



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2018 30 stp

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning

Synergi mellom sol- og vindressurser for Sør- Norge

Synergy between solar- and wind resources for
Southern Norway

Lars Fredrik Midtbø

Master i fornybar energi

Forord

Denne masteroppgaven har vært en del av en mastergrad i fornybar energi på fakultetet for miljøvitenskap og naturforvaltning ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Omfanget på oppgaven er på 30 stp.

Ved å skrive denne masteroppgaven har jeg fått mulighet til å skrive om sol- og vindressurser som er et av mine største interesseområder innenfor fornybar energi. Personlig føler jeg at arbeidet med denne oppgaven har gitt meg mye og ny og interessant kunnskap.

Jeg har videre et ønske om at denne oppgaven kan tilføre nyttig kunnskap innenfor dette fagfeltet, og at den kan være nyttig i beslutningsprosesser med tanke på skalering av vind- og solkraft anlegg.

Jeg vil gjerne rette stor takk til hovedveileder ved NMBU, Muyiwa Samuel Adaramola, professor ved fakultetet for miljø- og biovitenskap for tilførsel av god faglig kunnskap, gode samtaler og oppfølging. En stor takk går også til Øyvind Byrkjedal ved Kjeller Vindteknikk AS for innsamling av data til bruk i beregninger i oppgaven, og ellers god faglig veiledning, samtaler og oppfølging. Ellers vil jeg takke familie og venner for god støtte.

Ås, 27,02,2019

Lars Fredrik Midtbø

Sammendrag

Vind- og solenergi er viktige bidrag for den fremtidige energisituasjonen med tanke på energiforsyning. Ulemper med vind- og solenergi er at ressursene er variable og ustabile i motsetning til ressurser fra fossile energikilder. Dette kan føre til utfordringer for energisystemet ved at de gir ujevne produksjonsprofiler.

Formålet var å kartlegge sol- og vinressurssynergi over hele Sør- Norge og gi en indikasjon på andelen av tiden med nyttbar energiproduksjon. I tillegg vurderes fordelene av vind- og solsynergi i kombinasjon fremfor at hver ressurs produserer for seg selv. Data for sol- og vindressursdata ble hentet fra et datasett basert på den meteorologiske modellen Weather Research and Forecasting (WRF). Der er beregnet variasjon, tilgjengelighet og synergi mellom ressursene i 4 km oppløsning over hele Sør- Norge.

Resultatene illustreres i kart. Det vises høy synergi over flere områder i Sør- Norge. Det er stort sett høyest synergi i fjelltraktene hvor vindressurser er mest dominerende, enkelte steder oppnås synergi over 60% av tiden. I lavlandet ligger verdiene mellom 30-40%, og sjelden lavere enn 20%. Synergien er tydelig høyere enn tilgjengeligheten til sol- og vindressurser hver for seg, noe som tyder på at det kan være en fordel at ressursene virker i samspill. Dette kan gi en indikasjon om andelen av tiden det ikke er nødvendig med back-up kapasitet, energilagring eller kjøp av strøm fra el-nettet. Kartene kan være et godt utgangspunkt for hvordan et vind- og solkraftanlegg kan skaleres i forhold til tilgjengeligheten av vind- og solressursene i tillegg til forbruksprofil.

Abstract

Wind and solar energy are important contributions to the future energy situation in terms of energy supply. Disadvantages of wind and solar energy are that the resources are variable and unstable as opposed to resources from fossil energy sources. This can lead to challenges for the energy system by providing uneven production profiles.

The purpose of this thesis was to do analyzes of solar and wind resource synergy across southern Norway to give an indication of the time proportion with useful energy production. In addition, it considers the advantages of wind and solar synergy production rather than each resource producing for itself. Data for solar and wind resource data was derived from the WRF model. In this thesis it is calculated variation, availability and synergy between the resources in 4 km resolution across Southern Norway.

The results are illustrated in maps. High synergy appears across several areas in Southern Norway. Highest synergy is found in the mountain regions where wind resources are most dominant, some places the synergy achieve more than 60% of the time. In the lowlands the values are between 30-40%, and rarely less than 20%. Synergy of the resources is clearly higher than the availability of solar and wind resources separately, which indicates that it may be beneficial for the resources to interact. This also indicates the part of time there is no need for back-up capacity, energy storage or purchasing electricity from the electricity grid. The maps can be useful in planning of how a wind and solar power plant can be scaled in relation to the proportion of wind and sun, and consumption profiles.

Innholdsfortegnelse

1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Formålet med denne oppgaven	4
1.3 Struktur av oppgaven	5
2 Teori og metode	5
2.1 Datainnsamling	5
2.1.1. Weather Research and Forecasting model (WRF-modellen)	6
2.1.2. Kartlag	6
2.2 Global stråling	6
2.4 Beregninger av variabilitet, tilgjengelighet, komplementering og synergi	11
2.4.1 Variabilitet	11
2.4.2 Intermitterende perioder (intermittency)	11
2.4.3 Parametere for tilgjengelighet, komplementering og synergi	12
3 Resultater	13
3.1. Vurdering av lufttetthet ved beregning av vindenergitetthet	15
3.2 Variabilitet	21
3.2.1 Middel vindenergitetthet	21
3.2.2 Middel globalstråling	21
3.2.3 RCOV av vindenergitetthet	24
3.2.4 RCoV av globalstråling	
3.2.5 IQR vindenergitetthet	25
3.2.6 IQR globalstråling	28
3.3 Tilgjengelighet	29
3.3.1 Tilgjengelighet vind	29
3.3.2 Tillgjengelighet globalstråling	30

3.4 Vind- og sol komplementering	32
3.4.1 Vind komplementerer sol (VKS)	32
3.4.2 Sol komplementerer vind (SKV)	33
3.4.3 Vind- og sol synergi (VSS)	34
3.4.4 Vind og sol synergi for vintermåned og sommermåned	36
3.4.5 Vind- og solsynergi for hver time	38
4. Diskusjon	43
4.1 Data	44
4.2 Beregningsmetoder	44
4.3 Middel vindenergitetthet og middel globalstråling	45
4.4 Variabilitet	46
4.5 Tilgjengelighet	47
4.6 Komplementering og synergi	47
4.7 Videre studier	50
5. Konklusjon	50
6. Referanser	52
7. Vedlegg	54

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Økende klimagassutslipp og energisikkerhet er motivasjoner for å øke andelen fornybar energi i verden. Energi fra fossile energikilder utgjør den største delen av energiproduksjonen i dag, og estimater tyder på at CO₂-utslipp vil fortsette å øke (IEA, 2018). Det er også risikoer knyttet til knappheten av olje og gass, noe som fører til utfordringer for energisikkerhet (IEA, 2018). Grunnet befolkningsveksten øker energibehovet. Fornybar energi er bærekraftig og forventes i stor grad å erstatte energi fra kull, olje og naturgass. Det anslås at andelen fornybar energiproduksjon vil øke til to-tredjedeler innen 2040 (IEA, 2018; Statnett, 2018).

Vind- og solenergi er viktige bidrag for den fremtidige energisituasjonen med tanke på energiforsyning. Sol og vind er de energiresursene det er mest rikelig av ved bruk av fornybar energi, og er tilgjengelig over hele jordkloden. Sol- og vindkraft har hatt stor vekst de siste årene (Zhang et al., 2018), og det forventes at utviklingen skal fortsette å øke (IEA, 2018). Kostnaden av solcellepaneler og vindkraft har sunket mye de siste årene. Ifølge IEA (2018) forventes at det vil fortsette å synke, noe som vil bidra til større vekst i fremtiden. I 2017 var andelen vind- og sol PV produksjon 1,5 tusen TWh. Det forventes at det vil øke til 8,5 tusen TWh i 2040 (IEA, 2018).

Ulemper med vind- og solenergi er at ressursene er variable og ustabile i motsetning til ressurser fra fossile energikilder. Ressursene avhenger av tidsskala, klima, orografi og breddegrad. Det er ofte stor variasjon både med tanke på tidsintervaller og geografisk lokasjoner (Monforti et al., 2014). Ressursene varierer både gjennom år, måneder, dager, timer, og enda lavere tidsintervaller. Solinnstråling varierer blant annet mellom dag- og nattsyklus, og er sterkest på dagtid. Vindhastighet varierer også gjennom døgnet, den har for eksempel tendens i å være sterkere på nettene om sommeren. Topografi har også betydning fordi det ofte er sterkere vind og noe lavere solinnstråling jo lenger opp i høyden man befinner seg (Monforti et al., 2014). Andre faktorer som påvirker disse ressursene er knyttet til landskapet, som for eksempel vegetasjon og bygninger, som bidrar til variasjoner i vind og turbulens. Solinnstråling kan påvirkes av skydekke, aerosoler og skygge fra for eksempel åser, bygninger og vegetasjon. Solinnstrålingen er også sterkt avhengig av breddegrad og øker ved lavere breddegrader. Vindstyrke og solinnstråling varierer hver for seg og faktorene som påvirker er mange.

Variasjon av romlighet og ulike tidsintervaller for sol- og vindproduksjon kan gi utfordringer for energisystemet ved at de gir ujevne produksjonsprofiler (Monforti et al., 2014). Dette bidrar til en ikke optimal økonomisk situasjon (Hirth et al., 2015), i tillegg til problemer med energiforsyning til energisystemet. Ved de fleste lokasjoner, har ikke sol- og vindkraft produksjonstopper samtidig. Ofte er det slik at når den ene energikilden har høye verdier, så har den andre lave. Derfor kan det være en fordel at sol- og vindressurser brukes i kombinasjon slik at de komplementerer hverandre og virker i samspill. Ved komplementering gjennom sesonger er solinnstrålingen sterkest om sommeren samtidig som det er lavere vindhastigheter. (Li et al., 2011) (Sahin, 2000) (Heide et al., 2010). Derimot er det mer vind om vinteren, 60% av vindproduksjon på våre breddegrader er om vinteren (Brykjedal & Åkervik, 2009). Man vil helst ikke at begge ressursene skal produseres samtidig, det er mer nyttig at de utfyller hverandre innenfor et tidsintervall. Energiproduksjon for et hybridssystem kan være en funksjon av hvordan sol og vind komplementerer hverandre (Li et al., 2011). Bett & Thornton (2016) hevdet at komplementering kan føre til flere praktiske fordeler for å unngå operasjonelle skranker til el- nettet, backup kapasitet, ekstra installert kapasitet eller energilagring. Resultatene i studiet viser at det daglige gjennomsnittet for vindhastighet og solinnstråling hadde en svak negativ korrelasjon. Den daglige korrelasjonen varierte mellom -0.2 og -0.4 avhengig av måned (Bett & Thornton, 2016). Korrelasjonskoeffisient sier noe om hvordan solenergien og vindenergien henger samme. 1,0 betyr ingen forskjell og at ressursene varierer i fase meg hverandre, -1,0 vil bety at sol og vind produksjonen ikke skjer samtidig og produksjonen er i motfase. Negativ korrelasjonskoeffisient er derfor mest ønskelig.

Ifølge Li et. al (2011) kan lokasjoner med høy komplementaritet også ha store fordeler dersom et minimum mengde elektrisitet fra disse to energikildene skal dekkes. Studien viste at høyest komplementering finnes på steder med vind- og solenergi for Oklahoma. Det ble brukt CIWS (Complementary Index of Wind and Solar Radiation) som et mål på komplementering. Det sier noe om forskjellen mellom sol- og vindressurser etter at det er gjort normalisering. Høyest mulig CIWS var ønskelig for størst mulig komplementering. Gjennomsnittlig CIWS var 10.99 for alle de utvalgte lokasjonene, noe som var 46% av den teoretiske maksimumsverdien. 57% av lokasjonene var over gjennomsnittet på 10.99.

Heide et al. (2010) gjennomførte beregninger for et scenario med 100% vind- og solenergi for Europa og fant at den optimale sesongmessige fordelingen av kraftproduksjon ville være 55% vindenergi og 45% solenergi. Denne sammensetningen av energikilder reduserte også behovet for energilagring.

Prasad et al. (2017) konkluderte at ved planlegging av fremtidige hybride sol- vind kraftsystemer så er karakteristikker av sol- og vindsynergi avgjørende. Dette reduserer variabiliteten som man får med «stand alone» sol- eller vindenergisystemer. Komplementering mellom sol- og vindressurser over hele Australia ble vurdert.

Hoicka & Rowlands (2011) viste at både sol- og vindproduksjon innenfor utvalgte lokasjoner bidrar til å jevne ut kraftproduksjonen. Det vil si at det blir mindre forekomster av høye og lave verdier i produksjonen, enn om hver ressurs skulle blitt produsert hver for seg selv. Kraftproduksjonen ble enda mer utjevnet dersom ressursene ble spredt utover flere geografiske lokasjoner, i tillegg til å øke andelen lokasjoner hvor ressursene produseres.

Flere studier viser også at en kombinasjon av sol- og vindressurser gir mindre behov for energilagring enn et system som baserer seg kun på vind eller sol. Det er vist at lagringskostnader kan spares ved optimalt synkronisert sol- og vind komplementering (Zhou et al., 2010). Jurasz et al. (2018) viste at større lagringskapasitet fører til svakere effekt av komplementering på forsyningsikkerheten til systemet. Tilførsel av lagringskapasitet førte dermed til svakere sammenheng mellom parameter for tap av last og komplementeringsindeks. Lagringskapasiteten var i form av batteribank.

Monforti et al. (2014) hevdet at optimalt samspill mellom ressursene kan føre til reduserte kostnader og mer jevn energiforsyning. Studien kom frem til at ved utnyttelse av fornybar energi, er utfylling mellom sol- og vindressurser en fordel fremfor at hver ressurs produseres hver for seg. Det ble brukt en korrelasjonsanalyse for utfylling av sol- og vindressurser i Italia. Resultatene viste at på nasjonalt nivå kan utfylling nå en månedlig negativ korrelasjonskoeffisient mellom $-0,65$ og $-0,6$. På lokalt nivå for spesifikke steder kan det nås en korrelasjonskoeffisient ned på $-0,8$ eller lavere. Studien kom frem til at ved utnyttelse av fornybar energi, er utfylling mellom sol- og vindressurser en fordel. En ulempe med denne studien var at den kun gjaldt for året 2005 (Monforti et al., 2014).

Flere studier har vist at korrelasjonskoeffisienten synker mot større negative verdier ved større tidsskalaer. Det er dårligst korrelasjon på timesbasis, og korrelasjonen blir mer negativ når tidsskalaene øker til daglig-, månedlig- og sesongmessig/årlig korrelasjon (Heide et al., 2010) (Hoicka & Rowlands, 2011) (Solbakken et al., 2016) (Bett & Thornton, 2016)(Monforti).

I et land som Norge er det mye varierende topografi. Dette kan føre til store variasjoner i sol- og vindressurser. Det er et fåtall studier om komplementering mellom sol- og vindressurser i Norge, likevel er det noen studier som har blitt utført på bestemte lokasjoner.

Solbakken et al. (2016) utførte en studie med korrelasjonsanalyser mellom sol og vind for enkelte lokasjoner på Svalbard med tanke på hybride energisystemer for husholdninger. Tre av fire lokasjoner som ble undersøkt viste svake negative korrelasjonskoeffisienter på timesbasis. Daglig korrelasjon ga mer negativ korrelasjonskoeffisient, mens månedlig korrelasjon gav lavest verdier. Månedlig korrelasjon viste så lav som -0.54 for Tromsø (Solbakken et al., 2016).

I en case- studie av et storskala sol- og vindhybridsystem i Troms ble det gjort korrelasjonsanalyser mellom sol- og vindressurser for å se på mulighetene til et slikt system (Tiller et al., 2017). Det inngikk data for tre måneder (februar, mars og april). Studien viste en svak negativ korrelasjon, og at korrelasjonskoeffisienten sank ved økende tidsintervaller (Tiller et al., 2017).

1.2 Formålet med denne oppgaven

Som vist ovenfor er det flere steder i verden hvor det er gjort studier på komplementering og hybridisering mellom sol- og vindressurser, men det er fortsatt en del manglende kunnskap. I Norge er det gjort noen studier på dette feltet for enkelte lokasjoner, med det ser ikke ut til å være noen studier som har fokusert på hvordan sol- og vindressurser kan komplementere hverandre med god oppløsning over større landområder. Denne oppgaven kan være med på å bidra til denne manglende kunnskapen og settes i kontekst med studier fra andre land.

Formålet med denne oppgaven var å kartlegge sol- og vindressurs synergi for hele Sør-Norge i 4x4 km oppløsning og gi en indikasjon på andelen av tiden som kan gi nyttbar energiproduksjon. I tillegg vurderes det fordelene av vind- og solsynergi produksjon fremfor at hver ressurs produserer for seg selv.

Resultatene kan gi et bilde på om et sol- og vindenergisystem kan levere en mer stabil last ved å utnytte ressursene som utfyller hverandre, fremfor om hver ressurs produserer alene. Dette kan si noe om andelen av tiden det trengs ekstra kapasitet og/eller backup kapasitet uten at det overproduseres, en indikasjon på hvor ofte det må kjøpes strøm fra en annen kilde og hvor stor batterikapasitet som trengs. Videre kan oppgaven gir et bra utgangspunkt for videre studier for å optimalisere sol- vindsystemer i

forhold til forbruksprofiler for bestemte anlegg. Kartene som presenteres kan benyttes som et oppslag for hvor en best kan anlegge kombinerte vind- solkraftverk knyttet til nett. Energikilder kan dekke hverandre ved geografisk spredning mellom energikildene ved at de kan være koblet til el- nettet for å dekke en samlet last (Hoicka & Rowlands, 2011). Derimot er de stedene hvor sol- og vindressurser er plassert på samme sted (co- lokasjoner) ofte off- grid systemer. Slike systemer er godt egnet hvor sterk synergi mellom de to energikildene eksisterer (Prasad et al., 2017). Co- lokasjoner er fokuset i denne masteroppgaven. Det fokuseres på hvordan vind- og solressurser i hver enkelt lokasjon kan virke i synergi. Det er ikke vurdert komplementering mellom to eller flere lokasjoner over større geografiske avstander.

1.3 Struktur av oppgaven

Videre i oppgaven inngår metode i kapittel 2. Der beskrives datainnsamling, teori og beregning av vindenergitetthet, variabilitet, tilgjengelighet, komplementering og synergi. Resultatene vises i kapittel 3 med resultater av de forskjellige beregningene ved illustrasjoner av kart. Diskusjon av resultatene rettet mot nytteverdien av kartene ved forskjellige geografiske lokasjoner og tidsrom, presenteres i kapittel 4. Konklusjon presenteres i kapittel 5.

2 Teori og metode

2.1 Datainnsamling

Analysen i dette studiet omfatter Sør-Norge med fylkene til og med Trøndelag. Kjeller Vindteknikk AS tilførte data for analysene. Det ble gjort uttrekk av alle nødvendige data fra WRF-modellen (Weather Research and Forecasting Model) til beregninger. Det ble hentet ut data både til beregninger av variabilitet, tilgjengelighet, komplementering og synergi. Dataene lagt til grunn for beregning av disse var vindhastighet (m/s) og globalstråling (W/m^2). Global stråling gjaldt for en horisontal flate, mens vindhastighet gjaldt for 80 meters høyde. Det ble også hentet ut data for beregning av vindenergitetthet. Dataene for beregning av vindenergitetthet var temperatur(K), lufttrykk (Pa) og høyde(m). Modellen ga en output med punktkoordinater på 4 x 4 km oppløsning. På grunn av den ujevne topografien i Norge er denne oppløsningen nødvendig. Nærmere beskrivelse av beregningene blir beskrevet i kapittel 2.2 og 2.3. Alle dataene har tidsserier med verdier for hver time og strekker seg fra 1. januar 1979 til 31. desember

2017. Det inngår dermed 341 856 timer med data over en periode på 39 år. Tidsangivelsen følger UTC+1 som gjelder for hele Norge. Nedenfor vises mer detaljert beskrivelse av WRF- modellen, input og output dataene.

2.1.1. Weather Research and Forecasting model (WRF-modellen)

Informasjon om WRF- modellen er beskrevet i Byrkjedal (2009). WRF-modellen er en numerisk værvarslingsmodell på mesoskala. Modellen har et vidt spekter av metrologiske funksjoner. Skalaen kan variere fra ti meter til tusen kilometer. Geografiske og meteorologiske data er de viktigste inngangsparameterne. Modellen brukes både til forskningsformål og værvarsling. Bakkenivået til modellen kalles nullplansforskyvning. Modelltopografien er utglattet i forhold til virkelig topografi. Dvs. at toppene i terrenget vil ha lavere bakkehøyde og dype daler blir mindre dype. Denne forskjellen kan enkelte steder i Norge være på 100-200 km for 4 x4 km oppløsning i WRF- modellen. Utglattung av terrenget er også styrt av modellens gridoppløsning. Ved høyere oppløsning blir topografien bedre gjenskapt. Den vertikale høyden på vegetasjonen tas ikke opp i modellen. Det brukes bare en overflateruhet. Mye trær og annen vegetasjon fører til høyere ruhet fordi vindhastigheten bremses. Bakkenivået i modellen antas å være 80% av den virkelige vegetasjonshøyden (Byrkjedal & Åkervik, 2009). I et område med skog på 10 meters høyde, vil for eksempel modellens bakkenivå være på 8m. Høyden på 80 meter i modellen vil dermed være 100m i virkeligheten.

2.1.2. Kartlag

QGIS ble brukt til å lage illustrasjoner av kartene. Det ble lastet inn kartlag fra Geonorge.no. Kartlagene «Bakgrunnskart havarealverktøy», «Kystkontur» og «Basisdata N5000» ble brukt for å bedre illustrere kartene i QGIS. Punktdataene fra WRF-modellen ble avgrenset slik at de kun inngikk i avgrensningen for basisdata N5000 ved illustrasjon av dataene.

2.2 Global stråling

Det er to forskjellige bevegelser som beskriver jordens bane. Det ene er at jorda spinner rundt sin egen akse, noe som utgjør om det er dagslys eller ikke. Aksen til jorden går igjennom polene, og har en tilt på 23,5 grader. Denne vinkelen er konstant. Det andre er at jorda bruker ett år på å gå en runde i bane rundt solen. Aksen som går gjennom polene endrer ikke hvilken retning den peker mot når jorden går i bane rundt solen. Begge disse bevegelsene fører til forskjellige sesonger. Tiltet og jordens posisjon rundt solen

påvirker hvor den direkte solinnstrålingen treffer på jorden. Det har med hvilken vinkel solinnstrålingen treffer. Når den nordlige eller sørlige hemisfære kommer i posisjoner som er direkte rettet mot solen, vil det være sommer på den halvdelen som er rettet mot solen. Det vil være vinter på den halvdelen som er rettet vekk fra solen (Ruddiman, 2014).

Innstrålingsdataene i denne oppgaven kalles global solstråling (W/m^2). Global solstråling er den samlede kortbølgede strålingen som kommer ned på jorden og treffer en horisontal flate (UIO, 2019). Global stråling inkluderer både direkte og diffus solstråling. Direkte stråling treffer jordoverflaten fra klar himmel uten at sollyset spres (UIO, 2019). Diffus stråling spres og treffer ikke jordoverflaten direkte fordi strålingen treffer skyer, molekyler og stoffer i atmosfæren (UIO, 2019). Mengden global stråling varierer geografisk i Norge. Figur 2.1 viser kart over Norge fra NVE for solinnstråling på en horisontal flate i månedene januar og juni.



Figur 2.1: Solinnstråling på en horisontal flate i januar og juni (NVE, 2015).

Solenergi som energibærer kan utnyttes både til elektrisitet og oppvarming, men ikke all energien i solinnstrålingen som treffer jordens overflate kan utnyttes til disse formålene. Solenergiteknologier har forskjellige virkningsgrader. For solcellepanel ligger virkningsgraden vanligvis mellom 15-17%, mens de beste solcellene på markedet i dag har en virkningsgrad på opptil 22% (Energysage, u.å). For å maksimere

solcellepanelenes energi produksjon er det mer optimalt om de tiltes i passende vinkel slik at mer av energien i innstrålingen kan utnyttes, i motsetning til om innstrålingen treffer en horisontal flate. Solcellepaneler rettes alltid mot sør for å utnytte innstrålingen best mulig.

2.3 Vinndata og lufttetthet

Vind oppstår ved at det er temperaturforskjeller i atmosfæren grunnet soloppvarming. Ifølge Ruddiman (2014) fører sterk solinnstråling på sommeren til stor og rask oppvarming av landområder. Dette medfører at den varme luften stiger oppover og danner et lavtrykk nær bakken. Havområdene opplever derimot en svakere og tregere oppvarming, derfor vil det være høytrykk nært havnivå. Jorden består av forskjellige områder med lavtrykk og høytrykk. Temperaturforskjellene fører til at vinden beveger seg fra høytrykk til lavtrykk. Fuktig luft fra havet påvirkes av jordens rotasjon, slik at luften beveger seg fra venstre i den nordlige hemisfæren og til høyre i den sørlige hemisfæren. Motsatt vil det være om vinteren. På storskala vil jorden oppleve kraftigst soloppvarming i de områdene rundt ekvator. Dette kan en da se på som et lavtrykksbelte. I subtropiske områder finner vi et høytrykksbelte med synkende luft. Denne storskala sirkulasjonen mellom tropene og subtropene kalles Hadley sirkulasjon (Ruddiman, 2014). Mellom subtropene og breddegrader i Norge er det også en slik celle. Det er et lavtrykksbelte og kalles vestavindsbeltet (SNL, u.å).

Vindressursdataene fra WRF-modellen viste vindhastighet i meter i sekundet (m/s). Dataene var simulert for 80 meters høyde. Vindstyrken øker vanligvis med høyden, der det blir sterkere vind ved større høyder og svakere vind nærmere bakken. Nær bakken er vinden svakere grunnet friksjon. Friksjon kan blant annet skyldes topografi, trær eller annen vegetasjon som senker vindhastigheten og energien i vinden og skaper turbulens.

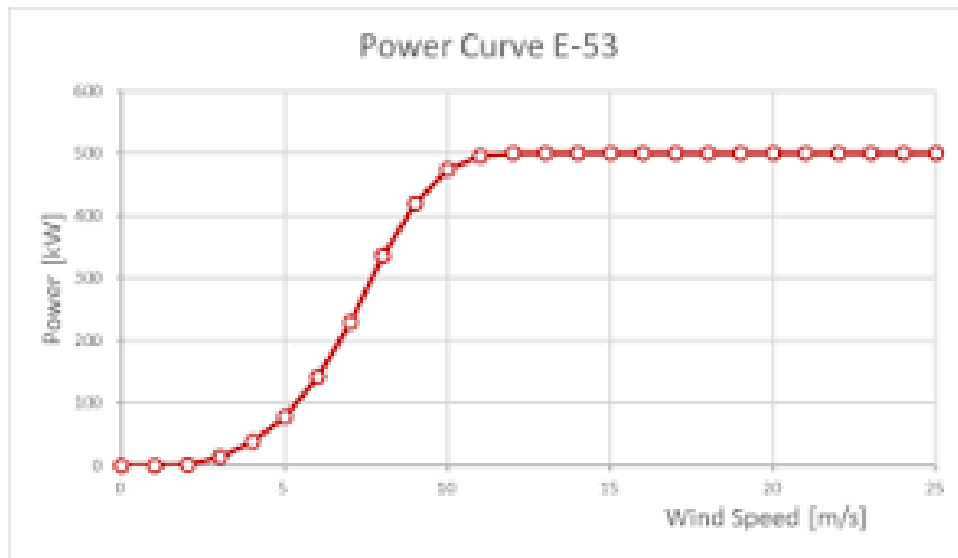
Landbaserte vindturbiner har tidligere hatt en typisk høyde på omkring 80 meter (EIA, 2017), noe som samsvarer godt med output data fra WRF-modellen. I de senere årene er det blitt mer vanlig med høyere vindturbiner (EIA, 2017). Målinger eller data for vindhastighet ved en viss høyde kan korrigeres ved en formel for å nå ønsket høyde. Det har ikke vært nødvendig å korrigere høyden i denne oppgaven.

Energien i vinden avhenger av lufttetthet og vindhastighet opphøyet i tredjepotens. Dette kalles vindenergitetthet. Det vil si at når vindhastigheten øker, vil energien i vinden øke betydelig mer og uproporsjonalt med vindhastigheten. Vindenergitetthet kan dermed gi et riktigere bilde av energiutbyttet i vinden enn vindhastigheter målt i m/s. Vindenergitetthet kan beregnes slik:

$$\text{Vindenergitetthet} = 0,5 * \rho * V^3 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (1)$$

Der ρ er tetthet (kg/m³) og V er vindhastighet (m/s).

Vindturbiner kan utnytte betydelig mer av energien i vinden ved høye vindhastigheter innenfor et område som turbinen kan beherske. Dette kan illustreres ved en vanlig vindkraftkurve der effekten har en bratt stigning ved økning i vindhastighet slik som illustrert i figur 2.2.



Figur 2.2: Typisk vindturbin kraftkurve (Renewable first, u.å.).

En vindturbin klarer ikke å utnytte all energien i vinden på grunn av at energien i vinden blir redusert av turbinbladene. Den maksimale andelen et vindkraftverk kan utnytte er 59,3%, gitt ved betz limit. Ved større vindhastigheter «pitches» turbinbladene, det vil si å justere bladene for å ta ut en mindre del av energien. Dette skjer når merkeeffekten til generatoren nås. Det er viktig fordi lastene på blader, tårn og generatorer øker ved høyere vind, og det er viktig at lastene på turbinene ikke bli for store (Boyle, 2012). Ved å se på effektkurven kan det ses når bladene pitches for å ta ut mindre del av energien, ved at kraftkurven flater seg ut.

Vindenergitetthet ble beregnet for alle punktene igjennom hele tidsserien fra 1979 til 2017 på timesbasis. Beregningene av vindenergitetthet ble gjort i Matlab. Tilstandsligningen for tettheten til tørrluft ble brukt til å beregne lufttettheten:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (2)$$

Der P er lufttrykket (Pa), R er den spesifikke gasskonstanten (287J/kg K) og T er temperaturen (Kelvin).

Det er kjent at lufttettheten avhenger av høyden. Derfor ble data for temperatur og lufttrykk også samlet fra Kjeller Vindteknikk AS for et utvalg av 15 punkter med forskjellige høyde med laveste punkt på 365 m og høyeste på 1300 m. Punktnavnene med koordinater og høyder vises i tabell 2.1. Det ble beregnet lufttetthet for hver time gjennom tidsseriene ved hjelp av temperatur og lufttrykk. I og med at det kun var data for 15 punkter til beregning av lufttetthet, ble det vurdert om det var tilstrekkelig med en gjennomsnittlig tetthet av de 15 punktene for å lage en regresjonslinje. Med en regresjonslinje kunne høyden anslå lufttettheten for hvert punkt over hele Sør-Norge. Dermed ble 3 alternativer sammenlignet: Alternativ 1: Vindenergitetthet for hver time beregnet med både vindhastighet og lufttetthet på timesbasis, heretter kalt V1.

Alternativ 2: Vindenergitetthet for hver time beregnet med bare vindhastighet på timesbasis og en gjennomsnittlig lufttetthet, heretter kalt V2.

Alternativ 3: Vindenergitetthet for hver time beregnet med vindhastighet på timesbasis og en konstant lufttetthet ved havnivå, heretter kalt V3.

Alternativene ble sammenlignet både med tanke på hvordan de varierer i et tidsrom og hvordan de varierer med høyden. Det ble beregnet MAE (Mean Absolute Error) og RMSE (Root Mean Squared Error) mellom begge alternativene. Forskjellen var ikke av stor betydning, slik at en gjennomsnittlig lufttetthet kunne beregnes for de 15 forskjellige høydepunktene og dermed brukes i regresjonsanalysen. Dermed kunne alternativ 2 velges.

Lufttettheten ble dermed anslått langs en regresjonslinje med høyde som uavhengig variabel, og gjennomsnittlig lufttetthet som avhengig variabel. Analysene ble utført i R commander. Dette gjaldt for alle punktene i Sør- Norge. Noe ekstrapolering ble også gjort. Det bør nevnes at en «outlier» ble fjernet fra analysen fordi punktet hadde en del lavere temperatur enn vanlig ved denne høyden, noe som igjen påvirket lufttettheten til å bli høyere enn normalt.

2.4 Beregninger av variabilitet, tilgjengelighet, komplementering og synergi

Det er beregnet et gjennomsnitt for både vindenergitetthet og solinnstråling. Utenom dette er det beregnet tilgjengelighet, komplementering og synergi. Noen slike beregninger har også tidligere vært gjort (Gunturu & Schlosser, 2012) (Hallgren et al., 2014). Alle beregningene er utført i Matlab. Tidligere har ofte korrelasjonsanalyser blitt brukt for å anslå variabilitet mellom sol- og vindressurser. Metodene i denne oppgaven er i midlertidig gode for parallelle analyser med korrelasjonsanalyse (Prasad et al. 2017).

2.4.1 Variabilitet

Variierende vind- og solressurser er vurdert ved å bruke variasjonskoeffisienten og kvartildifferansen. RCoV (Relative Coefficient of Variation) brukes videre som forkortelse for variasjonskoeffisienten. IQR (Inter Quartile Range) brukes videre som forkortelse for kvartildifferansen. Variasjonskoeffisienten er gitt som følgende:

$$\text{Variasjonskoeffisient} = \frac{\sigma}{\mu} \quad (3)$$

Der σ er standardavviket og μ er gjennomsnittet for vind- og solressurser.

Høyere standardavvik i forhold til gjennomsnittet gir høyere variasjon. Ofte blir median brukt istedenfor gjennomsnitt i vindenergianalyser. Dette egner seg godt for data med lang fordeling på verdiene (Prasad et al., 2017). I Norge er det flere steder hvor det er mange timer med lav innstråling i forhold til høy innstråling, og dermed ble gjennomsnitt valgt istedenfor median. Det er ønskelig med områder med høyt gjennomsnitt og lavt standardavvik.

Kvartildifferansen beregnes som 3.kvartil minus 1. kvartil. Der 1. kvartil er grensen mellom første og andre fjerdedel med data ordnet i stigende rekkefølge. 3. kvartil er grensen mellom tredje og fjerde fjerdedel. Kvartildifferansen sier noe om spredningen i dataene når de høyeste og laveste verdiene er fjernet, og kan si noe om mengden backup kapasitet som er nødvendig (Prasad et al., 2017). En lav kvartildifferanse er ønskelig for potensielle steder til energiproduksjon, fordi det indikerer lavere spredning.

2.4.2 Intermitterende perioder (intermittency)

I beregningene av intermitterende perioder som gjelder for tilgjengelighet, komplementering og synergi ble det brukt grenseterskel for energitetthet. Vindturbin og PV gir svak produksjon dersom energiressursene blir lave. Derfor ble det satt en grenseterskel på hva som er det laveste energiinnholdet i ressursene som gir en akseptabel produksjon. Vindenergitetthet er delt inn i forskjellige klasser fra 1-7

(NREL, u.å.), der klasse 1 ikke gir brukbar kraftproduksjon. Grenseterskelen for vind ble satt til klasse 2, som gir marginal kraftproduksjon. For 80 vil dette tilsvare omtrent $250\text{W}/\text{m}^2$ i vindenergitetthet. Det er ikke delt inn noen klasser for vindenergitetthet ved 80 meters høyde, men vindhastighet med tilsvarende vindenergitetthet er lik for alle høydene. Grenseverdien for sol var satt til $170\text{ W}/\text{m}^2$ som anbefalt av Prasad et al. (2017), for Australia. I denne oppgaven ble det også testet 1. kvartil for alle punktene for globalstråling i Norge. Alle verdiene viste 0, og dermed kunne ikke 1. kvartilet brukes som grenseverdi. Det kan i tillegg være nyttig å sammenligne med studien for Australia. For vind var grenseverdien satt litt høyere enn andre studier. Dette har med at produksjonen er lav ved lave vindhastigheter. Det var ønskelig med høye grenseverdier for begge ressursene, da dette ville gi et bedre bilde av hvordan sol og vind kan virke i samspill ved produksjon.

2.3 Parametere for tilgjengelighet, komplementering og synergi

Analysene av komplementering mellom vind- og solenergiressurser er vurdert ved bruk av følgende parametere: Tilgjengelighet, Vind Komplementerer Sol (VKS), Sol Komplementerer Vind (SKV), og vind- og solsynergi (VSS). Disse parameterne er definert som følger:

$$\text{Tilgjengelighet} = \frac{\text{antall timer med } RPD \geq RPD_{th}}{\text{totalt antall timer}} \quad (4)$$

Der RPD er verdien for vindenergitetthet eller globalstråling for den enkelte timen. RPD_{th} er grenseterskelverdien.

Tilgjengelighet er en måling av forekomster hvor vind- og solenergisystemer genererer et minimum andel energi. Tilgjengelighet kan gi indikasjoner på hvor stor andel av tiden vind eller sol kan produsere alene, utenom at ressursene komplementerer hverandre.

Vind Komplementerer Sol (VKS), som vises i ligning (5), sier noe om andelen av tiden når vindressurs er den dominante kilden til kraftproduksjon.

$$WCS = \frac{\text{antall timer med } (WPD > 250\text{ W}/\text{m}^2 \text{ OG } GI \leq 170\text{ W}/\text{m}^2)}{\text{totalt antall timer}} \quad (5)$$

Der WPD er vindenergitetthet og GI er globalstråling.

I den andelen av tiden hvor solenergiressurs er den dominerende kilden til kraftproduksjon, sies det at solenergiressurser komplementerer vindenergiressurser. Her er det antall timer med vindenergitetthet som er høyere enn terskelverdien, mens solinnstråling er lavere.

Dette uttrykkes som følger:

$$SCW = \frac{\text{antall timer med } (WPD \leq 250 \text{ W/m}^2 \text{ OG } GI > 170 \text{ W/m}^2)}{\text{totalt antall timer}} \quad (6)$$

Andelen av tiden hvor enten vind- eller solressurser er gode nok til minimal kraftproduksjon, slik at når den ene kan produsere, mens den andre er utilgjengelig kalles vind- og solressurssynergi. Her brukes XOR, slik at vind enten komplementerer sol eller sol komplementerer vind.

$$WSS = \frac{\text{antall timer med } (WPD > 250 \text{ W/m}^2 \text{ XOR } GI > 170 \text{ W/m}^2)}{\text{totalt antall timer}} \quad (7)$$

Beregningene for synergi er analysert igjennom hele tidsperioden, for sommer og vintermåned, og for hver time igjennom døgnet. Synergi sier ikke noe om andelen av tiden begge ressursene er over eller under grenseverdiene samtidig.

SKV, VKS og VSS kan gi indikasjoner på andelen av tiden sol- og vind kan komplementere hverandre og virke i synergi for hybridsystemer.

3 Resultater

Formålet med oppgaven var å kartlegge om det er nyttigere at sol- og vindressurser virker i samspill fremfor at det produseres hver for seg, og ved hvilke lokasjoner de kan komplementere hverandre og virke i synergi for hele Sør-Norge og. Derfor ble det gjort beregninger for variabilitet og komplementering i 4km oppløsning for hele Sør- Norge.

Det ble hentet inn data på timesbasis for sol- og vindressurser til å gjøre beregningene. Dataene for solressurser bestod av global stråling, og for vindressurser bestod det av vindhastighet. Verdiene for vindhastighet ble gjort om til vindenergitetthet.

Første del av resultatdelen viser analyser av hvordan vindenergitetthet avhenger av høyden ved forskjellig type lufttetthet. Det var gjort for et utvalg av 15 punkter. Videre analyser viser hvordan vindenergitetthet varierer over tid, enten med konstant lufttetthet eller lufttetthet på timesbasis . Det vises også hvordan lufttetthet varierer med høyden, og om en regresjonslinje kan nøyaktig forutsi lufttetthet til beregning av vindenergitetthet. Videre fremstilles kartene som illustrerer variasjon, tilgjengelighet og komplementering for sol og vind over hele Sør-Norge. Det er valgt å fremstille resultatene som illustrasjonskart fordi det gir best oversikt over dataene. Kartene viser verdier i grid-bokser med 4 km oppløsning. Det bør merkes at verdiene innenfor grid-boksene kan variere. Spesielt for vind kan det være høydedrag med betydelig høyere vindhastigheter enn det som er middelet innenfor grid-boksen. Dette har med at fjelltopper ofte drar opp middelet. Resultatene bør likevel kunne gi en indikasjon på hvilke områder det er gode ressurser. Det kan si noe om hvor i Sør-Norge sol og vind kan virke i samspill, noe som kan være nyttig for å finne steder som er egnet til kraftutbygging, spesielt med tanke på sol- og vindhybridsystemer.

Mer detaljert beskrivelse av data og metode beskrives i metodedelen, kapittel 2.

3.1. Vurdering av lufttetthet ved beregning av vindenergitetthet

Høyden er en faktor som har stor påvirkning på lufttettheten, noe som igjen får betydning for vindenergitetthet. Det ble testet om regresjonsanalyse med gjennomsnittlig lufttetthet for 15 punkter med forskjellig høyder kunne være nyttig til å anslå lufttettheten for alle data punktene i Sør-Norge. Det mest nøyaktige ville vært å bruke lufttetthet på timesbasis for alle datapunktene i Sør-Norge. I kapittel 3.1 vurderes det om beregninger av vindenergitetthet med gjennomsnittlig lufttetthet likevel kan gi omtrentlig de samme resultatene som lufttetthet på timesbasis.

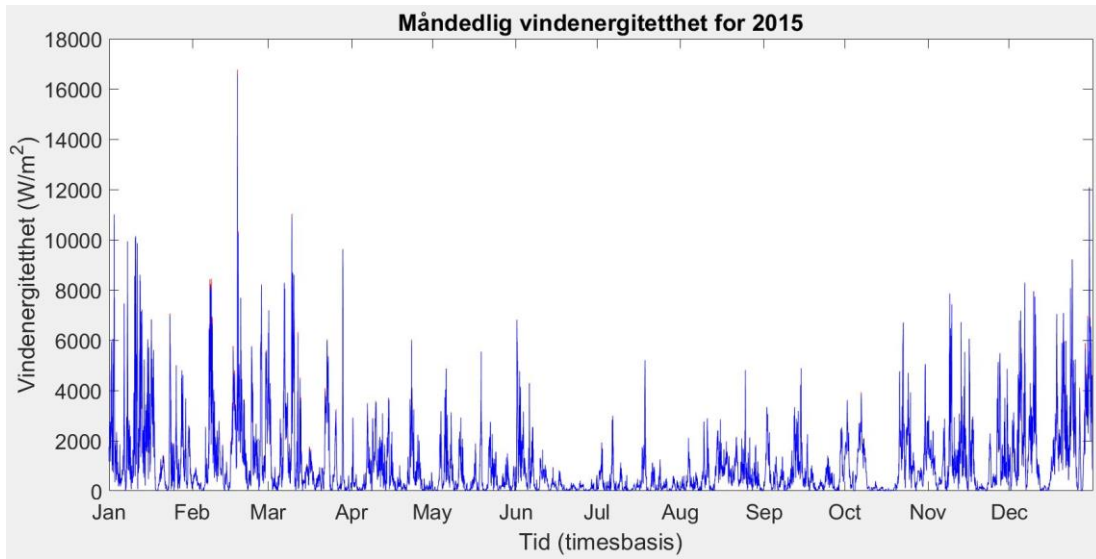
Som vist i metoddelen, kapittel 2, brukes disse betegnelse i beregningene av vindenergitetthet med forskjellige lufttetthet.

- V1: Vindenergitetthet med lufttetthet på timesbasis
- V2: Vindenergitetthet med gjennomsnittlig lufttetthet av hele tidsserien
- V3: Vindenergitetthet med en konstant lufttetthet på havnivå

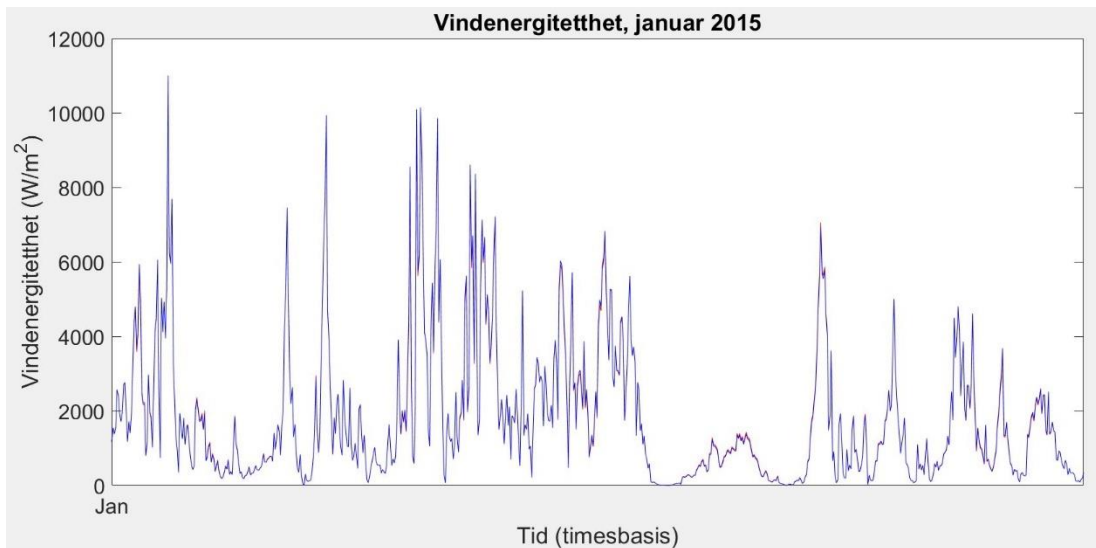
Analysene viser at vindenergitetthet som regel øker med høyden (plott med høyde vs vindenergitetthet vises i vedlegg). Dersom vindenergitetthet beregnes med V3 og sammenligner med V2 og V1, skaper dette større avvik, spesielt i høyden. MAE (Mean Absolute Error) og RMSE (Root Mean Squared Error) imellom V1 og V3 for høydepunktet med høyest forskjell i vindenergitetthet var henholdsvis 50 W/m^3 og 70 W/m^3 , noe som er relativt stort. Det er betydelig mindre forskjell mellom V1 og V2 for alle de 15 punktene. Dette viser at ved beregning av vindenergitetthet bør det brukes enten lufttetthet på timesbasis V1, eller en gjennomsnittlig tetthet V2 for hvert punkt.

For det høyeste punktet (Storekoll), ble det beregnet hvordan V1 og V2 varierer i tid.

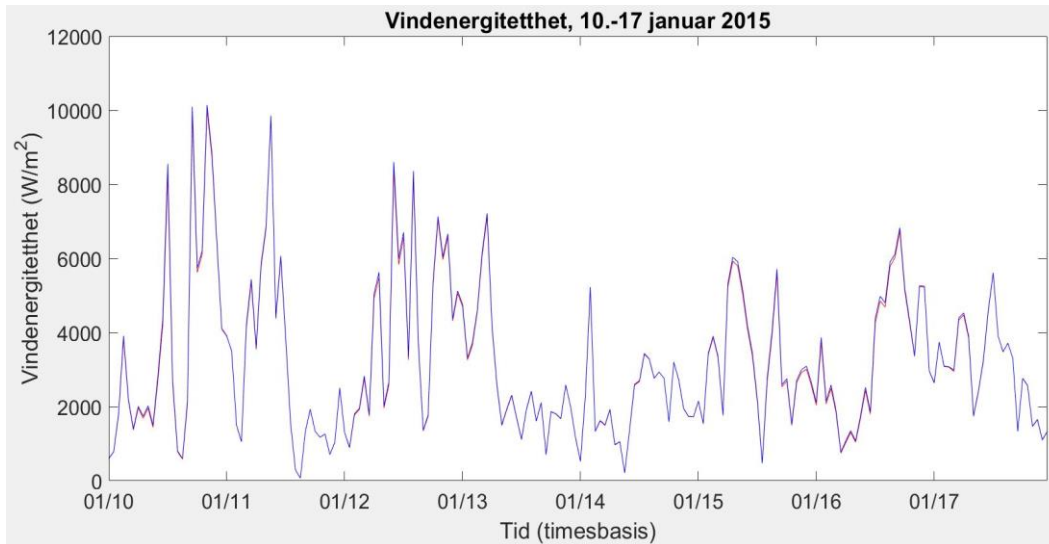
Figur 3.1, 3.2 og 3.3 illustrerer hvordan vindenergitetthet varierer i tid over et helt år (År 2015), over en hel måned (Januar 2015) og over en hel uke (10. – 17. jan.) med sammenligning mellom V1(blå) og V2(rød). Det er lite sannsynlig at andre tidsperioder vil gi et annerledes resultat.



Figur 3.1: Sammenligning av vindenergitetthet mellom V1(rød) og V2(blå) igjennom et helt år (2015)



Figur 3.2: Sammenligning av vindenergitetthet mellom V1(rød) og V2(blå) for en hel måned (januar 2015)



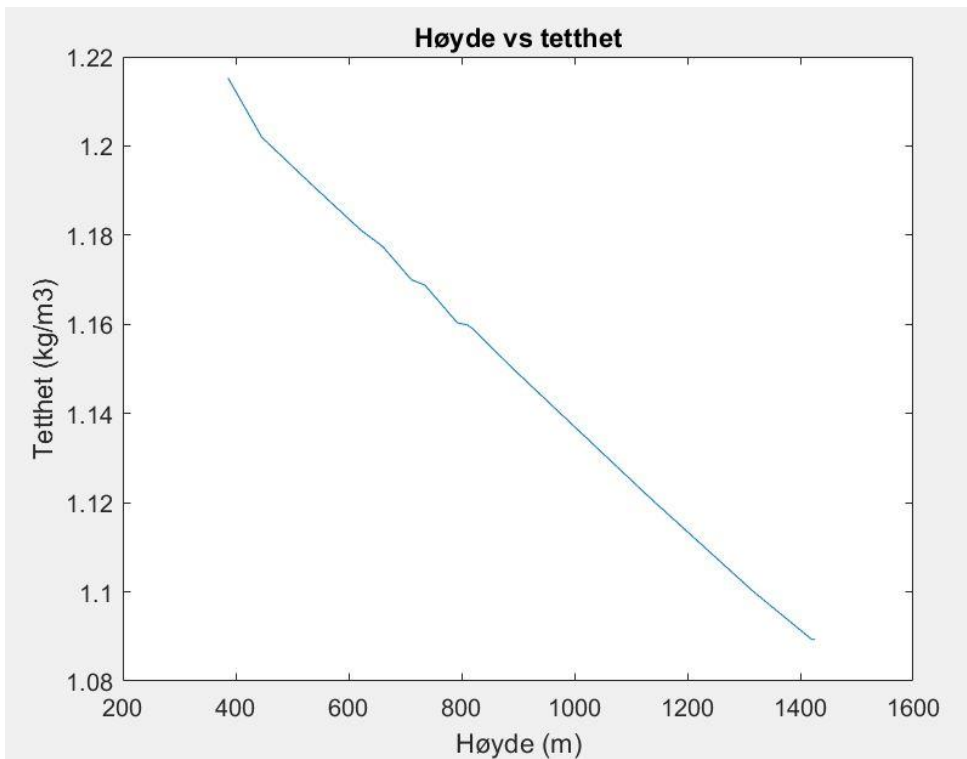
Figur 3.3: Sammenligning av vindenergitetthet mellom V1 (rød) og V2 (blå) for en uke (10-17 januar 2015).

MAE og RMSE ble beregnet mellom V1 og V2, kurven viser ikke avgjørende avvik. Tabell. 3.1 viser at verdiene mellom V1 og V2 ga lave verdier noe som kan sies å være akseptabelt. MAE og RMSE mellom V1 og V2 var henholdsvis 13,4926 og 28,7624. Dette tyder på at gjennomsnittlig lufttetthet kan gi omtrent tilsvarende resultater som lufttetthet på timesbasis i forskjellige tidsrom.

	MAE (Mean Absolute Error)	RMSE (Root Mean Squared Error)
V1 vs V2	13,4926	28,7624
V1 vs V3	102,6781	192,7294

Tabell 3.1: Sammenligning av MAE og RMSE mellom V1 og V2, og V1 og V3.

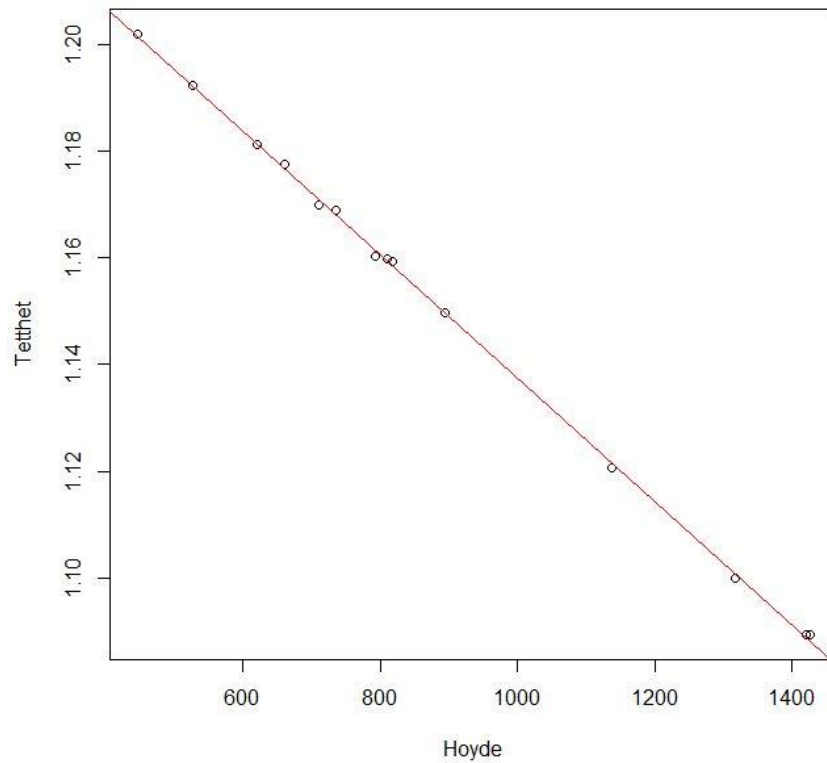
Konklusjonen var at en gjennomsnittlig lufttetthet for et høydepunkt er godt egnet til beregninger av vindenergitetthet. Videre er det testet hvordan lufttettheten varierer med høyden for bruk i videre beregninger av vindenergitetthet. Figur 3.4 viser et plot for hvordan gjennomsnittlig lufttetthet for de 15 forskjellige punktene varierer med høyden.



Figur. 3.4: Sammenheng mellom høyde og lufttetthet.

Plottet viser at lufttettheten synker bortimot lineært med høyden. Det er en klar trend. Dette kan sies å være forventet med tanke på at teori for lufttetthet tilsier at tetthet varierer med høyden.

Det er også testet om det var en lineær sammenheng mellom høyde og tetthet ved regresjonsanalyse. Nedenfor viser figur 3.5 regresjonslinje for sammenhengen mellom høyde og tetthet, mens figur 3.6 viser summeringsdata.



Figur 3.5: Regresjonslinje med høyde som uavhengig variabel og tetthet som avhengig variabel.

```
Call:
lm(formula = Tetthet ~ Høyde, data = df)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.0011783 -0.0006529  0.0002105  0.0005564  0.0010526

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.253e+00  5.996e-04  2089.8  <2e-16 ***
Høyde       -1.156e-04  6.430e-07  -179.8  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.0007447 on 12 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9996,    Adjusted R-squared:  0.9996
F-statistic: 3.233e+04 on 1 and 12 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Figur 3.6: Summeringsdata for regresjonsanalyse.

Det er en klar lineær sammenheng mellom høyde og tetthet. Både multiple R^2 og adjusted R^2 har høye verdier, henholdsvis 0,998 og 0,9978, noe som tyder på en sterk sammenheng. Residualplot vises i vedlegg, de viste lave avvik. En «outlier» ble fjernet fra de opprinnelige dataene fordi ett av punktene gav en del lavere temperatur enn normalt på 385 meters høyde. Utenom dette er det en sterk lineær sammenheng mellom høyde og temperatur. «Outlieren» med lavere temperatur førte igjen til høyere lufttetthet (se formel (2) i metodedelen). Med «outlieren» var det også en sterk lineær relasjon mellom høyde og lufttetthet, men med noe høyere konfidensintervall. Forskjellen med og uten «outlieren» var i midlertidig ikke veldig stor. Regresjonslinjen med «outlieren» vises i vedlegg.

I og med at det var en sterk regresjon, var det ikke nødvendig med data for alle punktene på timesbasis. Regresjonslinjen ble dermed brukt til å anslå lufttetthet for alle datapunktene. Funksjonen ble sendt slik ut:

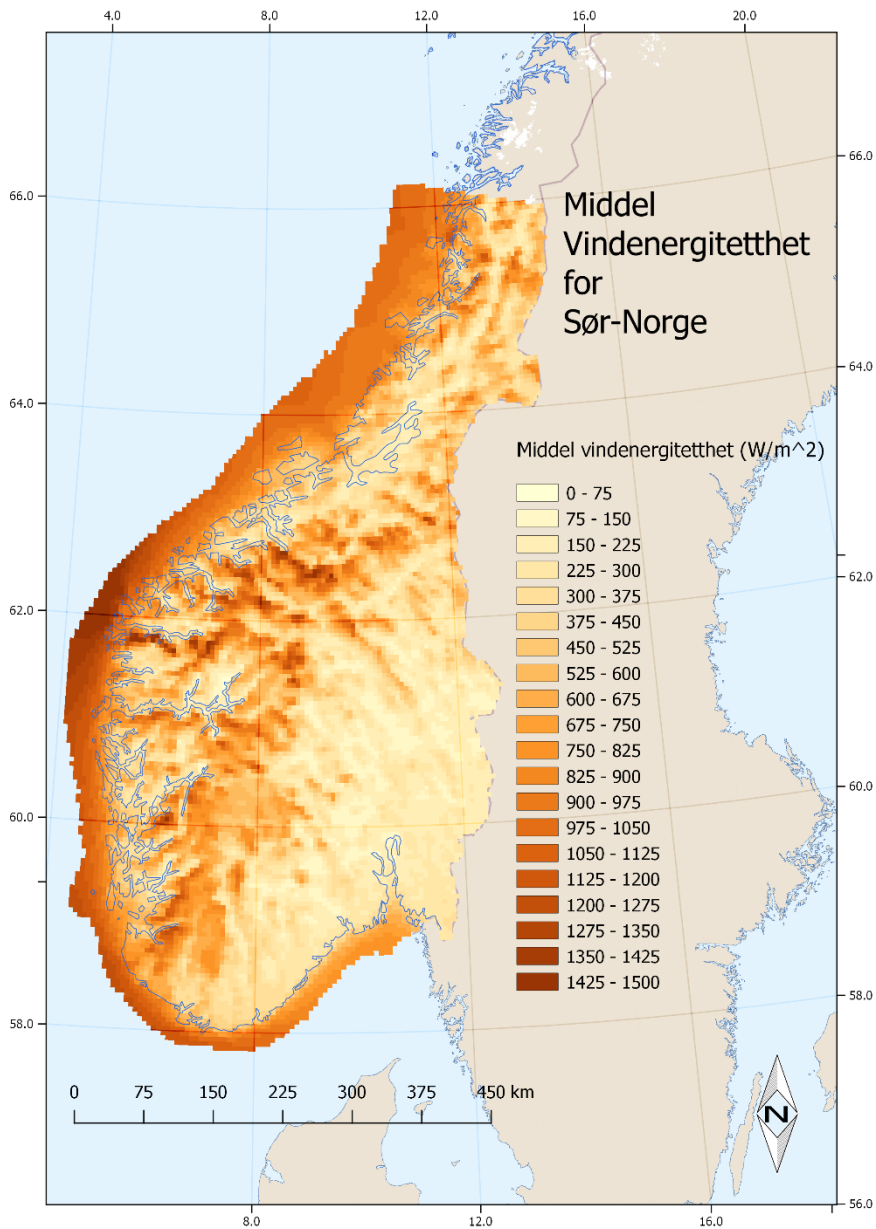
$$\text{Lufttetthet} = 1,253 - 0,0001156 * \text{Høyde}.$$

Lufttettheten ble igjen brukt til å beregne vindenergitetthet (se formel (1) i metodedelen). Det var som forventet at det skulle være en tilnærmet lineær sammenheng mellom høyde og lufttetthet.

3.2 Variabilitet

3.2.1 Middell vindenergitetthet

Figur 3.7 viser middell vindenergitetthet for hele Sør-Norge inkludert kysten ut til territorialgrensen (12 nautiske mil).



Figur 3.7: Middell vindenergitetthet for Sør-Norge og 12 nautiske mil ut fra kystlinjen.

Middell vindenergitetthet viser at vinden varierer en del geografisk. Vindenergitettheten er tydelig høyere i fjelltraktene enn i lavlandet. På Langfjella, Jotunheimen og fjelltraktene på Vestlandet er

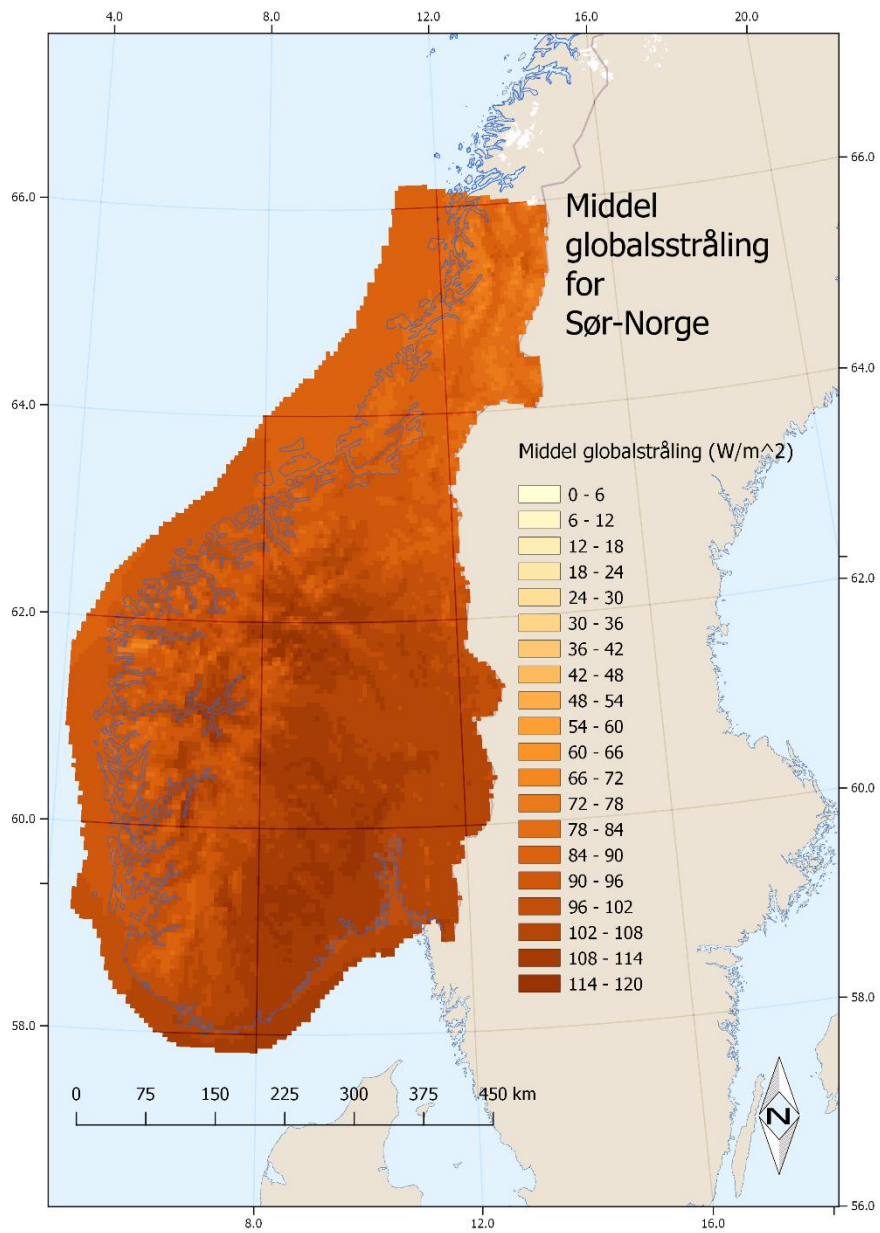
middelet de fleste steder mellom 500-900 W/m². Disse verdiene vil inngå blant de høyeste vindkraftlassene, noe som regnes som godt egnet for de fleste vindturbinapplikasjoner.

Østlandet har flere områder med lav vindenergitetthet enn ellers i landet. I lavlandet er det lavest verdier, hvor middelet ligger for de fleste stedene mellom 150-300 W/m². Vindenergitetthet under 200 W/m² kan klassifiseres som svake vindressurser (Gunturu & Schlosser, 2012). På Sørlandet er det noe høyere ressurser, der ligger verdiene mellom 250 – 550W/m².

Trøndelag har en del gode ressurser og ligger mellom 200 og 800 W/m². Det er sjeldent at verdiene går under 200W/m².

3.2.2 Middel globalstråling

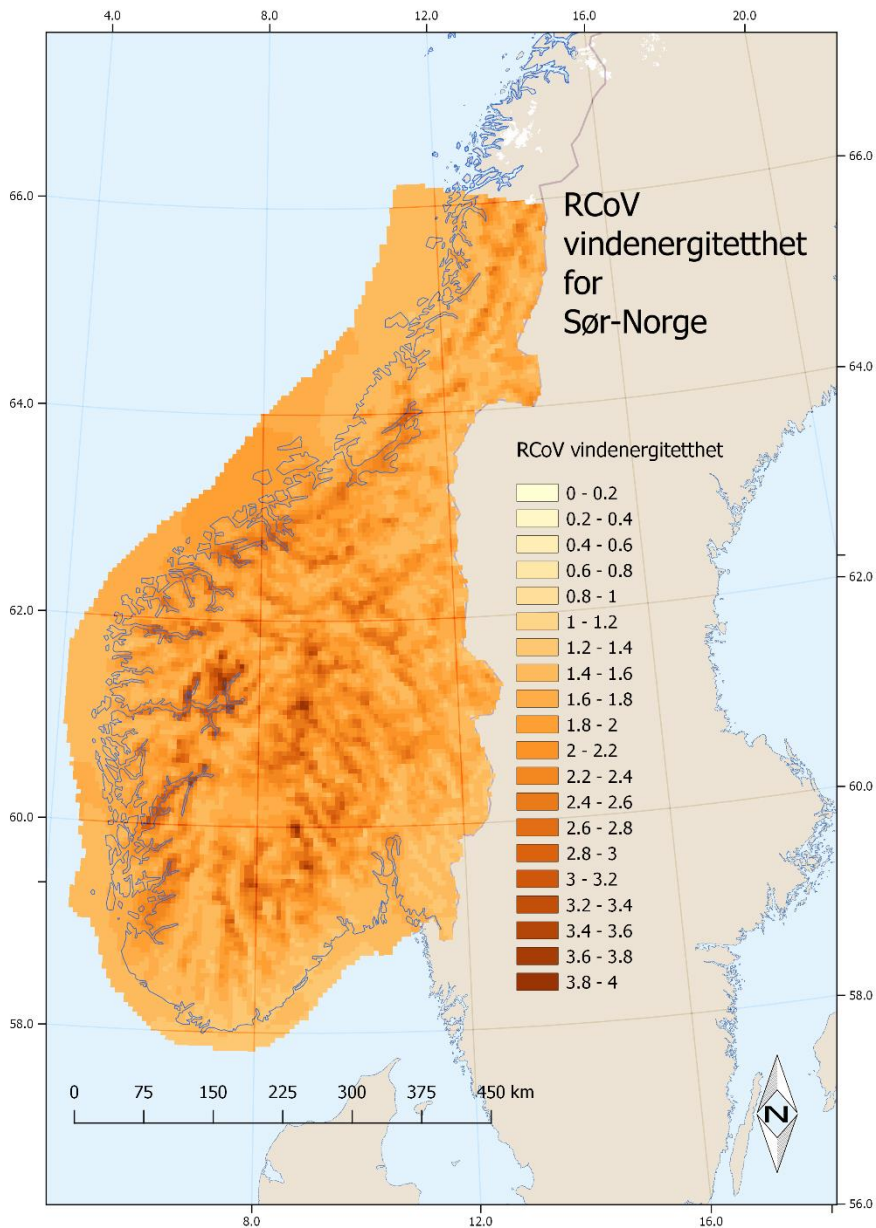
Figur 3.8 viser middel globalstråling for hele Sør-Norge, inkludert kysten ut til territorialgrensen (12 nautiske mil). Det er mest solinnstråling på Østlandet og Sørlandet. Gjennomsnittet kan bli så høyt som 120 W/m², og sjelden lavere enn 100 W/m². Solinnstrålingen varierer mest på Vestlandet og ligger på mellom 80-110 W/m². Det er flere steder med lavere innstråling enn på Østlandet. Verdiene ligger på 90-110 W/m² lenger innover i landet mot Østlandet. I Trøndelag er det noe lavere innstråling, men det varierer mindre enn i de andre landsdelene. Det ligger mellom 80-100 W/m². I Sør-Trøndelag ligger verdiene stort sett under 90 W/m², mens i Nord-Trøndelag ligger det stort sett over 90 W/m².



Figur 3.8: Middel global stråling for Sør- Norge og 12 nautiske mil ut fra kystlinjen.

3.2.3 RCoV av vindenergitetthet

Figur 3.9 viser RCoV av vindenergitetthet for hele Sør-Norge inkludert kysten ut til territorialgrensen (12 nautiske mil).



Figur 3.9: RCoV av vindenergitetthet for Sør-Norge og 12 nautiske mil ut fra kystlinjen.

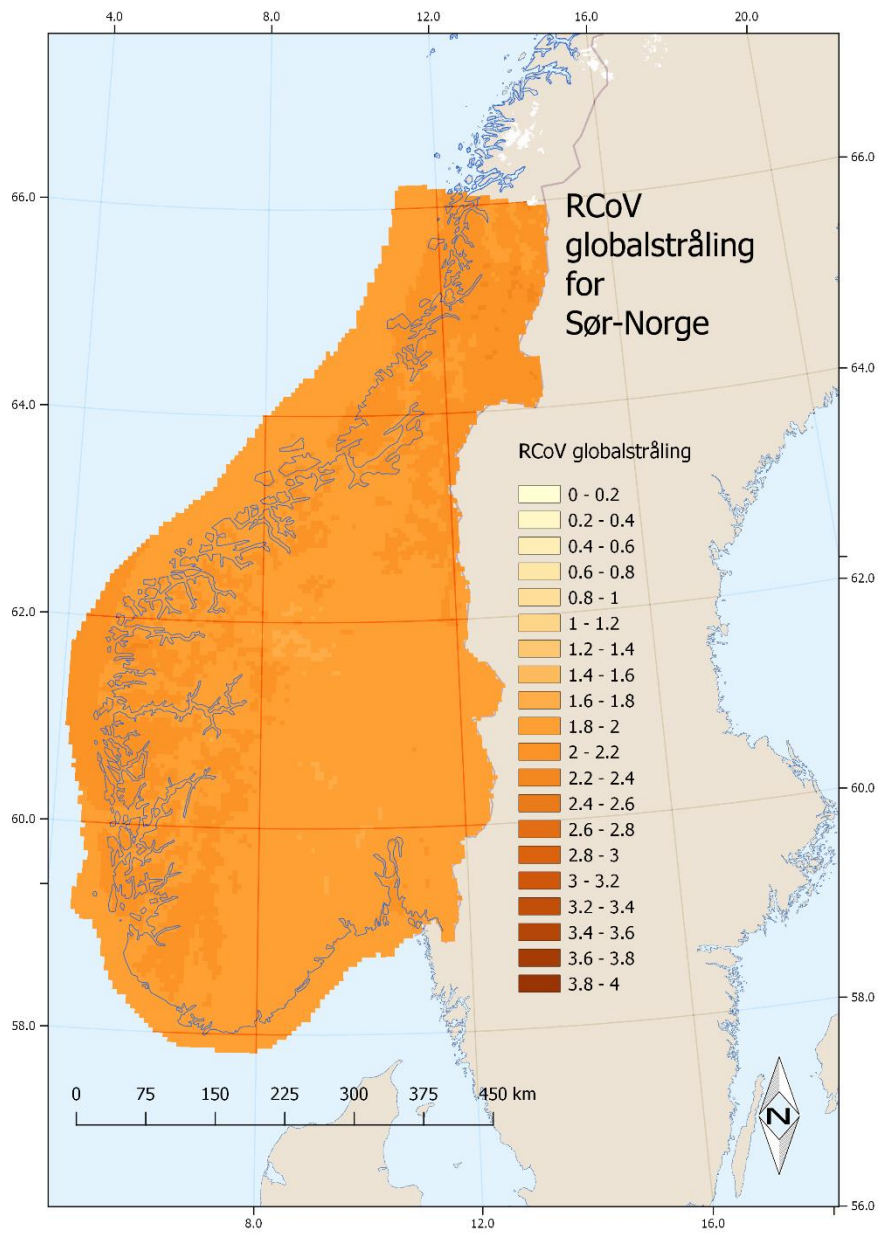
RCoV sier noe om variabiliteten der lavest mulig RCoV er ønskelig.

Det ser ut til å være høy RCoV variasjon flere steder i Sør-Norge. Dette er naturlig med tanke på tidligere nevnt at verdiene for middel vindenergitetthet varierer mye.

Det ser ut til å være noe høyere variasjon på nedsiden av fjelltraktene. På disse stedene blir RCOV ofte over 2,5 og vanligvis mellom 2- 3, slik som i den vestlige delen av Østlandet. Lenger øst mot Oslo og Akershus og på Sørlandet er RCoV lavere, men fortsatt mellom 1-2. Den når over 2 enkelte steder i Vest-Agder. Den er også lavere i Trøndelag der koeffisienten stor sett ligger mellom 1,5 – 2, utenom enkelte steder (2-3). Det tyder på at at RCoV er noe høyere langs fjordene, som strekker seg et stykke innover i landet, spesielt på Vestlandet hvor den kommer opp til 3-4. Ellers på Vestlandet ligger den mellom 1,5 – 2.

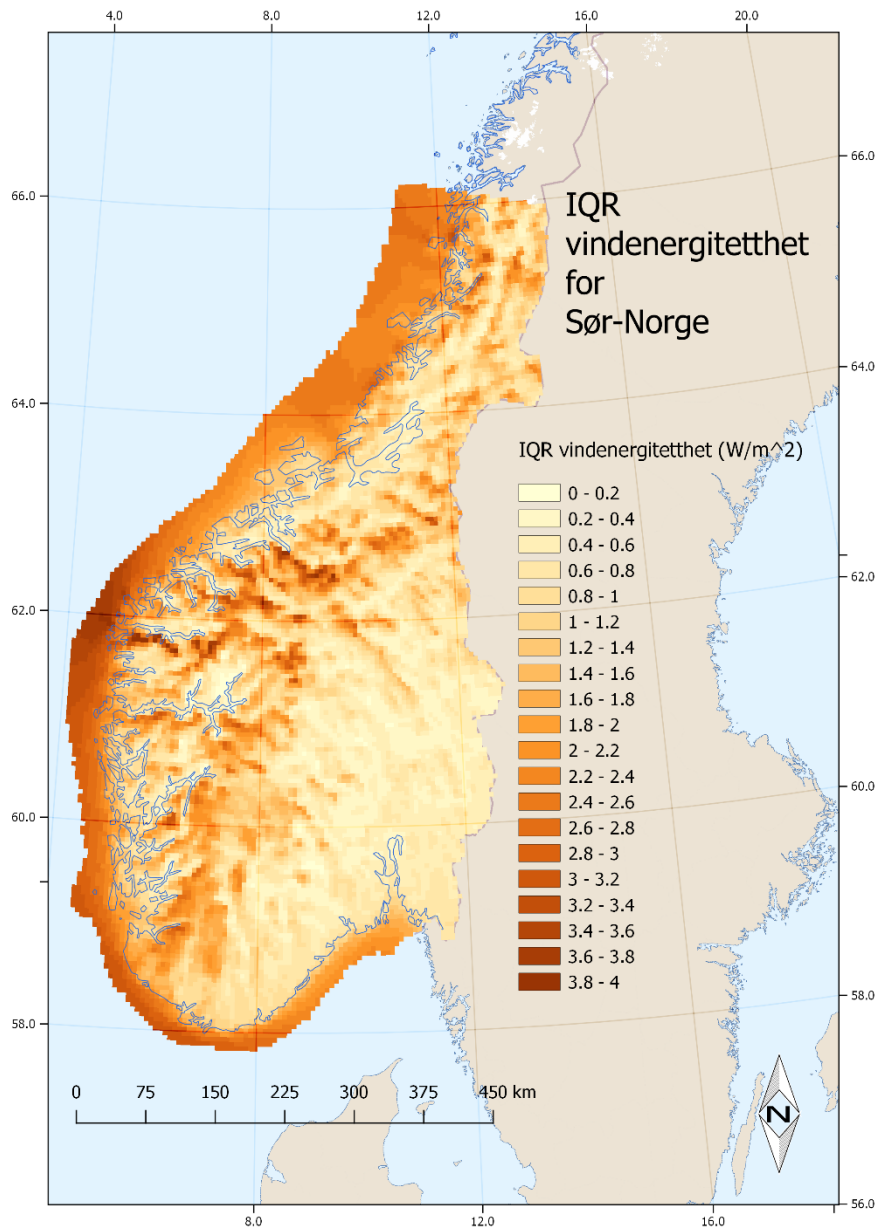
3.2.4 RCoV av globalstråling

Figur 3.10 viser RCoV for global stråling for hele Sør-Norge inkludert kysten ut til territorialgrensen (12 nautiske mil). RCoV for globalstråling er mer jevnt fordelt enn RCoV fra vind over store deler av Sør-Norge, men relativt høy de fleste steder. Det ser ut til å være høyest RCoV variabilitet der gjennomsnittlig solinnstråling er lav, og lavest variabilitet på de stedene hvor innstrålingen er høy. På Østlandet og Aust-Agder hvor det vanligvis er høyere innstråling, er RCOV flere steder mellom 1,8 og 2. For Vestlandet og Vest-Agder er RCoV litt i overkant av 1,9-2. Noen steder i lavlandet og ned mot fjorder er RCoV noe lavere, ned mot 1,8. I Trøndelag ligger variabilitetskoeffisienten mellom 1,4 – 2.



Figur 3.10: RCoV av global stråling for Sør-Norge og 12 nautiske mil ut fra kystlinjen.

3.2.5 IQR vindenergitetthet

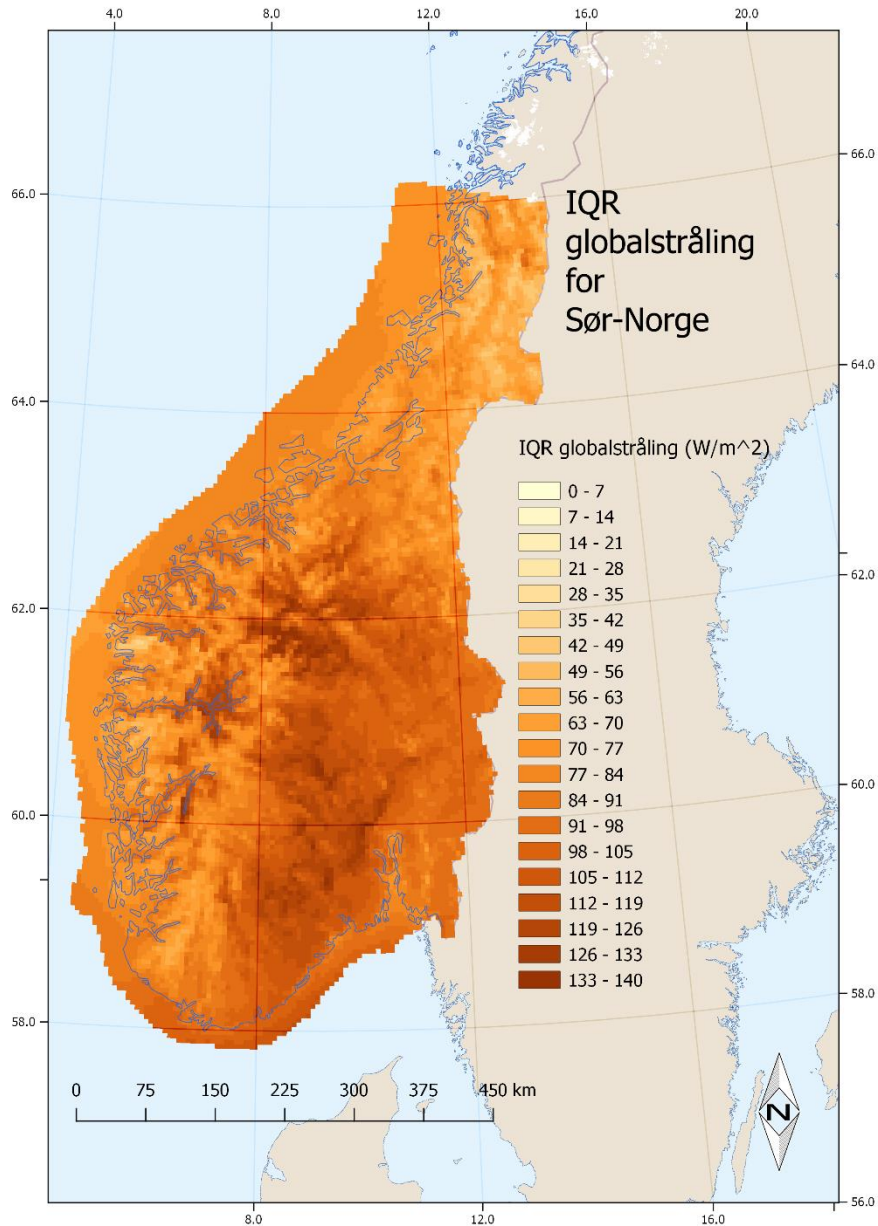


Figur 3.11: IQR av vindenergitetthet for Sør-Norge og 12 nautiske mil ut fra kystlinjen.

Figur 3.11 viser IQR av vindenergitetthet for hele Sør-Norge inkludert kysten ut til territorialgrensen (12 nautiske mil). IQR for vindenergitetthet er ganske ujevn over hele Norge, med betydelig større spredning i fjellområder enn i lavlandet. Det viser seg at IQR er høyest der vindenergitetthet er høyest. Dermed er IQR stort sett høyest i fjelltraktene på Vestlandet hvor det nås IQR verdier på over $1500 W/m^2$. I lavlandet på Østlandet og Sørlandet er det betydelig lavere IQR, hvor de fleste steder ligger mellom 100

og 300 W/m^2 Trøndelag er verdiene så høye som 1000 W/m^2 noen fjellområder og ned mot 150 W/m^2 lavlandet. Høye verdier med vindenergitetthet kan føre til mer spredning av dataene.

3.2.6 IQR globalstråling



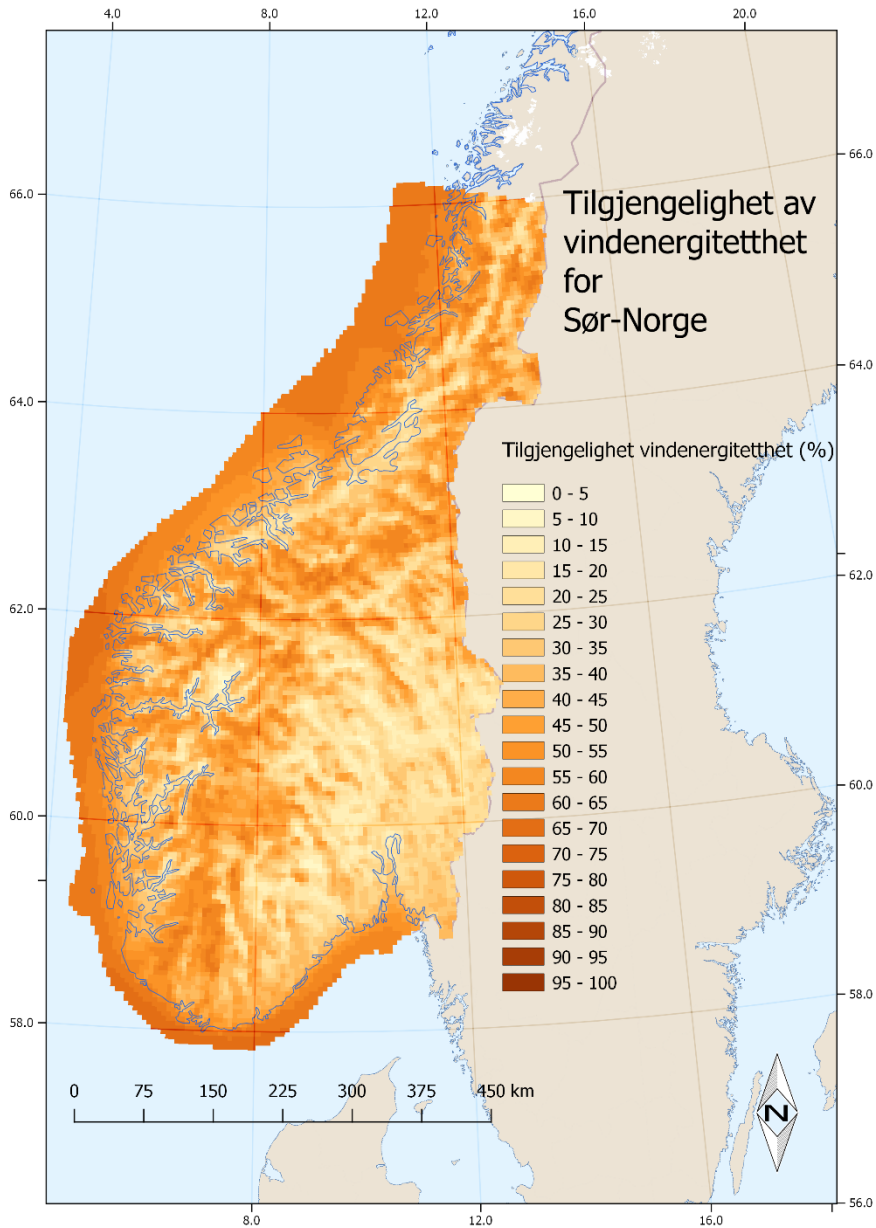
Figur 3.12: IQR av global stråling for Sør- Norge og 12 nautiske mil ut fra kystlinjen.

Figur 3.12 viser IQR av globalstråling for hele Sør-Norge, inkludert kysten ut til territorialgrensen (12 nautiske mil). IQR for global stråling er høyere på flere områder som har høy innstråling, slik som i

områder på Østlandet og Sørlandet ($100-120\text{W}/\text{m}^2$). I fjelltraktene på Vestlandet er det lavere og ligger som regel under $100\text{W}/\text{m}^2$. I Trøndelag er IQR stort sett mellom $50-80\text{W}/\text{m}^2$.

3.3 Tilgjengelighet

3.3.1 Tilgjengelighet vind



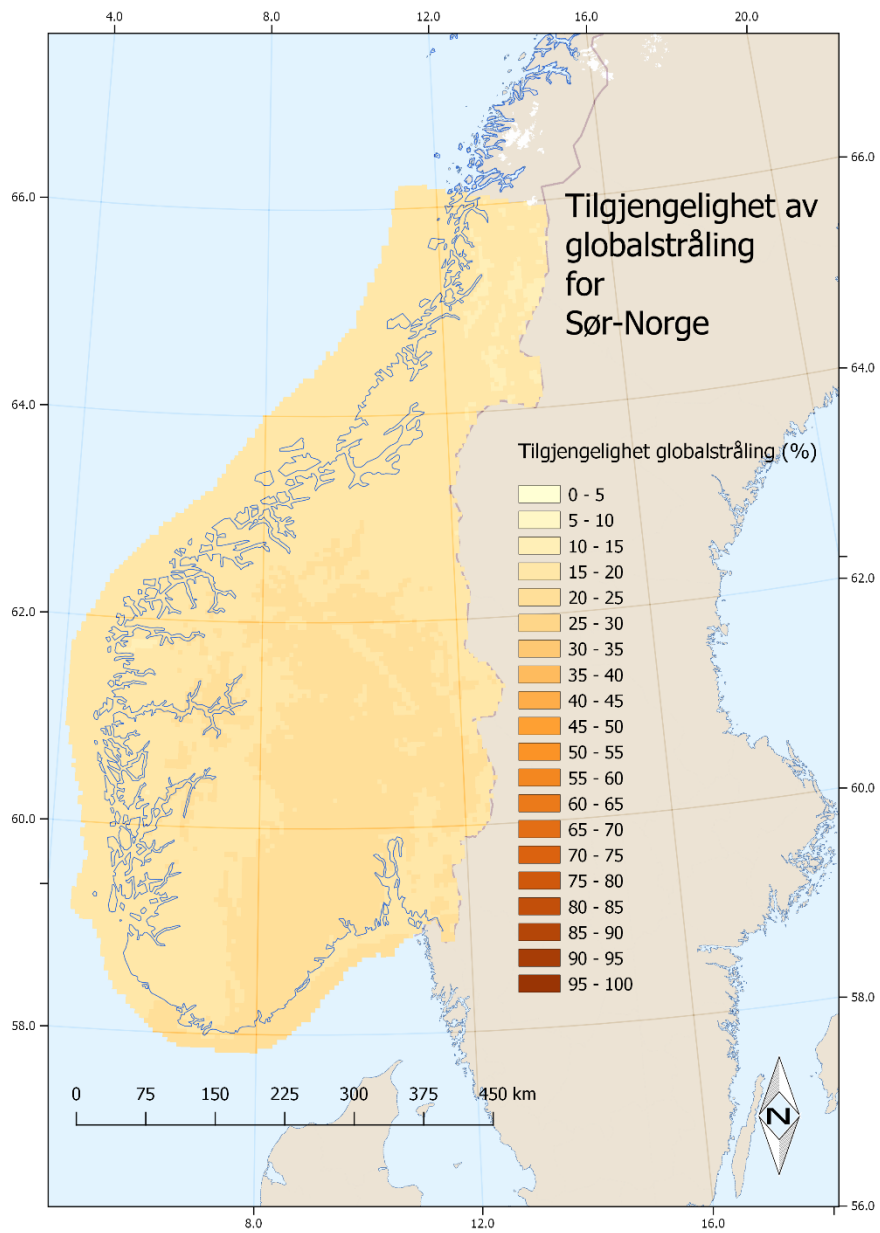
Figur 3.13: Tilgjengelighet av vindenergitetthet for Sør-Norge og 12 nautiske mil ut fra kystlinjen.

Figur 3.13 viser tilgjengelighet av vindenergitetthet for hele Sør-Norge inkludert kysten ut til territorialgrensen (12 nautiske mil). Grenseterskelen for vindenergitetthet var satt til 250 W/m². Vindressurser lavere enn dette klassifiseres som svak, og gir lite nyttbar energiproduksjon. Tilgjengeligheten for vind varierer en god del over hele Sør-Norge. Det er naturlig med tanke på at middel vindenergitetthet varierer en del, med høyest verdier i høyden og lavere i lavlandet. Det er flest områder med lav tilgjengelighet på Østlandet, for det meste lavere enn 30%. Det kan likevel oppnås over 50% i fjellområdene på Østlandet.

I skillet mellom Østlandet og Vestlandet, og på Sørlandet, er det flest områder med høy tilgjengelighet i området 40 og 60%. På Vestlandet varierer tilgjengeligheten fra 17-60% av tiden med lav tilgjengelighet i fjorder og daler og høy tilgjengelighet i høyereliggende områder. Trøndelag varierer mellom 18-60%.

3.3.2 Tilgjengelighet globalstråling

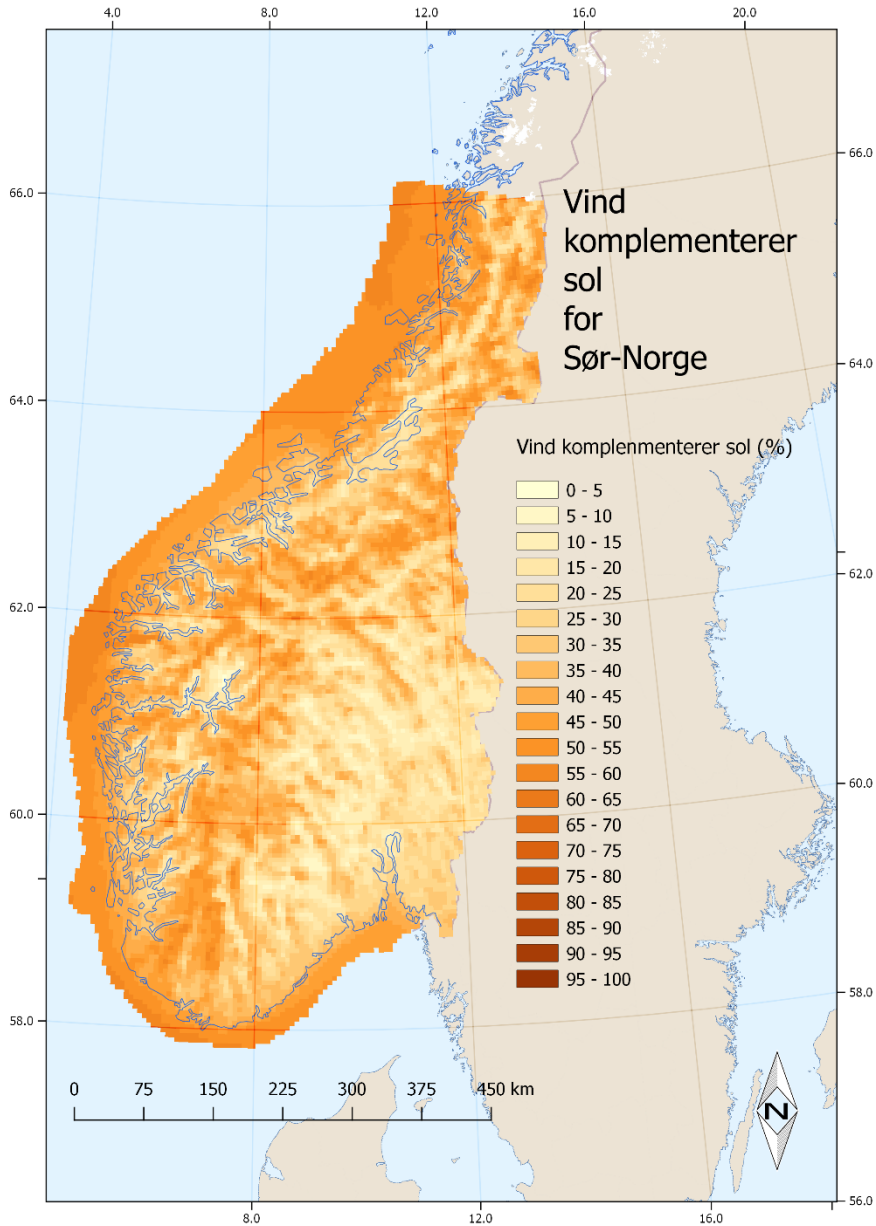
Figur 3.14 viser tilgjengelighet av globalstråling for hele Sør-Norge inkludert kysten ut til territorialgrensen (12 nautiske mil). Grenseterskelen for globalstråling var satt til 170 W/m². Innstråling lavere enn denne verdien er vurdert som utilgjengelig for kraftproduksjon i disse analysene. Tilgjengeligheten til sol er ganske jevn over hele Sør-Norge. Det er noe større andel på Østlandet og Sørlandet med Aust-Agder. Her ligger det i overkant av 21% de fleste stedene, og sjeldent under 18%. På Vestlandet varierer det noe mer men ikke mye. Her er andelen tilgjengelighet hovedsakelig 16-20% av tiden. Langs fjordene er det høyest verdier på Vestlandet. De laveste andelenene er i Trøndelag, her varierer det mellom 16-19% i Sør-Trøndelag og 15 – 18% i Nord Trøndelag.



Figur 3.15: Tilgjengelighet av global stråling for Sør-Norge og 12 nautiske mil ut fra kystlinjen.

3.4 Vind- og sol komplementering

3.4.1 Vind komplementerer sol (VKS)



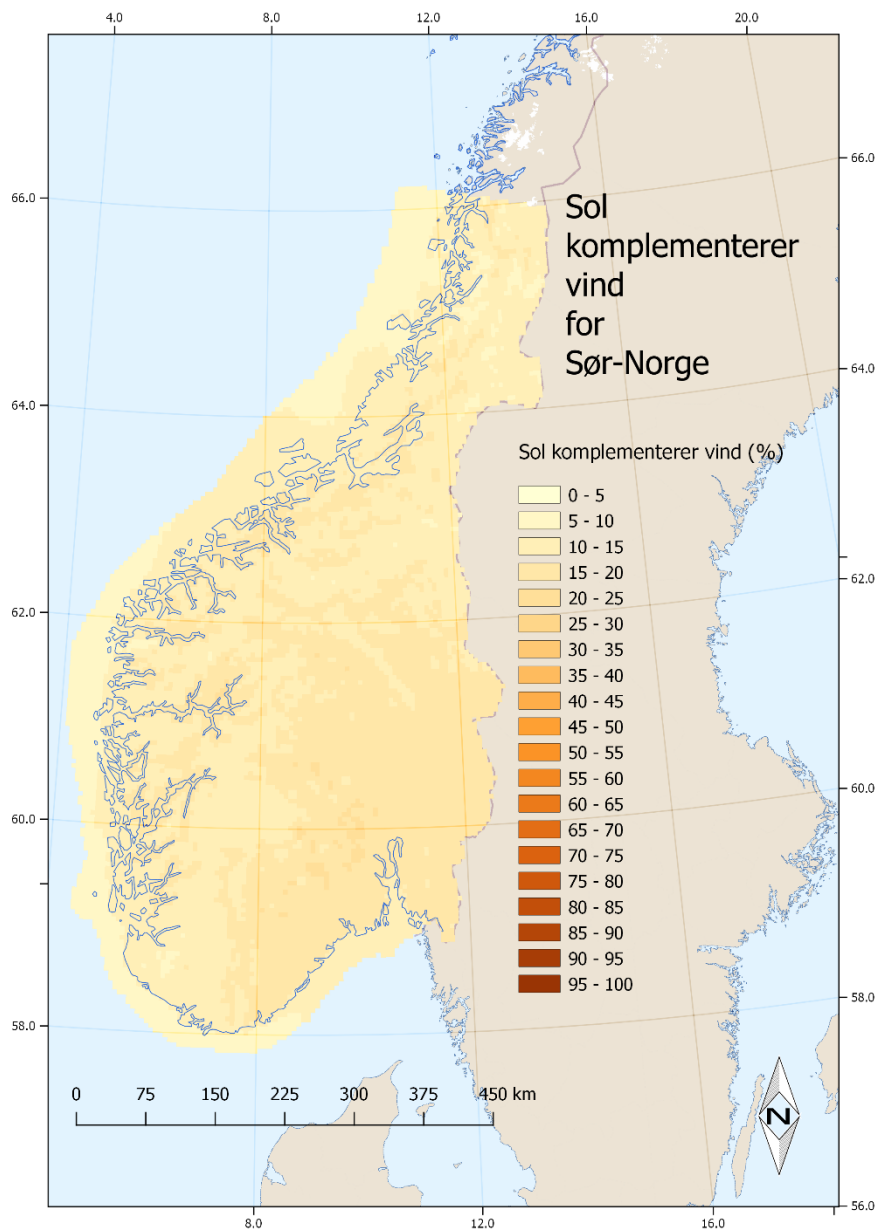
Figur 3.16: Vind komplementerer sol for Sør- Norge og 12 nautiske mil ut fra kystlinjen.

Figur 3.16 illustrerer hvor vindenergitetthet komplementerer global stråling for hele Sør- Norge inkludert kysten ut til territorialgrensen (12 nautiske mil). VKS sier noe om andelen av tiden vindenergitetthet er høyere, mens global stråling er lavere enn grenseverdiene. Slik som i fjellområdene på Vestlandet og i vannskillet mellom Østlandet og Vestlandet, og noen av fjellområdene i Trøndelag (30 -55%). Andelen i

lavlandet er en god del lavere, mellom 20-45% i lavlandet i Trøndelag, og under 20% noen steder i lavlandet på Vestlandet. På Østlandet og Sørlandet lå VKS vanligvis mellom 20-40%, også Østlandet hadde en del områder med lavere verdier.

3.4.2 Sol komplementerer vind (SKV)

Figur 3.17 viser hvor globalstråling komplementerer vindenergitthet for hele Sør-Norge inkludert kysten ut til territorialgrensen (12 nautiske mil).



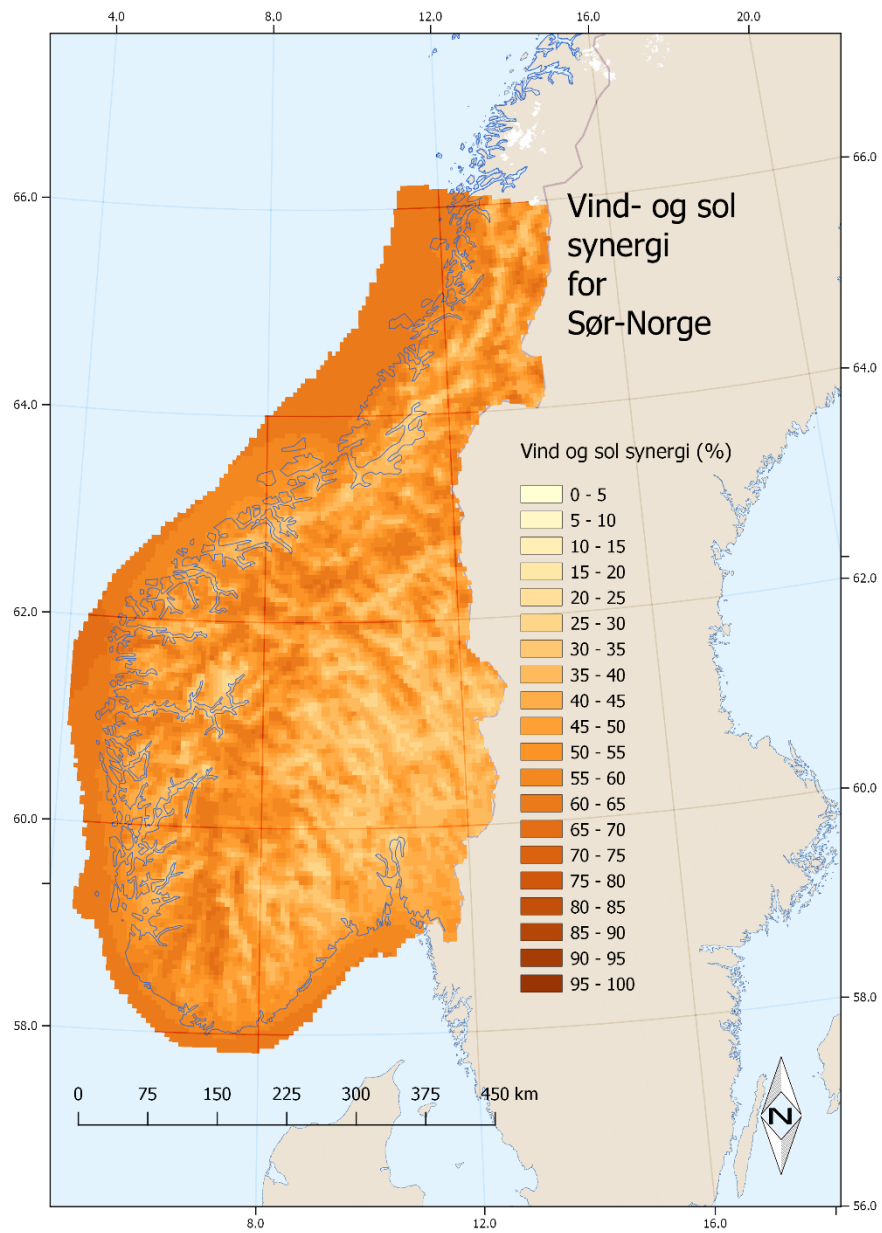
Figur 3.17: Sol komplementerer vind for Sør-Norge og 12 nautiske mil ut fra kystlinjen.

SKV sier noe om andelen av tiden global stråling er høyere, mens vindenergitetthet er lavere enn grenseverdiene. Andelen sol som komplementerer vind er ganske jevnt fordelt, men det er noe lavere i fjellområder enn områder i lavlandet. På Østlandet og deler av Sørlandet ligger SKV ofte mellom 16-20%, i Vest-Agder er andelen ofte lavere enn 15% grunnet mer vindressurser. Fjelltraktene i skillet mellom Østlandet og Vestlandet har ofte SKV mellom 11-14%. I fjelltraktene på Vestlandet er det noe lavere, men ganske likt. Lavlandet på Vestlandet har andeler som er noe lavere enn lavlandet på Østlandet med 15-18%. I Trøndelag ligger SKV mellom 10 – 15%.

3.4.3 Vind- og sol synergier (VSS)

Figur 3.18 viser vind- og solsynergi for hele Sør-Norge inkludert kysten ut til territorialgrensen (12 nautiske mil). VSS sier noe om andelen av tiden den ene av ressursene er høyere enn grenseterskelen mens den andre er lavere. Kartet for vind- og solsynergi varierer en del. VSS er høyest der det er mest vind. Dette kan ha en sammenheng med at vind komplementerer sol mer enn sol komplementerer vind. Synergien er flere steder sterk i høyden, med tanke på at det er mest vind i høyden. På Østlandet og flere steder på Sørlandet ligger VVS ofte mellom 30 - 40% i lavlandet, en del steder også opp til 40-50% og sjelden under 20%. I en del høydedrag og langs kysten på Sørlandet øker VVS til over 50%. Det varierer mye på Vestlandet, VVS i lavlandet ligger på mellom 40-50%. I fjelltraktene på Vestlandet, Langfjella og Jotunheimen blir andelen så høye som 60% mange steder og sjeldent under 50%.

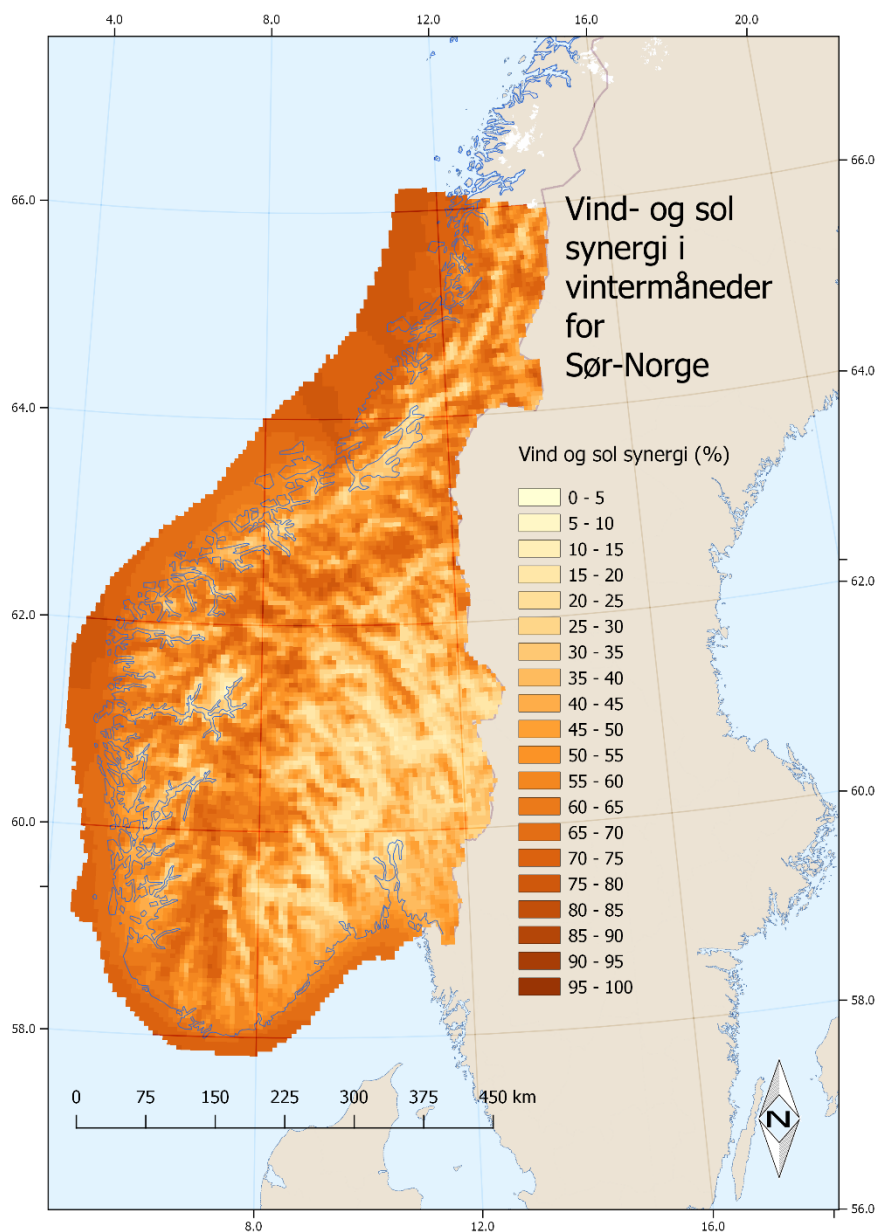
Synergien er både høyere enn tilgjengeligheten for sol og vind hver for seg, og når sol og vind komplementerer hverandre. Dette kan tyde på at det er en fordel av sol- og vindressurser kan virke i synergi.



Figur 3.18: Vind- og sol synergi for Sør- Norge og 12 nautiske mil ut fra kystlinjen.

3.4.4 Vind og sol synergi for vintermånedene og sommermånedene

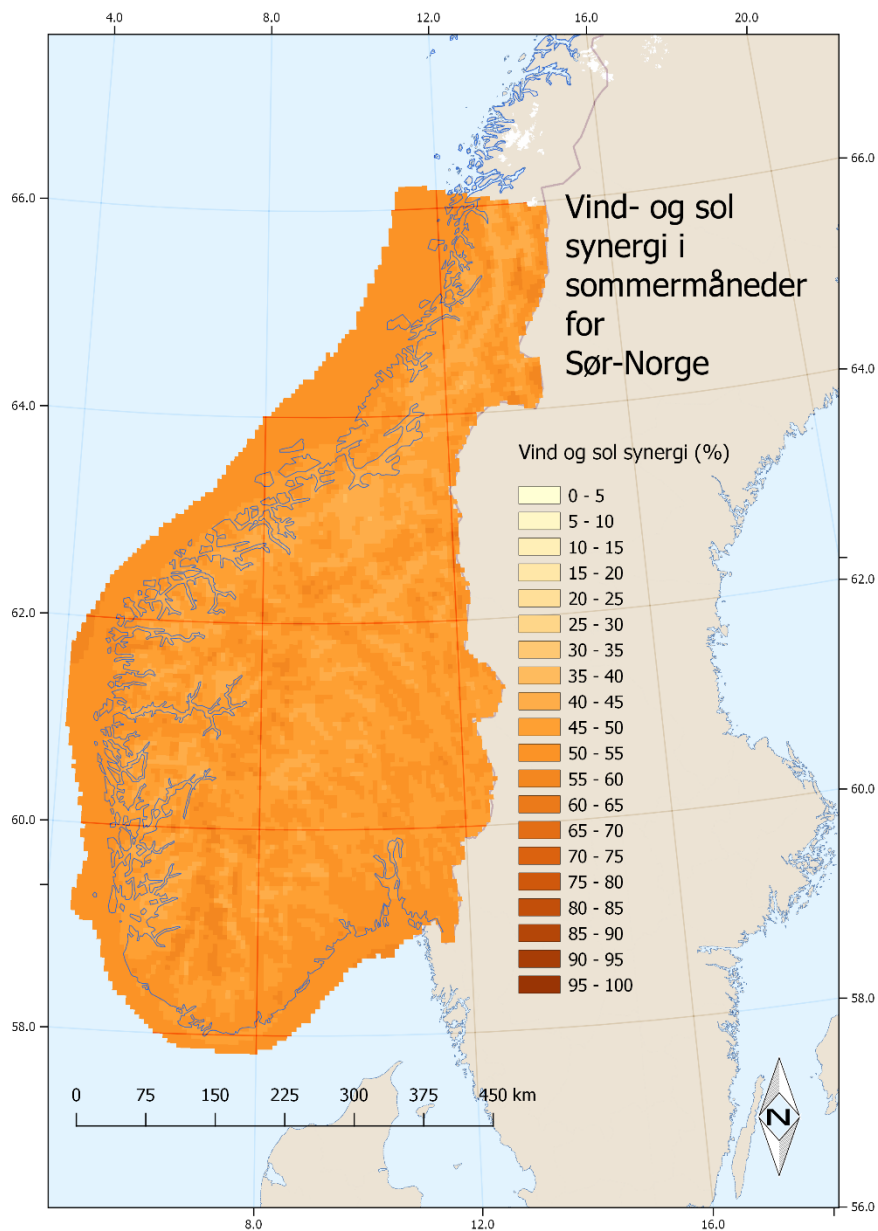
Figur 3.19 og figur 3.20 viser vind- og solsynergi i henholdsvis vintermånedene og sommermånedene for hele Sør-Norge inkludert kysten ut til territorialgrensen (12 nautiske mil).



Figur 3.19: Vind- og solsynergi for Sør-Norge og 12 nautiske mil ut fra kystlinjen.

Synergien i vintermånedene er klart størst på de stedene det er mest vind. Dette kan ha en sammenheng med at det er mest vind i vintermånedene, og tilsvarende er det mindre solinnstråling. Synergien er dermed lavere på Østlandet, der det ligger mellom 30 og 40% i lavlandet, og over 50% enkelte steder i fjellområdene. Den er høyere spredte steder på Vestlandet og en del steder på Sørlandet. I fjelltraktene

på Vestlandet og i skillet mellom Østlandet og Vestlandet varierer det som regel mellom 55-70%. Den er også relativt høy en del steder i Trøndelag.



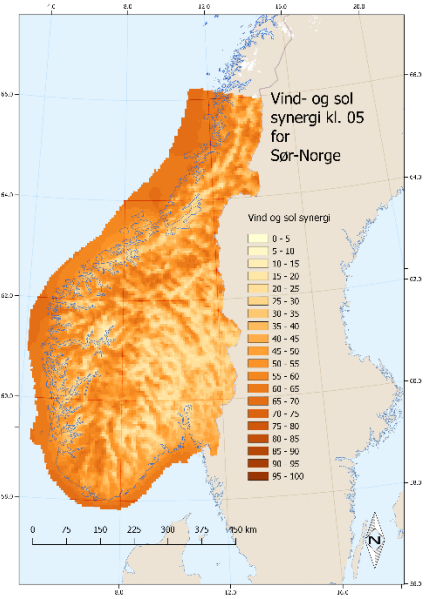
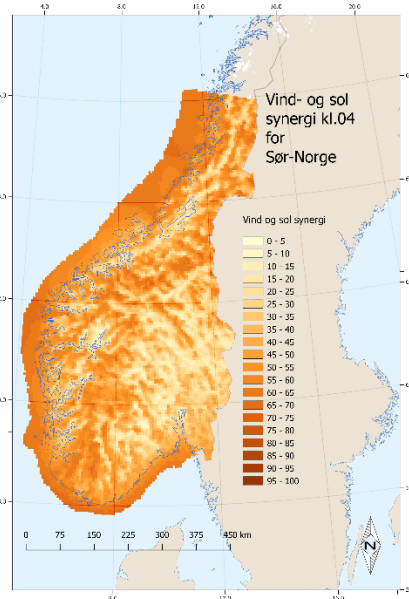
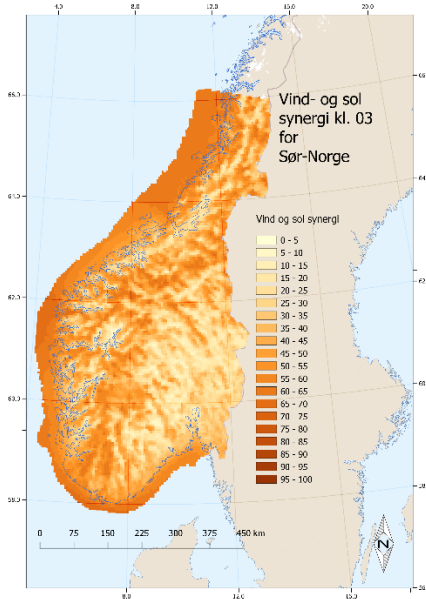
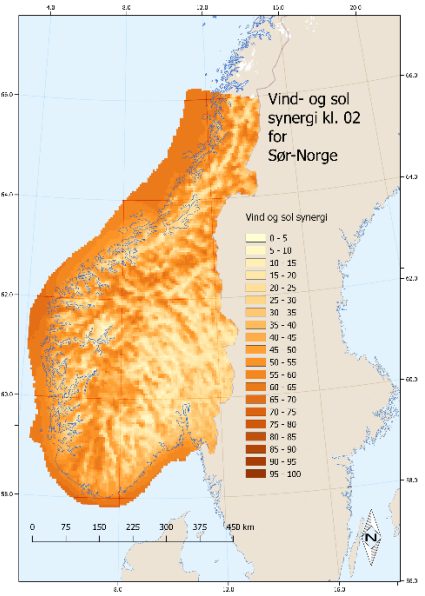
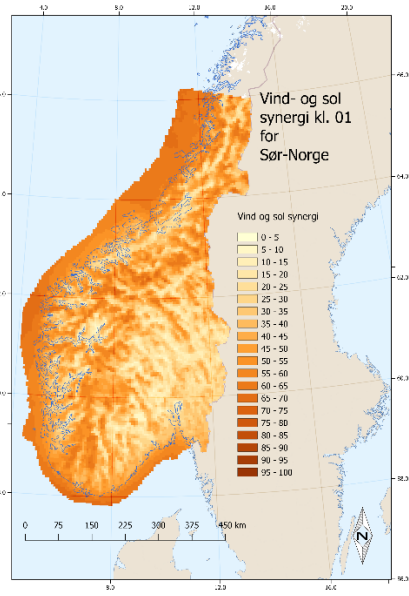
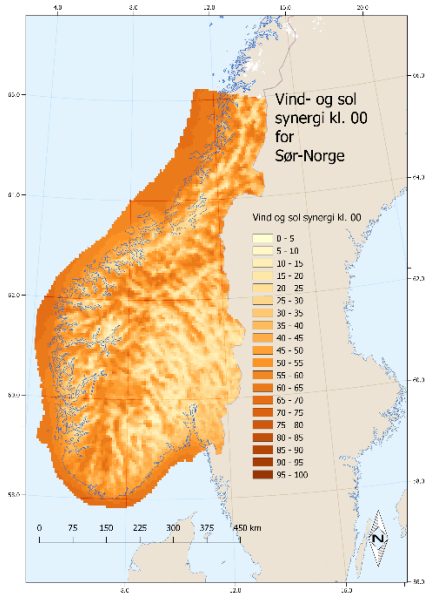
Figur 3.20: Vind- og solsynergi i sommermånedene for Sør-Norge og 12 nautiske mil ut fra kystlinjen.

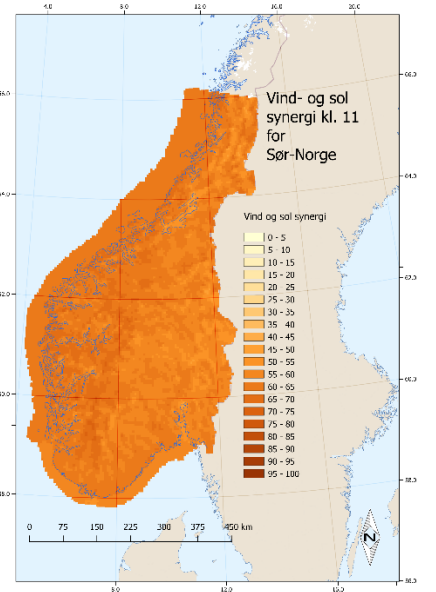
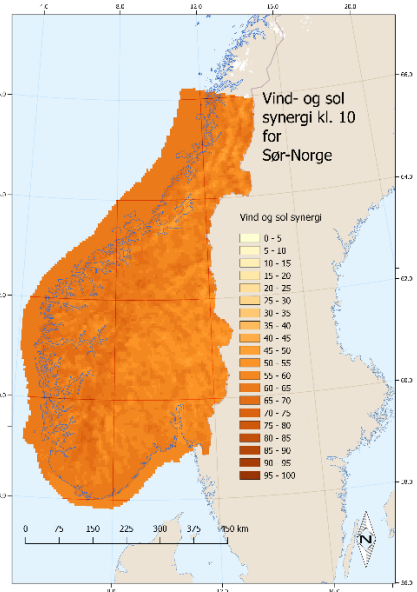
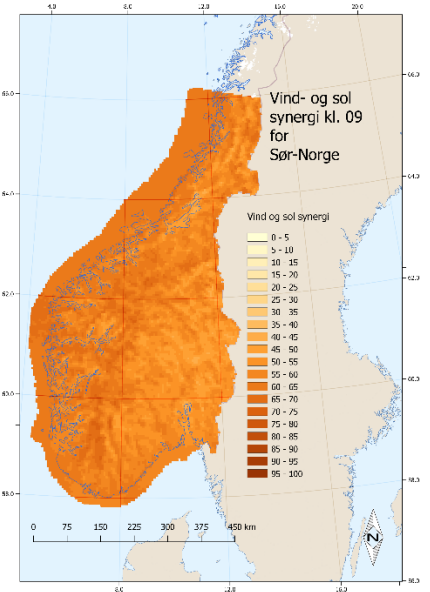
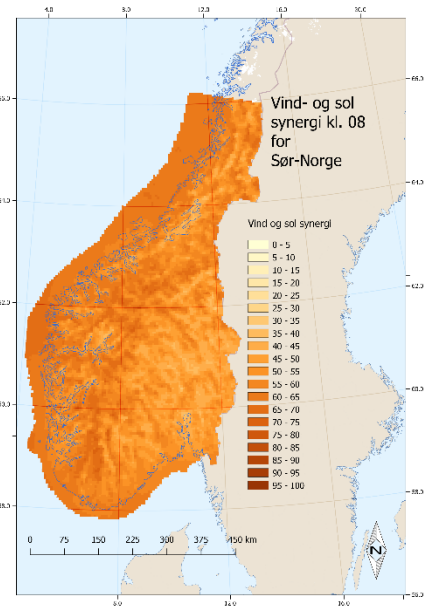
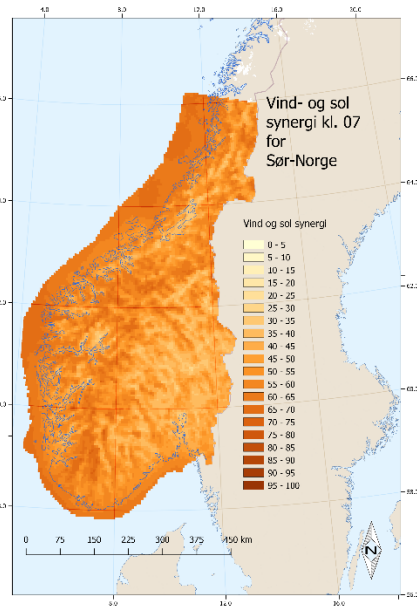
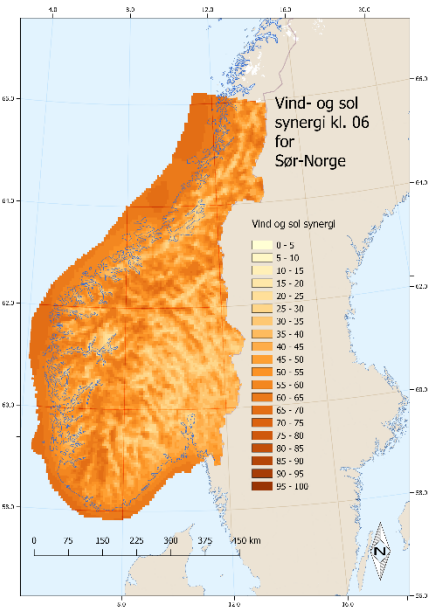
Synergien er betydelig jevnere fordelt over hele landet om sommeren enn om vinteren. Det er stort sett mellom 40-55%. Noe høyere og jevnere fordelt på Østlandet og Sørlandet enn ellers i landet, og noe lavere i Trøndelag. Synergien er fortsatt noe høyere i fjelltraktene, fordi vindhastighet fortsatt er mest

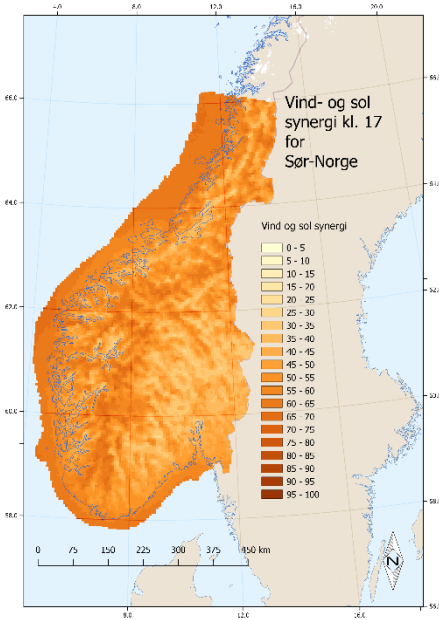
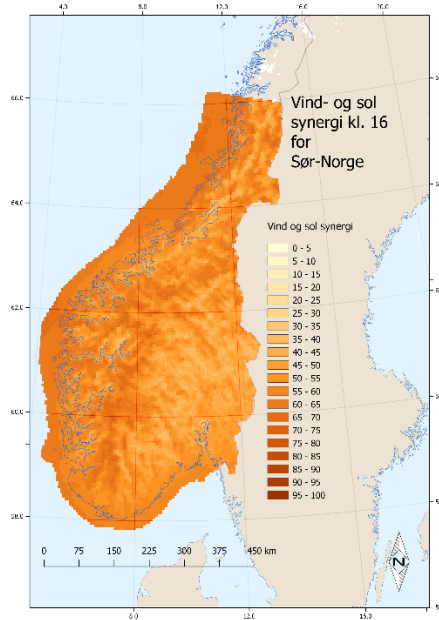
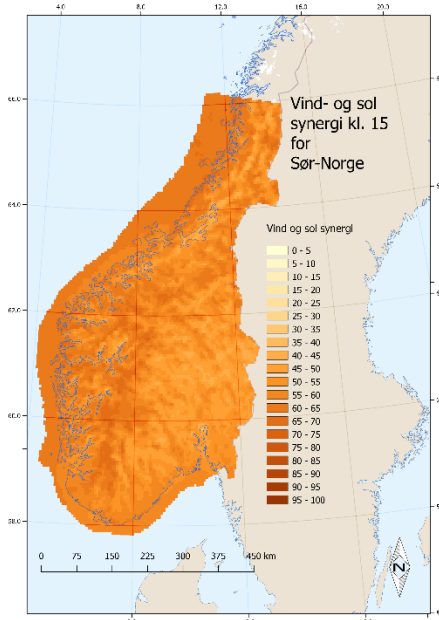
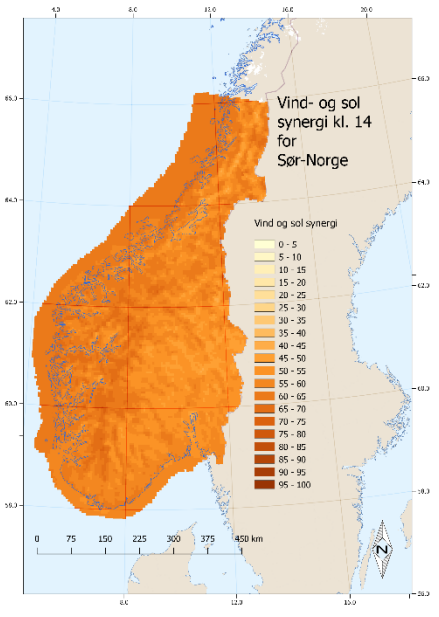
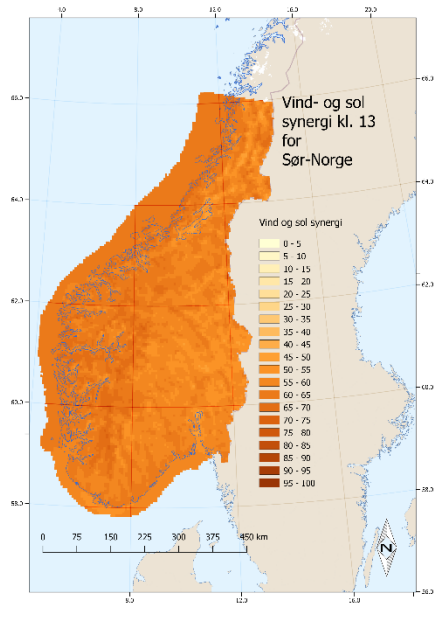
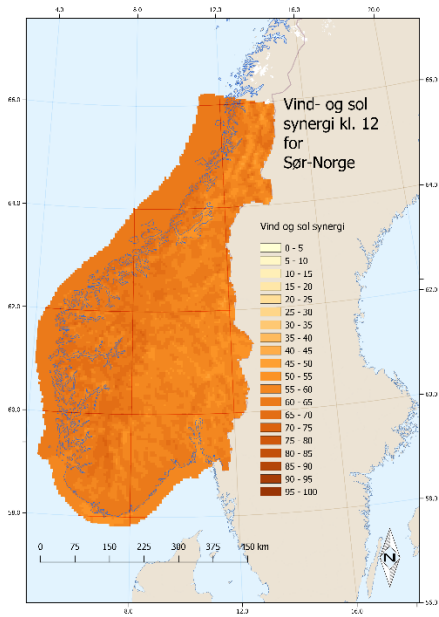
dominerende, selv om solinnstråling har større betydning på sommeren. I fjelltraktene på Vestlandet og i skillet mellom Østlandet og Vestlandet kan synergien bli så høye som 60%.

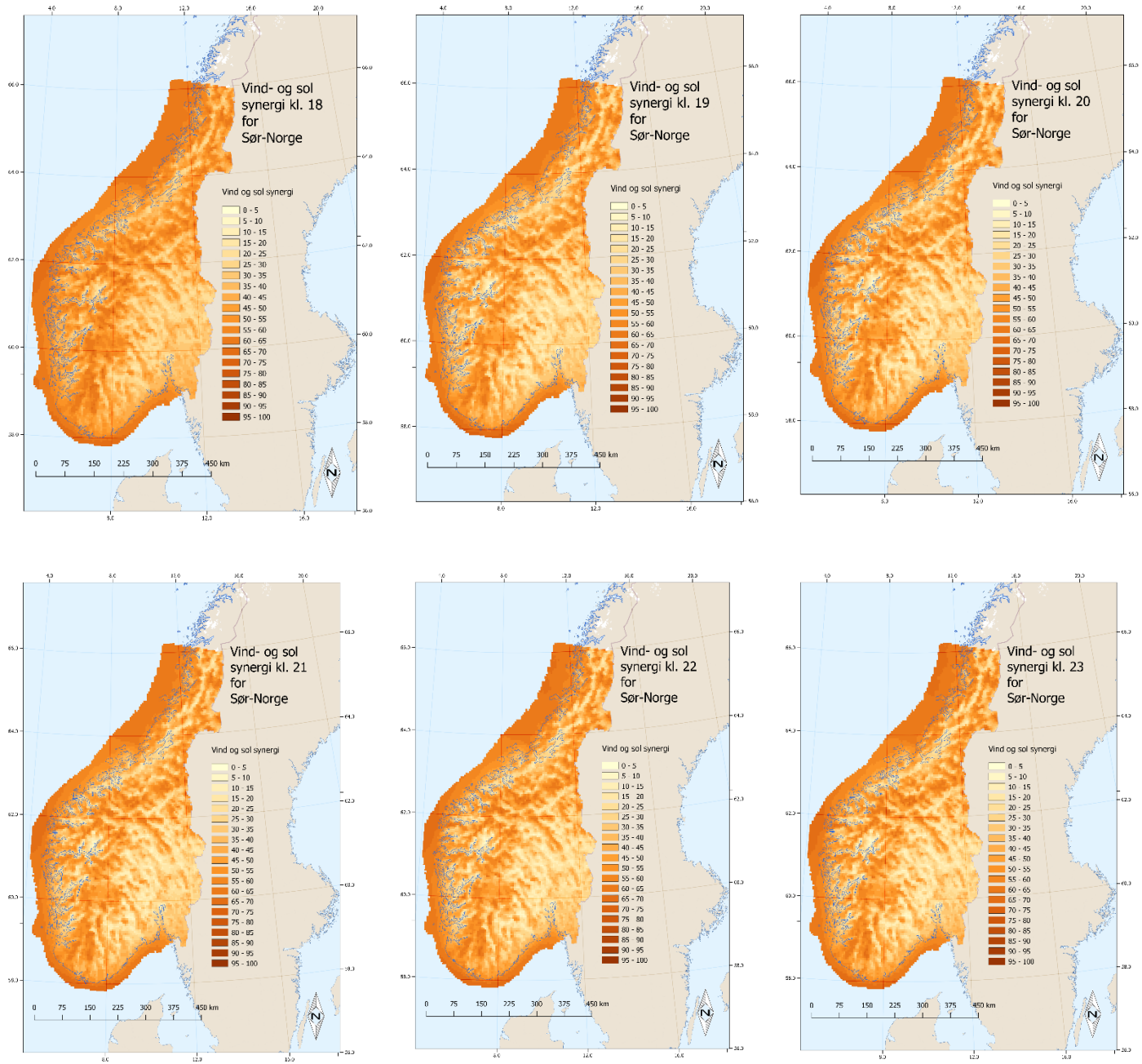
3.4.5 Vind- og solsynergi for hver time

Figur 3.21 viser vind- og solsynergi for et helt døgn for hele Sør-Norge inkludert kysten ut til territorialgrensen (12 nautiske mil). Det er en tydelig trend med sterkest synergi på midt på dagen, med tanke på at da er det mest solinnstråling. Den er minst på natten, hvor innstrålingen stort sett er fraværende. Vindenergitetthet er mer jevn igjennom døgnet selv om det tyder på at den er sterkere på natten.









Figur 3.21: Vind- og sol synergi mellom kl. 00 og 23 for Sør- Norge og 12 nautiske mil ut fra kystlinjen.

4. Diskusjon

I denne oppgaven var formålet å kartlegge komplementering med 4 km oppløsning over hele Sør-Norge, og vurdere nytten av at sol- og vindressurser virker i samspill fremfor at hver ressurs produserer hver for seg.

4.1 Data

Det er samlet inn data for solinnstråling, vindhastighet, høyde og landmask for hele Sør-Norge. Dataene er hentet fra WRF-modellen. I Byrkjedal & Åkervik er det tidligere brukt WRF-modellen til å kartlegge vindressurser i Norge ved forskjellige høyder. I rapporten nevnes det at en usikkerhet med WRF-modellen er at den bruker en nullplansforskyvning, det vil si modellens bakkenivå. Høyden på nullplansforskyvningen antas vanligvis å være 80% av vegetasjonshøyden. Vegetasjonen har altså ingen vertikal utbredelse i modellen, vegetasjonen påvirker da vindprofilen gjennom en overflateruhet definert for de ulike vegetasjonsklassene i modellen. Ulik ruhet gir ulik vindprofil over det som er definert som bakkenivået i modellen eller nullplanet. Nullplansforskyvningen vil være større ved høy enn lav vegetasjon. Under høyden til nullplansforskyvningen antas det å være stor usikkerhet i forhold til vindprofiler (Byrkjedal & Åkervik, 2009). En annen usikkerhet ved WRF-modellen er at den ofte ikke beskriver alle skyggeeffekter (Byrkjedal og Iversen, 2015). Dette kan føre til at daler får en del overestimert av sol. Skyer er også en faktor som er komplisert å modellere og som har vesentlig påvirkning på solinnstråling.

Disse usikkerhetene finnes ikke i like stor grad for målemaster, som ville gitt mest nøyaktige målinger. Det er likevel ikke plassert ut mange nok målemaster til å gi god nok romlig oppløsning av dataene i denne oppgaven.

Helst bør dataene gi en så god romlig oppløsning som mulig. Likevel vil data med oppløsning på 4x4 km gi et godt overordnet bilde av ressursene. Monforti et al. brukte også 4x4 km oppløsning i studier av komplementering av sol- og vindressurser. Ifølge studien er oppløsningen bra for å vise de mest fremtredende hot spots, men for grovt til å vise større detaljer i komplekst terreng, hvor det er mest produksjon (Monforti et al., 2014).

4.2 Beregningsmetoder

Beregningsmetodene variabilitet og tilgjengelighet av vindressurser er tidligere gjort for land som Australia og USA (Gunturu & Schlosser, 2012; Hallgren et al., 2014; Prasad et al., 2017), men med andre grenseverdier. For komplementering mellom sol- og vindressurser er tilsvarende metoder brukt for en studie i Australia. Det er ikke kjent at det er noen flere land med slike metoder. Grenseverdien vind er i denne oppgaven er valgt noe høyere enn det som har vært vanlig ved de andre studiene. Dette er fordi det er ønskelig med tilstrekkelig verdier for å si noe om produksjon. Grenseterskelen for solinnstråling var satt lik det som ble gjort i Prasad et al. (2017). Dette anses som en tilstrekkelig grenseverdi for Norge. Valg av høyere eller lavere grenseverdier kunne ha påvirket resultatene ved høyere eller lavere

Flere andre studier har gjort korrelasjonsanalyser og/eller statistiske analyser av utjevningseffekter av produksjonsprofiler mellom sol- og vindressurser, i tillegg til optimalisering av hybridssystemer. Det er imidlertid utført et fåtall slike studier i Norge. Derfor vil denne studien av komplementering av sol- og vindressurser for Norge kunne bidra til å fylle et kunnskaps gap. Beregningene i oppgaven er godt egnet til å gi parallelle sammenligninger med korrelasjonsstudier (Prasad et al., 2017). Det er vanligvis ikke brukt grenseverdier ved utførelse av andre studier av komplementering mellom sol- og vindressurser. Dermed vil ikke slike studier kunne fortelle like godt om andelen av tiden ressursene kan komplementere hverandre til nyttbar energiproduksjon. Likevel vil korrelasjonsstudier kunne si mer om hvordan ressursene utfyller hverandre. Det er imidlertid ikke kjent at det er utført andre studier av komplementering av mellom sol- og vindressurser i Norge over store andeler lokasjoner. Dermed er det vanskelig å sammenligne med andre metoder og resultater.

Som tidligere nevnt ble vindenergitetthet beregnet ved hjelp av lufttetthet og vindhastighet, der lufttetthet ble anslått for forskjellige høyder langs en regresjonslinje. Regresjonsanalysen i denne oppgaven viste at det var en klar lineær sammenheng mellom høyde og lufttetthet. Rapport fra NTNU viste også at lufttetthet reduseres med høyden (Rossing, 2018). Luft tettheten avhenger som nevnt av temperatur og lufttrykk. Forholdet mellom høyde og temperatur var lineært i rapporten fra NTNU. Mellom høyde og lufttrykk var det en viss kurvatur, men hadde lite å si for lavere høydeintervall. For det laveste høydesjiktet på 0-2000m er forholdet mellom høyde og lufttetthet nærmest lineært (Rossing, 2018). For å beregne lufttettheten mer nøyaktig i denne oppgaven, burde beregningene vært gjort for

hvert punkt for hele Sør- Norge på timesbasis istedenfor å anslå lufttettheten langs en regresjonslinje. Dette har med at lufttettheten kan variere noe i tid, noe som kommer av at luftrykk og temperatur endrer seg. For å få en mer nøyaktig regresjonslinje burde det inngått flere punkter i analysen. Men som vist i resultatkapittelet er feilen som introduseres på grunn av denne forenklingen minimal og vil således ikke påvirke konklusjonen fra studien.

4.3 Middel vindenergitetthet og middel globalstråling

Med tanke på vind- og solressurser viser det seg at høyde er av stor betydning. Vindenergitetthet er mer påvirket enn solinnstråling. Det er betydelig sterkere vind i fjellområder enn i lavlandet. Solinnstråling er noe lavere i høyden. Vindenergitettheten er dermed ofte høyest i fjellområder på Vestlandet, Langfjella, Jotunheimen og fjellområder i Møre og Romsdal. Den er lavere flere steder på Østlandet. Solinnstråling er størst i områder på Østlandet og enkelte steder på Sørlandet. Den er jevnt over svakere i Trøndelag, og i fjellområdene på Vestlandet og i skillet mellom Vestlandet og Østlandet. Annen litteratur viser til at vind vanligvis er betydelig sterkere i høyden (Monforti et al., 2014). Her er det mest vind og minst solinnstråling i fjellområder. Kartene for vindenergitetthet følger omtrent samme mønstre som kartene fra rapporten «Vindkart for Norge» (Brykjedal & Åkervik, 2009), hvor det er vist årsmiddelvind med meter i sekundet som enhet.

Ved sammenligning mellom gjennomsnittet for vindenergitetthet og global stråling, ser det ut til at de stedene med høyest vindenergitetthet har lavest innstråling og omvendt. Dette kan tyde på at ressursene kan komplementere hverandre godt mange steder.

Det bør nevnes at det en vindturbin kan produsere vil være lavere enn vindenergitettheten. En vindturbin klarer ikke å utnytte all energien (ca.40%)(Boyle, 2012). Tekniske utfordringer fører også til at vindproduksjonen må begrenses ved høyere vindhastigheter. Et solcellepanel har også en virkningsgrad som vanligvis er 10-15%. Panelet kan vinkles for å ta imot mer solinnstråling slik at innstrålingen treffer mer vinkelrett på panelet. Et optimalt vinklet solcellepanel vil dermed kunne utnytte betydelig mer av energien enn et solcellepanel plassert på en horisontal flate. Produksjonen kan bli opp til 20% høyere ved et tiltet solcellepanel enn ved et flatt panel (CivicSolar, u.å.).

Et eksempel på andelen solinnstråling som kan utnyttes vises i tabell 4.1 der det er en sammenligning mellom månedlig solinnstråling (kWh/m²) på en horisontal flate og et optimalt vinklet panel for en lokasjon i Oslo.

Year	Month	Horisontal flate	Optimalt vinklet panel
2005	Jan	5.91	14.3
2005	Feb	20.7	39.7
2005	Mar	64.9	96
2005	Apr	123	158
2005	May	134	145
2005	Jun	163	166
2005	Jul	154	156
2005	Aug	121	140
2005	Sep	75.1	105
2005	Oct	34.7	64
2005	Nov	11.3	29.2
2005	Dec	3.88	13.1

Tabell 4.1: Sammenligning mellom solinnstråling (kWh/m²) på en horisontal flate og på et optimalt vinklet panel. Dataene er hentet fra PVGIS.

Utnytting av både sol og vind til energiproduksjon avhenger av teknologi og det må gjøres utdypende analyser for hver enkelt lokasjon. Denne oppgaven baserer seg på variabiliteten i selve sol- og vindressursene. Kartene kan kunne si noe om hvilke ressurser som er best egnet uavhengig av teknologi. Dermed vil globalstråling og vindenergitetthet gi et mer riktig utgangspunkt.

4.4 Variabilitet

Det ser ut til at de stedene hvor det er høye vindhastigheter er det noe lavere RCoV variasjon, mens de stedene med lave vindhastigheter har høyere RCoV variasjon. RCoV er høyest på nedsiden av fjellområder og lavere på fjelltopper. Den høye RCoV verdien kan være fordi fjellsidene skjermer for vinden i ulike vindretninger. Dette fører til lavere vind fra enkelte vindretninger.

IQR er høy på de stedene det er sterkeste ressurser, både for vind og sol. Dette tyder på at de områdene med mest ressurser også har lang spredning i dataene. Da er det også størst fare for overproduksjon og større behov for back-up kapasitet, grunnet både mange høye og lave verdier.

4.5 Tilgjengelighet

Tilgjengelighet indikerer andelen av tiden hvor det er en marginal mulighet for kraftproduksjon. Det kan si noe om hvor ofte sol- og vindressurser kan produsere hver for seg. Tilgjengeligheten for vind er naturligvis størst der det er høyest middel vindenergitetthet. Den kan komme over 50% enkelte steder i fjellområder. På disse stedene kan dermed vindkraft produsere en stor andel av tiden. For sol er tilgjengeligheten lavere og ligger for det meste under 20%. Dette tallet inkluderer også nattestid, som er med på å dra ned verdiene.

4.6 Komplementering og synergi

Å se ressursene sammen i synergi er nyttig med tanke på å dekke en felles etterspørsel. Ressursene bør komplementere hverandre mest mulig, slik at når den ene ressursen er over grenseverdien så er den andre under (Monforti et al., 2014). Dette kan føre til jevnere produksjonsprofiler. Kartene for synergi (VSS) (figur 3.18) illustrerer ikke når begge ressursene er over grenseverdiene samtidig, men bare når ressursene komplementerer hverandre. Ofte vil man unngå at begge ressursene produserer samtidig for å gi en mer jevn kraftproduksjon.

Ved å sammenligne kartene for VKS og SKV (figur 3.16 og 3.17) viser det seg at vind komplementerer sol oftere enn sol komplementerer vind de fleste områdene, med unntak av enkelte steder i lavlandet spesielt på Østlandet og enkelte steder på Sørlandet hvor det er mer solinnstråling og mindre vindenergitetthet. Noe som tyder på at solenergi er den mest dominerende energikilden på disse stedene. VKS er høyere enn SKV spesielt i høytrakter og langs kysten. På disse stedene er vindenergitetthet den dominerende energikilden.

Over alle lokasjoner er det høyest verdier der ressursene virker i synergi. Synergien mellom ressursene er tydelig sterkere enn tilgjengeligheten til vind- og sol alene (figur 3.13 og 3.14). Det tyder på at det er mulighet for produksjon i en god del større andel av tiden enn hvis enten vind- eller solressurser produserer hver for seg. Størst forskjell er det i lavlandet hvor ressursene komplementerer hverandre

omtrent like mye. Sterkest synergi er der det allerede er mye vindressurser, slik som på Vestlandet og langs kysten der det enkelte steder oppnås synergi over 60% av tiden. Høyere verdier på disse stedene henger sammen med at vind komplementerer sol oftere enn sol komplementerer vind. Flere av stedene med god synergi har lengre avstander fra kraftledninger, noe som tyder på at lokasjonene er godt egnet for stand-alone hybridssystemer. Det kan forventes at det trengs ekstra installert kapasitet, tilførsel fra andre energikilder eller batterilagring den resterende andelen av tiden det må produseres for å dekke forbruk. De stedene med nærhet til kraftlinje kan gi en indikasjon på når det ikke må kjøpes strøm fra andre kilder. Tilgangen på ressursene varierer likevel mye igjennom tid. Derfor kan det være enkelte tider hvor andelen av forbruket som kan dekkes av ressursene er betydelig lavere eller høyere enn hva kartene illustrerer.

Grenseverdiene som er 250 W/m² for vindenergitetthet og 170 W/m² for globalstråling sier som sagt noe om verdiene som gir en marginal andel kraftproduksjon. Selv om disse verdiene tilsvarer at det skal være kraftproduksjon, kan det hende at det likevel trengs tilførsel av annen kraft. Dermed kan det hende at det trengs tilførsel av annen kraft i større andel av tiden enn de gangene det ikke er synergi. Et ideelt hybrid sol- og vind energisystem bør også ha tilførsel av andre fornybar energi teknologier eller energilagring. Ofte brukes batterilagring i «stand-alone» systemer.

I vintermåned er det klart sterkest synergi der det er mest vindressurser, og dermed vil vindressurser være mest dominerende i forhold til solressurser. Det er betydelig sterkere synergi enn på de stedene hvor vindressursene er lavere, noe som fører til stor variasjon avhengig av lokasjon. Dette kan en se i sammenheng med resultater fra litteratur som sier at vindressurser er sterkere, mens solinnstråling er svakere på vinteren (Heide et al., 2010). På grunn av denne store variasjonen på vinteren kan det derfor være av stor betydning i hvilke lokasjoner et hybridssystem plasseres. Det ser ut til å være mer jevn synergi over hele landet i sommermåned. De stedene med høyest synergi på vinteren er noe lavere på sommeren. Derimot de stedene med lav synergi på vinteren er betydelig høyere på sommeren. Solinnstråling har klart større betydning på sommeren. Synergien vil trolig også være en del høyere dersom det ses bort ifra nattetimer. På denne tiden er det også ofte mindre energietterspørsel. Dette tyder på at en vesentlig andel flere lokasjoner kan dekkes av vind og sol i sommermåned, spesielt på dagtid.

Det ble også beregnet synergi igjennom hele døgnet. Synergien er tydelig sterkest på de tidene hvor det er mest solinnstråling, grunnet døgnvariasjoner. Mellom kl. 09 og 15 ser det ut til å være sterkest synergi. Disse kartene kan gi en indikasjon på hvor stor andel sol- og vindressurser som kan dekke forbruk igjennom døgnet. Det er forskjellig energietterspørsel i ulike tider av døgnet. Derfor kan kartene brukes til å ses opp mot etterspørselskurver. Energiforbruk er ofte høyest på dagen og ettermiddagen, spesielt i husholdninger. Resultatene tyder på at det er god synergi i løpet av de timene hvor det er sterkest energietterspørsel.

Kartene kan derfor gi et godt utgangspunkt på hvordan et anlegg kan skaleres i forhold til andelen sol- og vindkraft, og anleggets forbruksprofil. Blant annet kan kartene være nyttig for produksjonsanlegg for hydrogen for å finne en god plassering og fornuftig dimensjonering av et slikt anlegg. Produksjonsanlegg for hydrogen kan skaleres opp og ned ganske raskt og vil kunne produsere så snart det er tilgjengelighet av enten sol- eller vindressurser. Produksjonen kan økes i takt med effekten som leveres. Produksjonsprofilen kan dermed følge ressurstilgangen istedenfor motsatt (Fell et al., 2010).

Flere andre studier har også vist at det er en fordel at vind- og solressurser komplementerer hverandre fremfor at hver ressurs produserer for seg selv. Flere av disse studiene er tidligere nevnt i innledninger. Det er ikke funnet noen studier som konkluderer med ikke er en fordel med komplementering mellom sol- og vindressurser. Flere av disse studiene tar likevel ikke hensyn til økonomi, som kan ha stor betydning ved planlegging sol- og vind hybridssystemer (Hirth et al., 2015). Dersom komplementeringen i den ene eller andre retningen blir for lav, kan det i mange tilfeller bli for dyrt å installere både vind og solanlegg. Det kan forventes at et hybridssystem kan forsvares økonomisk dersom komplementeringen er høy. Det er flere case-studier som har brukt økonomiske parametere, der noen kommer frem til økonomisk forsvarlige løsninger, mens andre viser seg å være ulønnsomme.

Parametere slik som energiproduksjon, type teknologi, økonomiske analyser forbruksprofiler er ikke en del av resultatdelen i denne oppgaven. Resultatene tar for seg hvordan selve ressursene kan virke i samspill.

4.7 Videre studier

Denne oppgaven har ikke gjort analyser av eksisterende eller planlagte kraftverk eller energietterspørsel i forskjellige lokasjoner. Det er heller ikke gjort noen beregninger for antatt produksjon. Variasjon i sol- og vindressurser kan ikke gi noe endelig svar på hvordan selve kraftproduksjonen variere. Likevel kan resultatene gi en indikasjon på andelen av tiden forbruket kan dekkes av sol- og vindressurser. Studien kan være et godt grunnlag for videre studier angående skalering av vind- og sol installasjoner med batteri i forhold til forbruk.

Videre bør det gjøres beregninger i forhold til hvordan produksjon kan dekke etterspørsel ved forskjellige utvalgte lokasjoner. Denne oppgaven vurderer heller ikke geografisk spredning av kraftproduksjon, og vil dermed være mest relatert til Co- lokasjoner. Spredning av kraftproduksjon over større geografiske avstander viser seg ofte å være en fordel (Hoicka & Rowlands, 2011; Liu et al., 2013), og fører til utjevning av produksjonsprofil. Det bør gjøres flere studier for hvordan sol- og vindressurser kan virke i samspill over lengre avstander fra hverandre i Norge. For eksempel kan det brukes samme beregninger som i denne oppgaven med komplementering mellom nabo punkter. En ulempe med geografisk spredning er hvis kraftproduksjonen skal spres når det er lengre avstander fra kraftledningen, kreves ny utbygging som kan være kostbart.

Hoica & Rowland hevder at det er flere forskjellige metoder og tilnærminger for å måle komplimentering. Det kan variere med hensyn til optimale løsninger eller system konfigurering. Mange studier stiller spørsmål om det å kombinere variable, sol- og vindressurser kan redusere en variabel kraftproduksjon. Ofte tas det ikke med tekniske og økonomiske parameter når forskjellige geografiske lokasjoner skal sammenlignes (Hoicka & Rowlands, 2011). Heller ikke i denne studien er dette gjort. Videre arbeid kan fokusere på slike parametere for å anslå komplementering.

5. Konklusjon

Formålet med denne oppgaven var å kartlegge sol- og vindressurs synergi for hele Sør-Norge og gi en indikasjon på andelen av tiden som kan gi nyttbar energiproduksjon. I tillegg vurderes det fordelene av vind- og solsynergi produksjon fremfor at hver ressurs produserer for seg selv.

Det ble gjort analyser av variabilitet, tilgjengelighet, komplementering og synergi mellom sol- og vindressurser for hele Sør-Norge. Data for sol- og vindressursdata ble hentet fra et datasett basert på den meteorologiske modellen Weather Research and Forecasting (WRF). Dataene ga en output på 4km oppløsning. Resultatene er presentert som kart av forskjellige parametere for Sør-Norge.

Variasjonskoeffisienten (RCoV) var høyest på nedsiden av fjellområder og lavere på fjelltopper. Dermed er det flere steder lavere RCoV der det er høyest vind. RCoV er lavere der det er mest solinnstråling. Det er trolig at middelverdiene påvirker i større grad enn standardavvik. Kvartildifferansen var derimot høyest på de områdene det er mest vind- og sol, noe som tyder på større spredning av dataene på disse områdene. Tilgjengeligheten for sol- og vindressurser er naturligvis størst der det er størst middel av vind og sol. Den kan bli så høy som 50% for vindenergitetthet i fjelltraktene og rundt 20% for solinnstråling. Vind komplementerer sol oftere enn sol komplementerer vind. Vind- og solressurssynergi er stort sett høyest der det er størst andel vindressurser. I fjelltraktene kan synergien nå over 60% i fjelltraktene, i lavlandet er synergien ofte på 30-40%, og sjelden lavere enn 20%. I sommermåned er jevnere høy synergi enn i vintermåned. Dette tyder på at det er flere steder som er godt egnet for komplementering i sommermåned. Igjenom døgnet er det størst synergi i timer på dagen der det er mest solinnstråling. Dette kan være en fordel med tanke på at det ofte er på denne tiden forbruket er høyest. Perioder uten synergi kan si noe om andelen av tiden det trengs energilagring, back-up kapasitet eller kjøp av strøm fra el-nettet.

Denne studien gir en kartlegging av de lokasjoner som er godt egnet for sol- og vindproduksjon over hele Sør-Norge. I Norge vil varierende topografi føre til at egnetheten av forskjellige lokasjoner varierer. Analyser av kartene kan være nyttig i planlegging og beslutningsprosesser av egnete områder for vind og solenergi, ved at produksjonsprofilene jevner seg ut ved høyere synergi og komplementering. For videre studier kan kartene gi en indikasjon for hvordan et anlegg skal skaleres i forhold til andelen sol og vind, og i forhold til forbruk. På steder med høy synergi er det sannsynlig at hybride sol- og vindenergisystemer kan forsvares økonomisk.

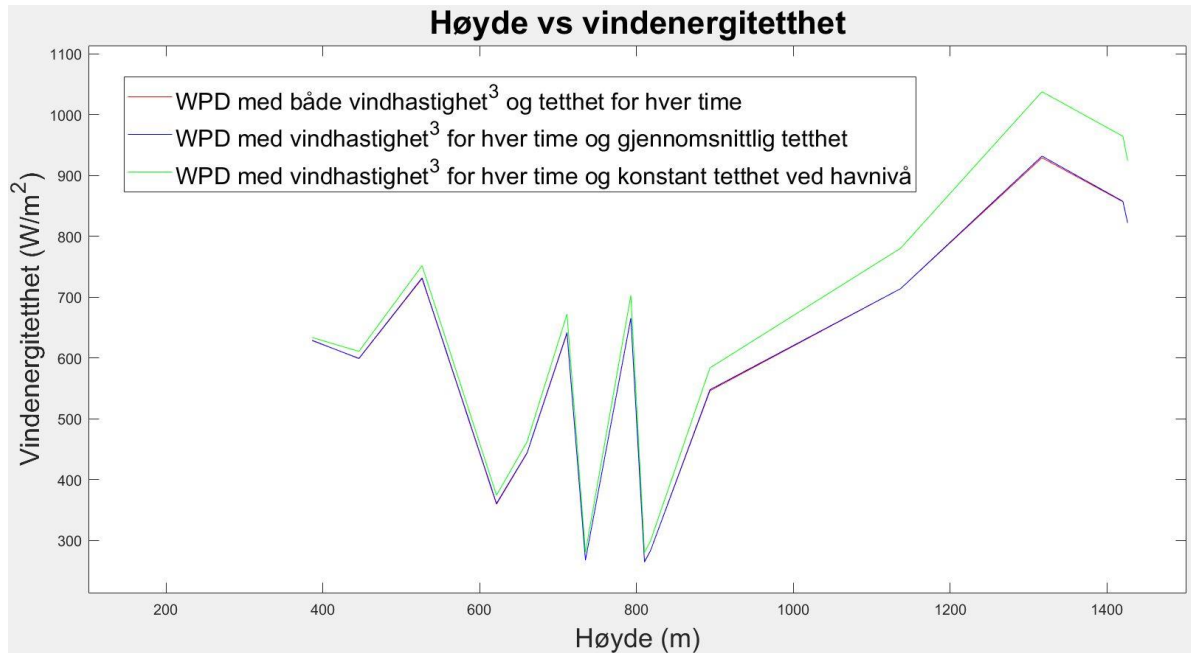
6. Referanser

- Bett, P. E. & Thornton, H. E. (2016). The climatological relationships between wind and solar energy supply in Britain. *Renewable Energy*, 87 (P1): 96-110. doi: 10.1016/j.renene.2015.10.006.
- Boyle, G. (2012). *Renewable energy*. 3 utg. Power for a sustainable future. Oxford: Oxford university press.
- Brykjedal, Ø. & Åkervik, E. (2009). *Vindkart for Norge*. Rapport nr 9/2009: NVE.
- CivicSolar. (u.å.). *Solar Array Tilt Angle and Energy Output*. Tilgjengelig fra: <https://www.civicsolar.com/support/installer/articles/solar-array-tilt-angle-and-energy-output> (lest 01.02.2019).
- EIA. (2017). *Wind turbine heights and capacities have increased over the past decade*. Tilgjengelig fra: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=33912> (lest 10.01.2019).
- Energysage. (u.å.). *What are the most efficient solar panels on the market? Solar panel efficiency explained*. Tilgjengelig fra: <https://news.energysage.com/what-are-the-most-efficient-solar-panels-on-the-market/>.
- Fell, H. J., Chladek, P., Wallevik, O. & Briskeby, S. T. (2010). *Flexible Production of Hydrogen from Sun and Wind: Challenges and Experiences*. Tilgjengelig fra: http://user.fz-juelich.de/record/135455/files/HP3c_4_Fell_rev0427.pdf.
- Gunturu, U. B. & Schlosser, C. A. (2012). Characterization of wind power resource in the United States. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12 (20): 9687. doi: 10.5194/acp-12-9687-2012.
- Hallgren, W., Gunturu, U. B. & Schlosser, A. (2014). The Potential Wind Power Resource in Australia: A New Perspective.(Research Article). *PLoS ONE*, 9 (7). doi: 10.1371/journal.pone.0099608.
- Heide, D., Von Bremen, L., Greiner, M., Hoffmann, C., Speckmann, M. & Bofinger, S. (2010). Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future, highly renewable Europe. *Renewable Energy*, 35 (11): 2483-2489. doi: 10.1016/j.renene.2010.03.012.
- Hirth, L., Ueckerdt, F. & Edenhofer, O. (2015). Integration costs revisited – An economic framework for wind and solar variability. *Renewable Energy*, 74 (C): 925-939. doi: 10.1016/j.renene.2014.08.065.
- Hoicka, C. E. & Rowlands, I. H. (2011). Solar and wind resource complementarity: Advancing options for renewable electricity integration in Ontario, Canada. *Renewable Energy*, 36 (1): 97-107. doi: 10.1016/j.renene.2010.06.004.
- IEA. (2018). *World energy outlook 2018*. Tilgjengelig fra: <https://webstore.iea.org/download/summary/190?fileName=English-WEO-2018-ES.pdf>.
- Li, W., Stadler, S. & Ramakumar, R. (2011). Modeling and Assessment of Wind and Insolation Resources with a Focus on Their Complementary Nature: A Case Study of Oklahoma. *Annals of the Association of American Geographers*, 101 (4): 717-729. doi: 10.1080/00045608.2011.567926.
- Liu, Y., Xiao, L., Wang, H., Dai, S. & Qi, Z. (2013). Analysis on the hourly spatiotemporal complementarities between China's solar and wind energy resources spreading in a wide area. *Science China Technological Sciences*, 56 (3): 683-692. doi: 10.1007/s11431-012-5105-1.
- Monforti, F., Huld, T., Bodis, K., Vitali, L., D'Isidoro, M. & Lacal-Arantequi, R. (2014). Assessing complementarity of wind and solar resources for energy production in Italy. A Monte Carlo approach. *Renewable Energy*, 63: 576.
- NREL. (u.å.). *Classes of wind power density at 10 m and 50 m*. Tilgjengelig fra: <https://rredc.nrel.gov/wind/pubs/atlas/tables/1-1T.html> (lest 01.01.2019).
- NVE. (2015). *Solenergi*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/energiforsyning-og-konsesjon/solenergi/> (lest 05.01.2019).

- Prasad, A. A., Taylor, R. A. & Kay, M. (2017). Assessment of solar and wind resource synergy in Australia. *Applied Energy*, 190: 354-367. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.12.135.
- Renewable first. (u.å.). *Enercon E53 800 kW Wind Turbine*. Tilgjengelig fra: <http://www.renewablesfirst.co.uk/windpower/wind-turbines/enercon-e53-800-kw-wind-turbine/>.
- Rossing, N. K. (2018). *Måling av lufttrykk, høyde og posisjon med Arduino*. Tilgjengelig fra: <https://www.ntnu.no/documents/2004699/1278627950/Trykk+og+posisjon+1.2.pdf/bb64e399-32a8-44e1-85cc-a7433b04ed55> (lest 15.05.2018).
- Ruddiman, W. F. (2014). *Earth's Climate Past and Future*. Third edition utg. New York: W.H. Freeman and company.
- Sahin, A. Z. (2000). Applicability of Wind?Solar Thermal Hybrid Power Systems in the Northeastern Part of the Arabian Peninsula. *Energy Sources*, 22 (9): 845-850. doi: 10.1080/009083100300001645.
- SNL. (u.å.). *Vestavindbelter*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/vestavindbelter>.
- Solbakken, K., Babar, B. & Boström, T. (2016). Correlation of wind and solar power in high-latitude arctic areas in Northern Norway and Svalbard. *Renew. Energy Environ. Sustain.*, 1: 42.
- Statnett. (2018). *Langsiktig markedsanalyse*. Tilgjengelig fra: <https://www.statnett.no/globalassets/for-aktorer-i-kraftsystemet/planer-og-analyser/langsiktig-markedsanalyse-norden-og-europa-2018-40.pdf> (lest 05.02.2019).
- Tiller, C., Boström, T. & Thyraug, S. E. (2017). *Case study of a large-scale solar and wind power hybrid system at Fakken Wind Farm, Troms*: UiT The Arctic University of Norway.
- UIO. (2019). *Solstråling*. Tilgjengelig fra: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/s/solstraaling.html> (lest 25.02.2019).
- Zhang, H., Cao, Y., Zhang, Y. & Terzija, V. (2018). Quantitative synergy assessment of regional wind-solar energy resources based on MERRA reanalysis data. *Applied Energy*, 216: 172-182. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.02.094.
- Zhou, W., Lou, C., Li, Z., Lu, L. & Yang, H. (2010). Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems. *Applied Energy*, 87 (2): 380-389. doi: 10.1016/j.apenergy.2009.08.012.

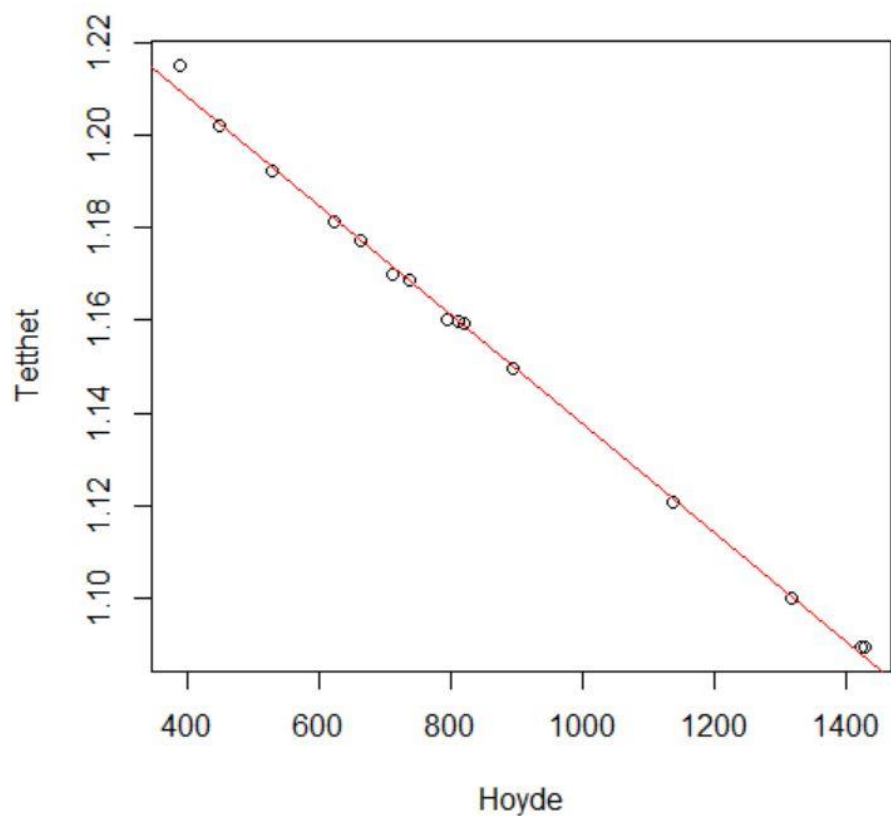
7. Vedlegg

I figur 7.1 vises det hvordan gjennomsnittlig vindenergitetthet med enten V1, V2 eller V3 varierer med høyden. Se metodedelen for nærmere beskrivelse av V1, V2 og V3. Det ser ut til å være sammenheng mellom vindenergitetthet og høyde. V1 gir mest nøyaktige beregninger fordi det er beregnet for hver time. V3 avviker en del fra V1, og vil være lite egnet til å si noe om vindenergitettheten.



Figur 7.1: Illustrasjon av hvordan vindenergitetthet varierer med høyden. Tre forskjellige grafer illustrerer hvordan vindenergitetthet beregnet med forskjellige lufttetthet, enten med lufttetthet for hver time, gjennomsnittlig eller konstant tilsvarende havnivå (1,225 kg/m³).

I figur 7.2 vises regresjonslinje med alle 15 punkter, inkludert outlier. Punktet med den laveste høyden ligger tydelig lenger unna linjen enn alle de andre punktene.



Figur 7.2: Regresjonslinje for alle 15 punktene. (inkludert outlier).

I figur 7.3 vises summeringsdata for regresjonsanalysen, med outlier inkludert. Det er en tydelig lineær sammenheng også med outlieren. Koeffisientene som ble brukt til å anslå lufttetthet er noe forskjellige fra analysene uten outlier, men det utgjør likevel ikke mye.

```

Call:
lm(formula = Tetthet ~ Hoyde, data = df)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.0017383 -0.0009548 -0.0003355  0.0000209  0.0054170

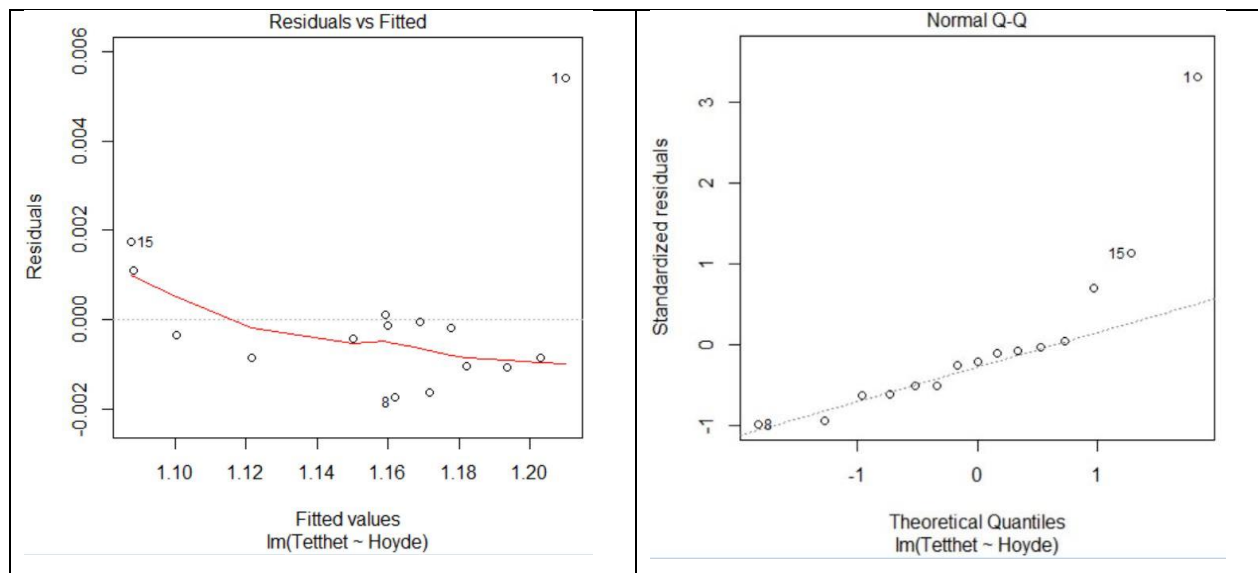
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.255e+00  1.323e-03  948.96  <2e-16 ***
Hoyde       -1.176e-04  1.459e-06  -80.59  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

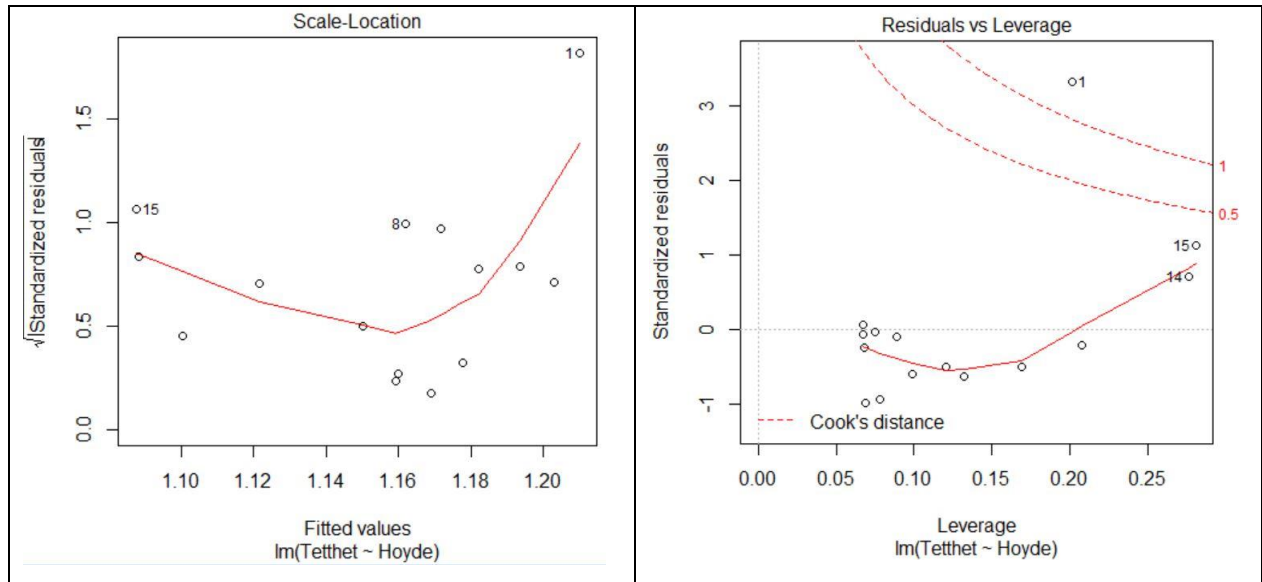
Residual standard error: 0.001827 on 13 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.998,    Adjusted R-squared:  0.9978
F-statistic: 6495 on 1 and 13 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

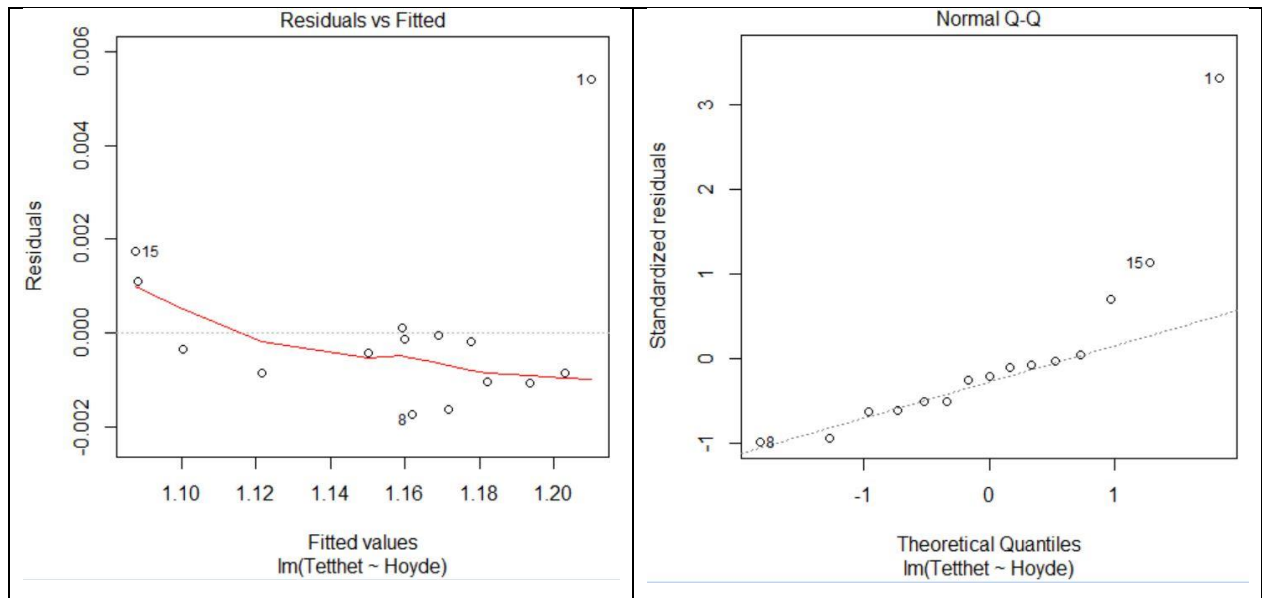
Figur 7.3: Summeringsdata med alle 15 punktene (inkludert outlier).

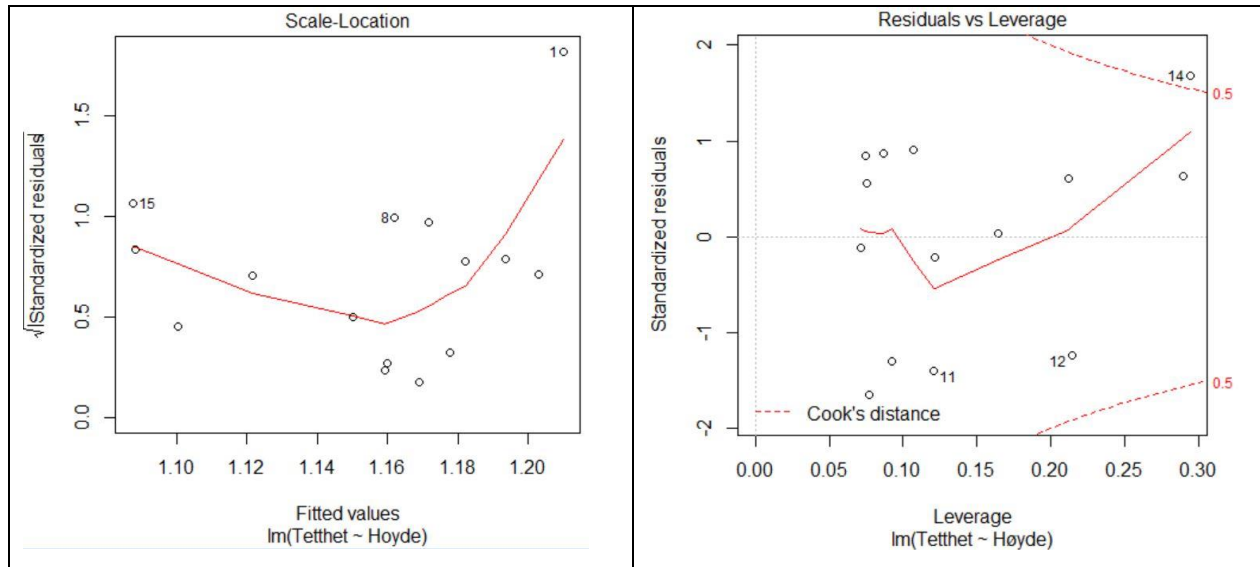
I figur 7.4 vises residualdata med outlier inkludert. Alle figurene viser at punkt nr. 1, som er outlieren, skiller seg tydelig fra resten av punktene.





Figur 7.4: Residualanalyse med alle 15 punktene (inkludert outlier).





Figur 7.5: Residualanalyse med alle 14 punktene der outlieren er ekskludert.

Viktigste matlab syntaxer:

Alle matrisene som ble sendt fra Kjeller Vindteknikk var i 3D. Matrisene var i størrelsen 40x60x341856. X verdien er enten matriser for vind eller sol. I funksjonene gjelder x1 for matriser med vinddata, mens x2 gjelder for matriser med soldata.

% RCOV for 3D matrise

```
function y = RCoV(x)
y = std(x,[],3)./mean(x,3);
disp(y);
end
```

% IQR for 3D matrise

```
Iqr(x,3);
```

% Tilgjengelighet for vind, 3D matrise

```
function y = Tilgjengelighetvind(x)
y = sum(x>=250,3)/341856*100;
disp(y);
end
```

```
% Tilgjengelighet for sol, 3D matrise
```

```
function y = Tilgjengelighetsol(x)  
y = sum(x>=170,3)/341856*100;  
disp(y);  
end
```

```
% Vind komplementerer sol, 3D
```

```
function y = VKS(x1,x2)  
y = sum(x1>250 & x2<=170,3)/341856*100;  
disp(y);  
end
```

```
% Sol komplementerer vind, 3D
```

```
function y = SCW3d(x1,x2)  
y = sum(x1<=250 & x2>170,3)/341856*100;  
disp(y);  
end
```

```
% Vind og sol synergi, 3D
```

```
function y = WSS3d(x1,x2)  
y = sum(xor(x1>250,x2>170),3)/341856*100;  
disp(y);  
end
```



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway