





## Vind- og produksjonsindekser for vindkraft i Norge, 2021



Til	Magnus Wold, Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)
Fra	Meventus AS
Dato	08.02.2022
Rapportens tittel	<b>Vind- og produksjonsindekser for vindkraft i Norge, 2021</b>
Rapportnr.	2022-001
Skrevet av	Anne Haaland Simonsen, Kyle Brennan

	Navn	Dato	Signatur
Utført av	Anne Haaland Simonsen	08.02.2022	
Kontrollert av	Kyle Brennan	08.02.2022	

---

*De presenterte resultatene er basert på informasjon som refereres til i dette dokumentet ved hjelp av kjente analysemetoder og industristandarder og betyr ikke at ikke noe informasjon kan endres. Alle estimater eller beregninger innebærer usikkerhet, og ingenting i dette dokumentet garanterer noen bestemt vindhastighet eller vindforhold. Meventus skal ikke være ansvarlig for fremtidig bruk av resultater i dette dokumentet, eller for direkte eller indirekte tap som kan skyldes mulige feil i dokumentet.*

---

## Innholdsfortegnelse

---

Innholdsfortegnelse .....	3
Sammendrag .....	4
1 Innledning.....	5
1.1 Endringer i vindkraftverkenes status fra fjorårets rapport .....	6
2 Datagrunnlag .....	7
2.1 Turbinposisjoner .....	7
2.2 Turbintyper og effektkurver .....	7
2.3 Terreng- og ruhetsdata.....	9
2.4 Meteorologiske referansedata .....	9
2.5 Historiske produksjonsdata .....	10
3 Beregningsmetode .....	11
3.1 Strømningsmodeller.....	11
3.2 Produksjonsmodeller .....	11
3.3 Skalering av WRF-data .....	12
3.4 Vind- og produksjonsserier .....	13
3.5 Verifikasjon av produksjonsmodell .....	13
4 Vind- og produksjonsindekser .....	15
5 Referanser.....	18
Appendiks A: Effektkurver for turbinene .....	19
Appendiks B: Valg av modelloppsett .....	21
Appendiks C: Modellverifikasjon .....	22

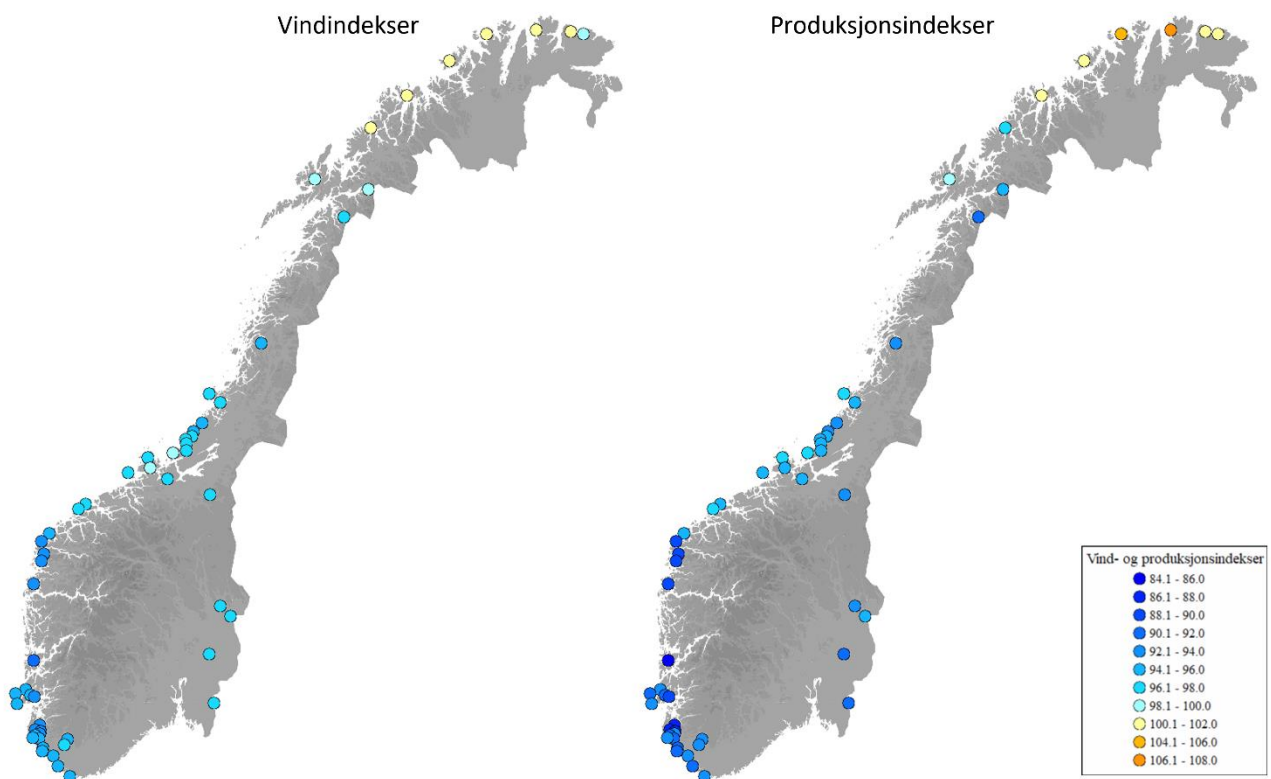
## Sammendrag

På oppdrag fra Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE) har Meventus beregnet vind- og produksjonsindekser for året 2021 for samtlige vindkraftverk i Norge som har vært i normal drift eller under utbygging dette året.

Beregningsmetodikken som er benyttet i analysen tar hensyn til de lokale vindforholdene og tar høyde for relevante stedsspesifikke faktorer som påvirker produksjonen, som terreng, ruhet, retningsavhengige vaketap og luftens tetthet. Indeksene er beregnet basert på normalårsverdier fra en 15 års referanseperiode fra 2003 til 2017.

Over store deler av landet har året 2021 vært et lavvindsår, med vind- og produksjonsverdier til dels langt under normalen. De laveste indeksverdiene er beregnet for vindkraftverkene på Vestlandet, mens indeksverdiene for vindkraftverkene i de nordligste delene av landet ligger noe over normalen, med høyest beregnet produksjonsindeks på 106.1%. Kapasitetsvektet gjennomsnitt av produksjonsindeksene for 2021 er på 93.6 %, mens tilsvarende tall for vindindeksene er på 96.3 %.

De beregnede vind- og produksjonsindeksene er presentert i Figur 1 under.



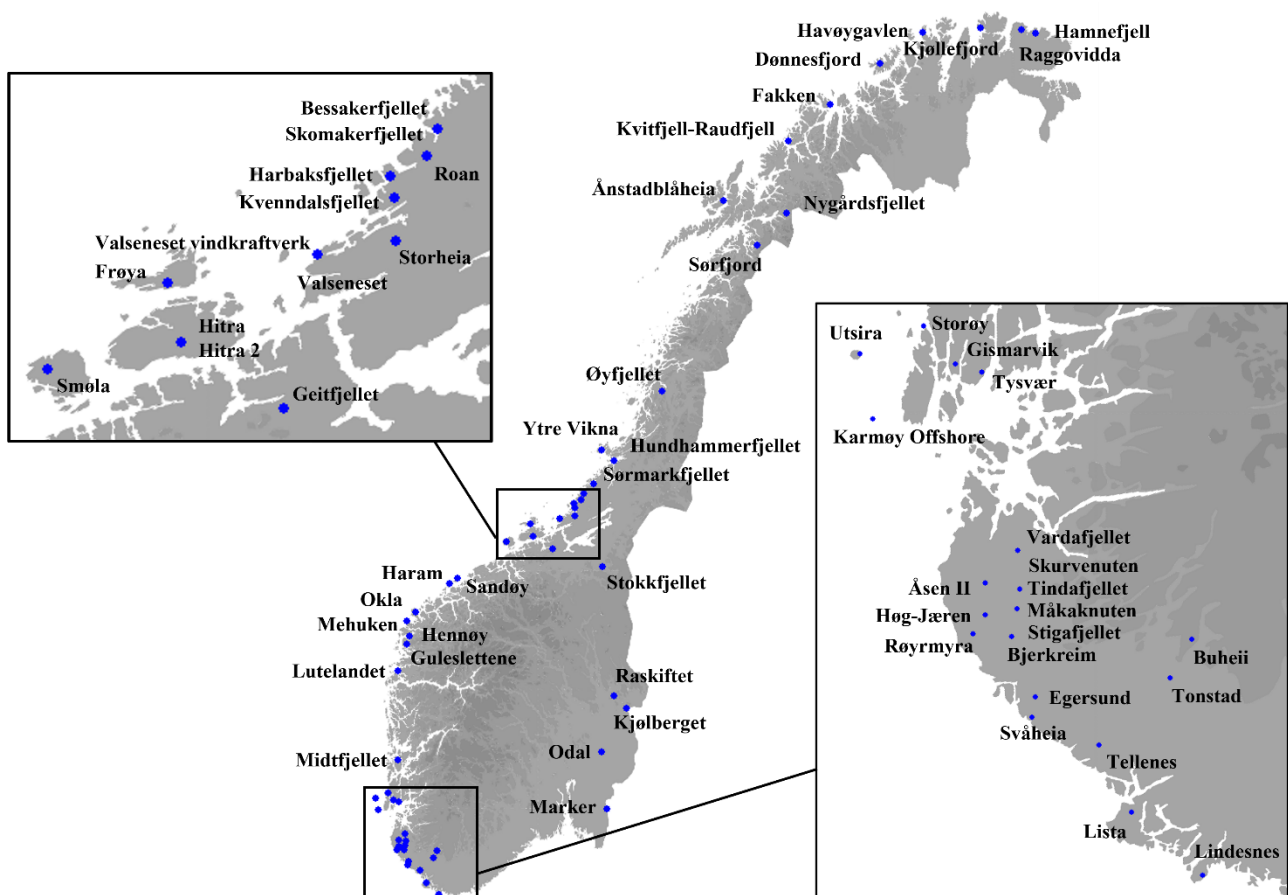
Figur 1 – Oversiktskart med beregnede indekser for samtlige norske vindparker som er inkludert i analysen

## 1 Innledning

På oppdrag fra Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE) har Meventus beregnet vind- og produksjonsindekser for året 2021 for samtlige vindkraftverk i Norge som har vært i normal drift eller under utbygging dette året. Formålet med arbeidet er å få en oversikt over hvordan den potensielle energiproduksjonen i hvert av disse anleggene var i 2021 sammenlignet med normalårsverdier. Dette er informasjon som blir brukt direkte i NVEs arbeid med overvåking og rapportering av Norges vindkraftproduksjon. Perioden 2003 - 2017 er i samråd med NVE valgt som referanseperiode, og de gjennomsnittlige vindforholdene i denne perioden er brukt for beregning av normalverdier for middelvind og produksjon.

Metodikken som er benyttet i denne analysen hensyntar de lokale vindforholdene og tar høyde for relevante stedsspesifikke faktorer som påvirker produksjonen, som terreng, ruhet, retningsavhengige vaketap og luftens tetthet. Beregningsmetodikken er beskrevet i detalj i kapittel 3, mens de beregnede indeksverdiene er presentert og kommentert i kapittel 4.

En oversikt over vindkraftverkene som er inkludert i rapporten er presentert i Figur 2 under.



Figur 2 – Oversikt over vindkraftverkene som er inkludert i analysen

## 1.1 Endringer i vindkraftverkernes status fra fjorårets rapport

I løpet av 2021 ble flere nye vindkraftverk bygget ut og satt i drift, mens noen vindkraftverk var fortsatt under bygging ved utgangen av året. Følgende endringer er registrert og hensyntatt i denne rapporten:

- På Havøygavlen ble de 15 gamle Nordex-turbinene tatt bort våren 2021, og 9 nye turbiner av typen Vestas V117 4.2/4.3MW ble installert og idriftsatt høsten 2021. Den gamle Siemens SWT - 3.0 - 101-turbinen som ble installert i 2011 er fortsatt i drift.
- Ett vindkraftverk, Kjølberget, var inkludert i fjorårets rapport, men ble idriftsatt i 2021.
- En ny vindturbin ble installert like ved av Karmøy Hywind. Vindturbinen er av typen Siemens SWT-3.6-130 med navhøyde 87 m, og tilhører prosjektet TetraSpar Demonstrator ApS. Vindturbinen deler nettilknytning med Karmøy Hywind.
- Åtte nye vindkraftverk ble idriftsatt i 2021 (Buheii, Gismarvik, Haram, Lutelandet, Okla, Stokkfjellet, Sørmarkfjellet og Tysvær).
- Vindkraftverkene Odal, Øyfjellet og trinn II av Raggovidda vindkraftverk er inkludert i denne rapporten, men var fortsatt under utbygging ved utgangen av 2021.
- Dønnesfjord vindkraftverk skulle vært idriftsatt i løpet av 2021, men har fått utsatt fristen til 31.12.2022. Prosjektet er likevel inkludert i denne rapporten.

I henhold til avtale med NVE, er følgende naboprojekter gruppert i rapporteringsarbeidet.

- Kvitfjell og Raudfjell vurderes samlet som Kvitfjell-Raudfjell
- Bjerkreim, Skinansfjellet og Gravdal vurderes samlet som Bjerkreim.
- Raggovidda I og II samlet som Raggovidda
- Karmøy Hywind og TetraSpar Demonstrator samlet som Karmøy Offshore

Prosjekter som ikke var fullt utbygd innen utgangen av 2021 er vurdert ut fra parkens planlagte totalkapasitet.

## 2 Datagrunnlag

### 2.1 Turbinposisjoner

Turbinposisjonene i hvert av vindkraftverkene som inngår i rapporten ble hentet fra NVEs nettside og offentlige databaser (OMS/OSM) som er tilgjengelige i programvaren WindPRO. Samtlige posisjoner er bekreftet ved bruk av satellittbilder for å sikre at de antatte posisjonene samsvarer med det som faktisk er bygget.

### 2.2 Turbintyper og effektkurver

Informasjon om hvilken turbintype og navhøyde som er benyttet i hvert av anleggene ble hentet fra NVEs database om utbygde vindkraftverk (NVE, 2022), fra forrige årsrapport (NVE, 2021) eller fra offentlig tilgjengelige data fra de respektive anleggenes nettsider. En oversikt over turbintypene som ligger til grunn i beregningene for hvert av vindkraftverkene er presentert i Tabell 1 og Tabell 2.

Tabell 1 – Oversikt over nye vindkraftverk inkludert i denne rapporten (ikke inkludert i fjorårets rapport)

Vindkraftverk	Antall turbiner	Idriftsatt	Turbintype(r)
Buheii	19	2021	Vestas V150 – 4.2 MW
Dønnesfjord	6	2022*	Enercon E92 – 2.35 MW
Gismarvik	3	2021	Enercon E138 – 4.2 MW
Haram	8	2021	Vestas V136 – 4.2 MW
Havøygavlen**	6	2021	Vestas V117 – 4.3 MW
	3	2021	Vestas V117 – 4.2 MW
Karmøy TetraSpar**	1	2021	SiemensGamesa SWT-DD-130 – 3.6 MW
Lutelandet	9	2021	Nordex N149 – 5.7 MW
Odal	34	2021*	SiemensGamesa SG 5.0-145 – 4.8 MW
Okla	5	2021	Vestas V117 – 4.2 MW
Raggovidda II**	12	2021*	SiemensGamesa SWT-DD-130 – 4.3 MW
Stokkfjellet	21	2021	Vestas V136 – 4.2 MW
Sørmarkfjellet	31	2021	Vestas V117 – 4.2 MW
Tysvær	11	2021	SiemensGamesa SWT-DD-130 – 4.3 MW
Øyfjellet	72	2021*	Nordex N149 – 5.5 MW

\* ikke ferdigstilt i 2021

\*\* inkludert i allerede eksisterende prosjekter

Tabell 2 – Oversikt over vindkraftverk inkludert i denne rapporten (og inkludert i fjorårets rapport)

Vindkraftverk	Antall turbiner	Idriftsatt	Turbintype
Bessakerfjellet	25	2008	Enercon E70 – 2.3 MW
Bjerkreim	70	2020	SiemensGamesa SWT-DD-130 – 4.3 MW
Egersund	33	2017	Senvion 3.4M114
Fakken	18	2012	Vestas V90 – 3.0 MW
Frøya	14	2020	Vestas V136 – 4.2 MW
Geitfjellet	43	2020	Vestas V136 – 4.2 MW
Guleslettene	47	2020	Vestas V136 – 4.2 MW
Hamnefjell	15	2017	Vestas V112 – 3.45 MW
Harbaksfjellet	30	2020	Vestas V117 – 4.2 MW
Havøygavlen	1	2011	Siemens SWT101 – 3.0 MW
Hennøy	12	2019	Vestas V136 – 4.2 MW
Hitra	24	2004	Siemens SWT82 – 2.3 MW
Hitra 2	26	2019	Vestas V117 3.6 MW
Hundhammerfjellet	1	2009	Enercon E70 – 2.0 MW
	1	2009	Enercon E70 – 2.3 MW
	12	2020	Vestas V136 – 4.2 MW
Høg-Jæren	32	2011	Siemens SWT93 – 2.3 MW
Karmøy Hywind	1	2009	Siemens SWT82 – 2.3 MW
Kjølberget	13	2021	Vestas V150 – 4.3 MW
Kjøllefjord	17	2006	Siemens SWT82 – 2.3 MW
Kvenndalsfjellet	27	2020	Vestas V117 – 4.2 MW
Kvitfjell-Raudfjell	67	2020	SiemensGamesa SWT-DD-130 – 4.2 MW
Lindesnes	2	2019	Vestas V112 – 3.6 MW
Lista	31	2012	Siemens SWT93 – 2.3 MW
Måkaknuten	22	2020	SiemensGamesa SWT-DD-130 – 4.3 MW
Marker	15	2019	Vestas V136 – 3.6 MW
Mehuken	11	2001	Enercon E70 – 2.3 MW
Midtfjellet	34	2012	Nordex N90 – 2.5 MW
	10	2013	Nordex N100 – 2.5 MW
	11	2018	Nordex N117 – 3.6 MW
Nygårdsfjellet	14	2011	Siemens SWT93 – 2.3 MW
Raggovidda I	15	2014	Siemens SWT101 – 3.0 MW
Raskiftet	31	2018	Vestas V126 – 3.6 MW
Roan	71	2018	Vestas V117 – 3.6 MW
Røyrmøya	3	2015	Enercon E48 – 0.8 MW
Sandøy	5	1999	NEG Micon NM48 – 0.75 MW
Skomakerfjellet	4	2015	Vestas V112 – 3.3 MW
Skurvenuten	2	2018	Vestas V117 – 3.45 MW
Smøla	20	2002	Bonus 76 – 2.0 MW
	48	2005	Siemens SWT82 – 2.3 MW
Sørfjord	23	2020	SiemensGamesa SWT-DD-130 – 4.2 MW
Stigafjellet	7	2020	SiemensGamesa SWT-DD-130 – 4.3 MW
Storheia	80	2019	Vestas V117 – 3.6 MW
Storøy	2	2018	Enercon E115 – 3.2 MW



Vindkraftverk	Antall turbiner	Idriftsatt	Turbintype
Svåheia	7	2018	Vestas V126 – 3.6 MW
Tellenes	50	2017	Siemens SWT113 – 3.2 MW
Tindafjellet	3	2018	Vestas V117 – 3.45 MW
Tonstad	51	2020	SiemensGamesa SWT-DD-142 – 4.1 MW
Utsira	2	2010	Enercon E40 – 0.6 MW
Valsneset	5	2006	Enercon E70 – 2.3 MW
Valsneset vindkraftverk	3	2020	Vestas V117 – 4.2 MW
Vardafjellet	7	2020	Vestas V117 – 4.3 MW
Ytre Vikna	17	2012	Enercon E70 – 2.3 MW
Ånstadblåheia	14	2018	Vestas V126 – 3.6 MW
Åsen II	2	2012	Enercon E48 – 0.8 MW

Spesifikke effektkurver er hentet fra WindPRO's WTG (Wind Turbine Generator) database.

En fullstendig liste over effektkurvene som er benyttet for hver spesifikk turbintype er presentert i Appendiks A.

## 2.3 Terreng- og ruhetsdata

For terrengbeskrivelse i hvert av områdene ble det benyttet høykvalitets høydedata (DTM data med 10 m oppløsning eller 10 m høydekoter). For ruhetsbeskrivelse ble det i WindSim benyttet ruhetsdata basert på N50 datasettet fra Statens Kartverk, mens det for vindkraftverkene modellert med WASP ble benyttet ruhetsbeskrivelse fra datasettet Corine Land Cover<sup>1</sup> (2012/2018). Ruhetsverdiene som ble benyttet for hver respektiv terrengtype for de to datasettene er presentert i Tabell 3.

Tabell 3 – Oversikt over ruhetslengder benyttet i beregningene

Type område	Ruhetslengde [m]	
	WindSim	WASP
Hav/innsjø	0.0001	0.00
Åpent Område	0.03	0.03
Dyrket mark	0.05	0.06
Myr	0.1	0.02
Bebyggelse	0.4	0.4
Skog	0.8	0.5

## 2.4 Meteorologiske referansedata

De meteorologiske referansedataene (hindcast) som er benyttet for denne analysen er EMD-WRF globale mesoskala data<sup>2</sup>, levert av det danske selskapet EMD International A/S (leverandør av

<sup>1</sup> [https://help.emd.dk/mediawiki/index.php?title=Corine\\_Land\\_Cover](https://help.emd.dk/mediawiki/index.php?title=Corine_Land_Cover)

<sup>2</sup> <https://www.emd.dk/windpro/mesoscale-data/emd-wrf-meso-scale-on-demand-service/>

programvaren WindPRO). WRF (Weather Research and Forecasting model) er et veletablert mesoskala numerisk værvarslingssystem designet for både atmosfærisk forskning og operasjonelle prognoseapplikasjoner. Gjennom WindPRO kan dette datasettet genereres for ønsket område og produseres ved bruk av WRF-modellen og grensebetingelser fra et utvalg av meteorologiske referansedata med tidsoppløsning på 1 time og romlig oppløsning på 3 x 3 km.

Grensebetingelsene for WRF-modellen er for denne analysen hentet fra det meteorologiske referansedatasettet CFSR/CFSv2 (Climate Forecast System Reanalysis data)<sup>3</sup>.

For denne analysen ble det lastet ned en historisk mesoskala (WRF) tidsserie for perioden fra 2003 og ut 2021 for et representativt sted innenfor hvert av vindkraftverkene. Det aktuelle datasettet inkluderer vindhastighet og vindretning for 5 ulike høyder mellom 10 og 200 meter, samt temperatur og lufttrykk som ble benyttet for beregning av lufttettheten for hvert tidssteg.

## 2.5 Historiske produksjonsdata

Produksjonsdata for hele referanseperioden fra hvert av vindkraftverkene er gjort tilgjengelig av NVE for bruk i denne analysen. Dataene er benyttet for kalibrering av produksjonsmodellen og for verifikasjon av resultatene. De timesoppløste aggregerte produksjonsverdiene (totalproduksjon for hvert vindkraftverk) er registrert av Statnett på inmatingspunktet.

Det påpekes at enkelte vindkraftverk ikke var ferdigstilt før slutten eller ved utgangen av 2021, og den oppgitte produksjonen for de aktuelle vindkraftverkene vil da ikke reflektere anleggenes fulle kapasitet.

---

<sup>3</sup> <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/climate-forecast-system-version2-cfsv2>

### 3 Beregningsmetode

Modelleringsmetodikken som er benyttet for beregning av vind- og produksjonsindekser er konsekvent for samtlige vindkraftprosjekter som inngår i denne analysen, uavhengig av anleggenes størrelse. Dette sikrer sammenlignbare resultater og er viktig for å kunne kartlegge eventuelle geografiske mønstre i resultatene.

Metodikken som er benyttet hensyntar de lokale vindforholdene og tar høyde for relevante stedsspesifikke faktorer som påvirker produksjonen, som terreng, ruhet, retningsavhengige vaketap og luftens tetthet.

Kort oppsummert er følgende fremgangsmåte benyttet:

- **Strømningsmodell:** En tilpasset strømningsmodell er satt opp for hvert område.
- **Produksjonsmodell:** Basert på turbinposisjonene med tilhørende effektkurver og parametere for vakemodellering er samlede effektkurver for alle mulige kombinasjoner av vindhastighet, vindretningssektorer og variasjon i lufttetthet beregnet for hvert av anleggene.
- **Skalering av WRF-data:** Parkspesifikke skaleringsfaktorer for justering av inngangsdata fra WRF til forventet nivå er beregnet. Dette er gjort ved en sammenligning av parkens beregnede produksjon basert på WRF-data og historiske produksjonsdata fra NVE/Statnett.
- **Vind- og produksjonsserier:** De resulterende kalibreringsfaktorene og effektkurvene (for samlet produksjon for hvert vindkraftanlegg) for hver kombinasjon av vindhastighet, vindretning og lufttetthet er deretter benyttet direkte på oppdatert tidsserier fra WRF.

Fremgangsmåten som er benyttet er beskrevet nærmere i de følgende underkapitlene.

#### 3.1 Strømningsmodeller

Avhengig av størrelse og terrengforhold for hvert av de individuelle vindkraftanleggene er en av følgende beregningsmetodikker benyttet for modellering av strømningsforholdene:

- WindSim CFD-modell (Computational Fluid Dynamics) med høy oppløsning
- WindSim CFD-modell med moderat oppløsning
- WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program) lineær strømningsmodell

Hvilken type strømningsmodell som er benyttet for hvert av de aktuelle vindkraftanleggene er presentert i Appendiks B. Valg av strømningsmodeller er avklart med NVE.

#### 3.2 Produksjonsmodeller

Et WindPRO-prosjekt er satt opp for hvert enkelt vindkraftanlegg. WindPRO-prosjektene inneholder detaljerte høyde- og ruhetsdata for området innenfor og rundt anleggene, turbinposisjoner, tilhørende effektkurve(r) og langtidskorrigerede vinddata. For små prosjekter hvor det er benyttet en

lineær WASP-modell er denne modellen satt opp direkte i WindPRO. For større parker hvor strømningsforholdene er beregnet med en WindSim CFD-strømningsmodell er relevante data hentet inn i WindPRO-prosjektet ved bruk av en WindSim FLOWRES eksportfil.

Turbinenes vaketap er modellert i WindPRO ved bruk av N.O.Jensen-modellen med en standard vakereduksjonskonstant for landbaserte vindkraftprosjekter.

Det resulterende WindPRO-prosjektet er benyttet for beregning av effektkurver for vindkraftverkens samlede produksjon for alle mulige kombinasjoner av vindhastighet, vindretning og lufttetthet. Disse effektkurvene er frembragt basert på en syntetisk tidsserie som inneholder alle kombinasjoner av 36 vindretningssektorer, vindhastigheter fra 0 til 40 m/s, og et spekter av tetthetsverdier (fra 1.050 til 1.475 kg/m<sup>3</sup>, i intervaller på 0.025) som kan forventes for hvert område.

### 3.3 Skalering av WRF-data

En historisk WRF-tidsserie med høy oppløsning (som beskrevet i seksjon 2.4) er benyttet som inngangsdata for produksjonsmodellene som er satt opp for hvert enkelt vindkraftverk. Ettersom vindhastigheten fra WRF-modellene ikke alltid samsvarer helt med det som forventes i området, er WRF-dataene skalert før bruk i produksjonsberegningene. WRF-data beregnet i 100 m høyde over bakken er benyttet, og dataene er justert til aktuell navhøyde ved bruk av strømningsmodellen.

Skaleringen er gjennomført ved beregning av tidsvarierende produksjonsverdier for hvert av vindkraftanleggene basert på tidsserier med vindhastighet, vindretning og lufttetthet (basert på temperatur og lufttrykk) fra WRF-datasettet. Disse tidsseriene ble sammenlignet med de historiske produksjonsdataene fra NVE/Statnett for beregning av egnet skaleringsfaktor. Produksjonen på timesbasis vil ofte variere mye fra time til time, basert på variasjon i vindforhold i de enkelte turbinposisjonene og eventuelle tekniske problemer. For å redusere resultatenes sensitivitet til statusen på de individuelle turbinene ble produksjonen samlet til daglige produksjonsverdier for skalering. Dette gjorde det også lettere å ekskludere data med tekniske problemer.

For å sikre en best mulig tilpassing av WRF-dataene til de faktiske forholdene i hvert område, ble følgende perioder ekskludert i kalibreringsprosessen:

- Vinterdata (f.o.m. desember t.o.m. februar) for å redusere påvirkning fra eventuelle isingsperioder. For prosjekter uten tilstrekkelig data er utvalgte data i disse periodene inkludert.
- Oppstartsperioder for nye vindturbiner.
- Perioder hvor turbinene tydelig ikke produserer optimalt.

For prosjekter hvor det er gjennomført en stegvis utbygging ble kalibreringen utført basert på data fra det oppsettet som har vært gjeldende lengst. Dette for å maksimere mengden data som var tilgjengelig for tilpassingen.

For nye prosjekter med lite historiske produksjonsdata tilgjengelig er skaleringsfaktoren delvis basert på faktorer benyttet for lignende prosjekter og en erfaringsbasert vurdering.

### 3.4 Vind- og produksjonsserier

Korrigerte timesoppløste tidsserier for vindhastighet, vindretning og lufttetthet ble beregnet for hvert av prosjektene basert på de historiske WRF-dataene og de respektive skaleringsfaktorene. Lufttettheten for hvert tidssteg ble beregnet basert på modellert temperatur og lufttrykk i 100 m høyde. Lufttettheten ble i denne prosessen avrundet til nærmeste 0.025 for å tilpasses nivåene i de genererte parkspesifikke effektkurvene. Vindhastigheten ble samtidig korrigert for endringen i lufttetthet i henhold til IEC 61400-12-1 (IEC, 2005) ved hjelp av ligningen under (1).

$$V_{korr} = V_{mod} \left( \frac{\rho_{mod}}{\rho_{avr}} \right)^{1/3} \quad (1)$$

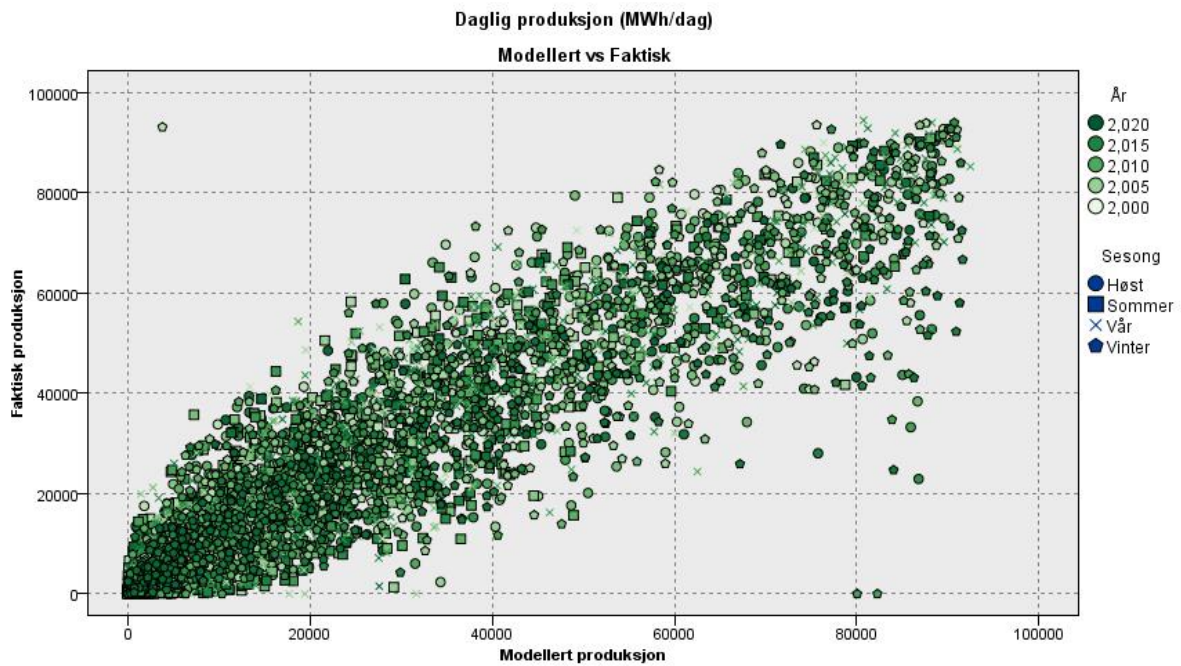
Lufttettheten  $\rho_{mod}$  er den modellerte lufttettheten som benyttes for å justere den modellerte vindhastigheten  $V_{mod}$  til den vindhastigheten  $V_{korr}$  som med nærmeste avrundede lufttetthet ( $\rho_{avr}$ ) vil representere den samme vindenergien.

De korrigerte tidsseriene ble videre benyttet i kombinasjon med aktuell effektkurve for parkens samlede produksjon for beregning av tidsserie med forventet produksjon, inkludert vaketap, for tidsperioden fra 2003 og frem til dagens dato. Figurer som viser modellert produksjon sammenlignet med faktisk produksjon for hvert av vindkraftverkene er inkludert i Appendiks C.

Denne produksjonen ble samlet til årlige verdier for beregning av vind- og produksjonsindekser. For vindkraftanlegg som var under bygging i 2021, som f.eks. Okla og Øyfjellet, var det anleggets planlagte totalkapasitet som ble lagt til grunn for beregning av indeksene, uansett om hele anlegget ble idriftsatt i 2021 eller ikke.

### 3.5 Verifikasjon av produksjonsmodell

De modellerte tidsseriene med produksjonsdata ble sammenlignet med de faktiske produksjonsdataene for å sikre at modellen klarer å gjenspeile de faktiske forholdene. En sammenligning mellom modellert og faktisk produksjon for et av vindkraftverkene i analysen er vist i Figur 3. Markørene i figuren er fargelagt med hensyn på årstallet, mens formen på markørene angir hvilken sesong datapunktet gjelder for.



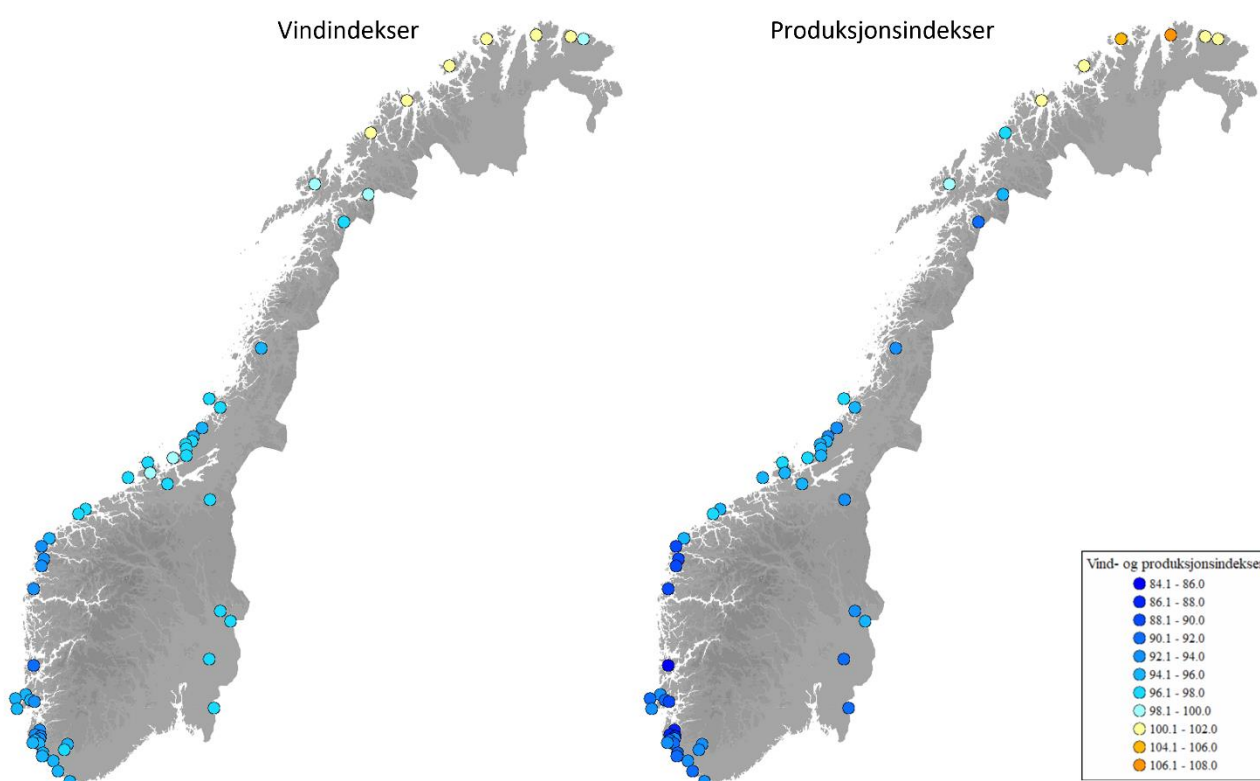
Figur 3 – Eksempel på verifikasjonsplot. Figuren viser sammenligning mellom modellert produksjon og faktisk produksjon for et av vindkraftverkene i analysen.

Verifikasjonsplot for produksjonen i 2021 er presentert i Appendiks C for samtlige inkluderte vindkraftverk med tilgjengelige produksjonsdata.

## 4 Vind- og produksjonsindekser

Vind- og produksjonsindekser for 2021 ble beregnet basert på en 15 års referanseperiode, f.o.m. 2003 t.o.m. 2017.

Beregnete vind- og produksjonsindekser for samtlige vindkraftverk i Norge som var i normal drift eller under utbygging i 2021 er markert geografisk på kartene i Figur 4 under og presentert i Tabell 4 (neste side). Tabellen viser også årlig standardavvik i produksjonsindeksen for hvert av anleggene, basert på produksjonsindekser beregnet for perioden 2003–2021. Denne verdien gir en indikasjon på årlig variasjon i produksjonen for hvert av vindkraftverkene.



Figur 4 – Oversiktskart med beregnede indekser for samtlige norske vindparker som er inkludert i analysen

Vind- og produksjonsindeksene følger generelt det samme mønsteret. Resultatene viser at for 6 av 61 vindparker i Norge var vind- og produksjonsindeksene over normalen i 2021, mens for de resterende 55 vindparkene var 2021 et lavvindsår hvor både middelvind og produksjon endte under normalen

Som det fremgår av oversiktskartet i Figur 4 er det i de nordligste delene av landet man finner de høyeste produksjonsindeksene for 2021, mens produksjonsindeksene for vindkraftverkene i øvrige deler av landet i all hovedsak lå under og til dels godt under normalen. De laveste produksjonsindeksene ble beregnet for vindkraftverkene langs kysten av Vestlandet.

Tabell 4 – Vind- og produksjonsindekser for samtlige vindkraftanlegg i Norge i normal drift i 2021

Vindkraftanlegg	Vindindeks 2021 [%]	Produksjonsindeks 2021 [%]	Årlig standardavvik i produksjonsindeksene [%]
Bessakerfjellet	95.6	92.5	7.8
Bjerkreim	95.4	92.0	6.7
Buheii	95.8	93.8	4.2
Dønnesfjord	100.1	101.6	6.9
Egersund	94.8	90.5	7.0
Fakken	101.3	100.6	7.6
Frøya	97.3	96.7	8.4
Geitfjellet	96.9	94.5	8.0
Gismarvik	94.4	91.0	6.9
Guleslettene	92.5	89.4	9.0
Hamnefjell	99.7	100.4	4.7
Haram	96.7	96.5	10.2
Harbaksfjellet	96.9	95.3	6.7
Havøygavlen	101.2	104.4	7.2
Hennøy	92.6	88.3	10.3
Hitra	98.1	95.1	11.1
Hitra 2	98.1	95.5	9.8
Hundhammerfjellet	97.1	95.2	7.3
Høg-Jæren	94.1	91.4	6.1
Karmøy Offshore	94.9	93.6	5.9
Kjølberget	97.2	94.5	6.3
Kjøllefjord	101.3	106.1	6.7
Kvenndalsfjellet	97.2	95.3	6.7
Kvitfjell-Raudfjell	100.6	96.6	6.4
Lindesnes	94.8	92.9	7.3
Lista	94.7	91.9	7.3
Lutelandet	92.6	89.2	8.8
Marker	96.7	91.7	7.5
Mehuken	93.0	89.0	11.3
Midtfjellet	91.5	85.3	10.1
Måkaknuten	93.9	92.7	5.7
Nygårdsfjellet	99.0	94.7	6.5
Odal	96.7	90.2	7.6
Okla	94.1	94.5	8.5
Raggovidda	100.5	101.3	5.1
Raskiftet	97.4	92.4	7.7
Roan	96.2	95.1	6.7
Røyrymyra	95.1	92.1	6.9
Sandøy	96.3	94.1	13.0
Skomakerfjellet	95.6	91.9	8.1
Skurvenuten	93.2	86.6	8.3
Smøla	97.4	95.2	13.4
Stigafjellet	93.9	91.0	5.9
Stokkfjellet	96.0	93.6	7.4
Storheia	96.7	94.2	7.2
Storøy	94.5	92.3	6.7
Svåheia	95.1	91.1	7.2
Sørfjord	96.2	90.4	7.0
Sørmarkfjellet	95.6	93.8	6.7
Tellenes	95.6	92.5	6.3
Tindafjellet	93.3	87.9	7.5
Tonstad	96.3	92.2	6.1
Tysvær	93.7	88.9	7.9
Utsira	94.2	91.7	7.1



Vindkraftanlegg	Vindindeks 2021 [%]	Produksjonsindeks 2021 [%]	Årlig standardavvik i produksjonsindeksene [%]
Valsneset	98.0	97.1	7.8
Valsneset vindkraftverk	98.0	96.1	6.7
Vardafjellet	92.2	86.2	8.3
Ytre Vikna	97.5	96.8	8.4
Øyfjellet	95.2	93.9	7.8
Ånstadblåheia	99.9	99.1	8.1
Åsen II	93.2	86.8	8.7

Den høyeste vindindeksen er beregnet for vindkraftverket Fakken på 101.3 % av normalen, mens den laveste vindindeksen er beregnet for Midtfjellet vindkraftverk på 91.5 % av normalen. For produksjonsindeksen er det også Midtfjellet vindkraftverk som ligger lavest på 85.3 % av normalen, mens den høyeste produksjonsindeksen er beregnet for Kjøllefjord vindkraftverk på 106.1 % av normalen.

Standardavviket i produksjonsindeksen gir en indikasjon på hvor mye produksjonen vil kunne variere fra år til år. Som det fremgår av Tabell 4 varierer standardavviket mellom 4.2 % og 13.4 % for de 61 vindkraftverkene som inngår i analysen. Beregnet standardavvik er lavest for vindkraftverkene i Øst-Finnmark (Raggovidda og Hamnefjell) og på Sørvestlandet, mens de høyeste verdiene er beregnet for vindkraftverkene på Nordvestlandet.

Gjennomsnittlig produksjonsindeks for 2021, med og uten kapasitetsvekting, er beregnet til 93.6 %. For vindindeksen er tilsvarende tall på henholdsvis 96.3 og 96.1 %.

---

## 5 Referanser

---

- NVE, 2014 Vindkraft – produksjon i 2014, Rapport nr. 18 – 2015, Norges Vassdrags- og Energidirektorat
- NVE, 2018 Vindkraft – produksjon i 2017, Rapport nr. 10 – 2018, Norges Vassdrags- og Energidirektorat
- NVE, 2019 Vind- og produksjonsindekser for vindkraft i Norge, 2018, MEV WS 2019-001, (<https://www.nve.no/media/7886/vind-og-produksjonsindekser-for-vindkraft-i-norge-2018.pdf>)
- NVE, 2020 Vind- og produksjonsindekser for vindkraft i Norge, 2019, MEV WS 2020-001, (<http://webfileservice.nve.no/API/PublishedFiles/Download/201307790/3075907>)
- NVE, 2021 Vind- og produksjonsindekser for vindkraft i Norge, 2020, MEV WS 2021-001, (<https://www.nve.no/media/11715/vind-og-produksjonsindekser-vindkraft-2020.pdf>)
- NVE, 2022 NVEs nettside om utbygde vindkraftverk (01.2022) (<https://www.nve.no/energi/energisystem/vindkraft/utbygde-vindkraftverk/>)
- IEC, 2005 IEC 61400-12-1:2005, Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines, 2005

## Appendiks A: Effektkurver for turbinene

Tabell 5 – Oversikt over effektkurver benyttet i analysen (Del 1 av 2). Effekten er oppgitt i kW.

Vindhastighet [m/s]	Bonus	Enercon					NEG Micon	Senvion	Siemens / Siemens Gamesa								Vestas	
	B76 2.0MW	E40 0.6MW	E48 0.8MW	E70 2.0MW	E70 2.3MW	E92 2.35MW	NM48 0.75MW	3.4M114	SWT82 2.3MW	SWT93 2.3MW	SWT101 3.0MW	SWT113 3.2MW	SWT-DD- 130 3.6MW	SWT-DD- 130 4.2MW	SWT-DD- 130 4.3MW	SWT-DD- 142 4.1MW	V90 3.0MW	V136 3.6MW
2	0	0	0	2	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	2	5	18	18	30	0	23	0	0	50	63	43	30.9	30	40	0	43
4	0	15	25	56	56	98	20	140	75	103	132	171	184	195.2	190	245	77	184
5	55	41	60	127	127	208	53	327	161	221	272	355	421	453.4	449	556	190	421
6	190	80	110	240	240	384	97	601	294	401	485	628	778	813.6	811	992	353	778
7	378	136	180	400	400	637	155	988	478	652	783	1008	1269	1302	1303	1583	581	1269
8	611	208	275	626	626	976	245	1502	721	981	1177	1503	1901	1922	1927	2308	886	1901
9	902	295	400	892	892	1404	349	2105	1031	1408	1674	2074	2630	2633	2647	3056	1273	2630
10	1242	405	555	1223	1223	1818	462	2721	1413	1892	2258	2601	3261	3343	3376	3698	1710	3261
11	1609	508	671	1590	1590	2089	565	3208	1829	2241	2757	2949	3534	3895	3961	4020	2145	3534
12	1901	571	750	1830	1900	2237	641	3400	2155	2299	2955	3114	3593	4139	4231	4092	2544	3593
13	2000	600	790	1950	2080	2300	696	3400	2275	2300	2995	3173	3600	4193	4292	4099	2837	3600
14	2000	600	810	2050	2230	2350	730	3400	2297	2300	3000	3192	3600	4199	4299	4100	2965	3600
15	2000	600	810	2050	2300	2350	746	3400	2300	2300	3000	3198	3600	4200	4300	4100	2995	3600
16	2000	600	810	2050	2310	2350	750	3400	2300	2300	3000	3199	3600	4200	4300	4100	3000	3600
17	2000	600	810	2050	2310	2350	745	3400	2300	2300	3000	3200	3600	4200	4300	4100	3000	3600
18	2000	600	810	2050	2310	2350	735	3400	2300	2300	3000	3200	3600	4200	4300	4100	3000	3600
19	2000	600	810	2050	2310	2350	723	3400	2300	2300	3000	3200	3600	4200	4300	4100	3000	3600
20	2000	600	810	2050	2310	2350	712	3400	2300	2300	3000	3200	3600	4200	4300	4100	3000	3600
21	2000	600	810	2050	2310	2350	701	3400	2300	2300	3000	3200	3600	4200	4300	3553	3000	3600
22	2000	600	810	2050	2310	2350	694	3400	2300	2300	3000	3200	3600	4200	4300	3007	3000	3600
23	2000	600	810	2050	2310	2350	693		2300	2300	3000	3168	3600	4200	4300	2460	3000	3600
24	2000	600	810	2050	2310	2350	695		2300	2300	3000	3136	3600	3528	3612	1913	3000	3600
25	2000	600	810	2050	2310	2350	701		2300	2300	3000	2844	3600	2856	2924	1367	3000	3600
26												2489		2184	2236	820		
27												2133		1512	1548			
28												1778		840	860			
29												1422						
30												1067						
31												711						
32												356						

Tabell 6 – Oversikt over effektkurver benyttet i analysen (Del 2 av 2). Effekten er oppgitt i kW.

Vindhastighet [m/s]	Enercon		Nordex							Vestas										Siemens Gamesa	
	E115 3.2MW	E138 4.2MW	N90 2.5MW	N100 2.5MW	N117 3.6MW	N149 4.95MW	N149 5.5MW	N149 5.6MW	N149 5.7MW	V112 3.3MW	V112 3.45MW	V112 3.6MW	V117 3.45MW	V117 3.6MW	V117 4.2MW	V117 4.3MW	V126 3.6MW	V136 4.2MW	V150 4.2MW	V150 4.3MW	SG145 4.8MW
2	3	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.5	19	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	49	93	9	3	15	29	29	29	29	6	7	7	22	22	12	19	36	57	81	81	56
3.5	94	165	43	46	70	113	113	113	113	52	53	53	78	78	65	75	102	133	172	172	130
4	155	264	87	101	146	233	233	233	233	121	123	123	150	150	140	147	183	225	285	285	241
4.5	236	390	140	171	241	383	383	383	383	204	208	208	237	237	230	233	281	338	424	424	383
5	339	541	208	256	355	561	561	561	561	303	309	309	340	340	336	336	401	479	596	596	555
5.5	468	722	292	356	489	773	773	773	773	417	427	427	466	466	460	461	546	650	808	808	762
6	628	936	390	472	646	1023	1023	1023	1023	553	567	567	617	617	610	611	721	856	1061	1061	1009
6.5	821	1183	504	608	830	1317	1317	1317	1317	715	732	732	796	796	788	788	928	1100	1360	1360	1300
7	1036	1461	635	765	1043	1658	1658	1658	1658	906	927	927	1006	1006	996	998	1169	1386	1711	1711	1638
7.5	1265	1765	787	945	1287	2047	2050	2050	2050	1124	1149	1149	1247	1247	1236	1237	1441	1710	2102	2106	2026
8	1522	2086	958	1148	1564	2460	2497	2497	2497	1371	1401	1401	1522	1522	1507	1509	1755	2077	2548	2549	2462
8.5	1816	2414	1147	1372	1868	2875	2988	2996	2999	1650	1688	1687	1831	1830	1814	1815	2099	2472	3021	3021	2933
9	2125	2738	1353	1615	2188	3278	3496	3520	3535	1957	2006	2006	2178	2176	2155	2157	2470	2858	3471	3470	3414
9.5	2419	3045	1572	1877	2513	3659	4001	4048	4081	2287	2348	2348	2544	2541	2521	2523	2826	3212	3820	3839	3864
10	2677	3323	1802	2108	2824	4017	4477	4548	4599	2627	2693	2693	2905	2903	2892	2895	3142	3548	4047	4099	4241
10.5	2881	3563	2038	2282	3089	4326	4851	4938	5006	2925	3011	3010	3201	3209	3245	3247	3379	3834	4146	4228	4520
11	3030	3759	2232	2401	3288	4558	5122	5221	5304	3125	3252	3263	3374	3418	3556	3566	3517	4029	4192	4287	4695
11.5	3125	3909	2369	2473	3429	4727	5309	5414	5506	3239	3388	3441	3435	3543	3815	3838	3581	4140	4199	4298	4765
12	3177	4018	2455	2498	3523	4844	5427	5534	5632	3285	3436	3545	3448	3589	4008	4052	3597	4185	4200	4300	4785
12.5	3197	4092	2496	2500	3576	4915	5487	5592	5691	3297	3448	3587	3450	3599	4124	4192	3600	4197	4200	4300	4793
13	3200	4139	2500	2500	3598	4947	5500	5600	5700	3300	3450	3598	3450	3600	4178	4264	3600	4199	4200	4300	4797
13.5	3200	4168	2500	2500	3600	4950	5500	5600	5700	3300	3450	3599	3450	3600	4187	4281	3600	4200	4200	4300	4798
14	3200	4184	2500	2500	3600	4950	5500	5600	5700	3300	3450	3600	3450	3600	4196	4294	3600	4200	4200	4300	4799
14.5	3200	4193	2500	2500	3600	4950	5500	5600	5700	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4299	3600	4200	4200	4300	4800
15	3200	4197	2500	2500	3600	4950	5500	5600	5700	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	4200	4300	4800
15.5	3200	4199	2500	2500	3600	4950	5500	5600	5700	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	4200	4300	4800
16	3200	4200	2500	2500	3600	4950	5500	5600	5700	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	4200	4300	4800
16.5	3200	4200	2500	2500	3600	4950	5500	5600	5700	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	4200	4300	4800
17	3200	4200	2500	2500	3600	4950	5500	5600	5700	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	4200	4300	4800
17.5	3271	4200	2608	2544	3724	4950	5500	5600	5700	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	4200	4296	4800
18	3286	4200	2631	2553	3751	4950	5500	5600	5700	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	4163	4230	4799
18.5	3301	4200	2654	2563	3778	4950	5500	5600	5700	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	4081	4102	4797
19	3316	4200	2677	2572	3805	4950	5500	5600	5700	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	3998	4003	4792
19.5	3331	4198	2700	2581	3832	4950	5500	5600	5700	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	3898	3895	4782
20	3347	4186	2723	2590	3859	4950	5500	5600	5700	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	3774	3770	4763
20.5	3362	4160	2746	2599	3886	4950	5500	5600	5700	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	3613	3607	4734
21	3377	4115	2769	2608	3913	4950	5500	5600	5700	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	3416	3408	4692
21.5	3392	4041	2792	2618	3940	4950	5500	5600	5700	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	3190	3180	4635
22	3407	3933	2815	2627	3967	4950	5500	5600	5700	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	2929	2917	4567
22.5	3422	3783	2838	2636	3994	4950	5500	5573	5603	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	2657	2645	4490
23	3437	3591	2861	2645	4021	4950	5469	5505	5506	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	2376	2363	4407
23.5	3452	3357	2884	2654	4048	4950	5387	5387	5387	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	2085	2070	4323
24	3467	3088	2907	2664	4075	4950	5278	5278	5278	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	1794	1782	4242
24.5	3482	2799	2930	2673	4102	4950	5147	5147	5147	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200	1570	1561	4164
25	3497	2214	2953	2682	4129	4943	5039	5039	5039	3300	3450	3600	3450	3600	4200	4300	3600	4200			4097
25.5	3513	1878	2976	2691	4156	4891	4891	4891	4891						4200	4300					4034
26	3528	1585	2999	2700	4183	4782	4782	4782	4782						4200	4300					3977
26.5	3543	1314	3022	2710	4210										4200	4300					3931
27	3558	1069	3045	2719	4237										4200	4300					3889
27.5	3573	854	3068	2728	4264																
28	3588	708	3091	2737	4291																

## Appendiks B: Valg av modelloppsett

Tabell 7 under viser en oversikt over hvilken type strømningsmodell som er benyttet for hvert av vindkraftverkene som inngår i analysen. De tre ulike typene strømningsmodell er:

- WindSim CFD-modell med høy oppløsning (20x20 m) (H)
- WindSim CFD-modell med moderat oppløsning (50x50 m) (M)
- WASP lineær strømningsmodell (W)

Valg av strømningsmodell er basert på en vurdering av anleggets størrelse, kompleksiteten i terrenget i det aktuelle området og terrengforskjellene mellom de ulike turbinposisjonene. Valg av strømningsmodeller er avklart med NVE.

Tabell 7 – Oversikt over samtlige vindkraftverk inkludert i rapporten, med valgt type strømningsmodell

Vindkraftverk	Antall Turbiner	Valgt strømningsmodell	Vindkraftverk	Antall Turbiner	Valgt strømningsmodell
Bessakerfjellet	25	H	Nygårdsfjellet	14	M
Bjerkreim	70	H	Odal	34	M
Buheii	19	M	Okla	5	W
Dønnesfjord	6	W	Raggovidda	27	M
Egersund	33	H	Raskiftet	31	H
Fakken	18	M	Roan	71	H
Frøya	14	M	Røyrmøya	3	W
Geitfjellet	43	H	Sandøy	5	W
Gismarvik	3	W	Skomakerfjellet	4	H
Guleslettene	47	H	Skurvenuten	2	W
Hamnefjell	15	H	Smøla	68	M
Haram	8	W	Stigafjellet	7	H
Harbaksfjellet	30	H	Stokkfjellet	21	M
Havøygavlen	10	M	Storheia	80	H
Hennøy	12	M	Storøy	2	W
Hitra	24	H	Svåheia	7	W
Hitra 2	26	H	Sørfjord	23	M
Hundhammerfjellet	14	M	Sørmarkfjellet	31	M
Høg-Jæren	32	H	Tellenes	50	H
Karmøy Offshore	2	W	Tindafjellet	3	W
Kjølberget	13	M	Tonstad	51	H
Kjøllefjord	17	H	Tysvær	11	W
Kvenndalsfjellet	27	H	Utsira	2	W
Kvitfjell-Raudfjell	67	M	Valsneset	5	W
Lindesnes	2	H	Valsneset vindkraftverk	3	W
Lista	31	H	Vardafjellet	7	W
Lutelandet	9	W	Ytre Vikna	17	M
Marker	15	M	Øyfjellet	72	M
Mehuken	11	W	Ånstadblåheia	14	M
Midtfjellet	55	M	Åsen II	2	W
Måkaknuten	22	H			

# Appendiks C: Modellverifikasjon

