

Nyt regionalt DK-vind energi indeks beregningsmetode/kalibrering/validering

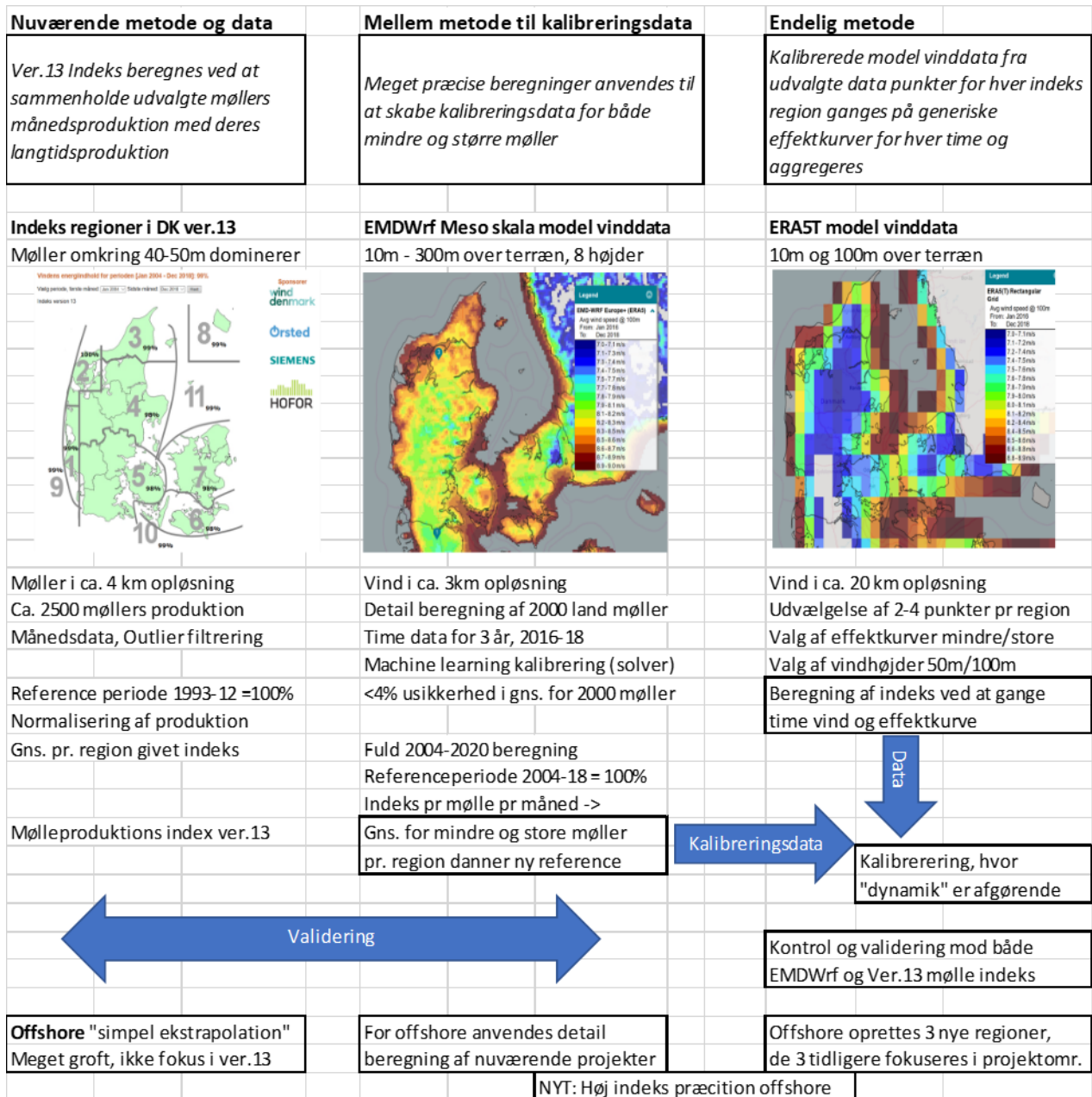
Ver. 1 Per Nielsen, EMD International AS 2-3-2021

Review: HSP 22/09/2020

Contents

Metode, overblik	2
Beregning af 2000 DK onshore vindmøller, "machine learning" kalibreret	5
Kvalitets evaluering af beregnings resultater	6
Etablering af nyt "reference indeks" baseret på kalibrerede mølleberegninger	13
Etablering af indeks baseret på ERA5T model data.....	19
Validering af ERA5T indeks mod reference indeks baseret på EMDWrf detail beregninger	21
Validering af ERA5T indeks mod nuværende DK.13 mølleproduktions indeks.....	24
Offshore indeks beregning, kalibrering og validering	27
Kalibrering og validering af offshore indeks.....	30
Sæson kalibrering/validering.....	33
Sammenfatning	35

Metode, overblik



Figur 1 Beregnings metode illustreret i diagram form.

1. Ca. 2000 Vindenergi DK møller (500kW+) er kalibreret baseret på avanceret Solver metode ¹⁾, så EMDWrf meso scala model data, downscaled ²⁾ (der er det der giver vindhastigheder tættest på virkeligheden), reproducerer produktion time for time for perioden 2016-18 bedst muligt. Der anvendes avanceret outlier filtrering ³⁾, så kun timer med "normal drift" anvendes. Usikkerheden målt som standardafvigelsen på forskellen mellem målt og beregnet på de 36 måneders normal drift data er under 4% i gns. for de knap 2000 møller.
2. De ca. 2000 møllers beregnede månedsproduktioner (fuld driftstid/100% rådighed) divideres med gns. beregnede månedsproduktioner for 2004-18 (15 år), som er valgt som den nye normalperiode⁴⁾. Herved haves vind energi indeks for hver mølle for hver måned.
3. For hver indeks region findes gns. måneds indeks fra disse møller opdelt i hhv. lav (<60m) og høj navhøjde. For høj navhøjde anvendes variant med max 380 W/m² specifik effekt, da det nye indeks ønskes at repræsentere den moderne "lavvindsmølle", ikke fx V90 3MW der er udpræget højvindsmølle med 425 W/m², som der er en del opstillet af, grundet fuldlasttime tilskudsordning, der tilgodeså stor generator effekt. Derved vil indeks passe bedre til nye møller, relativt til højvindsmøller.
4. Det EMDWrf baserede "mellem indeks" valideres op mod det mølleproduktions baserede danske indeks, hvor det udviser meget fin overensstemmelse ⁵⁾, og afvigelser synes meget klart at skyldes at det møllebaserede indeks "driver" i tid, dels grundet tiltagende bevoksning, dels faldende mølleperformance, dels mere markedsregulering. Bl.a. ses ikke drift i forhold til de kystnære mølleplaceringer, men nogen drift ved indlandsplaceringer med megen bevoksning. For de seneste 2-4 år vil man typisk se at det nye indeks er omkring 4% højere end det hidtidige, der som gennemsnit har overvægt af indlandsplaceringer.
5. De beregnede EMDWrf baserede indeks for hver af ca. 2000 mølleplaceringer benyttes som reference – eller "sandheden" ved kalibrering af nyt indeks baseret på ERA5T⁶⁾ data og generiske effektkurver⁷⁾. Indeksberregning kalibreres så dynamikken er intakt og korrelationen i top.
6. Der udvælges en række ERA5T punkter repræsenterende hver indeks region ⁸⁾, baseret på at disse skal repræsentere regionen bedst muligt, f.eks. søges punkter med offshore vindklima (trods de ligger over land), undgået. Dette er desværre ikke muligt for fx Bornholm, hvorfor en ret markant kalibreringsfaktor må anvendes her. Men også for sydhavsøerne, reg.6, ses lignende problemer.

¹ Solver metode er en "machine learning" metodik, der finder optimale kalibrerings konstanter ved at minimere forskellen mellem målt og beregnet gennem metodisk justering af kalibreringskonstanter.

² EMDWrf meso scala model data, downscaled. EMDWrf er et meso scala model data sæt som EMD har kørt med den US baserede Wrf meso skala model med ERA5 data som input help.emd.dk/mediawiki/index.php?title=EMD-WRF_Europe%2B Downscaling er en metode til at omsætte disse data til en konkret position og højde (mølleplacering), udviklet af EMD.

³ Outlier filtrering anvendes for at fjerne data, der er upålidelige. EMD har egenudviklet en avanceret metodik hertil.

⁴ Ny normal periode, 2004-18. Tidligere anvendtes 1993-2012, før det har andre perioder været anvendt som normalen. Det er meget afgørende for et retvisende indeks at normalperioden er langtidsrepræsentativ.

⁵ Validering af Meso beregnet indeks mod mølleproduktions indeks fokuserer primært på at dynamikken skal være intakt, dvs. de ringeste og bedste vindmåneder skal rammes korrekt, herudover skal korrelationen mellem de to indeks være i top.

⁶ ERA5T er en Temporær udgave af ERA5, som frigives få dage efter månedsslut for forudgående måned. Dermed vil denne datakilde gøre at nye vind energi indeks vil kunne være klar ca. 1 uge efter månedsslut. Baseret på ERA5 ville der være omkring 3 måneders forsinkelse. EMD holder løbende øje med om de temporære data ændres efter den endelige kvalitetskontrol, dette er hidtil ikke set.

⁷ Generiske effektkurver, er typiske effektkurver repræsenterende de møller, indeks skal anvendes sammen med.

⁸ Punkter til ERA5T indeks beregning er udvalgt med ca. 4 punkter pr region, der er fundet repræsentative.



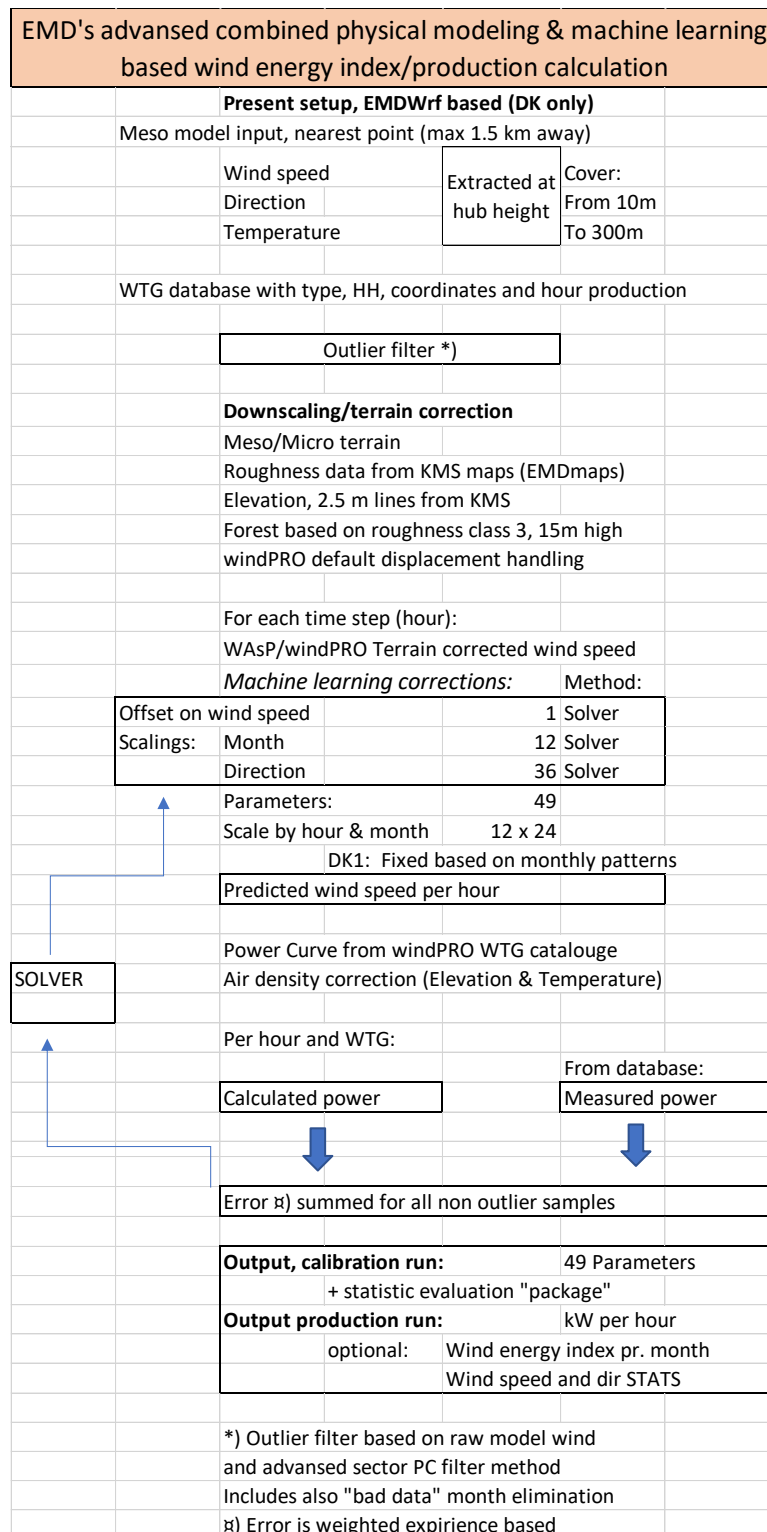
7. Kernen i kalibrering er at de 15 års månedsindeks fra hhv. EMDWrf baseret detail mølle kalibreret indeks og ERA5T punkt indeks (Model indeks), skal have samme dynamik (hældning), når korrelationsanalyse laves for hver indeks region. Desuden skal korrelation være høj. Den parameter der skal justeres for at opnå den mest korrekte hældning, er en skalerings faktor på vindhastigheden⁹). Vindhastigheden for ERA5T punkter skal skaleres til at være repræsentativ for møllepopulationen i regionen. Mange andre kalibreringsmetoder er afprøvet, men det er den beskrevne der virker klart bedst, og har samtidig den fordel, at den er simpel og forklar bar.

I det følgende dokumenteres de enkelte delelementer i den beskrevne metode.

⁹ Skalering af ERA5T vindhastigheder er den metode blandt flere afprøvede metoder, der viser sig at performe bedst.

Beregning af 2000 DK onshore vindmøller, "machine learning" kalibreret

Med time produktionsdata 2016-18 (3 år) for ca. 2000 møller, er der etableret et meget avanceret beregnings setup:



Figur 2 Model kæden for den nyudviklede meget præcise energiberegnings metode.

EMDWrf EU+ meso scala model data nærmeste punkt (max. 1,5 km fra mølleplacering) anvendes som input time for time.

Meso scala data downscales ved at "løfte" meso terræn af og påtrykke micro terræn med WAsP model. Der anvendes de af EMD etablerede ruhedskort anvendt ved beregning af Vindresourcekort 1998, som fortsat betragtes som den mest præcise ruhedsbeskrivelse der er tilgængelig. KMS højdedata med 2,5 m konturlinjer anvendes. Desuden anvendes skovmodel baseret på at hvor ruhedsklasse er => 3, oprettes en skov med 15m højde, som korrigerer vindhastighed individuelt efter retning og afstand. Vindmøllens navhøjde (Stamdata register med korrektion for åbenlyse fejl gennem samkøring med ældre VINDSTAT database baseret på møllejeres indrapporteringer) og effektkurve fra windPRO møllekatalog anvendes.

Beregnet produktion time for time sammenholdes med målt time for time. Der etableres en SOLVER baseret efterkalibrering, hvor der for 36 vindretnings sektorer og 12 måneder oprettes skaleringsfaktorer. Desuden en offset på vindhastighed. Der er gennem analyser fundet bedste døgnvariations korrektioner for hver måned. De "frie" $36+12+1 = 49$ parametre justeres til at give den bedste sammenhæng mellem målt og beregnet produktion time for time i 3 år, for ikke outlier markerede timer.

Der køres en avanceret outlier detektion, som anvender retningsopdelte erfarede effektkurver til at detektere driftsproblemer, dvs data punkter, hvor produktion er markant under forventet, typisk 0 produktion, hvor der burde være produktion.

Kvalitets evaluering af beregnings resultater

Kvaliteten af beregningerne for de ca. 2000 møller måles på en række parametre, hvor det grundlæggende kvalitetsmål er hvor god sammenhængen mellem målt og beregnet for ikke outlier data er summeret for hver måned. For de 36 måneder ses på:

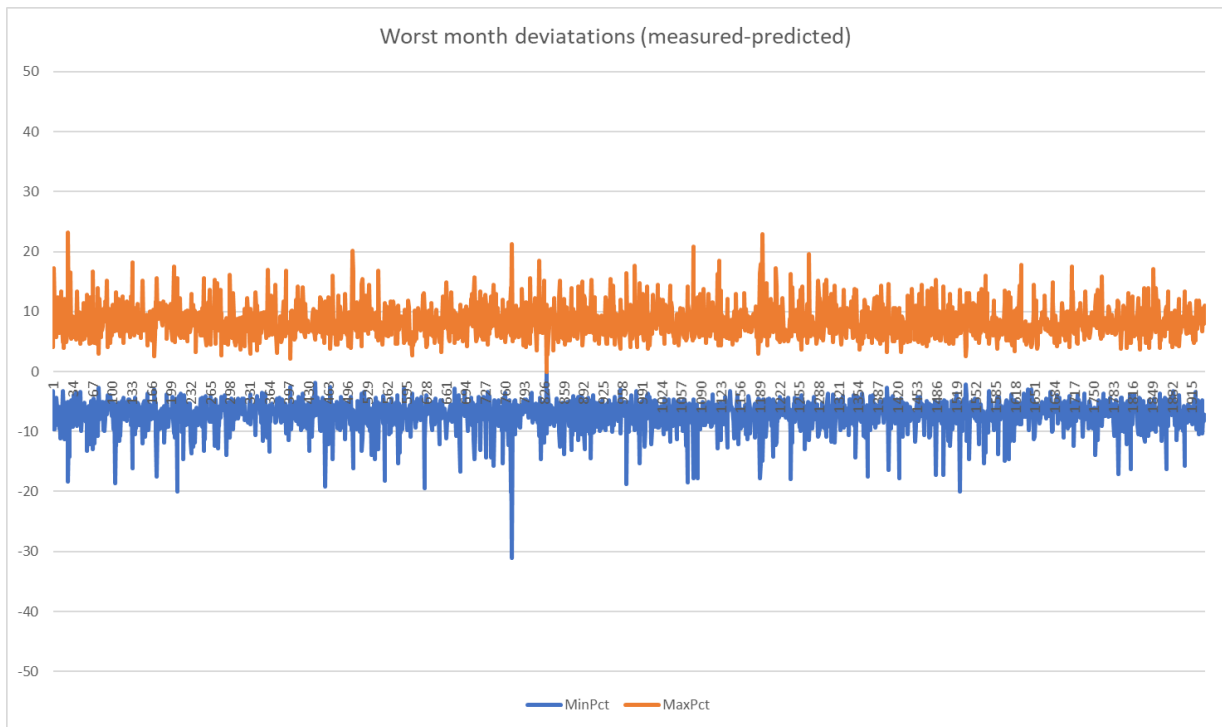
- Hvad er den største procentuelle hhv. positive og negative måneds afvigelse
- Hvad er usikkerheden målt som standardafvigelsen for de 36 måneds afvigelser

Desuden testes på hvor stor offset der kræves på vindhastigheden og hvor stor mængde outlier filtrering der er.

Resultaterne heraf analyseres efter møllestørrelse (navhøjde), mølletype og geografisk placering for at finde frem til om der er særlige problemområder, der kan føre tilbage til forbedring af metoden. Der er så kørt omkring 20 metode forbedringer, før den endelige kørsel, for hvilken resultater her præsenteres.

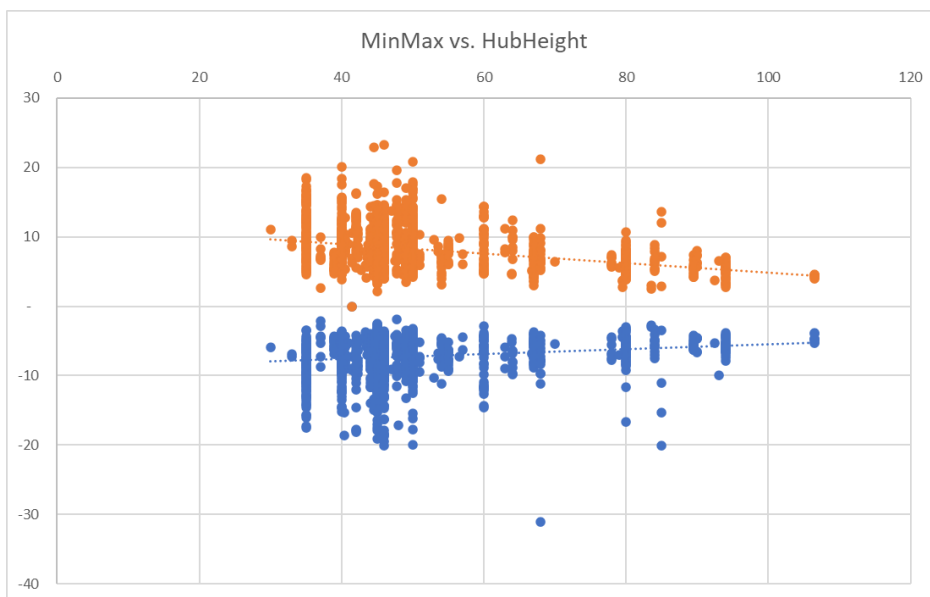
Gennem de ca. 20 kørsler, er der bl.a. fundet følgende problemårsager:

- Møllen er tilsluttet indenfor ejers installation, og målt produktion er kun den solgte andel
- Møllen har fået "nye naboer" gennem 3 års perioden, og dermed markant ændrede park skyggetab.
- Møllen har fået en markant defekt gennem 3 års perioden og dermed produceret markant ringere i en del af perioden.
- Modellen fejlede grundet for ringe outlier filtrering eller andre problemer, der kunne rettes.

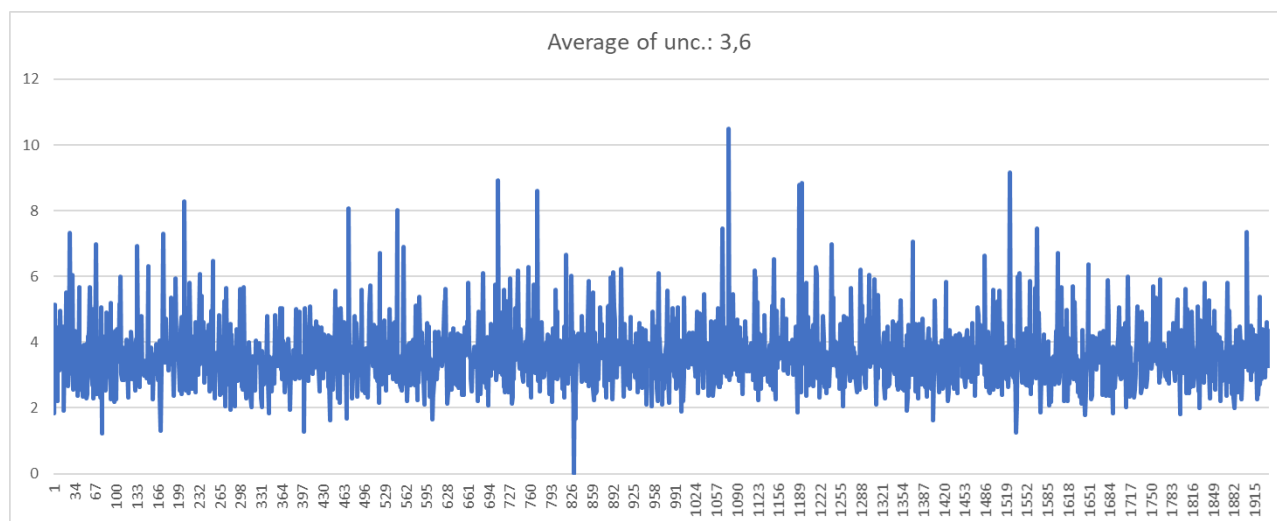


Figur 3 Gennemsnitlige "værste måneder" ligger indenfor +/- 8% for de knap 2000 møller.

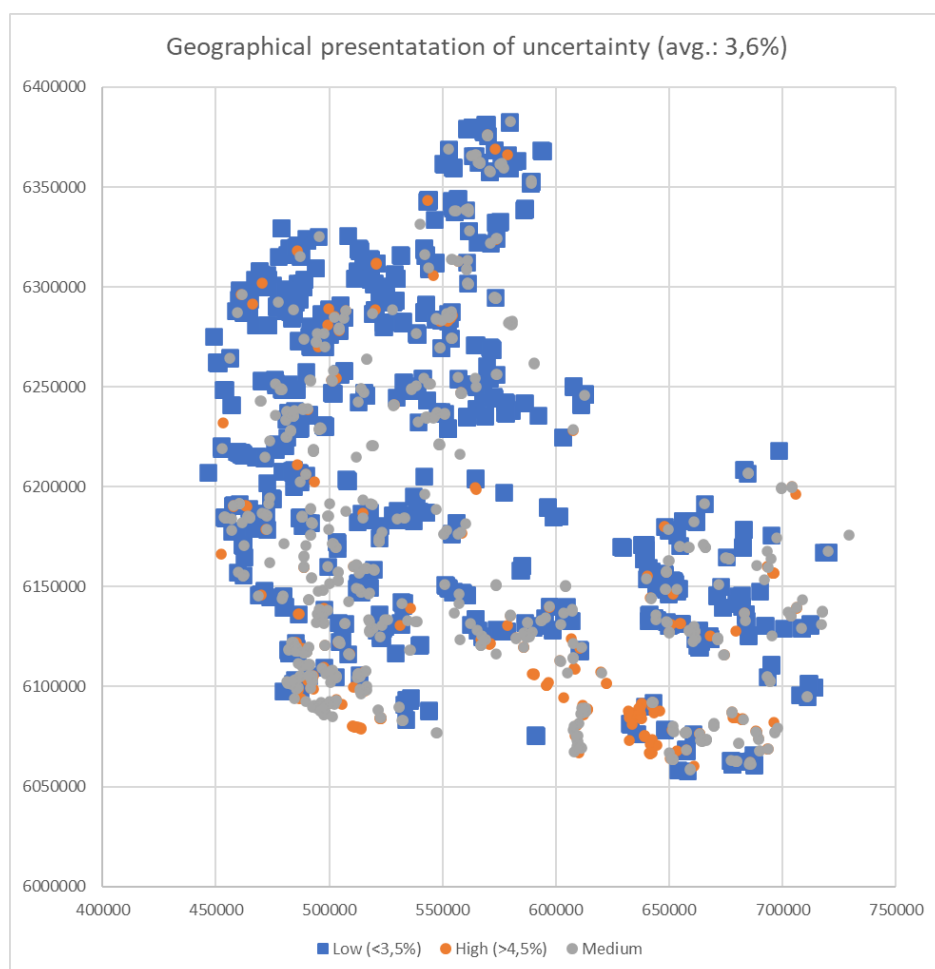
Der er enkelt måneder der afviger op til omkring +/- 20%. De største afvigelser skyldes typisk at en mølle har stået stille de meste af måneden, og dermed er der et lille datagrundlag.



Figur 4 Værste måneds (Max – min) fejl falder markant med mølle størrelse og vil typisk være under +/- 10% for store møller.

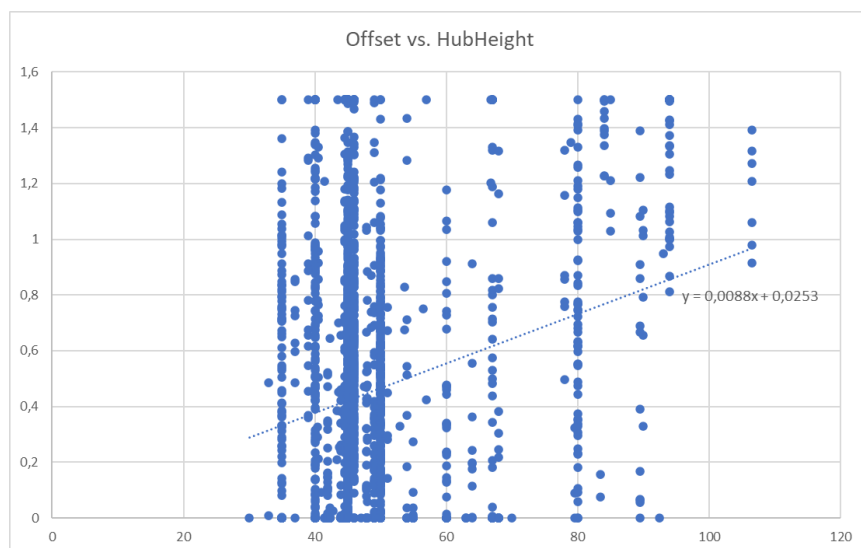


Figur 5 Den gennemsnitlige usikkerhed er 3,6% og typisk under 6%.



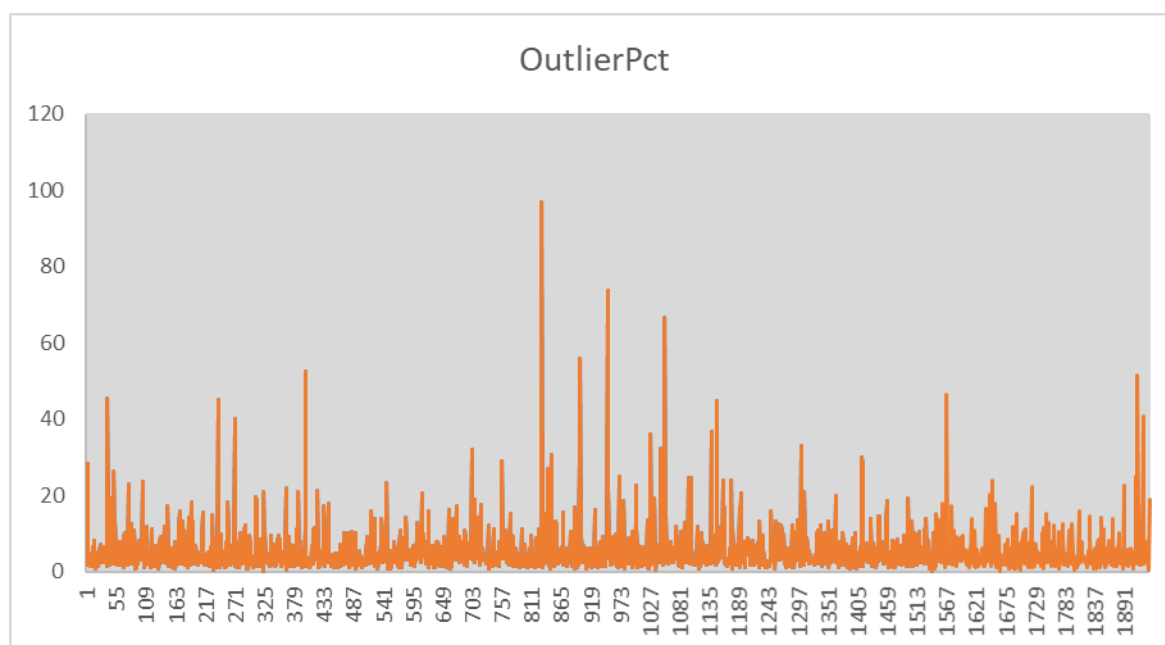
Figur 6 Usikkerheden er størst på Falster, hvor model data ikke "fanger" onshore vindklima godt nok.

Der er en markant tendens til at møller på Falster og sydfynske øer har en overvægt af høje usikkerheder, formentlig fordi model data her "ser" vindklimaet som offshore og derfor ikke repræsenterer det klima møllerne ser så godt som i resten af landet. Bornholm er udeladt her da der er meget få møller i testgruppen.



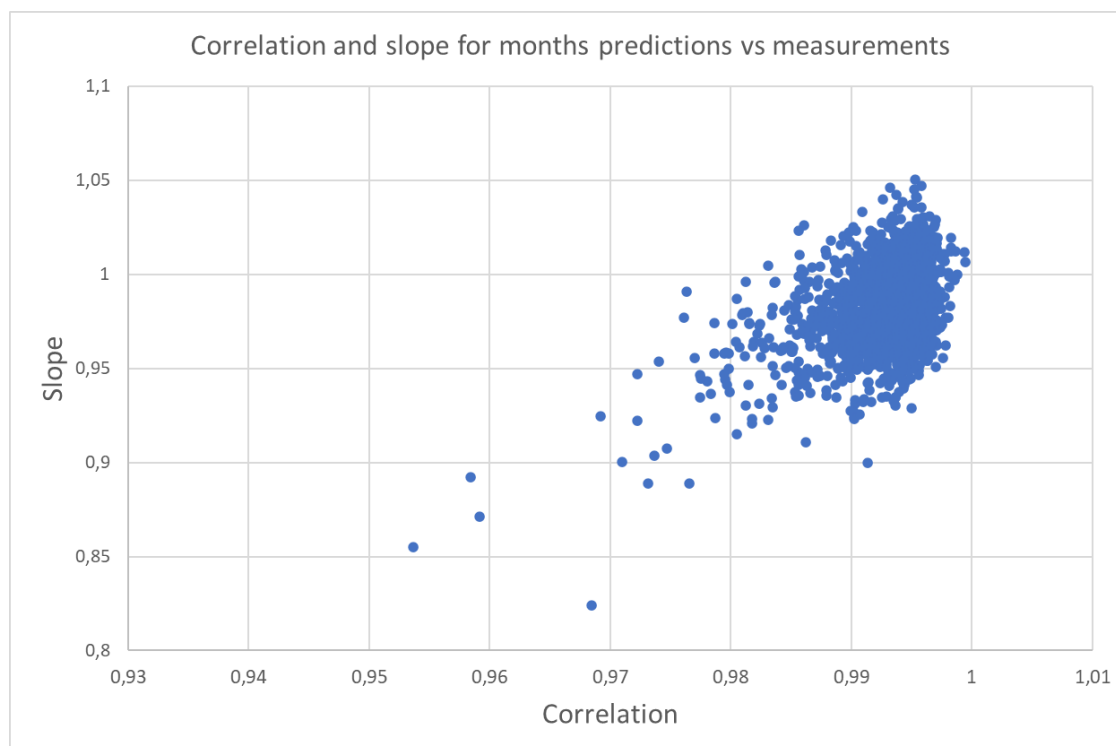
Figur 7 Den offset på modelvindhastighed der fungerer bedst, stiger lidt med møllehøjden, er i gns 0,46.

Offset betyder at tillægger man alle vindhastigheder en fast værdi mellem 0 og 1,5 m/s, så får man en bedre korrelation mellem målt og beregnet. Offset korrigerer for at model vinddata ikke repræsenterer den "virkelige" vinds fordeling på vindhastigheder godt nok. At benytte offset i kalibrering viste sig at reducere usikkerheder ganske pænt.



Figur 8 Procent del outlier detekterede data pr mølle er i gns. 5,4% og typisk under 10%.

At der er relativt få outliers er vigtigt for at skabe tillid til metodikken. Ideelt set skal der ikke frasorteres flere end dem der skyldes møllestop eller bevidst reduceret ydelse, hvilket nok vil være i størrelsesordenen 3-5% for disse møller, hvoraf mange er ældre, og de nyere markedsregulerer. Yderligere frasortering kan tilskrives at model data og/eller beregningsmodeller er for ringe. Der er én mølle med outlier procent på 97%, denne mølle har stået stille næsten alle 3 år med data, derfor er den naturligvis ikke brugbar og er senere taget ud af de videre anvendelser af data.

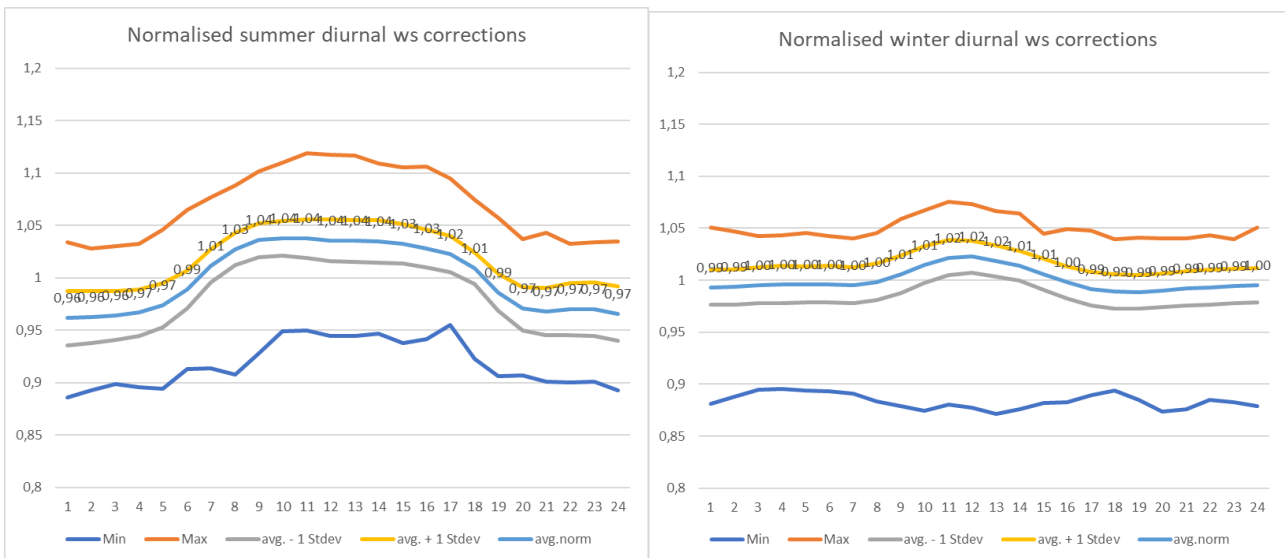


Figur 9 Korrelation og hældning ved sammenligning af målte og beregnede måneds data pr mølle.

Her præsenteres de knap 2000 møllers beregnings performance udtrykt ved korrelation og hældning, der gerne skulle være tæt på 1,0. Som det fremgår er dette også tilfældet.

Alt i alt kan konkluderes at beregningsmetode og model vinddata fungerer rigtig godt. En måned til måned usikkerhed under 4% i reproduktion af 2000 møllers målte produktion, er meget høj kvalitet, når man ved hvor varierende vindhastigheder er, og hvor stor betydning dette har for produktionen. Vindens energi stiger med vindhastigheden i 3' die potens, det fortæller meget om hvor vanskelige vindenergi beregninger er.

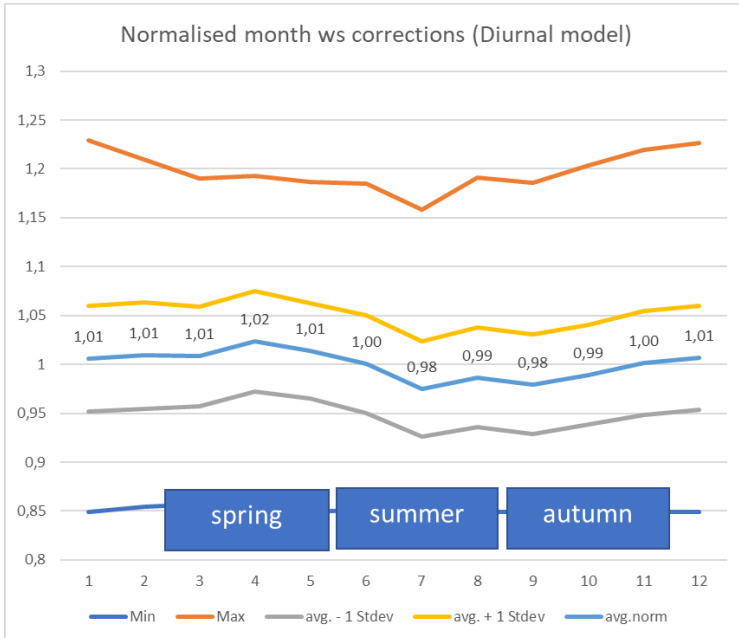
En af de væsentlige korrektioner i modelberegningen er døgn variationen, hvor EMDWrf model data ikke rammer den døgnvariation der ses i mølleproduktioner. Men da denne fejl er ret konstant fra mølle til mølle, men sæson afhængig, vælges at etablere en fast månedlig døgnkorrektionskurve.



Figur 10 Nødvendig døgnvariations korrektion med EMDWrf data er meget ens for alle møller (lav st.dev).

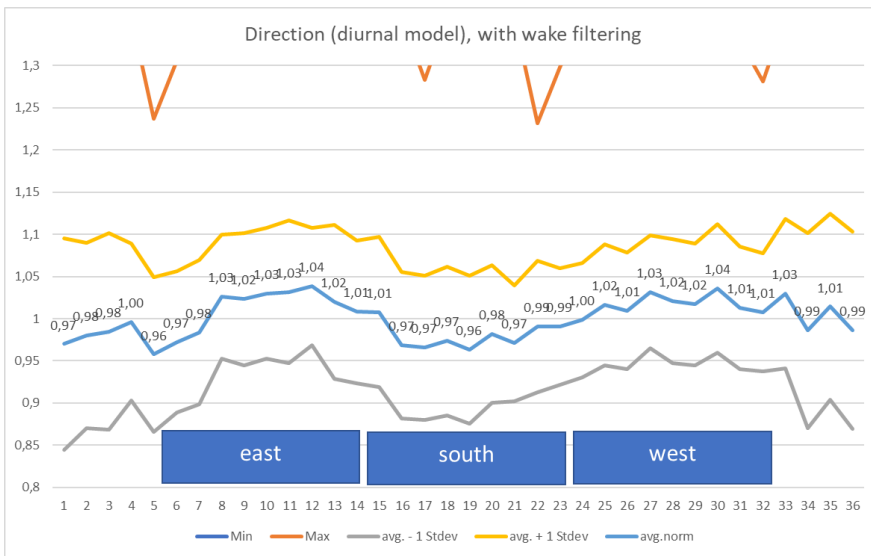
Ovenfor eksempel på kørsel, hvor det fremgår at vindenergien undervurderes ca. 5% midt på dagen i forhold til om natten, både sommer og vinter, men i meget kortere tid om vinteren. Dette skyldes naturligvis dagslængden, og det er derfor valgt at lave en gradueret korrektion for hver måned i forhold til dagslængden, men at lade den være ens for alle møller i optimeringskørslerne, så solver metoden får færre parametre at optimere, og dermed meget større datagrundlag for hver enkelt kalibreringsparameter.

Ved at se på måneds og retnings korrektioner afsløres de øvrige systematiske model data problemer.



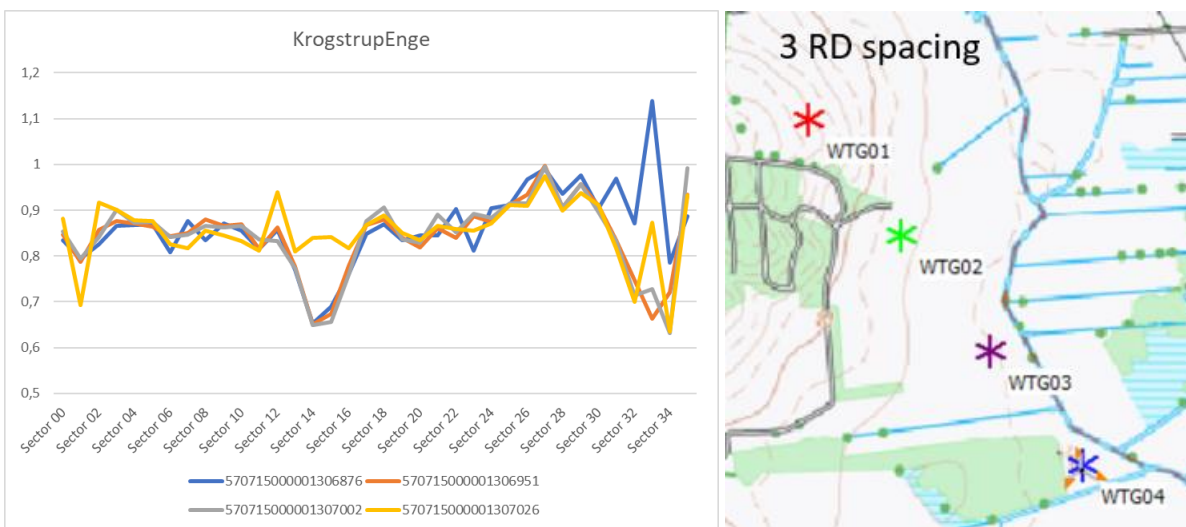
Figur 11 Gennemsnitlige månedskorrektioner viser at model data skal øges lidt i forårs måneder og reduceres lidt sommer/efterår.

Her er der dog ikke så lav en standard afvigelse at en fast korrektion er formålstjenlig, og der er derfor en gevinst ved at lade månedskorrektioner være individuelle for hver mølleplacering.



Figur 12 Vindretningskorrektioner, hvor wake retninger er taget ud.

Det er især vind fra øst og vest, der skal øges lidt relativt til nord og syd, men det er relativt lidt. Retningskalibrering er dog et must, fordi der er wake (Park skygge) virkninger på de enkelte møller, som er vidt forskellige fra mølle til mølle og retning til retning. Men selv uden wake retninger, er standardafvigelsen ret høj, og resultater bliver derfor klar bedre med retningskorrektionerne.



Figur 13 Eksempel på retningskorrektioner for en møllerække med 4 møller, hvor wake retninger tydeligt ses.

Det kan alt i alt konkluderes at EMDWrf model data baseret detail beregning i kombination med solver efter kalibreringen giver en meget præcis reproduktion af møllernes faktiske produktion for hver måned. Det giver et godt grundlag for næste trin i etablering af et nyt vind energi indeks.

Etablering af nyt "reference indeks" baseret på kalibrerede mølleberegninger

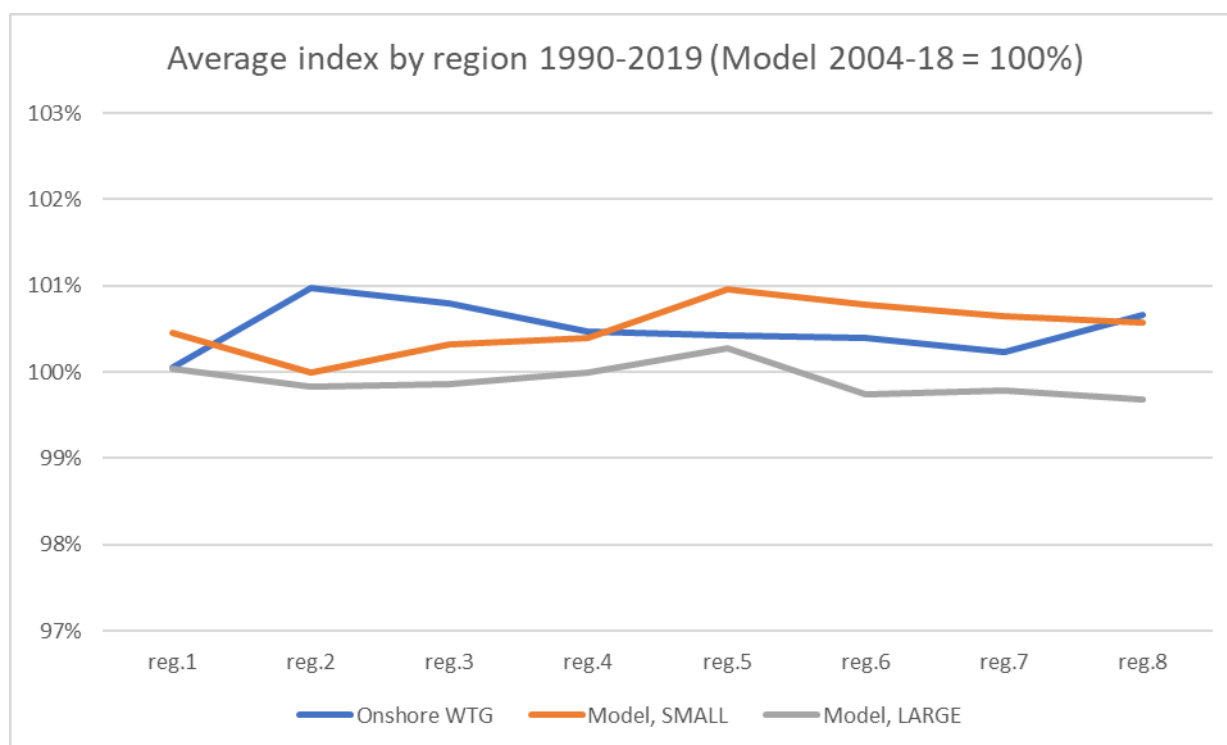
Med en velfungerende modelberegning, kan månedproduktioner over længere tid beregnes for de knap 2000 møller, og derved kan et vindindeks etableres. At have præcise beregnede månedproduktioner frem for faktiske mølleproduktioner har den styrke at udetider som følge af fejl på møller og markedsregulering tages ud, hvorved det reelle vind energi grundlag kan etableres. Desuden kan opdeles i mindre og større møller give et tilstrækkeligt datagrundlag for begge grupper.

En væsentlig beslutning ved etablering af vind energiindekset er referenceperioden – den periode indeks sættes til 100%. Denne var tidligere 1993-2012 (20 år) baseret på adskillige analyser.

En anden beslutning, der er taget i forbindelse med nyt vind energi indeks er at opdele det for mindre og større møller, hhv. under og over 60m navhøjde. Det har i mange år været et problem at de nyere store møller ikke fulgte vind indeks ret godt, idet det var domineret af mindre møller. Større møller har grundet større navhøjde mindre udsving mellem lav og højvinds måneder end mindre møller. Det har været forsøgt at etablere et indeks for større møller baseret på mølleproduktion, men uden held, idet de større møller deltager markant mere i el markedsregulering end de mindre, hvilket forvrænger indekset baseret på faktisk produktion. Og for nogle regioner er der også for få større møller til at generere et indeks.

Den nye referenceperiode vælges til 2004-18 (15 år) begrundet i bl.a. følgende:

Det betragtes som en fordel at referenceperioden er så nutidig som muligt, da modeldatakilder forbedres i tid, og man derved ikke risikerer at blande ældre perioder med ringere data kilder ind. Man skal dog sikre sig at perioden ikke er atypisk lang tids. Dette verificeres af følgende:

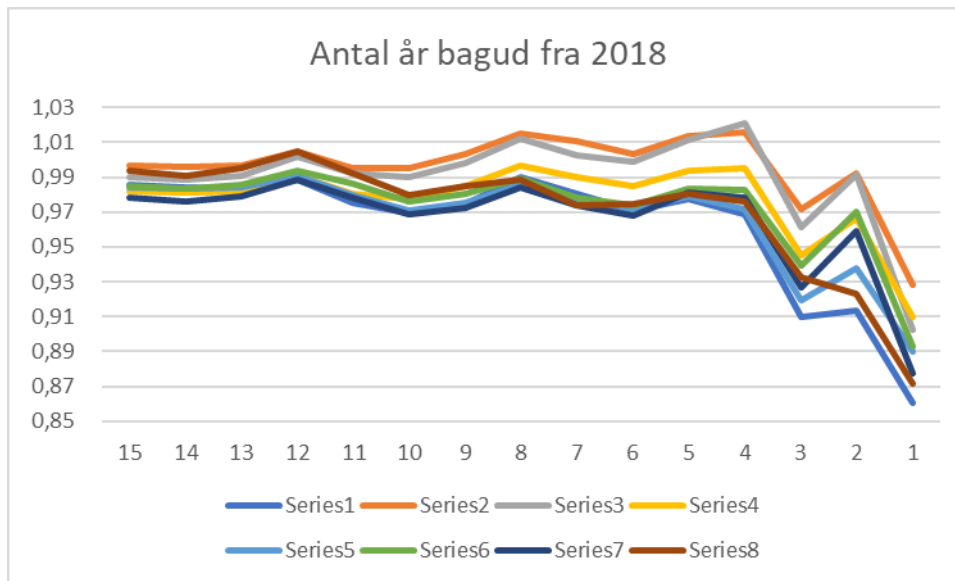


Figur 14 Med 2004-2018 som lang tids reference, opnås tæt ved 100% indeks for perioden 1990-2019 (30 år)

Grafen ovenfor viser at de forskellige indeksvarianter (nærmere beskrivelse af grundlaget følger senere), dels det nuværende mølleproduktionsbaserede indeks onshore, dels de to nye modelberegning baserede

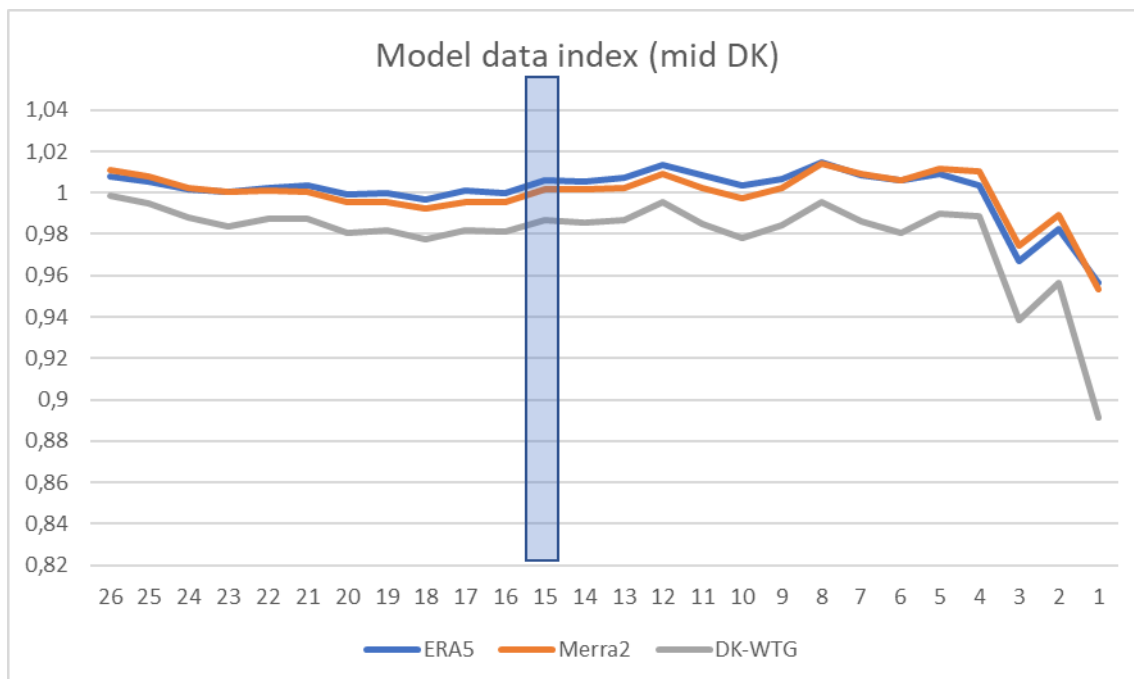
for hhv. mindre og større møller, ligger meget tæt på 100% set over en 30 års periode for hver enkelt af de 8 danske land indeks regioner.

En anden begrundelse for valget af referenceperioden er denne analyse:



Figur 15 De 8 DK onshore regioners middel indeks med stigende antal år i middelværdi.

De 8 regionale indekser (serie 1-8) ses at stabiliseres i værdi efter lidt mere end 10 år og vurderes meget stabile efter 15 år. Der er dog en individuel bias mellem regioner, hvor fx region 2 & 3 er noget højere de senere år, men falder næsten sammen med de andre regioner ved at gå 15 år bagud.



Figur 16 Inddragelse af model data indeks i fastlæggelse af reference periode.



Med inddragelse af model data, hvor hele den tilgængelige dataperiode er sat til indeks 100%, bekræftes 15 år bagud fra 2018 som et godt valg, idet disse rammer 1,00, mens DK-WTG-indekset ligger lidt under. Det er ikke et mål i sig selv at DK-WTG indekset skal være 1,00 over den nye referenceperioden, da dettes indeks's niveau er fastlagt for mange år siden ud fra tidligere mindre præcise datakilder.

En test der er gennemført for at sikre beregninger holder, også for andre år end de tre år med time kalibrerings data, består i at beregne alle møllernes månedsproduktioner, og aggregere antal måneder efter hvor stor fejl er.

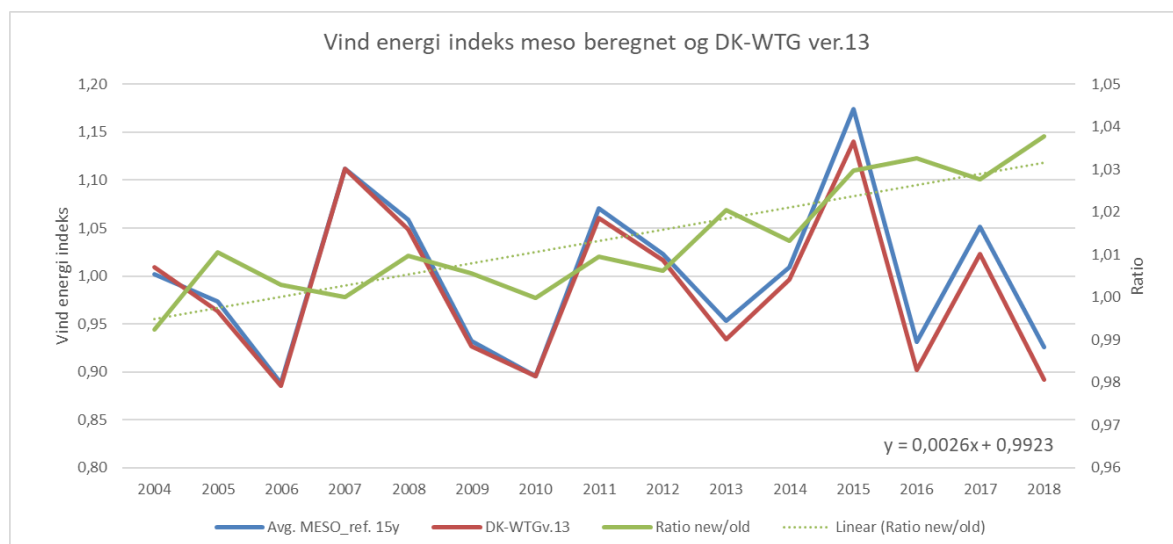
Row Labels	-0,20	-0,18	-0,16	-0,14	-0,12	-0,10	-0,08	-0,06	-0,04	-0,02	0,00	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	Grand Total
2004	773	480	726	1024	1420	1904	2190	2422	2294	2049	1630	1190	758	506	284	154	112	81	52	44	329	20422
2005	988	499	751	1119	1322	1610	1884	2164	2032	1926	1636	1289	944	635	421	294	209	134	85	75	473	20490
2006	1513	585	743	1010	1448	1725	2091	2258	2096	1846	1432	1110	743	522	341	236	124	114	66	55	438	20496
2007	827	491	684	984	1301	1597	1893	2095	2101	1850	1546	1358	924	704	494	333	225	159	120	70	765	20521
2008	488	290	451	708	982	1390	1831	2116	2440	2388	1993	1487	1072	747	494	327	264	147	139	96	798	20648
2009	238	203	396	595	933	1487	1963	2285	2348	2411	2046	1678	1171	843	557	326	252	166	130	100	631	20759
2010	620	333	512	739	1051	1374	1736	2001	2095	2159	2038	1648	1210	801	549	407	294	189	172	118	783	20829
2011	190	126	267	417	653	1054	1518	2065	2480	2640	2530	2124	1537	984	688	439	279	206	139	97	696	21129
2012	192	137	198	340	570	976	1581	2498	2972	3055	2642	1976	1342	852	479	299	214	143	122	82	789	21459
2013	193	110	191	300	556	862	1367	1999	2583	2749	2645	2248	1728	1225	896	585	366	288	198	142	837	22068
2014	467	192	265	339	459	652	895	1399	1908	2422	2714	2724	2349	1685	1134	734	498	302	242	156	1071	22607
2015	34	23	48	86	167	323	654	1306	2026	2944	3183	2911	2380	1624	1100	838	598	500	386	294	1278	22703
2016	12	3	10	25	69	158	321	738	1427	2542	3653	3928	3299	2295	1270	801	484	323	206	151	1072	22787
2017	6	7	16	28	59	140	363	1000	2172	3548	4553	4085	2547	1382	762	417	302	216	129	108	948	22788
2018	56	36	61	84	178	258	454	699	1256	2229	3432	3778	3066	1988	1262	909	581	412	352	262	1435	22788
Grand Total	6597	3515	5319	7798	11168	15510	20741	27045	32230	36758	37673	33534	25070	16793	10731	7099	4802	3380	2538	1850	12343	322494

Figur 17 Fejl i månedsforudsigtelse, baseret på "rå" målt produktion fra Stamdataregister.

Tabellen ovenfor viser at for 2016-18, som er udgangspunktet for kalibreringen, er fejlen for langt de fleste møllemåneder indenfor +/-5% - felter med grøn baggrund. Når man går længere op i tabellen (tilbage i tid), forskyder de grønne områder sig mod venstre, altså beregnes mindre end der måles. Det kunne få en til at tro der er noget galt med modelberegningen. Detail analyser viser noget andet. Hovedforklaringen er at møllerne har tabt produktion i tid, og når man så sætter en beregning op der passer 2016-18, så beregner man for lavt i de tidlige driftsår, hvor møllen dels performede bedre teknisk, men også – og det er væsentligt – så ud i et landskab med lavere ruhed. Der er kommet flere læhegn til, mere skov og mere bebyggelse gennem årene. Dette øger terræn ruheden, og sænker gradvist produktionen.

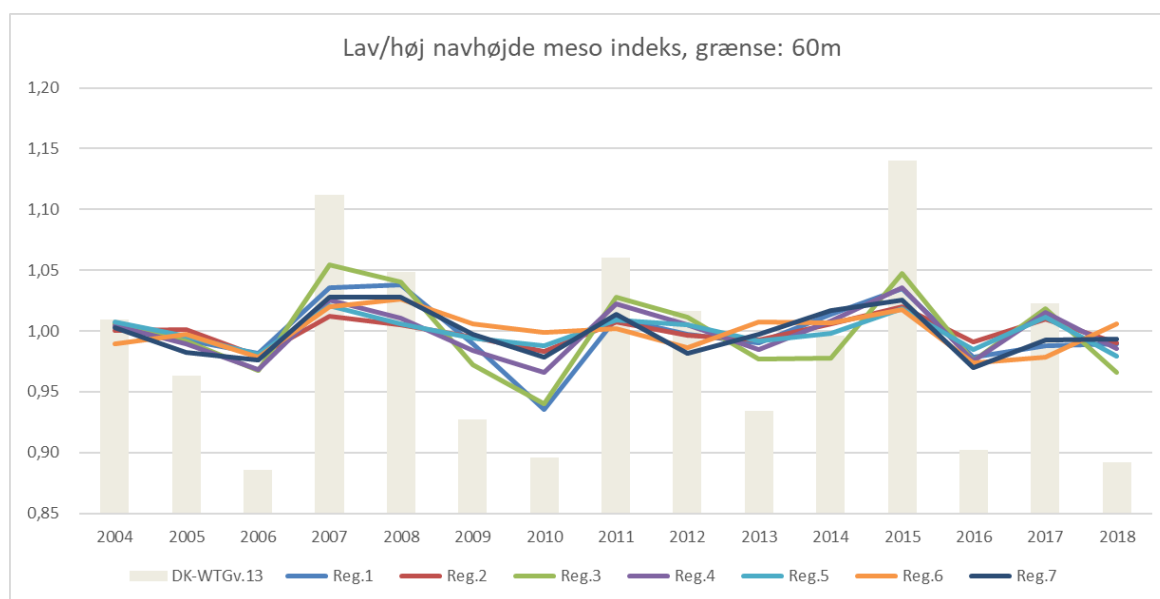
Det ses at gælde for indlandsmøller, især regioner med meget læhegnsbepantning, men ikke for kystnære møller, der ikke mærker en stigende terrænruhed i samme grad. Disse forhold er nærmere beskrevet i Vindindeks præsentations dokument.

Det nye reference vind energiindeks ses her sammenholdt med mølle produktions baseret indeks.



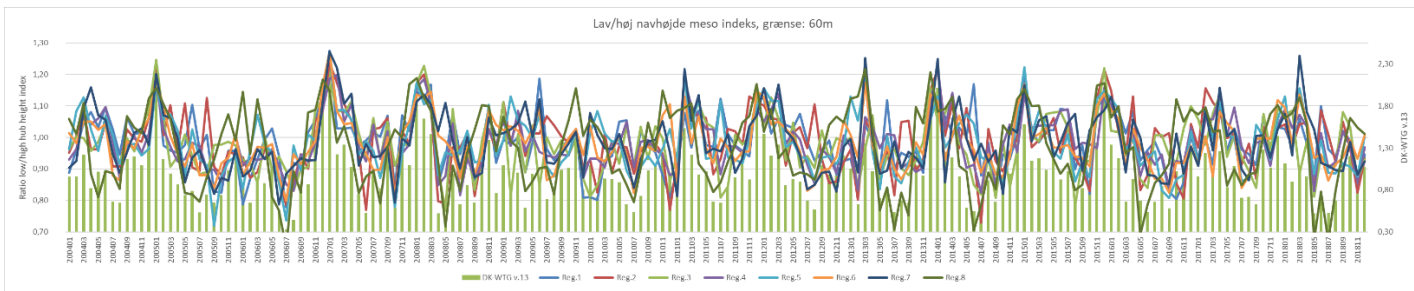
Figur 18 Det meso model beregnede indeks som gns. af alle knap 2000 møller sammenholdt med Ver.13, mølleproduktionsbaseret.

Der ses en klar trend, det nye indeks øger mere i tid end det mølleproduktionsbaserede. Hvorfor er der tidligere redegjort for.



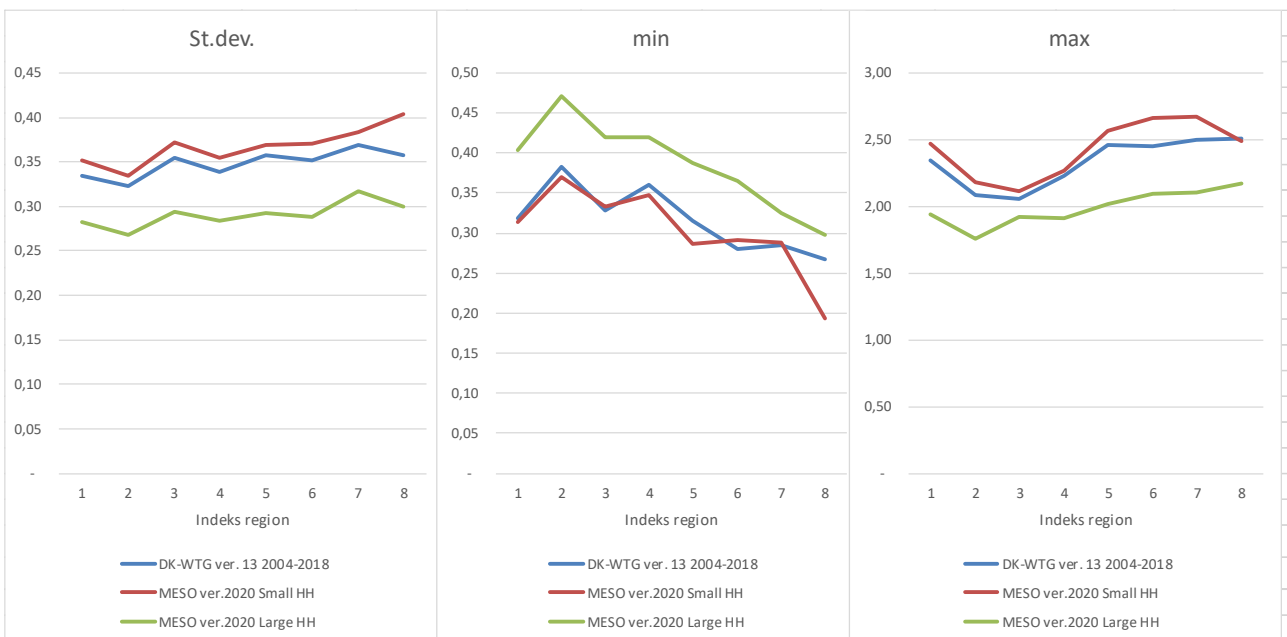
Figur 19 For hver region ses forholdet mellem lav/høj navhøjde indeks.

Der er især i lav og højvindsår store forskelle. Over 5% i enkelte år for enkelte regioner. På månedsniveau er forskellene markant større, se næste graf.



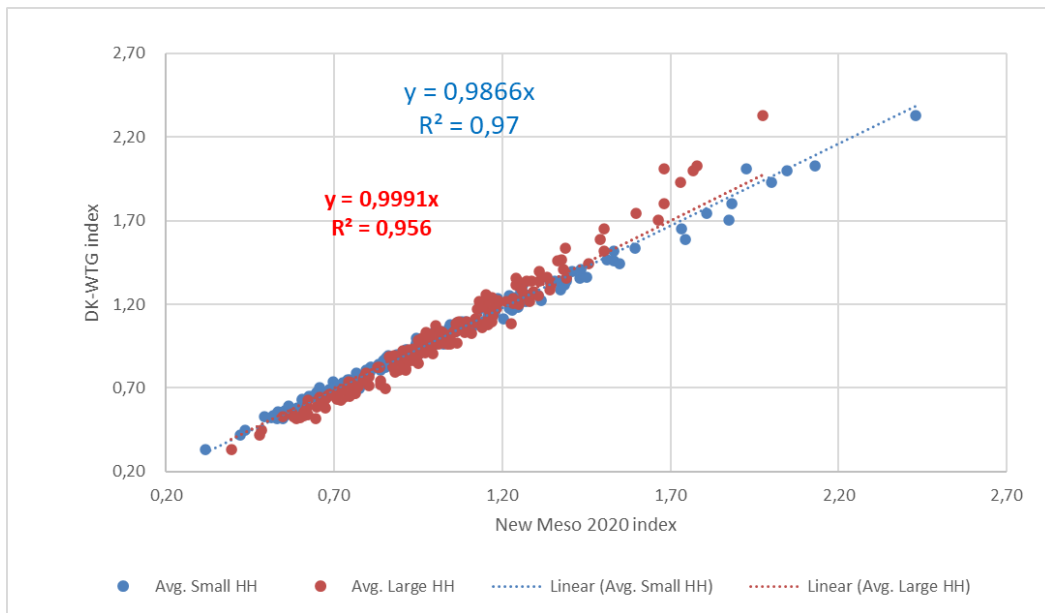
Figur 20 På månedsniveau ses op til 30% forskel mellem lave og høje mølles indeks.

Den store forskel er meget væsentlig, når en enkelt mølles produktion skal vurderes.



Figur 21 Det er meget afgørende dynamikken i det nye indeks modsvarer dynamikken i mølleproduktion fra måned til måned.

Her ses at det nye indeks for mindre møller går lidt længere ned i laveste vindmåned og lidt højere op i højeste, mens det er modsat for større møller. Det er som ønsket, idet det møllebaserede indeks har overvægt af mindre møller, men dog en del større med i indeksberegning. At dynamikken "holder" for hver enkelt indeksregion, vidner om høj kvalitet i beregninger.



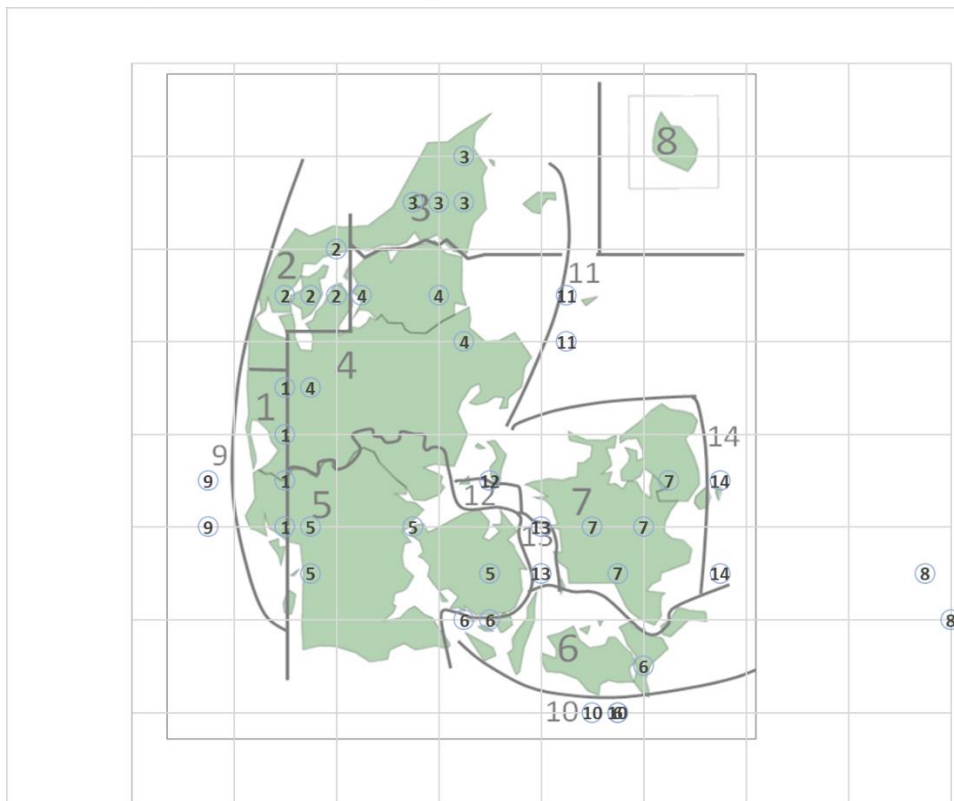
Figur 22 Korrelationen er høj mellem mølleproduktions indeks og meso indeks.

Ikke overraskende er korrelationen højest når mølleproduktion sammenlignes med mindre møller. Det ses at især i højvindsmåneder, er det meso baserede indeks for store møller mindre, hvilket er som forventet.

Delkonklusion: Der haves nu et sæt vindindeks for både mindre og større møller, der vurderes at repræsentere mølleproduktion for hver indeks region meget præcist. Dette anvendes til at kalibrere ny indeks beregning op mod. Når det ikke er det her viste indeks der anvendes som det nye skyldes det primært:

- Beregningsgrundlaget forefindes kun med ca. 3 måneders forsinkelse.
- Det er baseret på beregning af konkrete møller, hvilket gør det mindre generelt.

Etablering af indeks baseret på ERA5T model data



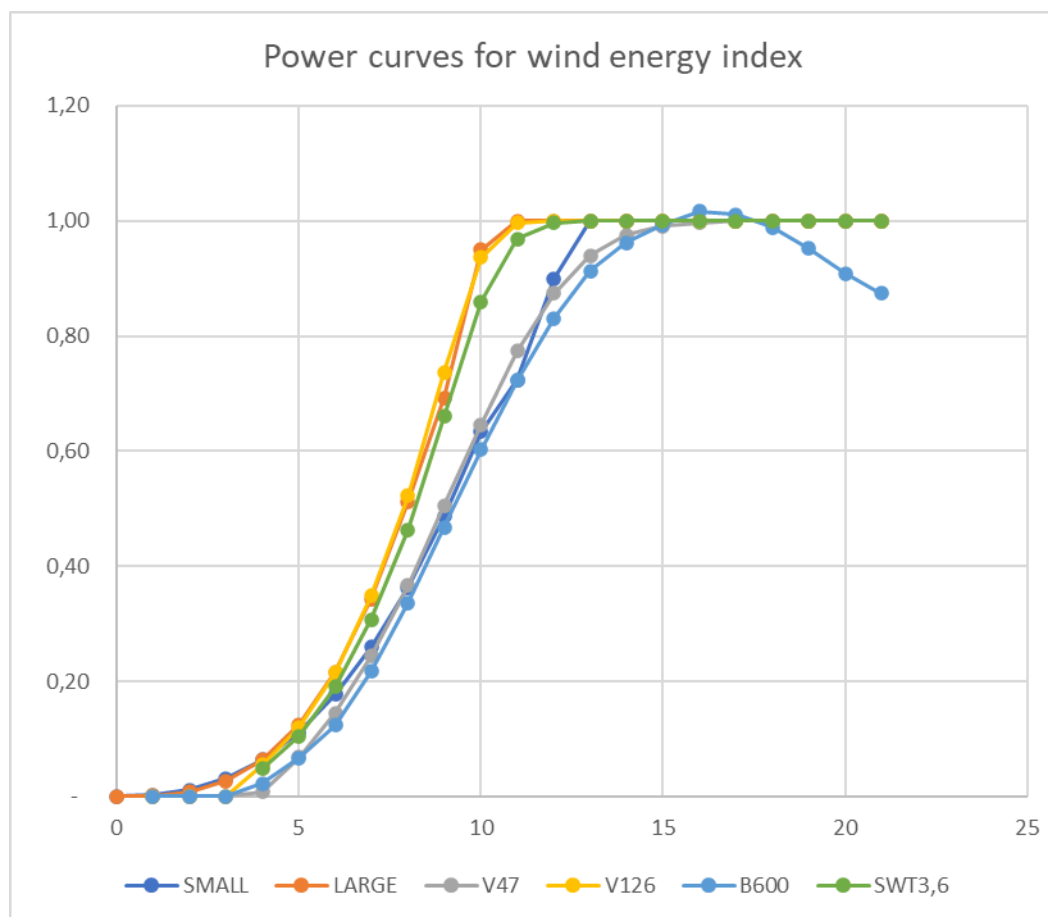
Figur 23 De udvalgte ERA5T punkter (små ringe) til nyt regionalt vind energi indeks, hvor region er vist med gråt tal.

For Bornholm er baggrundskort vist med "flytning", mens indeks punkter er geografisk korrekt placeret.

Ved udvælgelse af punkter har der især været fokus på at undgå ekstremer, hvor ERA5T punktet enten har for høj eller lav vindhastighed i forhold til regionen. Det ses især ved Lolland og Bornholm, hvor landområderne fylder for lidt i ERA5 modellen, til at områderne får "landvind", den bliver modelleret som offshore vind.

For offshore områder, vil det nye indeks byde på markant højere præcision end forgængerens. Derfor er det valgt at udvide med 3 offshore regioner, 12-14, hhv. Samsø, Storebælt og Øresund, hvor der er offshore projekter. De hidtidige offshore regioner 9-11, hhv. Horns Rev, Nysted og Anholt er blevet mere fokuseret omkring de eksisterende offshore parker.

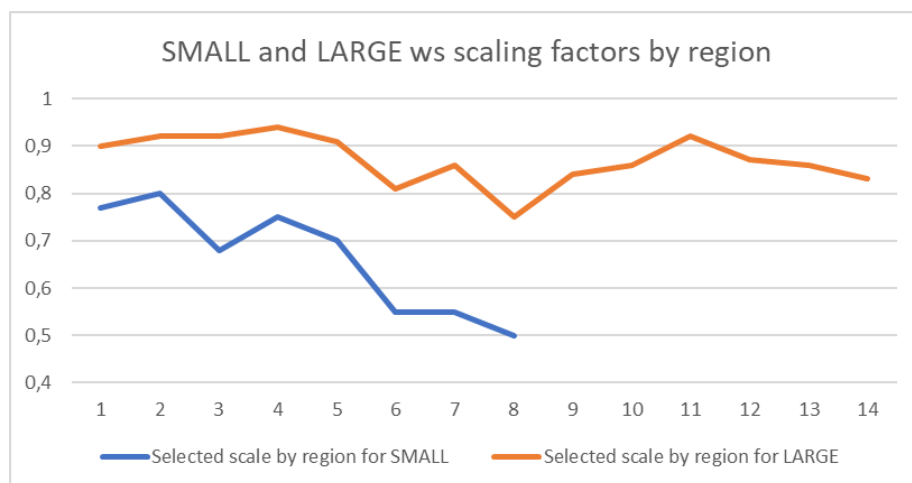
Det vælges at anvende 100m ERA5T data for større landmøller samt offshore. For mindre landmøller anvendes 10m og 100m data som via vindprofil beregning fra disse to højder omregnes til 50m.



Figur 24 Generiske effektkurver (SMALL og LARGE), sammenlignet med reelle.

Effektkurver er opbygget som simple funktioner: $P = \max(u^x, z)$, hvor u er vindhastigheden, x er hhv. 2,5 for mindre og 3 for større møller og z er max effekten beskrevet ved den vindhastighed, hvor effektkurven mætter, hhv. 13 m/s for mindre og 10 m/s for større. Desuden er der lagt en knæreduktion ind, så der ved vindhastigheden hvor kurven mætter og punkter før reduceres i effekt til hhv. 90% og 95%.

En række beregningsmetoder for et ERA5T baseret indeks er afprøvet, hvor den valgte er baseret på en simpel vindhastighedsskalering, fundet gennem en række test kørsler, hvor resultat for kørslen er sammenlignet med de beregnede referenceindeks for hver region for hhv. mindre og større møller.



Figur 25 De fundne skaleringsfaktorer for hver region, hhv. mindre og større møller.

Især for region 6-8 for mindre møller skal anvendes meget lave skaleringsfaktorer, under 0,6 ganges på vindhastigheden, hver time. Forklaringen er dels at model vindhastigheder i ERA5T i disse områder er for høje (grundet offshore nærhed), dels at de mindre møller i disse regioner generelt er lavere, og nok typisk har mindre stigning på effektkurve end den anvendte i beregningen.

Diskussion: Der kunne overvejes følgende yderligere kalibrerings kørsler:

- Skalere ned til lavere navhøjde end de anvendte 50 og 100m for small og large
- Anvende effektkurver med mindre hældning

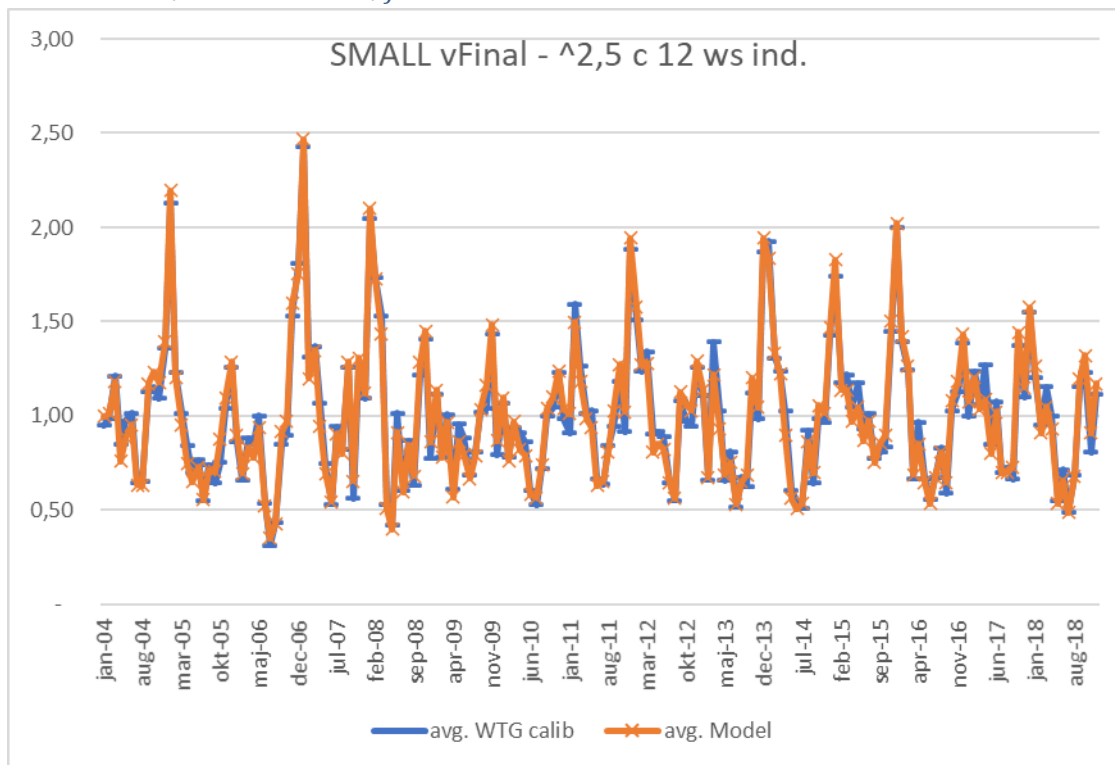
Begge ville have den virkning at vindhastighed skulle skaleres mindre ned. Der er gennemført forsøg med sidstnævnte, men dette førte ikke til bedre korrelation. Det vurderes derfor at metoden er ret ufølsom for om det er det ene eller andet sted der justeres, og skalering på vindhastigheden er den simpleste, og har en rimelig begrundelse, idet vi ved gennem sammenligning mellem ERA5T og EMDWrf, at vindhastigheden generelt er for høj i de punkter der anvendes.

Validering af ERA5T indeks mod reference indeks baseret på EMDWrf detail beregninger

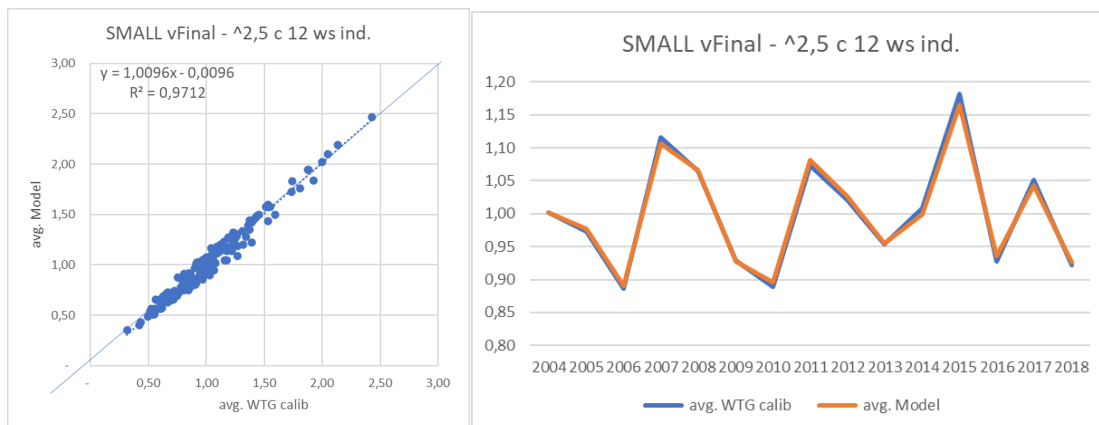
Det nye indeks skal naturligvis valideres mod det nuværende mølleproduktions baserede indeks. Men først testes og trimmes det mod "mellemberegningen", hvor knap 2000 møller er detailkalibreret, og beregningsresultater anvendes til at skabe et "bedre" indeks end mølleproduktions baseret indeks. Bedre fordi det ikke har de indbyggede problemer som mølleproduktionsindekset har, men alligevel har den rette dynamik som vist tidligere. Og det har yderligere den store fordel, at det kan opdeles i større og mindre møller, hvor mølleproduktioner for større møller giver et for spinkelt grundlag, især grundet disses aktive deltagelse i markedsregulering.

Validerings perioden er 2004-18, den periode der er beregnet detail kalibreret produktion for, og som er valgt til ny reference periode.

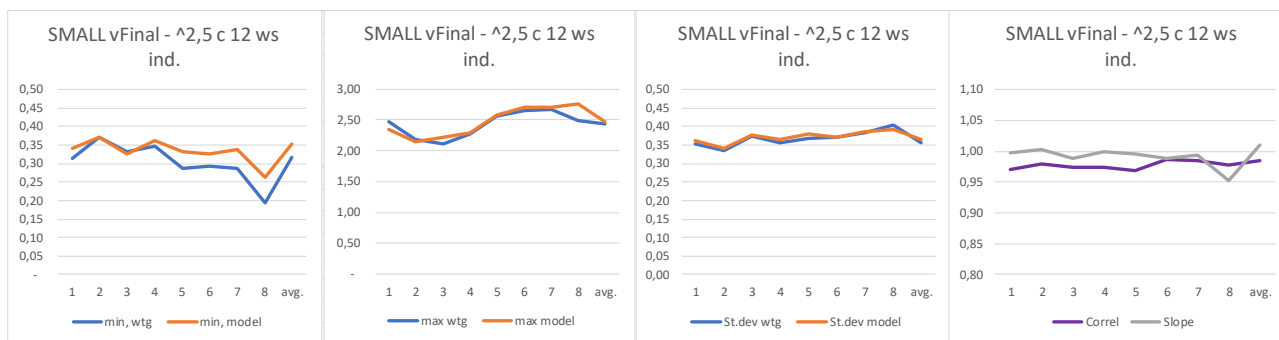
For mindre møller <60m navhøjde



Figur 26 Månedligt ERA5T (model) indeks mod beregnet mølleindeks for mindre møller, gns af alle regioner.



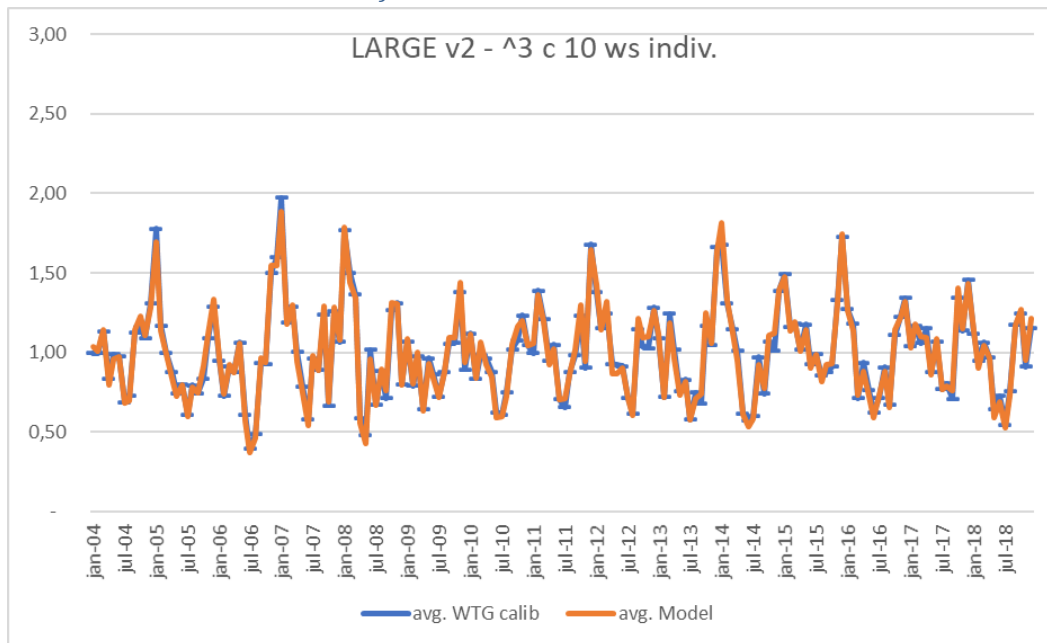
Figur 27 Korrelation og slope for mindre møller, månedligt, til venstre og års indeks til højre.



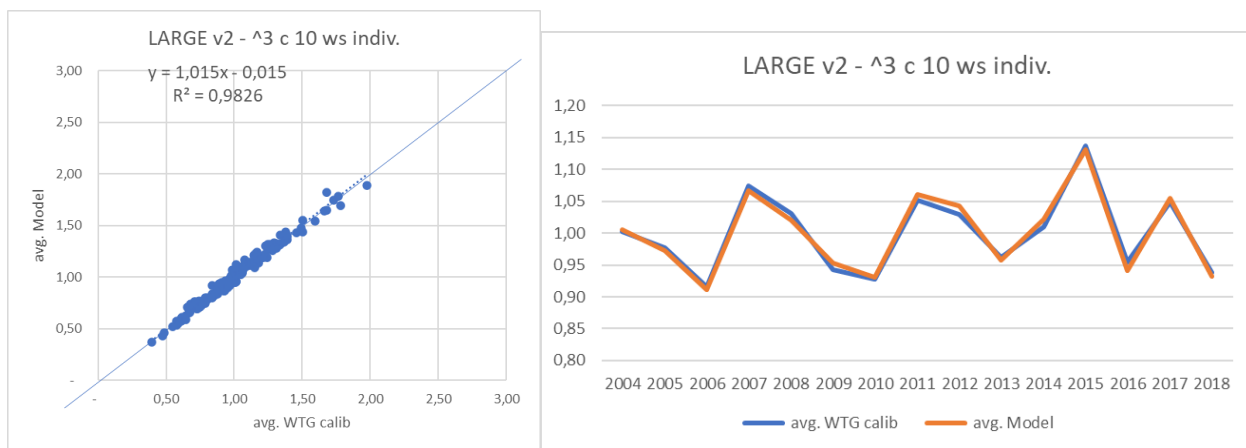
Figur 28 Test af dynamik for hver indeks region for mindre møller.

Der er en meget præcis sammenhæng mellem det "simple" ERA5T baserede regionale indeks og det der er baseret på gns. af et stort antal møller i hver region, beregnet med avanceret model. På alle målte parametre er der kun marginale forskelle og resultat er meget tilfredsstillende. Kun region 8 (Bornholm) udviser lidt afvigelse. Her er meget få møller at kalibrere op mod, og ERA5T vindklimaet er offshore domineret, hvilket gør det vanskeligt at øge præcisionen.

For store møller => 60m navhøjde



Figur 29 Månedligt ERA5T (model) indeks mod beregnet mølleindeks for større møller, gns af alle regioner.



Figur 30 Korrelation og slope for større møller, månedlig, til venstre og års indeks til højre.

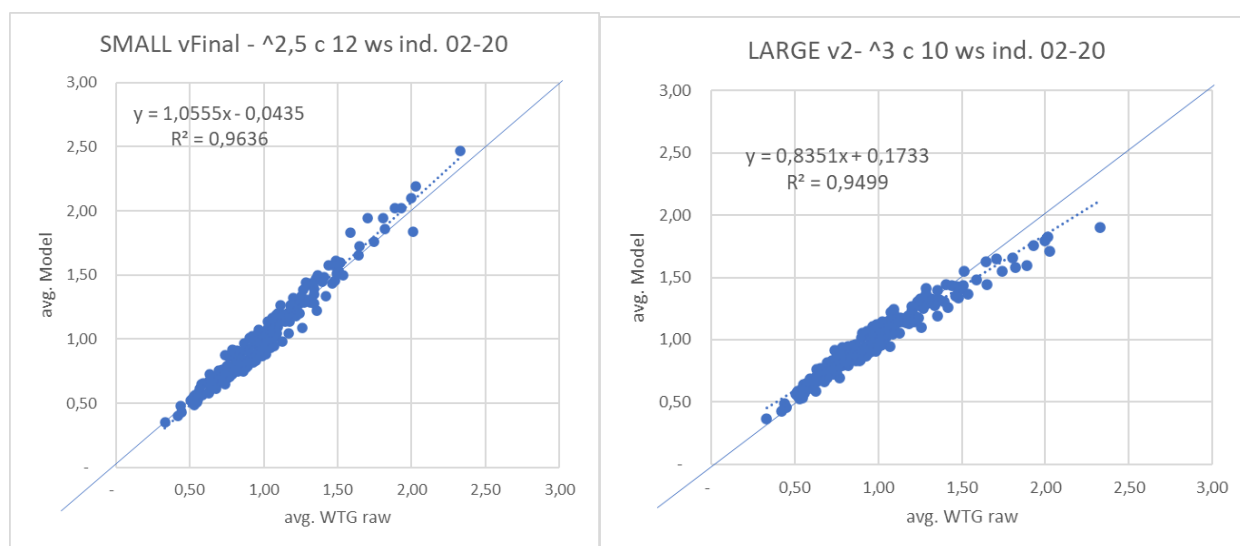


Figur 31 Test af dynamik for hver indeks region for større møller.

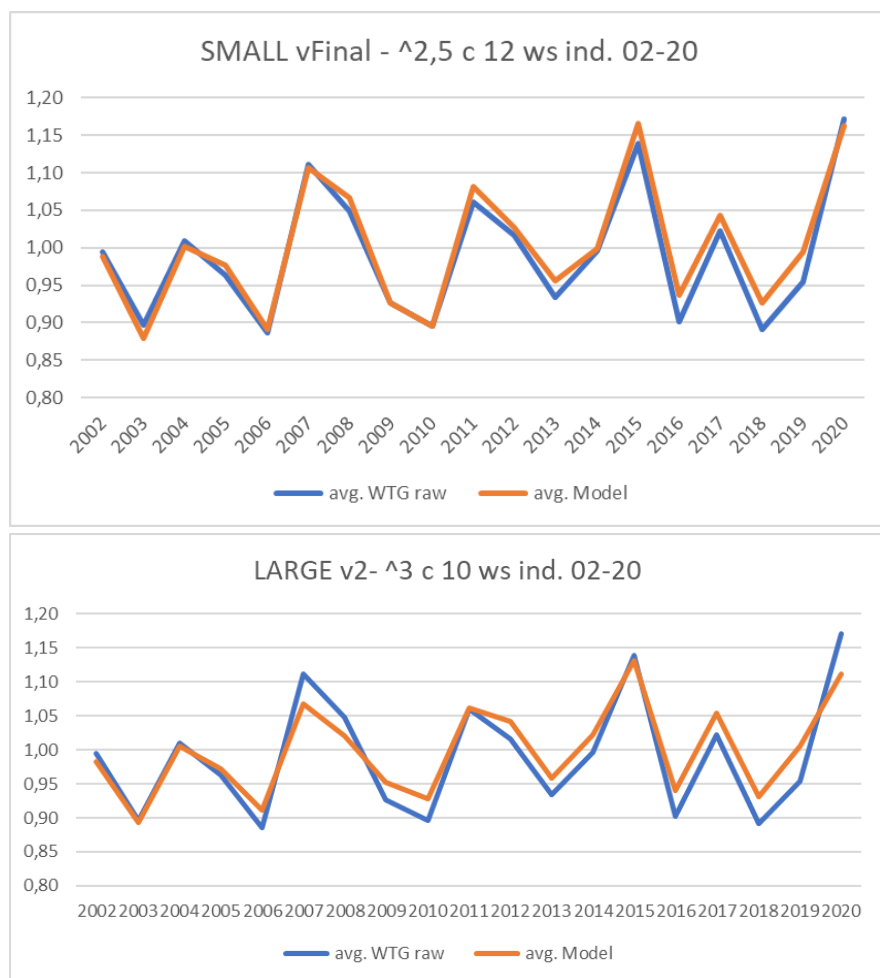
For de større møller er sammenhængen ligeledes meget præcis. Faktisk en smule bedre end for de mindre møller, hvilket nok kan forklares af de mindre vind variationer ved større højde over terræn.

Validering af ERA5T indeks mod nuværende DK.13 mølleproduktions indeks

Mølleproduktionsindekset DK.13 repræsenterer primært de mindre møller. Derfor forventes bedst sammenhæng til indeks for mindre møller. I denne test/validering, er perioden udvidet til 2002-2020(jul.).

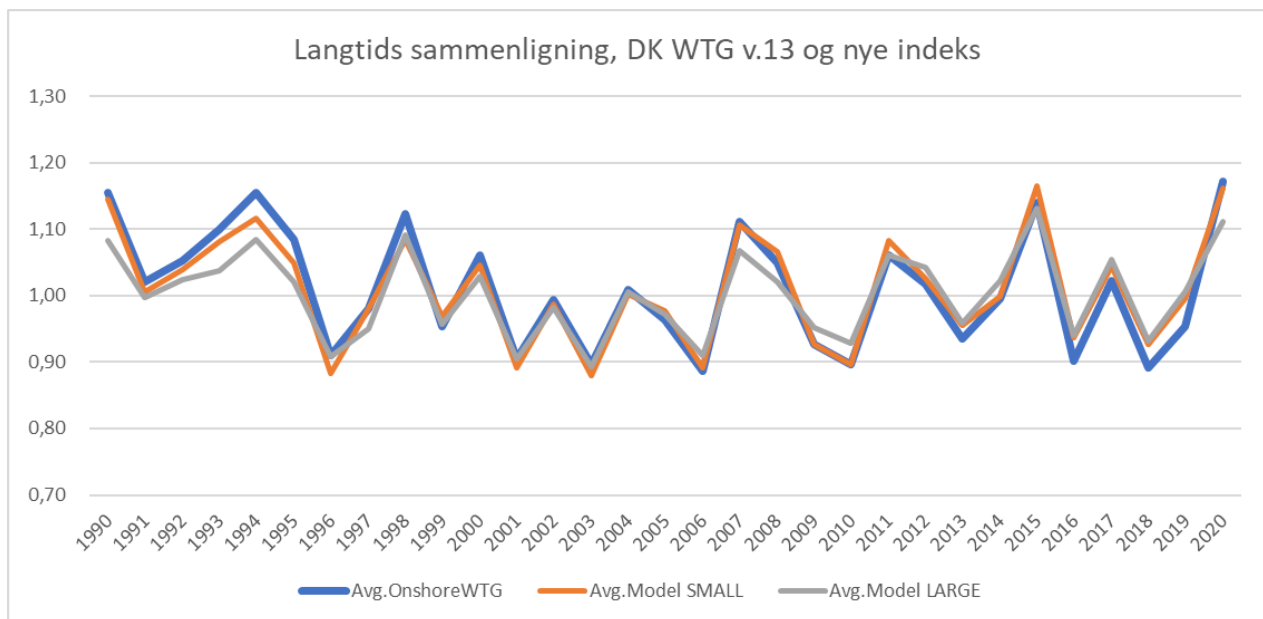


Figur 32 De primære valideringstests, korrelation, hældning.



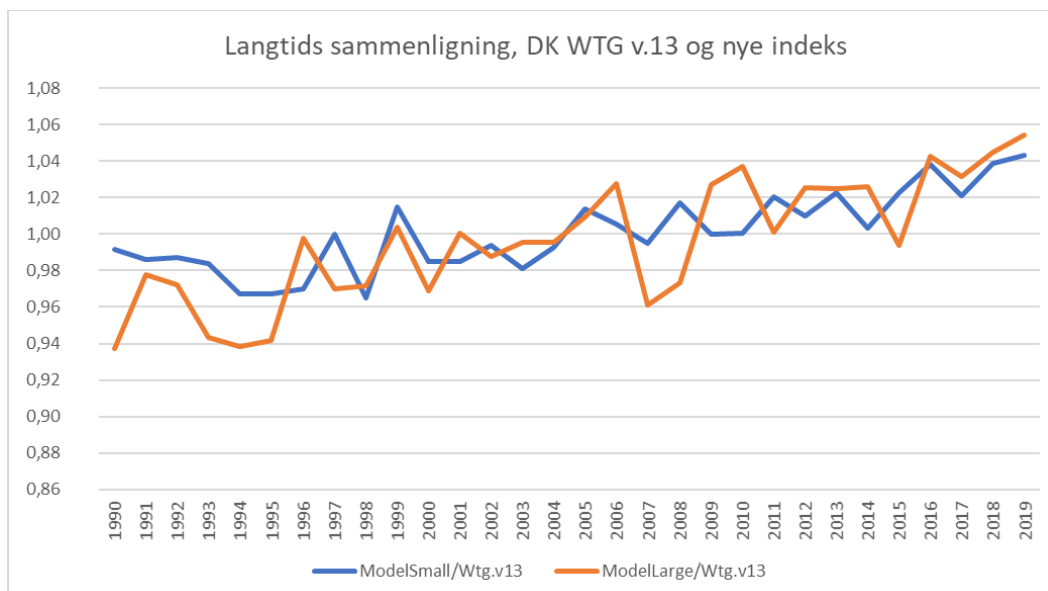
Figur 33 De primære valideringstests, år til år variation.

Som forventet kommer indeks for mindre møller ud med bedst korrelation og en hældning over 1,0, mens hældning for store møller kommer ud noget lavere end 1,0. Det fremgår også at model indekset er lidt højere de senere år, dog ikke for 2020 indtil videre. 2020's første 7 måneder har været meget vindrige. Det ses også tydeligt hvordan lav og højvindsår som forventet varierer markant mindre i indekset for større møller.



Figur 34 Sammenligning over meget lang tid, 40 år viser god konsistens.

Det man vil bemærke, er dels at det møllebaserede indeks er lavere seneste år, dels højere de tidlige år. De seneste år er forklar bare med markedsregulering, mølledegradering og øget ruhed. De første år er det kun højvindsårene, mølleindekset er højere, hvilket skyldes at møllerne dengang var noget lavere, og derfor endnu mere følsomme for høj contra lavvindsår end de møller der i dag kategoriseres som mindre. Der er således ingen grund til at betvivle model indeksets langtidskonsistens for Danmark. Andre steder i verden, hvor det meteorologiske grundlag har været meget spinkelt for 30-40 år siden, vil model data ikke nødvendigvis have en tilstrækkelig kvalitet. At vi i Danmark har vindmølle produktion at måle imod, er helt unikt.



Figur 35 De nye modelindeks relativt til nuværende mølleproduktions indeks.

Øget terrænruhed er en klart medvirkende faktor til den set trend. Denne er ikke med i model data, der modellerer vinden ud fra en konstant overflade ruhed i tid.

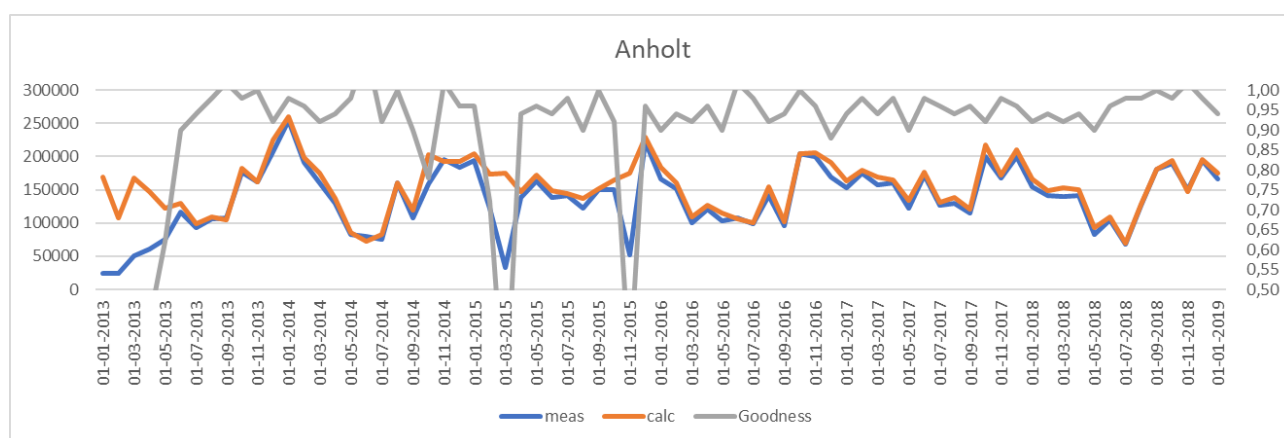
Offshore indeks beregning, kalibrering og validering

Det er valgt at udvide med 3 nye offshore indeks områder, hvor der er kørende større offshore projekter, Samsø, Storebælt og Øresund. De hidtidige offshore områder er samtidig blevet mere fokuseret omkring HornsRev, Nysted og Anholt.

For offshore områderne er det ikke muligt at danne et produktionsbaseret indeks, idet der typisk kun er et eller få projekter, hvor produktion kun kendes for de samlede projekter, ikke på mølleniveau. Derfor ville et produktionsbaseret indeks vise mere om offshore parkernes rådighed end den vind der var tilgængelig. Man kan med andre ord ikke midle og outlier filtrere på et stort antal møller og derved få et tal for hvor meget vindenergi der er til rådighed.

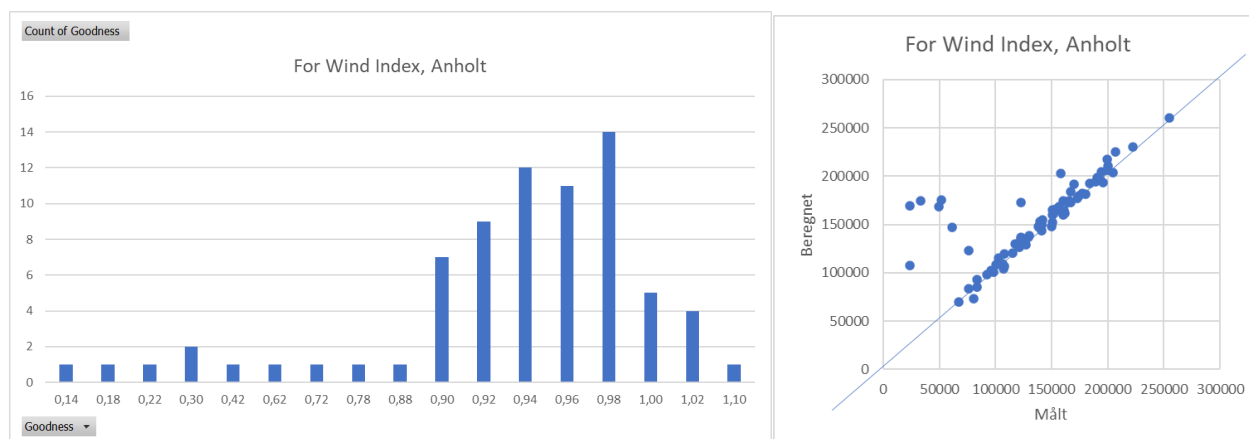
Men heldigvis er EMDWrf datagrundlaget offshore endnu mere præcist offshore end onshore. Metoden er derfor at sætte en detaljeret beregning op for hvert større DK offshore projekt, og kalibrere denne baseret på faktisk månedsproduktion. Med mange måneders data til rådighed, er det muligt at komme meget tæt på en meget korrekt beregning, og derved også for måneder med meget udetid få et meget præcist udtryk for hvor meget vind energi, der var til rådighed. Disse kalibrerede præcise beregninger anvendes som referencen, den nye indeks beregningsmetode skal matche.

Et eksempel på en sådan beregning illustreres her med Anholt møllepark.



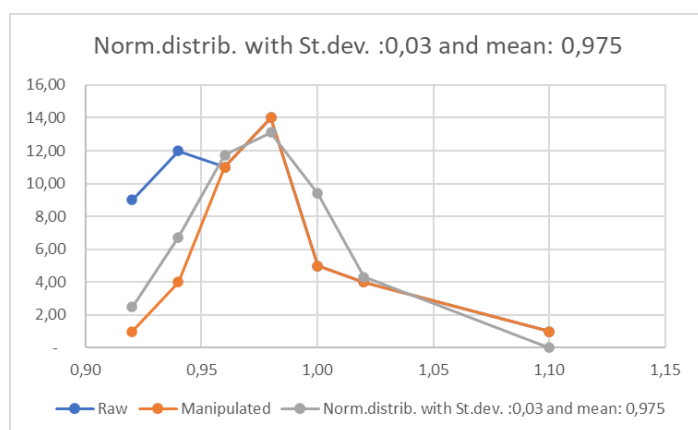
Figur 36 Beregnet og målt månedsproduktion for Anholt møllepark.

Goodness (godhed) er forholdet målt/beregnet. Denne illustreres aggregeret nedenfor.



Figur 37 Godhed opdelt i intervaller tv. Til højre målt og beregnet pr måned.

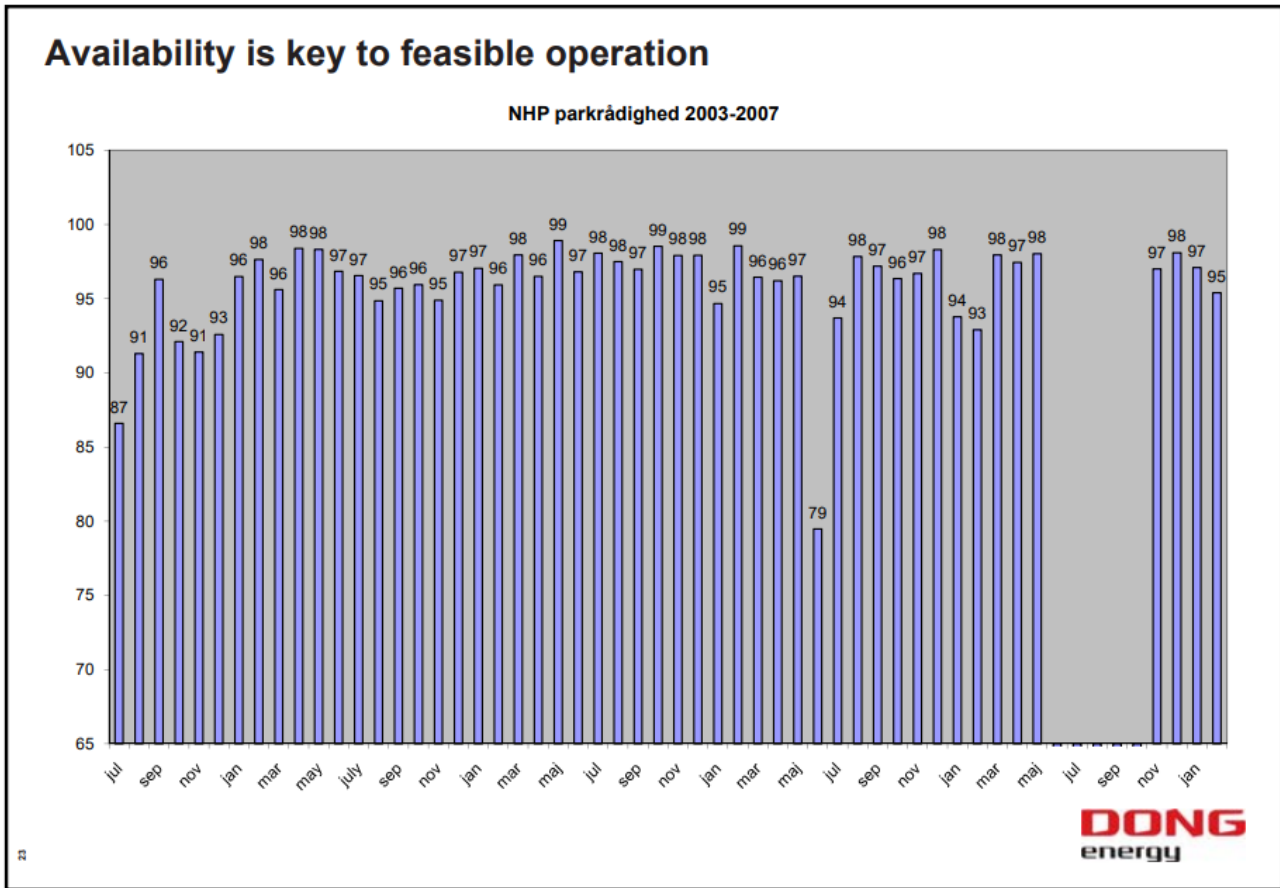
Som det fremgår, er der en del måneder med markant mindre målt end beregnet. Der er måneder med driftsproblemer, hvor der fx har været kabelbrud.



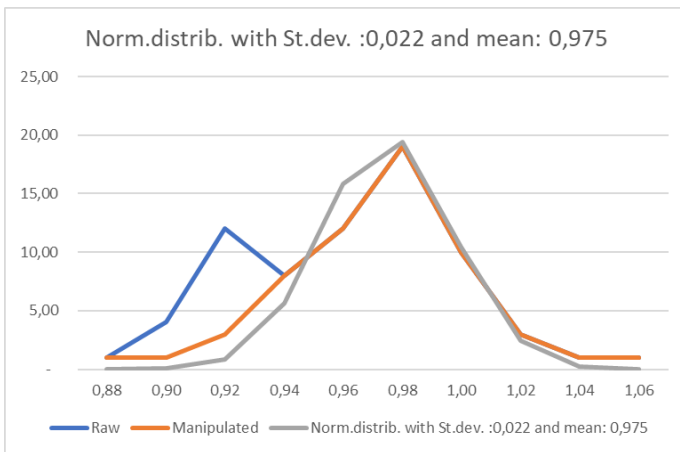
Figur 38 Illustration af beregningsusikkerhed for Anholt offshore møllepark. Y-aksen viser antal måneder.

Da selv de "normale" måneder vil have nogle udetider, hvor møller er ude af drift, kalibreres beregninger for offshore projekterne, så gns. af de "normale" måneder for målt/beregnet skal være ca. 97-98%. Det er bl.a. fra DONG/Ørsted vist at der ca. er 2-3% udetidstab i normale driftsmåneder for offshore projekter, se graf nedenfor.

I grafen ovenfor viser den orange kurve "manipulerede data", hvor de måneder der beregnes for lavt, spejles om middelværdien for de måneder der antages beregnet ok. Herved kan beregningsusikkerheden illustreres ud fra en antagelse om at beregningsfejlen er normalfordelt. Dette giver for Anholt en beregningsusikkerhed på 3%.



Figur 39 R digheds opgørelse for Nysted vindmøllepark fra DONG kursusmateriale 2009 på DTU/Risø.



Figur 40 Eksempel for Nysted offshore park, med stort datagrundlag.

Et andet eksempel med denne metode illustreret er Nysted (f r Rødsand bygges). Her er beregningsusikkerhed helt nede på 2,2%.

Med så lave beregningsusikkerheder, leverer beregningsmetoden et meget kvalificeret input til kalibrering af vindenergi indekset. Her skal man igen huske, at når denne metode ikke giver selve indekset, er det fordi datagrundlaget EMDWrf er ca. 3 måneder forsinket, derfor anvendes ERA5T som grundlaget for selve indeks beregningen. Her anvendes samme setup som for "large" onshore, dvs. samme effektkurve, og vindhastigheds skaleringer findes ved at sammenholde beregnet indeks med den her beskrevne reference.



Tabel 1 Beregninger EMDWrf baseret med nøgletal.

	HH	Umean 2002-19	HP-value	windPRO scalings needed
Reg.9 Horns Rev (2)	68	9,35	-1	0,975
Reg.10 Nysted-Rødsand	69	8,65	3	0,965
Reg.11 Anholt	81,6	8,89	1	0,965
Reg.12 Samsø	61,2	8,36	-1	0,965
Reg.13 Storebælt	80	7,99	-1	0,92
Reg. 14 Øresund	64	7,07	-4	0,95

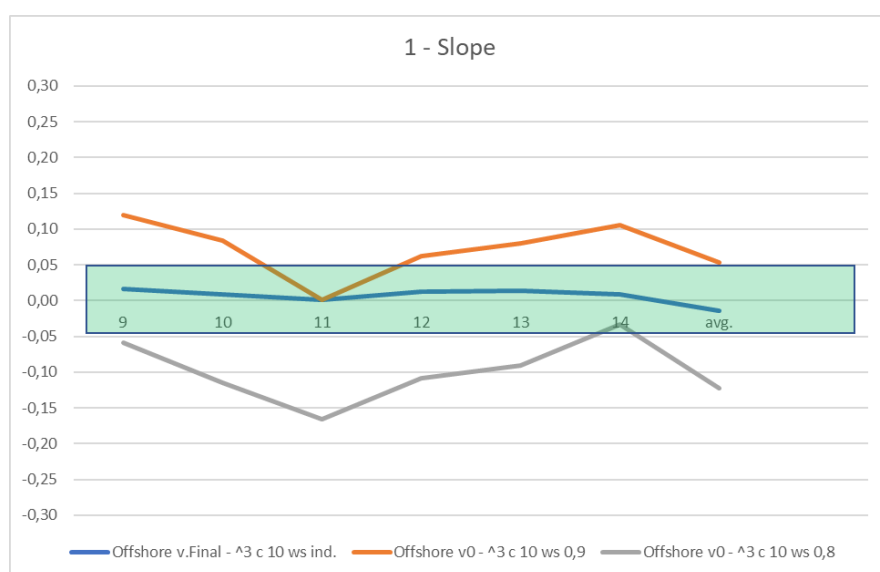
Ovenfor ses de 6 offshore områder der er detail beregnet. Interessant er hvor meget EMDWrf data skal skaleres for at ramme målt produktion korrekt. For Horns Rev området skal vindhastighed skaleres 2,5% ned, mens den som for onshore projekter skal skaleres 3,5% ned for reg. 10-12. For Storebælt skal nedreguleres 8%, hvilket måske kan tilskrives en lidt for optimistisk effektkurve (HP-værdi), men måske også at effekten fra Storebæltsbroen ikke modelleres. For Øresund skal nedreguleres 5% (Middelgrund projektet), som er et vanskeligt område at regne, grundet store land-vand forskelle i ruhed.

Kalibrering og validering af offshore indeks

De fundne vindhastighedsskaleringer på ERA5T data er:

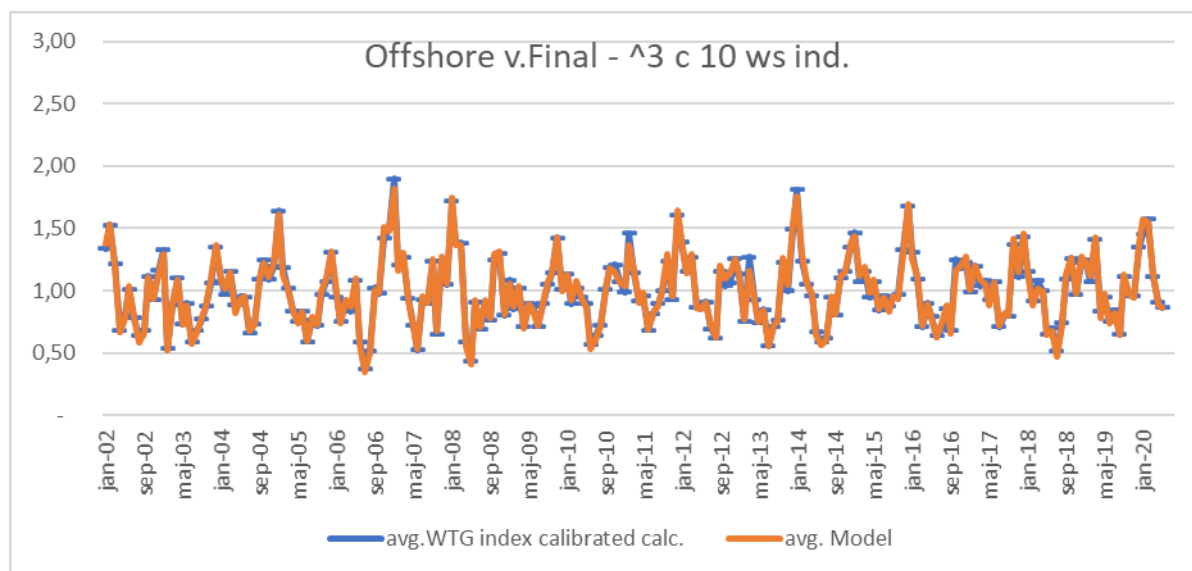
Tabel 2 ERA5T vindhastigheds skaleringer for offshore områder.

region	ERA5T vindhastigheds salering
9	0,84
10	0,86
11	0,9
12	0,87
13	0,86
14	0,83

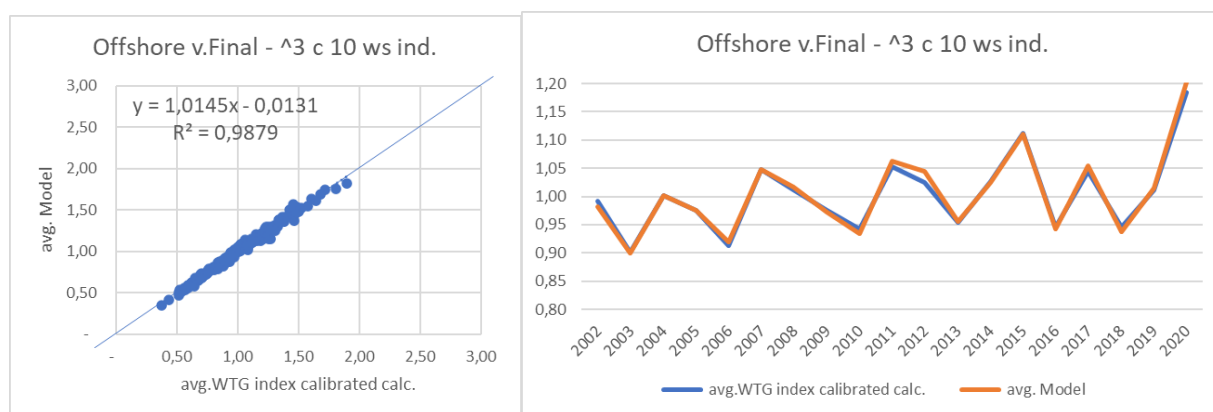


Figur 41 Her ses mellem resultater for kalibrering, hvor forskellige skaleringsfaktorer er anvendt.

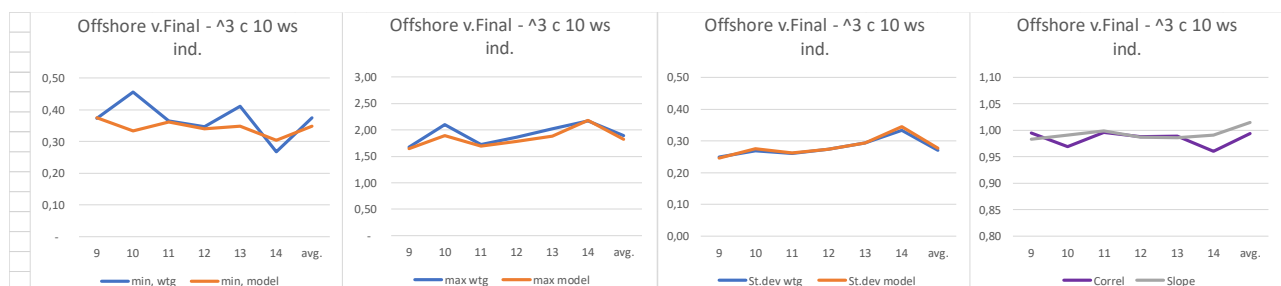
Dvs. 10-17% reduktion, hvilket bl.a. skyldes 100m højde vind anvendes, men også at den anvendte effektkurve er en udpræget lavvinds mølle. Man kunne argumentere for at man skulle anvende data tilpasset til de konkrete offshore projekter. Vi har valgt at vægte generalitet, så det er enkelt at udvide/omlægge, når der kommer nye offshore projekter, og så det er ensartet og erfaringer kan udbredes Worldwide. Det man her kan udlede, er at en faktor 0,9 vurderes passende at anvende for et generelt globalt offshore indeks, der skal servicere moderne offshore projekter bedst muligt.



Figur 42 Sammenligning mellem detail beregnet gns. offshore index og ERA5T model indeks.



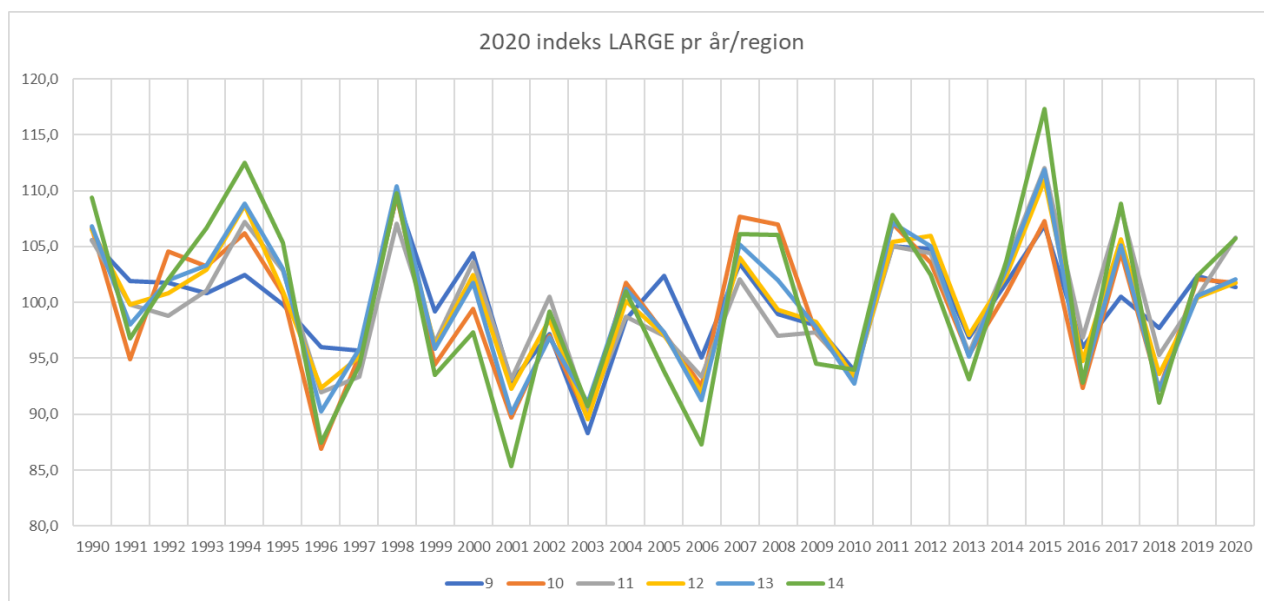
Figur 43 Korrelation og hældning er nær perfekt for gns. offshore indeks, samme er år for år udvikling.



Figur 44 Sammenligning af kvalitetsmål pr indeks region.

Også region for region kommer kvalitetsmålene ud med meget gode værdier.

Der er naturligvis en vis "selvopfyldelse" i at datagrundlaget bag såvel reference data som indeks model data kommer fra samme kilde, hvilket er medvirkende til de gode resultater her. Men mellemregningen vurderes vigtig, fordi denne bl.a. bringer parkskygge tab ind, hvilket model indekset ikke gør. At dette så ikke gør at forskellene bliver større giver blot ekstra tryghed ved at den simple indeks metode er brugbar, fx når man skal give bud på hvor meget vindenergiproduktion man kan forvente i et normalt vindår.



Figur 45 Offshore områdernes nye indeks.

Som det fremgår, er der selv på års niveau ret store forskelle fra region til region, og der er en del forskel fra år til år, dog ikke så store som onshore.

Sæson kalibrering/validering

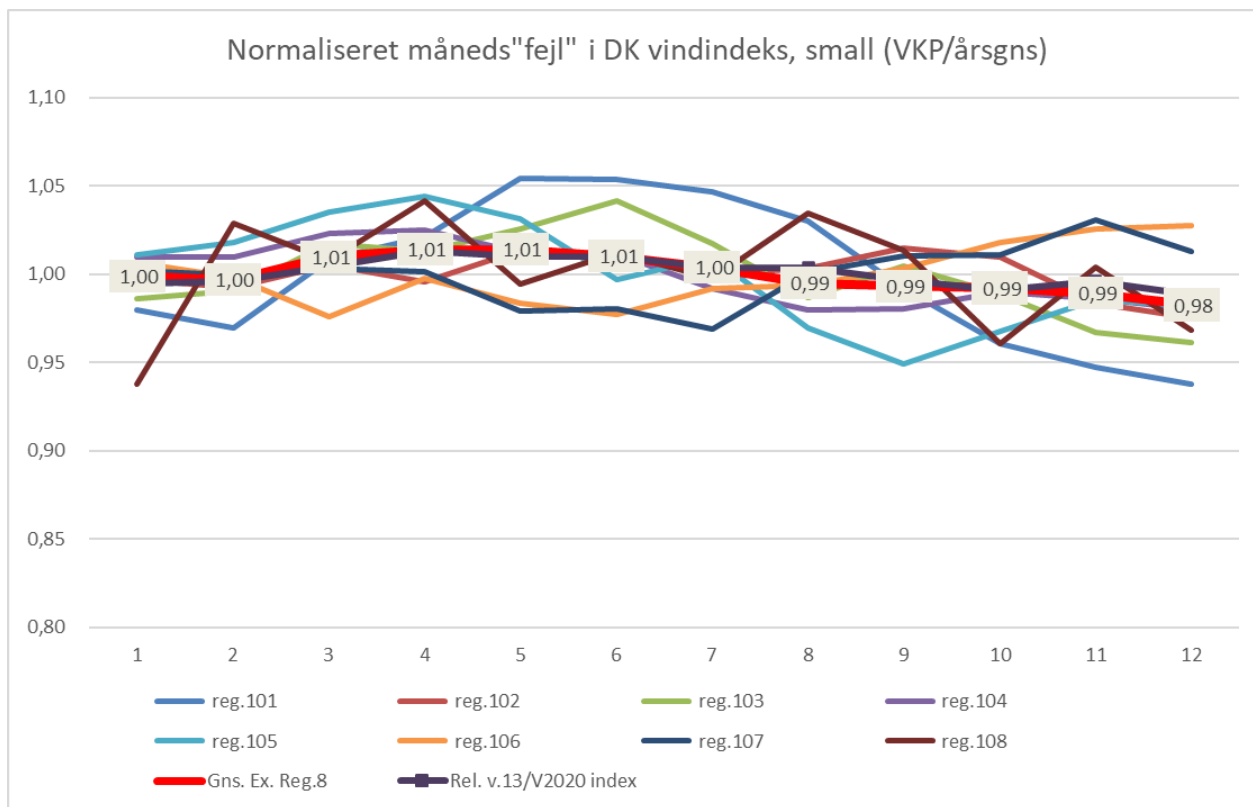
Der er især for mindre vindmøller en klar sæson bias i model vinddata. Dette korrigeres der for.

De fundne sæsonkalibreringer er:

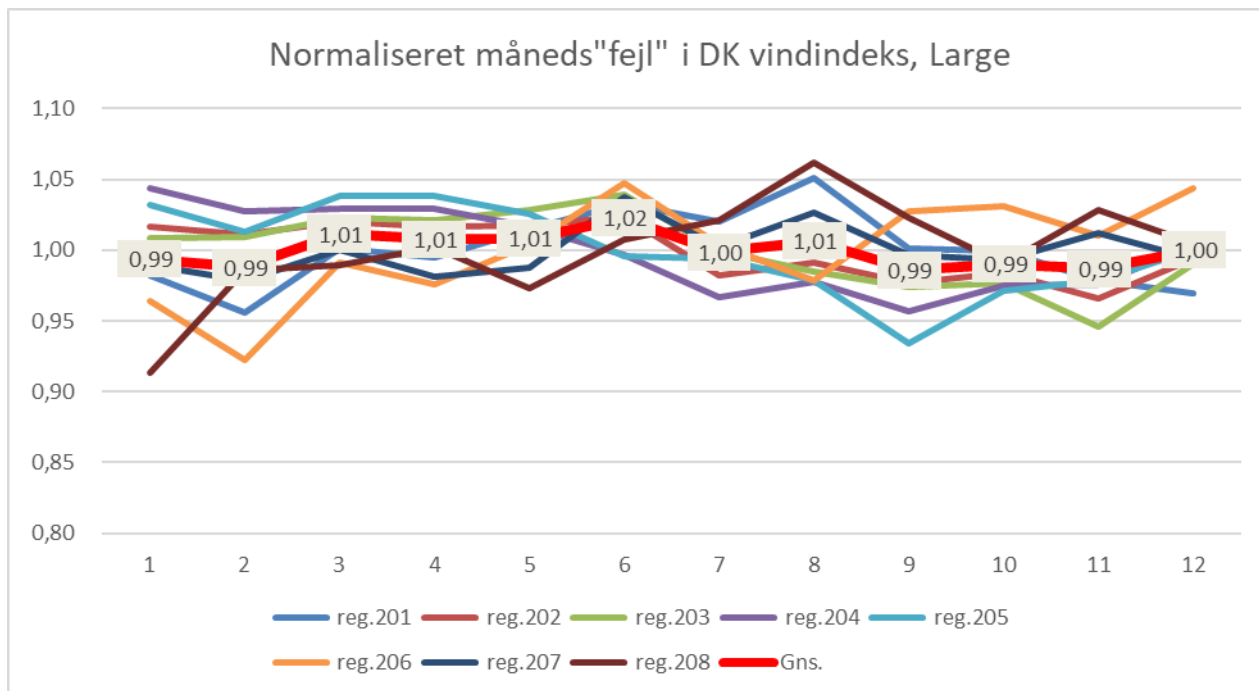
Måned	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Faktorer small	0,94	0,96	1,02	1,08	1,08	1,05	1,01	1,00	0,95	0,92	0,94	0,94
Faktorer large	1	1	1	1,02	1,02	1	1	1	0,99	0,97	1	1

Model vindhastighederne er klart for lave forår og høje efterår. Dette gælder dog primært når man er tæt ved jordoverfladen, og kan nok tilskrives den måde bevoksning indgår i modellerne der genererer modelvinddata.

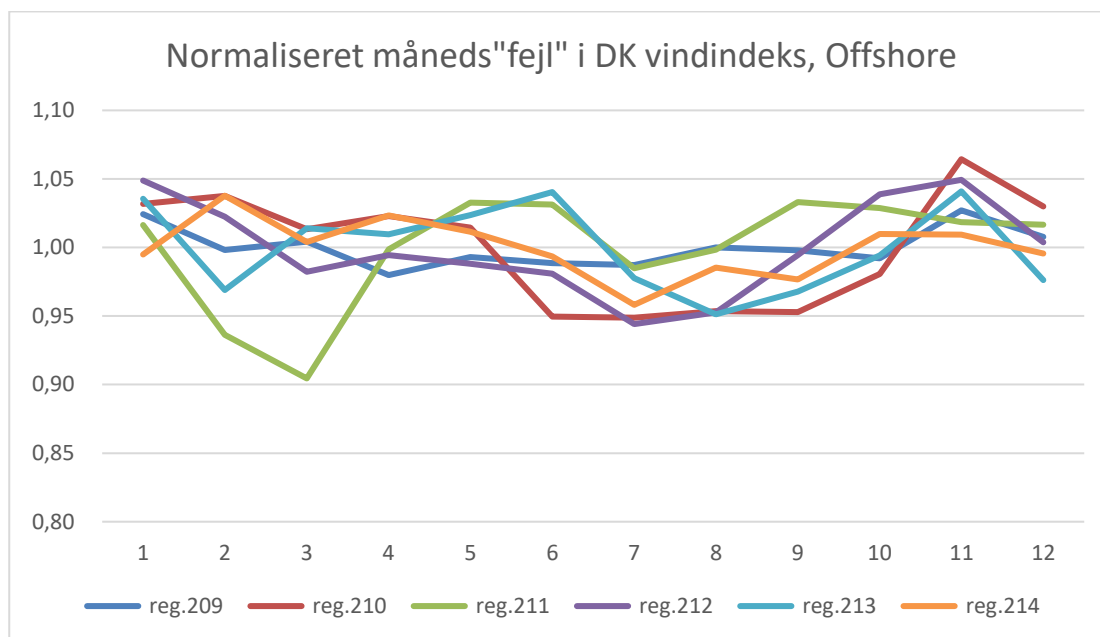
Med disse sæsonkalibreringer, kan de vind indeks korrigerede produktioner for samtlige vindmøller i Danmark opgøres månedsvist for hver enkelt region og for hhv. small og large.



Figur 46 Månedlige gennemsnits vindindeks korrigerede produktioner for de 8 onshore regioner for mindre vindmøller.



Figur 47 Månedlige gennemsnits vindindeks korrigerede produktioner for de 8 onshore regioner for store vindmøller.



Figur 48 For offshore er ikke sæsonkorrigeret.

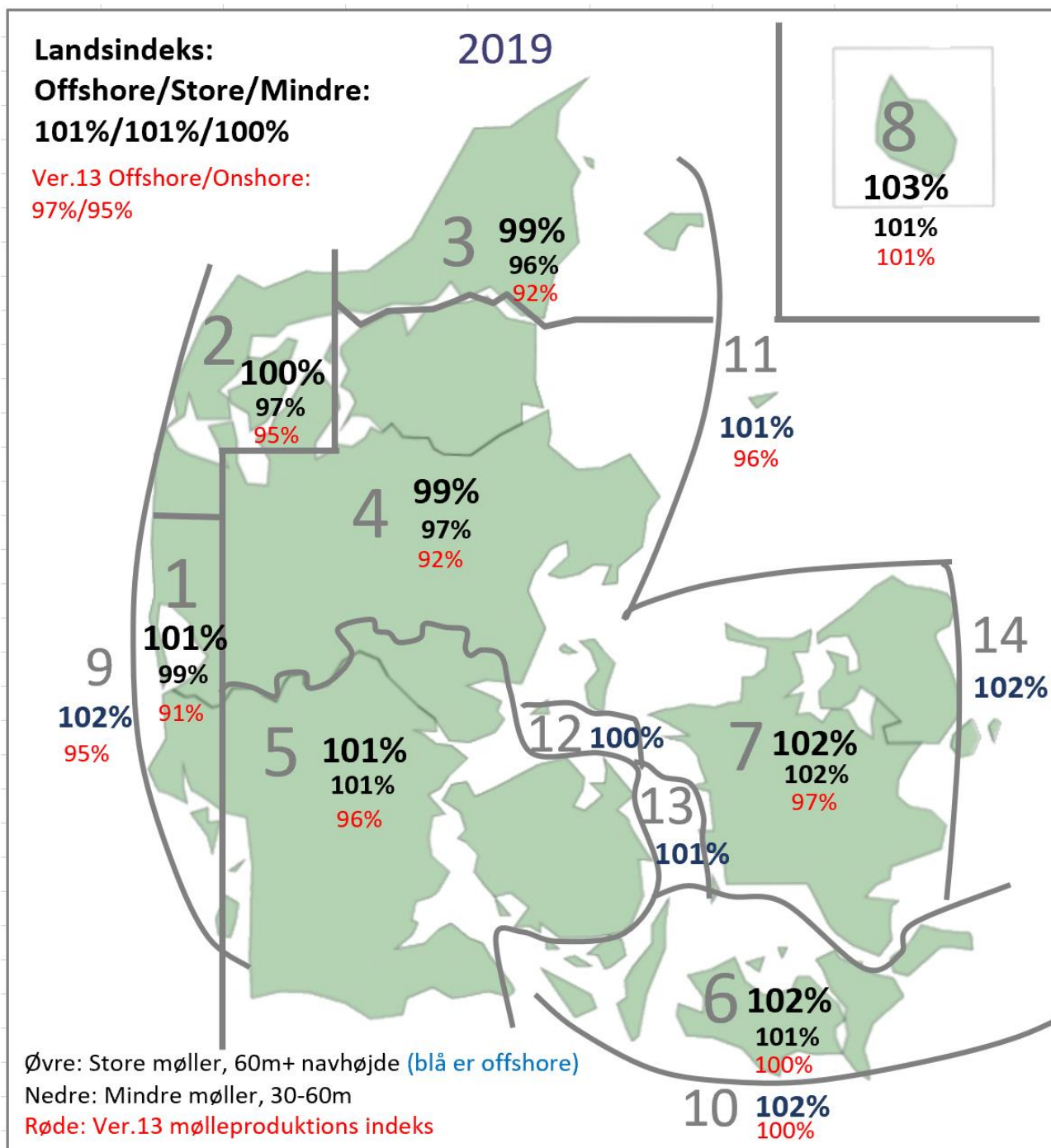
Offshore er en svag trend, at indeks er lidt for højt i sommer måneder, men da offshore parkerne i høj grad har andre variationer som ikke er vindbetinget, og det er vores erfaring at der ikke er nævneværdig sæson bias for offshore vind, har vi valgt ikke at gennemføre en sæsonkorrigering her.

Sammenfatning

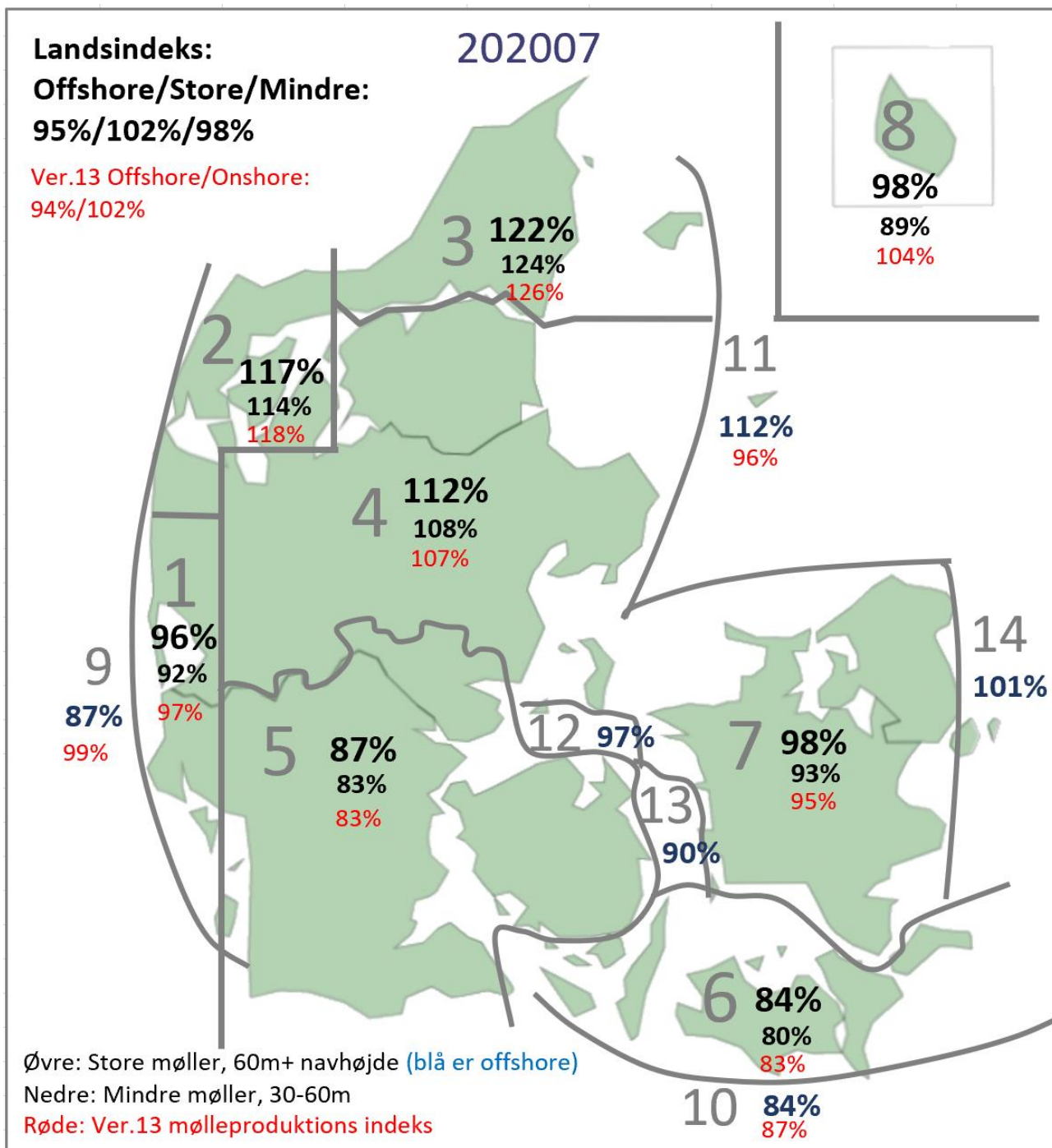
Der er udviklet et nyt regionalt vindindeks for Danmark, der baseres på model vind, mod tidligere mølleproduktion. Det viser sig med de tilførte beregningsmetoder og kalibreringer at performe meget tæt op af det mølleproduktionsbaserede, med følgende gevinster:

- Det er uafhængigt at problemer som øget markedsregulering og nedslidning af møller.
- Det repræsenterer "den frie vind", dvs. terræn der ikke har øget ruhed i tid, og man kan dermed bruge det til også at måle hvor meget en mølles ydelse falder som følge af dette forhold. Og dermed også få et mere neutralt indeks for møller der ikke har øget terræn ruhed i tid (fx kystnære møller).
- Der er nu meget præcise offshore indeks, hvor de tidligere var simple onshore ekstrapolationer.
- Det er hurtigt fremme ved brugeren, typisk 8 dage efter månedsslut.

Indekset er tilgængelig på www.vindstat.dk som tidligere. Herudover vil der komme et nyt globalt indeks, hvor der både vil være et gratis globalt "groft" indeks samt mulighed for at tilkøbe detaljerede projektspecifikke indeks som abonnements løsning, samt få leveret indeks via e-mail eller API interface.



Figur 49 De nye regionale DK vind energi indeks kort, med sammenligning til Ver.13. 2019 som eksempel.



Figur 50 De nye regionale DK vind energi indeks kort, med sammenligning til Ver.13. Juli 2020 som eksempel.

Note: Ovenviste er fra før de sidste kalibreringer er foretaget.