremtidige parker, er møllernes størrelser og placeringer inden for parken dog ikke offentliggjort, hvorfor det antages at de tilføjede parker i 2030-scenariet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

Møllespecifikationerne for hhv. 15 og 27 MW møllerne fremgår af tabel 3.

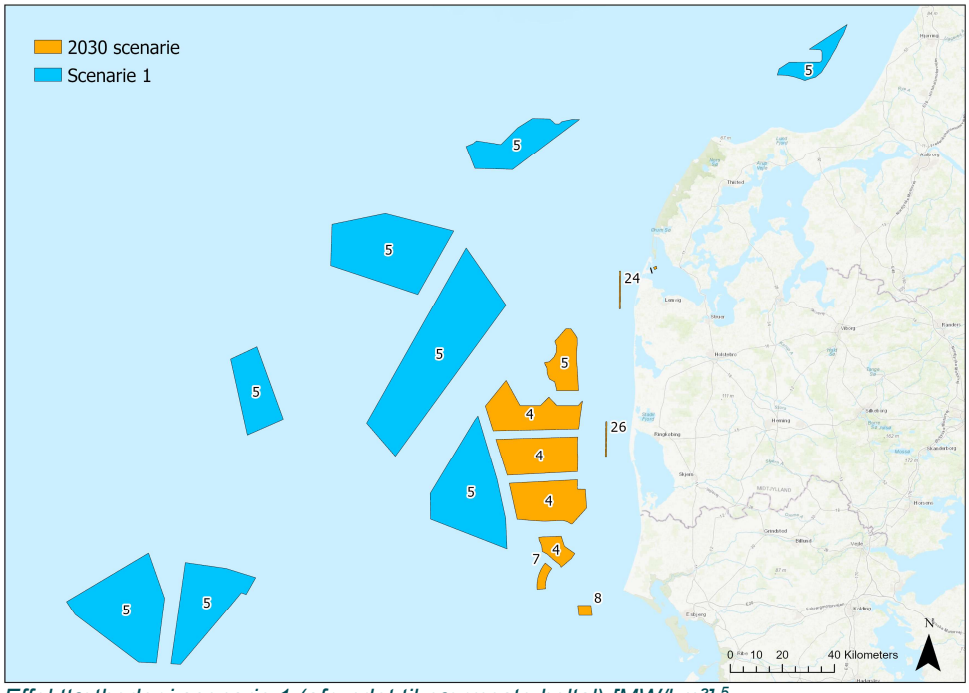
	15 MW mølle	27 MW mølle
Totalhøjde	263 m	330 m
Navhøjde (hub height)	146,5 m	180 m
Rotordiameter	233 m	300 m

Tabel 3. Møllespecifikationer for 15 MW og 27 MW møller

Kortbilag 1 – havvindmølleparker i scenarie 1



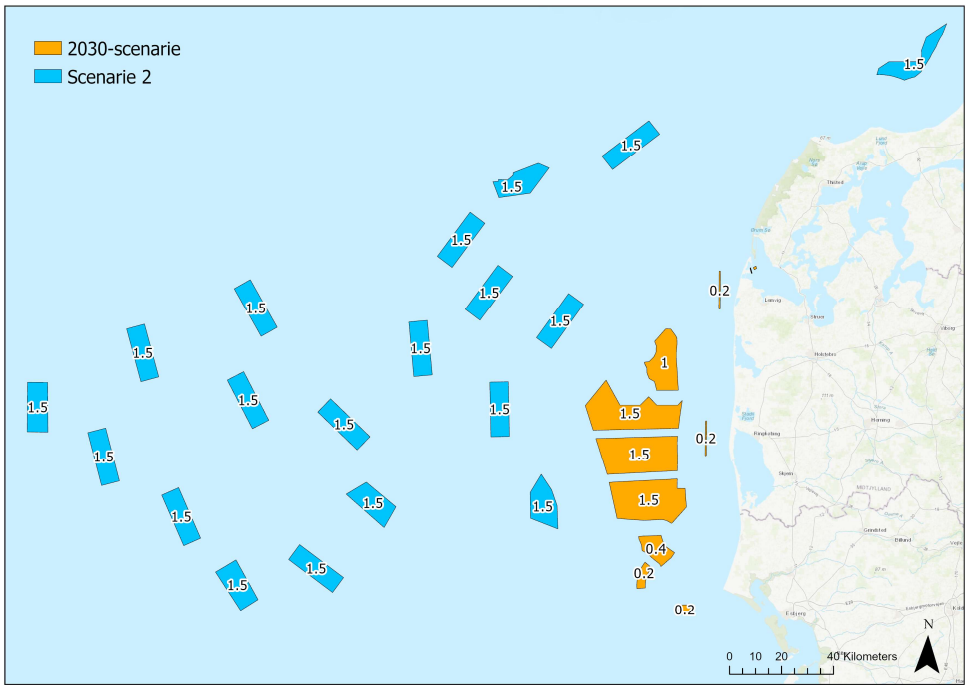
Havvindkapaciteter i scenarie 1 [GW]



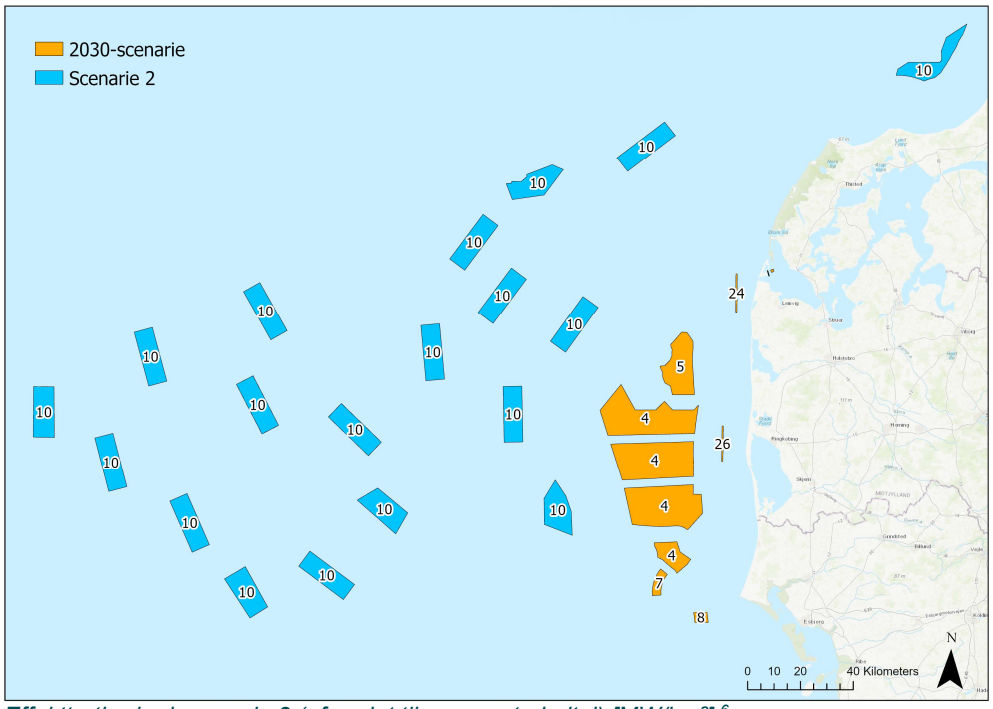
Effekttætheder i scenarie 1 (afrundet til nærmeste heltal) [MW/km²] [5]

[5] Områder, kapaciteter og effekttætheder er hypotetiske, tekniske antagelser specifikt udviklet til nærværende analyse. Se i øvrigt kommentar øverst på side 6 vedr. Nordsøen Midt og Nordsøen Syd

Kortbilag 2 – havvindmølleparker i scenarie 2



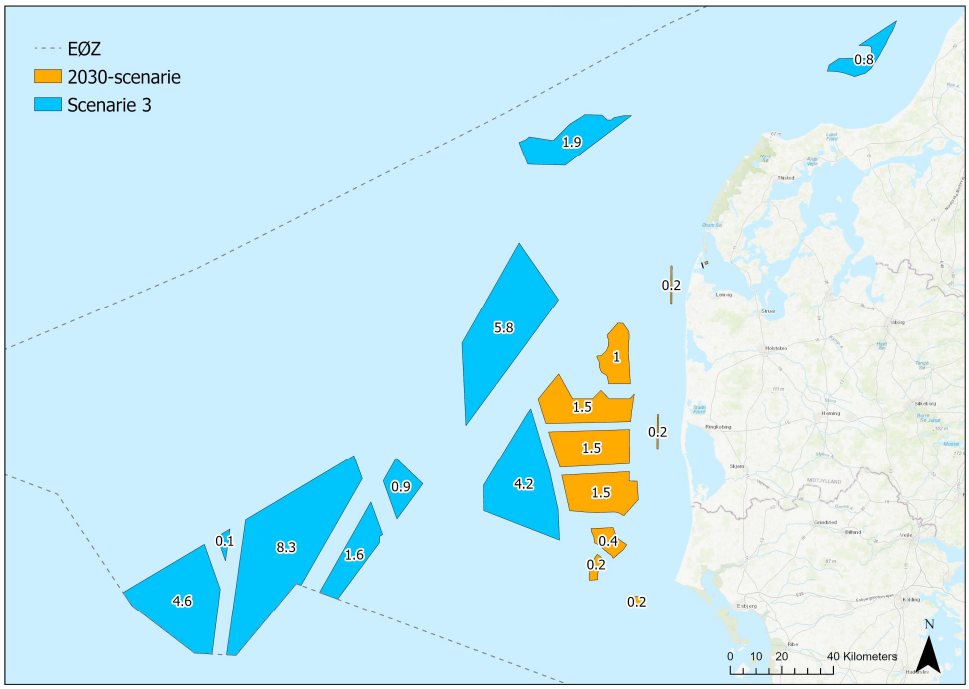
Havvindkapaciteter i scenarie 2 [GW]



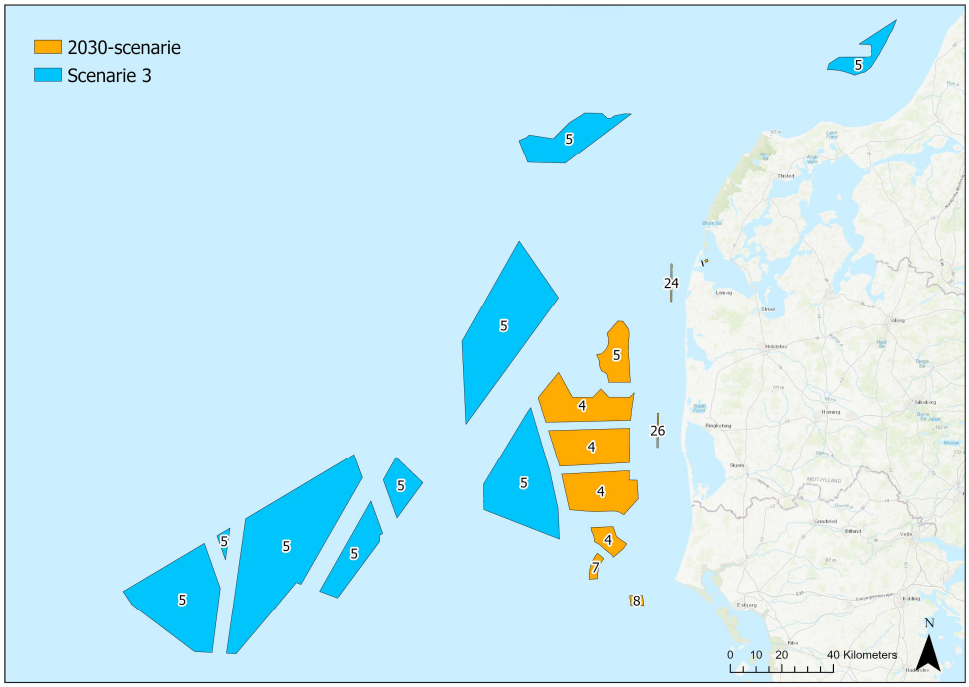
Effekttætheder i scenarie 2 (afrundet til nærmeste heltal) [MW/km²] [6]

[6] Områder, kapaciteter og effekttætheder er hypotetiske, tekniske antagelser specifikt udviklet til nærværende analyse. Se i øvrigt kommentar øverst på side 6 vedr. Nordsøen Midt og Nordsøen Syd

Kortbilag 3 – havvindmølleparker i scenarie 3



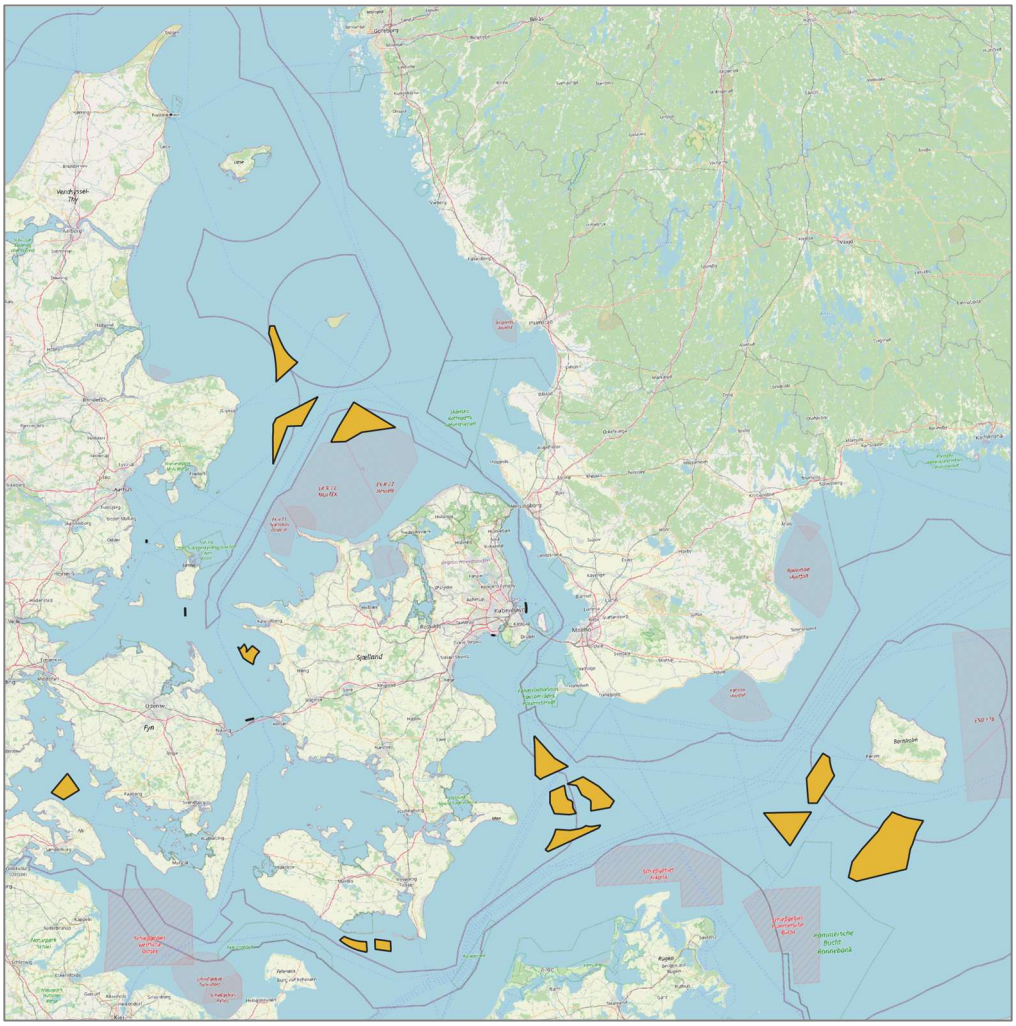
Havvindkapaciteter i scenarie 3 [GW]



Effekttætheder i scenarie 3 (afrundet til nærmeste heltal) [MW/km²]7

[7]Områder, kapaciteter og effekttætheder er hypotetiske, tekniske antagelser specifikt udviklet til nærværende analyse. Se i øvrigt kommentar øverst på side 6 vedr. Nordsøen Midt og Nordsøen Syd.

Kortbilag 4 - parker i indre danske farvande og Østersøen



Områder i de indre danske farvande og Østersøen (gælder alle scenarier) [8]

[8] For antagelser vedr. kapaciteter i de indre farvande henvises til Energistyrelsens 'Notat om scenarier for havvindudbygning frem mod 2030', som kan downloades via følgende link: https://ens.dk/media/6392/download

Kortbilag 5 - udenlandske parker



Kilde: DTU Vind