



Notat om

*Landvind-potentialemodellen*

*Dette notat beskriver den GIS tekniske metode bag landvind potentialemodellen og præsenterer resultaterne og analyser fra udvalgte kørsler.*

- s. 1: *Baggrund*
- s. 2-6: *Opbygning af potentialemodellen*
- s. 7-13: *Resultater*
- s. 14-21: *Analyse af mulig udbygning af landvind, 2020-2030*

**Kontor/afdeling**  
SEG

**Dato**  
1. oktober 2018

**J nr.** 2018-18572

/JLO

## 1. Baggrund for GIS modellering af landvindpotentiale

Til anvendelse i analyser og fremskrivninger er det vigtigt at have et realistisk estimat af det samlede nationale landvindpotentiale under gældende lovgivning. Endvidere er det værdifuldt at kunne levere konsekvensanalyser af foreslået lovgivning, der kan påvirke produktionsmulighederne for vedvarende energi (VE) i fremtiden.

Vha. geografiske informationssystemer (GIS) og geodata, kan der laves landsdækkende screeninger af muligheden for opstilling af møller. Særligt de mange geodata, der stilles frit til rådighed via Kortforsyningen, samt Bygnings- og Boligregistret (BBR), gør dette muligt. Tidligere har GIS baserede analyser af landvindpotentialet typisk været baseret på trin for trin fraklipning, hvor en begrænsende områdetype fjernes for hvert trin og det tilbageværende udgør de potentielle områder. Denne fremgang er nyttig og kan hjælpe med at give et generelt overblik, men metoden lider også af en manglende fleksibilitet. Flexibiliteten er særligt nødvendig nu, hvor opkøb af boliger er en naturlig del af projekteringen og man derfor ikke længere bare kan frasortere alle arealer, der er inden for minimumsafstanden af boliger, sommerhuse og lignende.

For at imødegå behovet for et fleksibelt værktøj, både til potentiale vurdering og til konsekvensanalyser, er en GIS baseret potentialemodel udviklet af Energistyrelsen i samarbejde med Energinet. Modellens formål er at screene hele landet ud fra en række parametre, og derved give et bud på det totale potentiale. Den geografiske tilgang giver desuden et indblik i fordelingen af områderne, hvor der potentielt kan opstilles vindkraftanlæg. Det er vigtigt, at påpege at områderne er estimerede og skal tages med forbehold.

**Energistyrelsen**

Amaliegade 44  
1256 København K

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

www.ens.dk

## 2. Opbygning af potentialemodellen

I potentialemodellen beregnes den potentielle landvindkapacitet ud fra hensyn til arealmæssige begrænsninger. Disse placeringshensyn er fastlagt ud fra Naturstyrelsens "Vejledning om planlægning for og tilladelse til opstilling af vindmøller, 2015", der bl.a. tager udgangspunkt i "Bekendtgørelse om planlægning for og tilladelse til opstilling af vindmøller" (BEK nr 1590 af 10/12/2014), samt den lidt ældre "Vejledende liste over placeringshensyn, vindmøllesekretariatet 2011".

### 2.1. *Input data*

Geodata, der skal repræsentere de arealmæssige hensyn, er erhvervet fra en lang række kilder. Det meste er dog distribueret gennem Kortforsyningen (<http://kortforsyningen.dk/>).

De mange hensyn gør det praktisk at samle dem i generaliserede kategorier. Her anvendes kategorierne "Infrastruktur" og "Natur", da de dækker over en lang række af de arealbegrænsende hensyn. Boligrelaterede parametre er desuden helt centrale og informationer baseret på BBR data går derfor igen flere gange, de er blandt andet brugt til at estimere ejendomsværdi i 4 møllehøjders (4 MH) afstand. 4 MH er minimumsafstanden mellem mølle og bolig og derfor vigtig for estimering af nødvendig boligopkøb. I Tabel 1 ses en oversigt over de anvendte datasæt. Det meste data er erhvervet i 2015 og 2016 og ændringer forekommer løbende over tid.

Det meste data findes som vektorfiler og er relativt tungt at anvende på nationalt niveau. Derfor konverteres vektordata til rasterdata i 50m opløsning inden det generaliseres til infrastruktur, natur eller boligpris datasæt. Dette gør databehandlingen langt lettere men introducere en lille geografisk usikkerhed. For de hensyn hvor højden på en mølle spiller ind, antages højden generelt at være 150m, da det er den maksimale tilladte højde for møller på land i Danmark.

### 2.2. *Metode*

Metoden kan inddeles i 4 trin:

1. Første sortering af hele landet
2. Aggregering af måske-brugbare områder
3. Sekundær sortering og reduktion af områder efter pris
4. Nærhed- og afstandsanalyser

**Trin 1:** Modellens første trin er en grovsortering af landets areal i måske-brugbart og ikke-brugbart. For at kunne udføre sorteringen repræsenteres placeringshensynene vha. geodata, der kobles til et landsdækkende hektargrid (100\*100 meter). Landets ca. 4,3 mio. hektar kan herefter sorteres, f.eks. ift. boliger



og ejendomsværdi inden for en given afstand, fredede områder, infrastruktur og beliggenhed ift. omkringværende terræn. I Tabel 2 ses to eksempler på værdierne for enkelte hektar i geodatabasen og i Tabel 3 ses de arealmæssige begrænsninger samlet i fire overordnede kategorier. Bemærk at boligudgifter (række 1 i Tabel 3) beregnes med udtrykket vist under trin 3 nedenfor. De måske-brugbare arealer anvendes herefter som input i modellens senere trin.

**Trin 2:** I modellens andet trin bliver hektar-celler, der opfylder første-sorteringens kriterier, aggregeret til sammenhængende områder. For at kunne benyttes til opstilling af møller, skal et områdes areal være minimum  $0,2 \text{ km}^2$ , da det ellers ikke er realistisk at opstille 3 eller flere møller. Mindre områder frasorteres. Minimumsarealet på  $0,2 \text{ km}^2$  er baseret på forsøg med indpasning af flest mulige fiktive møller, i ordnede rækker og med 2-3 MH mellem de enkelte møller, i lidt over 30 forskellige områder. Valget af 3 møller som min. er fastlagt ud fra analyse af stamdataregistret for vindkraftanlæg, som viser at mellem januar 2005 og september 2016, er der kun opstillet 5 enkeltstående møller over 1MW på land, 24 der er opstillet i par, og 482 der står tre eller flere sammen. Det potentielle antal møller pr. område er estimeret ved empirisk baseret sammenhæng mellem arealstørrelse og antal mulige møller (rundet af til heltal). For hvert aggregeret område beregnes antal boliger, samt deres værdi, indenfor 4 og 10 møllehøjder (ingen boliger tælles flere gange for samme område), som herefter kan bruges til at estimere udgifter til boligopkøb og værditabsordning.

**Trin 3:** For opkøb af boliger antages prisen at være 150 pct. af BBR's estimerede ejendomsværdi for boliger, sommerhuse og landbrugsejendomme stuehuse, der er inden for 4 MH (BoPri4MH) af et aggregeret område. For værditabsersatning antages prisen at være 5 pct. af samme inden for 10 MH (BoPri10MH) af et aggregeret område:

$$\text{Boligudgifter} = 1,5 * \text{BoPri4MH} + 0,05 * \text{BoPri10MH}$$

Boligudgifterne relateret til opkøb og erstatning kan være meget høje for nogle områder, på trods af den første sortering af det landsdækkende hektargrid. Derfor fastsættes en maksimal værdi for opkøb af boliger per mølle på 3 mio. kr., hvilket vurderes at udgøre ca. 12 pct. af de samlede investeringsomkostninger per mølle. I områder hvor boligopkøbet vil overstige værdien, frasorteres iterativt de 10 % dyreste dele af området, indtil området enten kommer under den valgte maks værdi, eller ender med at være mindre end  $0,2 \text{ km}^2$ .



**Trin 4:** Ifølge de nuværende retningslinjer skal der som udgangspunkt være 28 møllehøjder i mellem to mølleklynger. Ved planlægning for vindmøller nærmere end 28 gange totalhøjden fra eksisterende eller planlagte vindmøller, skal redegørelsen for planforslaget, jf. planlovens § 11 e, belyse anlæggenes påvirkning af landskabet, herunder oplyse, hvorfor påvirkningen anses for ubetænkelig. Derfor vil ibrugtagelse af et område ofte betyde udelukkelse af andre. I modellens fjerde trin itereres der gennem områderne, således at store områder (antal potentielle møller  $\geq 20$ ) med lavest mulig udgift per mølle prioriteres, og nærliggende mindre eller dyrere områder frasorteres løbende. Små områder, der ligger indenfor 500m af hinanden og sammenlagt kan rumme over 20 møller, prioriteres dog som store. Her er afstanden på 500m valgt, da det er en typisk intra-klynge afstand mellem møller med totalhøjde på 150m. Dette forhindrer f.eks. at større område, der gennemskæres af en jernbane, der har 150m sikkerhedszone på hver side, frasorteres som to eller flere små områder.

Det bemærkes, at vurderingen af udgifter pr. mølle udelukkende er beregnet ud fra omkostninger forbundet med opkøb af nærliggende beboelsesejendomme, og der er således ikke i vurderingen medtaget elementer vedrørende bl.a. vindforhold, da disse er yderst komplicerede at modellere inden for en acceptabel fejlmargen. Ift prioritering af nærliggende områder kan det dog antages at variationen i vindforhold vil mindskes, når afstanden mindskes.

**Tabel 1: Navn, udbyder, type og anvendelse af data anvendt i landvind GIS modellens geodatabase.**

Navn	Dataudbyder	Overordnet datasæt	Type	Anvendelse
BBR (XY, anvendelseskode, ejendomsværdi)	Skat	BBR	Vektor, punkter	Boligværdi Boligantal Støjfølsomme områder
Bygning	SDFE	GeoDanmark	Vektor, Polygoner	Bebyggelse
Landingsbaner	SDFE	Kort 10	Vektor, polygoner	Infrastruktur
Landingsbane højdegrænseplan	Digitaliseret til formålet	-	Vektor, polygoner	Infrastruktur
Vej, anden subkode	SDFE	Kort 10	Vektor, linjer	Infrastruktur
Vej, over 6 m	SDFE	Kort 10	Vektor, linjer	Infrastruktur
Motortrafikvej	SDFE	Kort 10	Vektor, linjer	Infrastruktur
Motorvej	SDFE	Kort 10	Vektor, linjer	Infrastruktur
Jernbane	SDFE	Kort 10	Vektor, linjer	Infrastruktur
Banestyrelsens områder	ENS	Elnetgrænser	Vektor, polygoner	Infrastruktur
Højspændingsledninger	SDFE	Kort 10	Vektor, linjer	Infrastruktur
Luftledn., 132 kV+ & HVDC	Energinet DK	-	Vektor, linjer	Infrastruktur
Kabler, 132 kV+ & HVDC	Energinet DK	-	Vektor, linjer	Infrastruktur
Stationspunkter	Energinet DK	-	Vektor, punkter	Infrastruktur
Transmissionsledning, gas	Energinet DK	-	Vektor, linjer	Infrastruktur
Stationsområder, gas	Energinet DK	-	Vektor, punkter	Infrastruktur
Skylleledning, gas	Energinet DK	-	Vektor, linjer	Infrastruktur
Vindmøllebuffer, forsvarets	FES	-	Vektor, polygoner	Forsvar
Fredede områder	Miljøportalen	-	Vektor, polygoner	Natur
Fredede områder, forslag	Miljøportalen	-	Vektor, polygoner	Natur
Søbeskyttelseslinjer	Miljøportalen	-	Vektor, polygoner	Natur
Beskyttede vandløb	Miljøportalen	-	Vektor, linjer	Natur
Åbeskyttelseslinjer	Miljøportalen	-	Vektor, polygoner	Natur
Kirkebyggelinjer	Miljøportalen	-	Vektor, polygoner	Natur
Natura2000 og fredskov	Naturstyrelsen	Grønt naturkort	Vektor, polygoner	Natur
Søer	Naturstyrelsen	Vandplan 2.H. 2014	Vektor, polygoner	Natur
Klitfredning	Geodatastyrelsen	Matrikelkortet	Vektor, polygoner	Natur
Strandbeskyttelseslinjer	Geodatastyrelsen	Matrikelkortet	Vektor, polygoner	Natur
Fredede fortidsminder	Kulturstyrelsen	-	Vektor, punkter	Natur



**Tabel 2: Oversigt over geodatabasens parametre med eksempler på værdier fra to hektarer. Eksempel 1 er en hektar nær Ny Lindholm i Ringkøbing Skjern kommune, hvor der allerede står opført en mølle, eksempel 2 er en hektar i udkanten af Ferup Skov i Kolding kommune, hvor det må antages at være usandsynligt at der bliver opstillet møller.**

Parameter	Eksempel 1 Ny Lindholm	Eksempel 2 Ferup Skov
Infrastruktur	0	0
Natur	0	1
Forsvar	0	0
Højdeforskel ift. gennemsnit indenfor 5 km	-3m	2m
Landbrugsejendomme indenfor 4 MH, antal	0	2
Landbrugsejendomme indenfor 4 MH, værdi	0	7.550.000
Kommunekode	760	621
Bygning, alle	0	0
Støjfølsomt område (5+ boliger indenfor 200m)	0	0
Boliger indenfor 4 MH, antal	0	12
Boliger indenfor 4 MH, værdi	0	9.820.000 kr
Boliger indenfor 5 MH, antal	2	19
Boliger indenfor 5 MH, værdi	2.692.000 kr	15.921.000 kr
Boliger indenfor 6 MH, antal	3	23
Boliger indenfor 6 MH, værdi	3.222.000 kr	19.975.000 kr
Boliger indenfor 7 MH, antal	4	31
Boliger indenfor 7 MH, værdi	3.653.000 kr	29.910.000
Boliger indenfor 8 MH, antal	5	43
Boliger indenfor 8 MH, værdi	4.533.000 kr	40.593.000 kr
Boliger indenfor 9 MH, antal	8	50
Boliger indenfor 9 MH, værdi	7.670.000 kr	48.732.000 kr
Boliger indenfor 10 MH, antal	11	55
Boliger indenfor 10 MH, værdi	9.791.000 kr	52.953.000 kr
Centrum X koordinat, decimalgrader, ETRS89	8,26288	9,37801
Centrum Y koordinat, decimalgrader, ETRS89	56,19060	55,54076

**Tabel 3: Opsummering af arealbegrænsninger under gældende lovgivning. Bemærk at der flere steder i landet er overlappende arealbegrænsninger, hvorfor tabellen ikke summer til 100 %, f.eks. er mange af forswarets arealer også fredet.**

Arealbegrænsning	Andel af Danmarks landareal (%)
Boligudgifter over 3 mio. ift. afstandskrav	87,2
Fredning og naturbeskyttelse (inkl. fredskov)	29,2
Infrastruktur (inkl. sikkerhedszoner)	18,7
Forsvaret	13,0



### 3. Resultater

Modellens resultat er en geodatabase med potentielle områder, estimerede områdeudgifter og kapacitet pr. område. Resultatet er afhængigt af indstillingen af modellens parametre (se Tabel 4 for standardkørsels indstillinger). Ved modellering af det nuværende potentiale kan de fleste parametre indstilles ud fra gældende lovgivning og vejledninger, men enkelte er mindre faste, f.eks. maksimal udgift pr. mølle til boligopkøb og erstatning.

Resultaterne beskriver et potentiale opgjort som kapacitet, baseret på moderne møllers fysiske karakteristika, og estimerer dermed ikke nuværende eller fremtidig produktion. Med andre ord er potentialet en summering af, hvor der er plads til at opstille møller. Den GIS tekniske metode og det høje detaljeniveau i det tilgængelige geodata giver desuden indblik i den geografiske fordeling af potentialet. Beregningerne er behæftet med stor usikkerhed grundet de mange parametre i modellen. Samtidig tages der ikke hensyn til muligheden for dispensation for de forskellige begrænsninger og præcisionen af ejendomsvurderinger, hvilket også øger usikkerheden. Ved forskellige indstillinger af modellen vil resultaterne naturligvis variere. Dette giver mulighed for at lave konsekvensanalyser af ændringer i de arealmæssige begrænsninger.

#### 3.1. Standardkørsel

Det bedste bud på parameterindstilling ud fra nuværende lovgivning, her kaldet standardkørslen, giver et geografisk fordelt estimat af det nationale landvindpotentiale. En parameteroversigt er vist i Tabel 4.

**Tabel 4: Parameterindstilling for landvind potentialemodellens standardkørsel.**

Parameter	Standardindstilling
Min. afstand til boliger, sommerhuse mm.	4 MH
Afstand for værditabserstatning	10 MH
Afstand mellem klynger af møller	28 MH
Møllehøjde	150 meter
Max samlede udgifter pr mølle til boligopkøb og erstatning	3 mio. DKK
Infrastruktur (se tabel 1)	Begrænsende
Natur (se tabel 1)	Begrænsende
Forsvaret	Begrænsende
Terrænhøjde ift. nærområde	Ikke begrænsende
Støjfølsomme områder	Begrænsende
Bygninger (alle)	Ikke begrænsende
Kommune	Ikke begrænsende



Standardkørsleens resultater er opsummeret i Tabel 5, og det nationale teoretiske potentiale er estimeret til 14,5 GW. Potentialet forudsætter at alle områder tages i brug i alle kommuner, og at der opstilles det maksimale antal møller i hvert område, uanset hvilken påvirkning af produktionen det måtte have.

**Tabel 5: Standardkørsleens resultater, opsummeret for hele landet.**

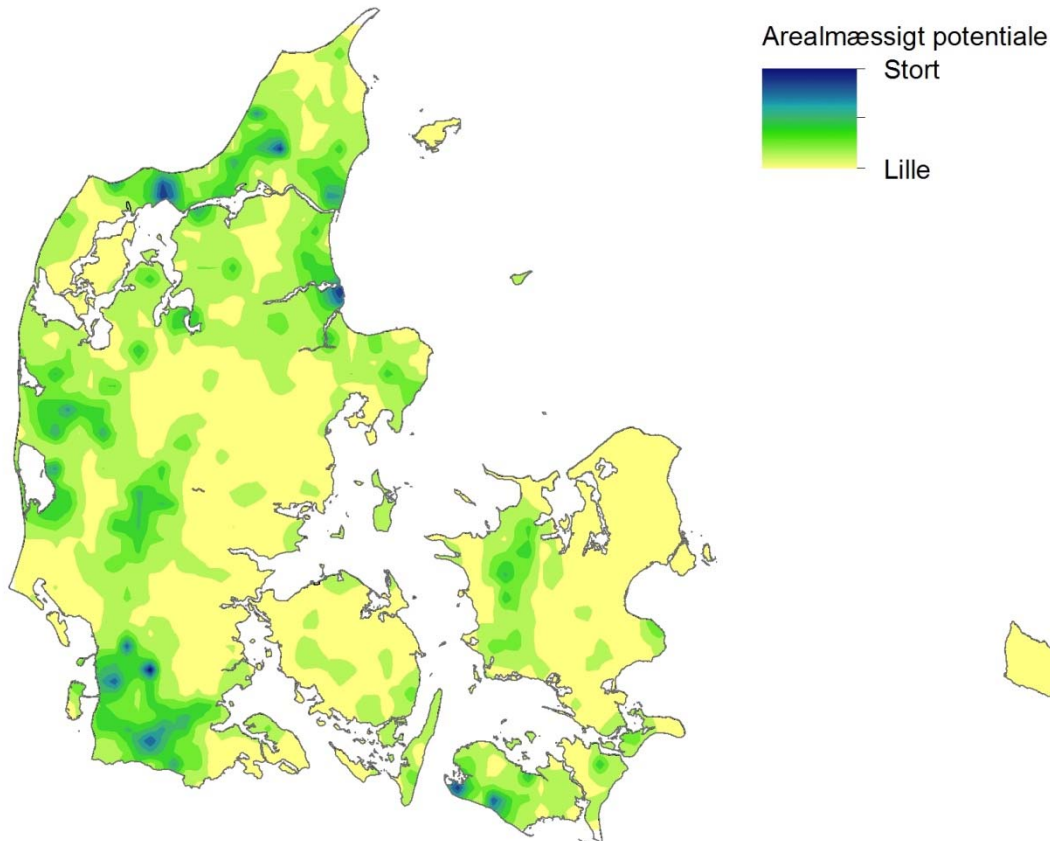
<b>Standardkørslen (28 MH), hele DK</b>	<b>Resultat</b>
Antal områder	451
Samlet areal	616 km <sup>2</sup>
Antal møller	4150
Potentiale (antaget 3,5 MW pr mølle)	14,5 GW

### 3.2. Visualisering af standardkørslen

Den geografiske fordeling af potentialet er uens over landet. I Figur 1 vises en interpoleret version af resultatet, der kan ses som en indikator for, hvor potentialet er koncentreret. Interpolationen er baseret på et datasæt bestående af A) centrumkoordinater og maksimalt antal møller for hvert af de estimerede områder (451 stk – se også Tabel 5) og B) koordinater med 0-værdi i et 10 km grid for de steder, hvor der er mere end 5 km til nærmeste estimerede område (184 punkter). Metoden der er anvendt til interpolationen er Inverse Distance Weighting (IDW), som matematisk er en relativ simpel interpolationsmetode.

Figur 1 viser at potentialemodellen i mange dele af landet identificerer områder, hvor der er mulighed for at opstille landvindmøller, set ud fra de nuværende arealmæssige begrænsninger, uden hensyn til eksisterende møller. Omvendt viser modellen også, at der er relativt få steder, hvor der er mulighed for koncentreret opstilling af møller. I de dele af landet, hvor modellen ikke har identificeret områder med potentiale for opstilling af vindmøller, er der forskellige forklaringer. Mest almindeligt er det tæt befolkning (og deraf mange boliger) i f.eks. Østjylland og på Fyn og dele af Sjælland, der begrænser pladsen. Der er også steder hvor der er store natur, landskabs- og forsvarsmæssige begrænsninger (f.eks. på Bornholm og i Varde kommune).





**Figur 1: Visualisering af interpoleret resultat af standardkørslen. Kortet indikerer hvor der kan findes områder med plads til at opstille landvindmøller, set ud fra en betragtning om færrest mulige arealbegrænsninger. Der er ikke taget hensyn til vindforhold, eksisterende møller og hvor dyrt eller billigt det vil være at koble nye møller på nettet.**

### 3.3. Møllehøjder mellem mølleklyngerne

I standardindstillingerne er det antaget, at der skal være 28 MH mellem klyngerne. Lovgivningens formulering på dette område indeholder dog mulighed for dispensation (se afsnit 2.2 – Trin 4) og i praksis er der placeret mølleklynger tættere på hinanden end de 28 MH. Da dette er et parameter, der vurderes at kunne have en relativ stor indflydelse på resultatet ved modelleringen af potentialet, er afstandene mellem eksisterende klynger analyseret med henblik på en kørsel med mindre antal møllehøjder mellem klyngerne.

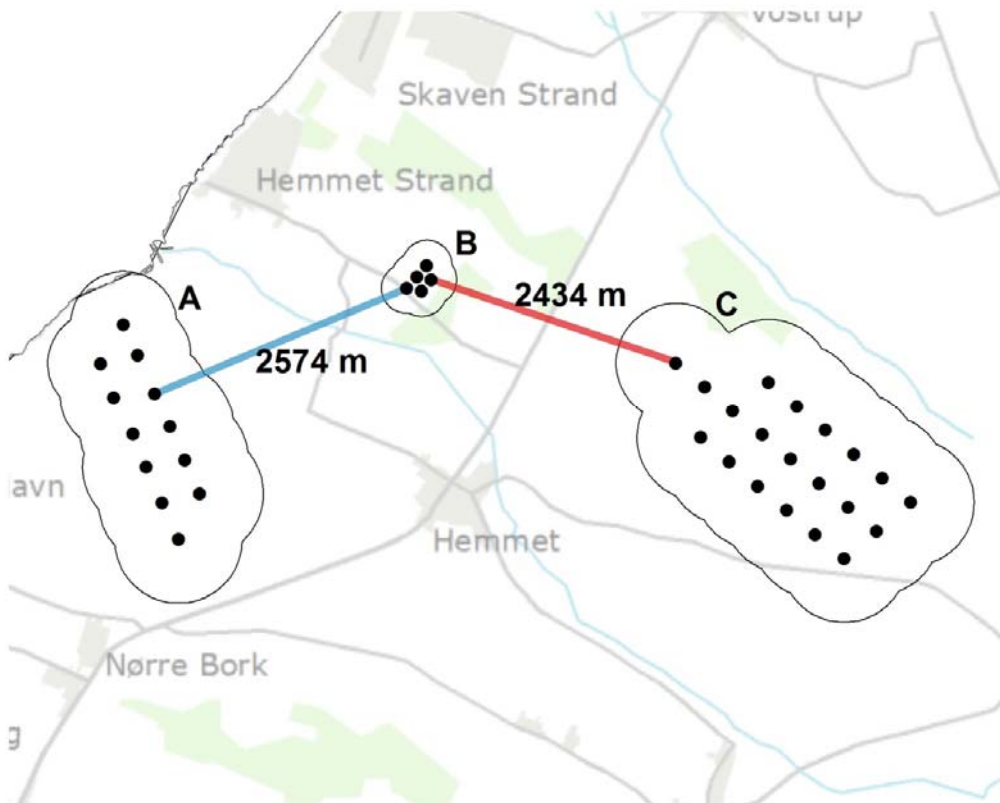
Analysen er foretaget på eksisterende møller fra stamdataregistret for vindkraftanlæg (juli 2018), tilsluttet i 1990 eller senere og med en kapacitet på mindst 500 kW. En klynge er defineret som 2 eller flere møller, der står tæt på hinanden. Dvs. at møllernes 4 MH zoner, beregnet ud fra den enkelte mølles

totalhøjde, er i berøring med hinanden (se Figur 2 for eksempel). Opdelingen giver 763 klynger og den korteste afstand til en anden klynge er beregnet fra mølle til mølle. Til parameterindstillingen af modellen skal afstanden konverteres til MH. Det forudsætter at der vælges hvilken højde, der skal anvendes, da møllerne i to nærliggende klynger sjældent vil have samme højde. Den anvendte højde kan defineres på flere måder, hvoraf to er undersøgt her:

**1)** Højden defineres ud fra klyngen med de laveste møller. Hvis møllerne i én park er 50 meter og møllerne i den nærmeste anden park er 100 m, så er MH beregnet ud fra de laveste møller og  $28 \text{ MH} = 28 * 50 = 1400\text{m}$ .

**2)** Højden defineres ud fra klyngen med de nyeste møller. Hvis møllerne i én park fra 1995 er 50 meter og møllerne i den nærmeste anden park fra 2009 er 100 m, så er MH beregnet ud fra de nyeste møller og  $28 \text{ MH} = 28 * 100 = 2800\text{m}$ .

Et eksempel er vist i Figur 2. Her er tre klynger analyseret og afstandene mellem de nærmeste møller markeret med en rød og en blå linje. Både klynge A og C har klynge B som nærmeste nabo, mens klynge B er nærmest C. Møllerne i B er lidt ældre 600 kW møller sat op i 1996 med totalhøjde på 59,5 m. Møllerne i A og C er nyere og har totalhøjder på 150 m (for A) og 149,5 (for B). Antal møllehøjder mellem A og B er således  $= 2574/59,5 = 43,2$ , hvis den laveste møllehøjde anvendes (1. definition). Dvs. et godt stykke over de 28 MH. Hvis møllehøjden fra de nyere møller i A anvendes (2. definition) ville antal møllehøjder være  $= 2574/149,5 = 17,2$ . Altså væsentlig under de 28 MH.



**Figur 2: Eksempel på beregnede afstande mellem mølleklynger. De tynde sorte omrids repræsenterer 4 MH zoner omkring møllerne.**

Antallet af klynger, hvor nærmeste anden klynge er tættere på end de 28 MH, er angivet i Tabel 6 ud fra de to forskellige definitioner.

**Tabel 6: Opgørelse af antallet af mølleklynger, hvor nærmeste anden klynge er tættere på end 28 MH, hvis de anvendte møllehøjder er enten den laveste eller den nyeste.**

Højde anvendt	Klynger under 28 MH fra nærmeste anden klynge
Totalhøjde fra laveste	252
Totalhøjde fra nyeste	415
Antal analyserede klynger	763

De 763 mølleklynger, der er analyseret, fordeler sig med enten 252 eller 415 klynger, der har under 28 MH til nærmeste anden klynge, og 511 eller 348 klynger der har 28 MH eller længere til nærmeste anden klynge. Dvs. at selv om højderne fra de mindste møller i de to klynger anvendes, er en tredjedel af de eksisterende møller opstillet tættere på hinanden end 28 MH. Disse 252 klynger er i gennemsnit 19,2 MH fra nærmeste anden klynge.

For at teste modellen ift. en lempelig anvendelse om reglen om de 28 MH, indstilles minimum til 20 MH mellem mølleklyngerne. De andre parametre holdes identiske



med standardkørslen (Tabel 4). Resultaterne opsummeret på landsbasis er vist i Tabel 7.

**Tabel 7: Standardkørslens resultater med anvendelse af 20 MH som minimum mellem klynger, opsummeret hele landet.**

<b>Kørsel med 20 MH, hele DK</b>	<b>Resultat</b>
Antal områder	583
Samlet areal	726 km <sup>2</sup>
Antal møller	5003
Potentiale (antaget 3,5 MW pr mølle)	17,5 GW

Antagelsen om 20 MH mellem mølleklynger giver dermed en forøgelse på 132 områder, svarende til ca. 3 GW, ift. standardkørslen. At antallet af områder forøges med ca. 30 pct., mens potentialet øges med ca. 20 pct., skyldes at de ekstra områder generelt er mindre. Dette er pga. den iterative tilgang (beskrevet i afsnit 2.2 - trin 4), der prioriterer de større områder, som derfor i stor udstrækning vil være inkluderet uanset om der anvendes 20 MH eller 28 MH.

#### 3.4. Variation i afstandskrav

Ifølge nuværende lovgivning må der ikke være boliger, inkl. sommerhuse, indenfor 4 møllehøjder (4 MH) af en ny vindmølle. Dette betyder i praksis, at der opkøbes boliger for at skaffe plads. Der er undtagelse for vindmølle ejerens egen bolig. For en mølle på 150m svarer minimumsafstanden til en cirkel med radius på 600m.

Afstandskravet på 4 MH er pt. den mest betydende arealbegrænsning, da det for 87,2 pct. af landet er estimeret at boligudgifter (ved opkøb indenfor 4 MH og erstatning indenfor 10 MH) vil være over 3.000.000 kr.

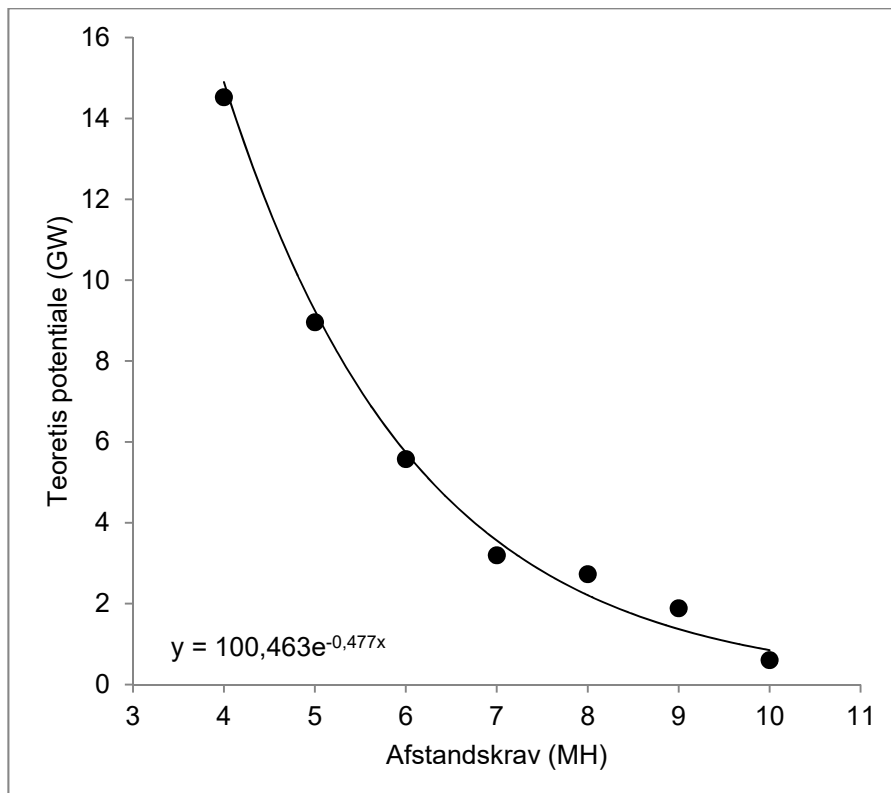
Forøgelse af afstandskravet kan dermed få meget stor betydning for det teoretiske potentiale og er undersøgt gennem flere kørsler. Kørslerne anvender standardindstillingerne, men minimum afstand til boliger, sommerhuse mm. varieres fra 4 MH til 10 MH.



**Tabel 8: Opsummering af resultaterne for hele landet, ved gradvis øgning af afstandskravet med en MH, såfremt resten af parametrene holdes som i standardkørslen. Kolonnen for kørslen med 4 MH er standardkørslen (se Tabel 4 og Tabel 5).**

Afstandskrav, hele DK	4 MH (standard kørslen)	5 MH	6 MH	7 MH	8 MH	9 MH	10 MH
Antal områder	451	324	217	135	98	61	28
Samlet areal (km <sup>2</sup> )	616	361	218	126	120	88	24
Antal møller	4150	2560	1594	914	781	540	173
Potentiale (antaget 3,5 MW pr mølle)	14,5 GW	9,0 GW	5,6 GW	3,2 GW	2,7 GW	1,9 GW	0,6 GW

I Figur 3 illustreres effekten af variation i afstandskravet. De modellerede potentialer kan tilnærmes med funktionen  $y = 100,463 \cdot e^{-0,477x}$ , hvor  $x$  er afstandskravet i MH.



**Figur 3: Afstandskrav (x-akse) og modelleret teoretisk potentiale (y-akse). Værdierne svarer til dem vist i Tabel 8.**

## 4. Analyse af mulig udbygning af landvind, 2020 til 2030

### 4.1. Opsummering

Analysen undersøger den mulige udbygning af landvindkapacitet fra 2020 til 2030 og leverer et bud på størrelsen heraf. Der tages udgangspunkt i et geografisk modelleret teoretisk potentiale baseret på gældende lovgivning, som efterfølgende skæres til vha. analyse af nuværende udnyttelsesgrad af potentielle områder og opstillingshistorik pr. kommune.

Resultaterne viser en mulig udbygning på 2,88 GW fra 2020 til 2030. Det betyder at den nuværende landvindkapacitet på 4,42 GW realistisk kan øges til 5,14 GW i 2030. Variation af centrale parametre indikerer dog et udfaldsrum fra 4,76 til 5,89 GW.

Til sammenligning estimerer frozen-policy grundforløbet i Energistyrelsens Basisfremskrivning 2018 (BF18) en udbygning på ca. 0,2 GW og at landvindkapacitet i 2030 vil være reduceret til 2,8 GW.

Analysen viser også at omkostninger pr. produceret MWh primært bestemmes af egnetheden af potentielle områders placering, og sekundært af varierende udgifter til boligopkøb og værditabserstatning, da områder med lave udgifter forventes at blive taget i brug først og blokere for anvendelse af nærliggende dyrere områder.

### 4.2. Intro til analysen

Energiproduktion fra landvindmøller er en vigtig del af det danske energisystem og omstillingen til vedvarende energi. Gennem en årrække er der sket en statsstøttet udbygning af kapaciteten og andelen af vindenergi i den samlede el-produktion har været stigende. Dette er f.eks. afspejlet i Stamdataregistret for vindkraftanlæg (juli 2018), der viser en gennemsnitlig årlig udbygning på land på ca. 200 MW siden 2010.

Ifølge BF18 vil andelen af vindkraft (land og hav) i elforbruget fortsat øges fra 43 pct i 2015 til 56 pct i 2020, men derefter falde til 39 pct i 2030. BF2017 er en såkaldt frozen-policy fremskrivning og medtager kun eksisterende politiske tiltag. Dette bevirker at der i grundforløbet i BF2017 ses et fald i landvindkapacitet til 2,8 GW i 2030.

#### 4.3. Landvind i dag (juli 2018)

Ifølge stamdataregistret for vindkraftanlæg var der i juli 2018 en samlet landvindkapacitet på 4,42 GW, hvoraf de 2,16 GW er opført i 2005 eller senere (se fordeling pr. kommune i figur 4 A) og kan forventes stadig at eksistere i 2030, forudsat en teknisk levetid på minimum 25 år. Langt de fleste vindmøller opstilles i dag i parker med mindst 3 i hver, med undtagelse af husstandsmøller. Husstandsmøller udgør dog kun en samlet kapacitet på ca. 18 MW. Udløbet af støtteordningen "25-øren" i februar 2018 resulterede i, at en stor mængde ny landvind kapacitet blev tilsluttet i perioden op til udløbsdatoen. Fra starten af november 2017 til slutningen af februar 2018, blev 123 nye møller tilsluttet (ekskl. husstandsmøller), med en samlet kapacitet på 417 MW. Ifølge stamdataregistret fra juli 2018, er der ikke tilsluttet nye større landvindmøller siden 25-ørens afslutning.

#### 4.4. Teoretisk potentiale

Det teoretiske potentiale fra standardkørslen med 28 MH er 14,5 GW fordelt på 451 områder (se Tabel 5). Anvendes 20 MH i stedet for 28 MH, øges det teoretiske potentiale til 17,5 GW fordelt på 583 områder (se Tabel 7). Ved opgørelse af det teoretiske potentiale for 2030 indregnes den eksisterende kapacitet opført i 2005 eller senere og hertil føjes de potentielle områder, der ikke blokkeres af de eksisterende vindmølleparker. De blokerede arealer er afhængige af, om der anvendes 28 eller 20 MH. For 28 MH giver det et teoretisk potentiale i 2030 på 12,7 GW og for 20 MH 16,6 GW.

#### 4.5. Udnyttelsesgrad

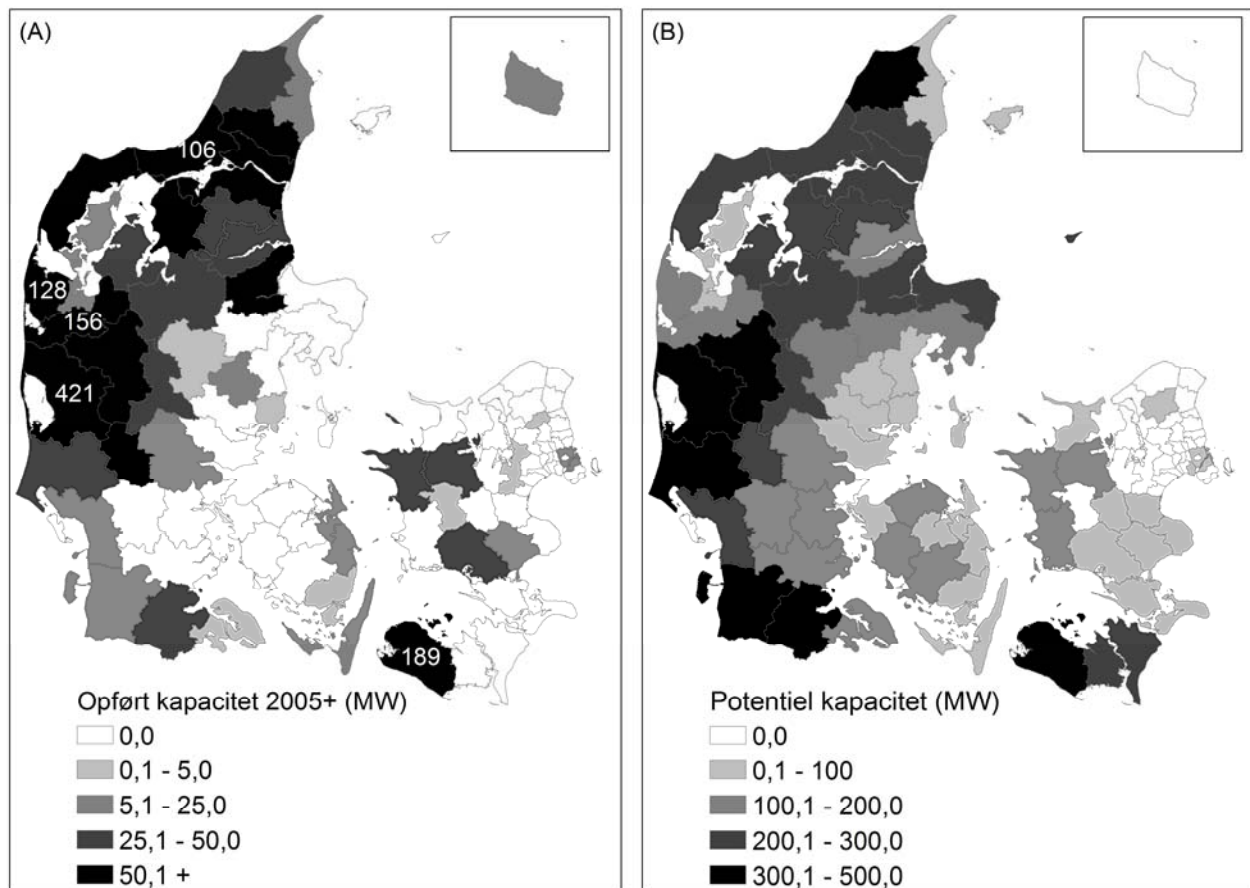
En sammenligning mellem det estimerede maksimale antal møller i 73 potentielle områder udpeget af modellen, og det faktisk opførte antal møller af sammenlignelig størrelse (totalhøjde  $\geq 120$  m), viser en udnyttelsesgrad der er væsentlig under det estimerede teoretiske potentiale. Det estimerede maksimum er i alt 1110 (3885 MW) møller i de 73 områder, mens det faktisk opførte antal er 417 (1459,5 MW), altså en udnyttelsesgrad på 38 %. Generelt har arealmæssigt store potentielle områder en lavere udnyttelsesgrad end mindre områder, og sammenhængen kan tilnærmes lineært ved  $y = 0,2x + 3$ , hvor  $y$  er det faktiske antal opstillede vindmøller og  $x$  er det estimerede, teoretisk maksimale antal vindmøller. Dvs. at for potentielle områder, med plads til 3 eller 4 møller, vil der typisk også være opstillet 3 eller 4 møller. I et potentielt område med plads til 20 møller vil der i gennemsnit være opstillet 7 møller. Når der tages hensyn til udnyttelsesgraden reduceres det teoretiske potentiale til henholdsvis 6,8 eller 8,5 GW (for 28 eller 20 MH), heraf er 1,5 eller 1,4 GW blokeret af eksisterende vindmøller fra 2005+. Fordelingen af potentialet (20 MH) pr. kommune er vist i figur 4 B.

#### 4.6. Kommunehistorik

Potentialemodellens standardkørsel viser, at der er 65 kommuner med mindst et område med potentiale for opstilling af 3+ vindmøller på 150 m, og der er 33 kommuner uden potentielle områder. Anvendelse af enten 28 eller 20 MH ændrer ikke dette. Af de kommuner, hvor der findes potentielle områder, er der stor variation i, hvor meget kapacitet der er opstillet i nyere tid. Ifølge stamdataregistret for vindkraftanlæg, juli 2018, er der i 37 af kommunerne opført mere end 5 MW siden 2005. Årsagerne til forskellene i opstillingshistorik analyseres ikke h

**Tabel 9: Kommuneopssummering.**

Forudsætning	Antal kommuner
Ingen	98
Indeholder potentielle områder	65
Indeholder ingen potentielle områder	33
5+ MW opstillet siden 2005	37



**Figur 4, A: Opført kapacitet i MW siden 2005 (vindmøller over 1 MW medregnet). B: Potentiel kapacitet for landvindkraft fra større vindmøller (150 m) pr. kommune under hensyn til udnyttelsesgraden som beskrevet i afsnit 4.5.**



#### 4.7. Estimat af mulig udbygning fra 2020 til 2030

Det er nødvendigt at tage hensyn til den stærkt varierende opstillingshistorik for kommunerne, for at levere et realistisk bud på muligheden for udbygning af landvind fra 2020 til 2030. I de 10 kommuner der har oplevet den største kapacitetsudbygning siden 2005, og hvor der er plads til mindst 10 større møller, er der i gennemsnit opført kapacitet svarende til 77 % af det estimerede potentiale, beregnet med 28 MH (inkl. hensyn til udnyttelsesgraden af de potentielle områder). Det antages derfor at 77 % af potentialet kan blive anvendt frem mod 2030 i kommuner med historik for opførelse siden 2005, samt at 20 % af potentialet kan blive anvendt i kommuner, der ikke har historik for opførelse siden 2005. Der forventes ca. 0,19 GW i alt fra de teknologineutrale udbud, men fordelingen af landvind, PV eller åben dør havvind kendes ikke, og desuden stilles møllerne ikke nødvendigvis op før 2020. For at tage højde for, at udbuddene kan optage potentielle områder, fratrækkes 2020-2030 udbygningsestimateret 0,1 GW, der antages at komme som landvind frem til 2020. Et bud på den mulige udbygning af landvind fra 2020 til 2030 kan således se ud som følgende:

$$LU2030 = Pot1 * k1 + Pot2 * k2 - U$$

Hvor LU2030 er den estimerede mulige landvindudbygning fra 2020 til 2030. Pot1 er det teoretiske potentiale nedjusteret mht. underudnyttelse af områder og summeret for de kommuner, der har historik for at opstille større landvindmøller siden 2005. Pot2 er det samme som Pot1, men for de kommuner der *ikke* har historik for opstilling af større landvindmøller siden 2005. k1 og k2 er henholdsvis de 77 % og 20 % forventet anvendelse. Indsættes de i førnævnte udtryk giver dette:

$$LU2030 = 3,38 \text{ GW} * 77 \% + 1,88 \text{ GW} * 20 \% - 0,1 \text{ GW} = 2,88 \text{ GW}$$

Altså en mulig udbygning af landvindskapacitet på 2,88 GW fra 2020 til 2030 (se også første række i Tabel 10). Med 2,16 GW eksisterende kapacitet bliver den samlede mulige kapacitet i 2030 således 5,14 GW (LU2030 + eksisterende + udbud), svarende til 0,72 GW mere kapacitet ift. juli 2018 og 2,45 GW mere kapacitet end fremskrevet i BF18.

#### 4.8. Alternative udbygningsestimater

Værdierne for parametrene Pot1, Pot2, k1 og k2 kan fastsættes anderledes end beskrevet i afsnit 4.7, hvis det teoretiske potentiale beregnet med 20 MH anvendes, eller hvis der tages hensyn til effekten af 25-ørens ophør. Derudover kan der argumenteres for at k2 er sat højt. Derfor beregnes fire alternative estimater (se

række 2-5 i Tabel 10 for oversigt), som supplerer bedste bud estimeret (række 1 i Tabel 10). Tilsammen angiver de fem estimater et udfaldsrum.

Hvis kommuner, hvor der ikke er opstillet mindst 5 MW siden 2005, antages at fortsætte uden ny opstilling af vindmøller fra 2020 til 2030, kan k2 sættes til 0 % (række 2 i Tabel 10). Dette repræsenterer den mulighed, at der er kommuner med et estimeret potentiale for opstilling af større landvindmøller, hvor potentialet af uspecificerede årsager ikke bliver anvendt frem til 2030.

Hvis det teoretiske potentiale beregnet med 20 MH anvendes (afsnit 3.3) øges Pot1 og Pot2 og k1 reduceres, da den opførte kapacitet i de 10 kommuner med størst udbygning så svarer til 66 % af potentialet (række 4 i Tabel 10). Der er givet mange dispensationer ift. de 28 MH, og de 252 mølleklynger, hvor der med ret stor sikkerhed må antages at være givet dispensation (se Tabel 6 i afsnit 3.3), udgør sammenlagt en kapacitet på lidt over 1 GW fordelt i 33 kommuner. Heraf er 51 % dog koncentreret i blot 4 kommuner (Ringkøbing Skjern, Lemvig, Lolland og Holstebro). Disse kommuner er også blandt dem, hvor der er opført mest kapacitet ift. modelleret potentiale siden 2005 og hvor det frie potentiale ikke længere er stort.

Hvis de 417 MW, der blev tilsluttet i perioden lige op til at 25-øren udløb (november 2017 til februar 2018) ikke inkluderes i fastsættelsen af k1, reduceres k1 til henholdsvis 68 % eller 53 % (række 3 og 5 i Tabel 10), alt efter om det teoretiske potentiale beregnet med 28 MH eller 20 MH anvendes. De 417 MW fra 25-ørens afslutning indgår som eksisterende kapacitet i den samlede vurdering af landvindkapacitet i 2030. Dog kan der argumenteres for, at den hastige udbygning repræsenterer en usædvanlig situation, hvor udmeldingen om en gunstig støtteordnings nærtforestående afslutning, gav et midlertidigt øget incitament, som ikke kan forventes at være generelt frem mod 2030, og derfor ikke bør inkluderes i k1.

Spændet omkring fremskrivningen af mulig samlet landvindkapacitet i 2030 vurderes således fra 4,76 GW (28 MH, eksklusiv 25-ørens afslutning i k1, og ingen ny kapacitet i kommuner, der ikke allerede har historik for opstilling) til 5,89 GW (20 MH og inklusiv 25-ørens afslutning), med bedste bud på 5,14 GW.



**Tabel 10: Oversigt over estimerne af landvindudbygning og samlet kapacitet frem til 2030, ud fra anvendelse af teoretisk potentiale beregnet med 28 og 20 MH, samt om 25-ørens afslutning inkluderes eller ekskluderes i fastsættelse af k1.**

MH	Inkl. 25-ørens afslutning i k1	Pot1 (GW)	Pot2 (GW)	k1 (pct)	k2 (pct)	2030 udbyg. (GW)	2030 total (GW)
28	Ja	3,38	1,88	77	20	2,88	5,14
28	Ja	3,38	1,88	77	0	2,50	4,76
28	Nej	3,38	1,88	68	20	2,57	4,83
20	Ja	4,95	2,33	66	20	3,63	5,89
20	Nej	4,95	2,33	53	20	2,99	5,25

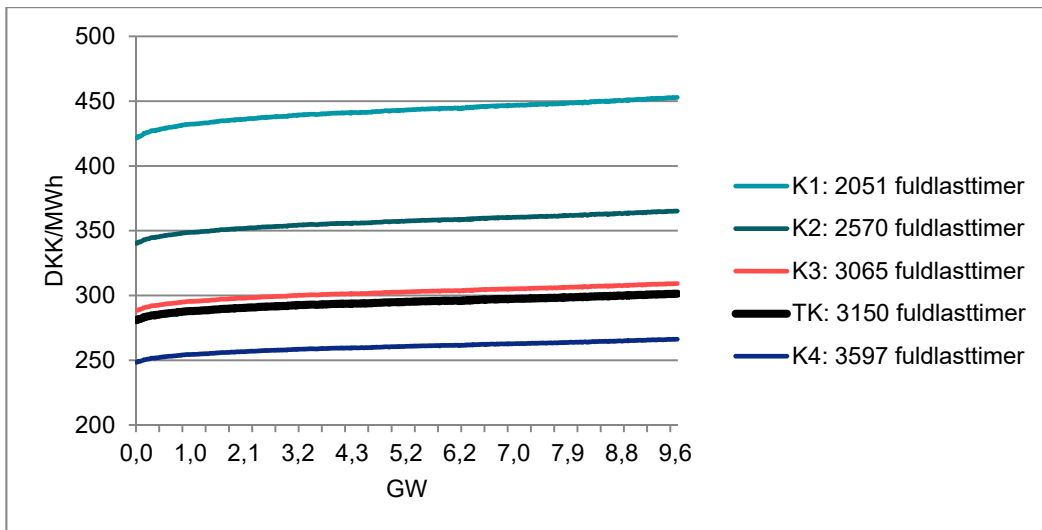
#### 4.9. Produktionsomkostninger pr MWh

Til beregning af de samlede omkostninger pr. produceret MWh anvendes tal fra teknologikataloget (2020 estimer), som vist i tabel 11 nedenfor. Antal fuldlasttimer pr. år er i kataloget angivet til 3150, men dette suppleres med en vurdering af spændet af fuldlasttimer, lavet på baggrund af årlige produktionstal for landvindmøller opstillet mellem 2005 og 2015, med en kapacitet på 2 MW eller mere. Værdierne er gennemsnitsværdier for alle fulde produktionsår for de givne møller, og møllerne er opdelt i kvartiler. Det forventede antal fuldlasttimer for nye møller ligger således imellem 3. og 4. kvartil for eksisterende møller.

**Tabel 11: Parametre til omkostningsberegning**

Parameter	Værdi
Rente til diskontering	6,5 %
Fuldlasttimer	2051/2570/3065/ <b>3150</b> /3597
Kapacitet	3,5 MW pr. anlæg
Forventet levetid	27 år
CAPEX (inkl. net)	7.375.500 DKK/MW
OPEX fixed	178.055 DKK/MW
OPEX variabel	18,63 DKK/MWh
Grøn ordning	88.000 DKK/MW
Køberetsordning	640.000 DKK/MW
Bolig, opkøb	Varierer efter område
Bolig, værditabserstatning	Varierer efter område

I figur 5 vises omkostningsvariationen pr. MWh. De forskellige linjer repræsenterer produktionspriserne ud fra gennemsnitlige årlige fuldlasttimer, mens linjernes stigning repræsenterer forskellen i boligudgifter (opkøb og erstatning) for de billigste til de dyreste områder der forventes ibrugtaget. Afstandskravet om minimum 28 MH imellem parker bevirker at kun relativt billige områder vil blive taget i anvendelse, da områderne med lave udgifter forventes at blive ibrugtaget først og vil blokere for anvendelse af nærliggende dyrere områder. Derved bliver egnetheden af vindmøllernes placering samt deres effektivitet afgørende for prisen.



**Figur 5: Beregnet omkostning pr. produceret MWh for landvindkraft for varierende antal fuldlasttimer (K1= fuldlasttimer for 1. kvartil etc.). X-aksen angiver den akkumulerede kapacitet i GW for de 583 områder, inkl. hensyn til udnyttelsesgrad.**

#### 4.10. Referencer

Analysen anvendte følgende eksisterende materiale fra Energistyrelsen:

- Stamdataregistret for vindkraftanlæg, juli 2018
- Basisfremskrivningen 2018
- Teknologikataloget: "technology\_data\_for\_energy\_plants\_-\_aug\_2016.\_update\_june\_2017.xlsx"