



# Solformørkelser og energiproduktion

## Forfatterne



Bent Hansen Sass,  
chefkonsulent ved DMI  
bhs@dmi.dk



Kristian Pagh Nielsen,  
Fysiker, ph.d., DMI  
kpn@dmi.dk



Claus Petersen,  
seniorforsker, DMI  
cp@dmi.dk



Niels Woetmann Nielsen,  
associeret lektor,  
Københavns Universitet  
nwn@dmi.dk



Lasse Diness Borup,  
modeludvikler ved  
Energinet.dk  
LDB@energinet.dk

Under solformørkelsen den 20. marts 2015 faldt energiproduktionen fra sol og vind – både i Danmark og i andre dele af Europa. Jo mere vedvarende energi, der er installeret i elsystemet, jo vigtigere er det at kunne forudsige effekterne af en solformørkelse. Det klarer vejrmodellerne heldigvis godt.

For få årtier siden var det ikke interessant at tale om ændringer i den vedvarende energiproduktion i relation til en solformørkelse. I dag er situation anderledes, fordi der de seneste 10 -20 år er installeret så meget vedvarende energi fra sol og vind, at eventuelle pludselige ændringer i de meteorologiske forhold kan ændre balancen i el-systemet.

I Danmark er *Energinet.dk* ansvarlig for at opretholde denne balance. Ubalancer håndteres primært i et fælles nordisk elmarked, som kaldes regulerkraftmarkedet (se boks).

Forudsigelser af energi fra sol og vind i vejrmodeller, bl.a. fra DMI, anvendes i daglige procedurer for reguleringer af ubalance i el-systemet. Spørgsmålet er så, om modellerne kan forudsige de meteorologiske effekter af en solformørkelse med tilstrækkelig præcision og dermed forudsige faldet i energiproduktion fra vedvarende energikilder. Det har vi ved DMI undersøgt ved at studere solformørkelsen den 20. marts 2015 og udføre to prognoser for vejrudviklingen denne dag. Den ene prognose simule-

rer månens blokering af sollyset, mens den anden er en normal vejrprognose. Resultaterne har vi sammenlignet med dels teoretiske overvejelser, dels med de konkrete målinger af temperatur og vind samt opgørelser af den løbende energiproduktion fra vedvarende energikilder.

## Dansk vedvarende energi under solformørkelsen

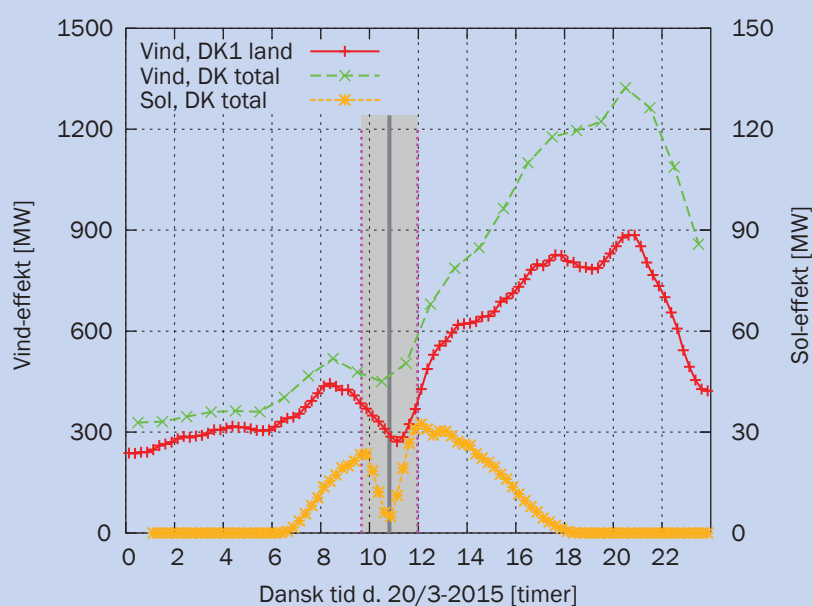
Opgørelser fra Energinet.dk for den løbende elproduktion fra vind og sol fra den 20. marts viser, at både elproduktionen fra vind og sol nåede lokale minima under solformørkelsen. Elproduktionen fra sol faldt ikke helt til 0 ved solformørkelsens kulmination, fordi kun 85 % af solskiven var dækket, da formørkelsen var på sit højeste i Danmark. Hvad der sikkert er mere overraskende for mange er, at vindenergiproduktionen også faldt under formørkelsen. Det gives der nedenfor en forklaring på. Faldet var på mere end 150 MW for vindmølleproduktionen over land vest for Storebælt, hvilket var mere end 5 gange den samlede energiproduktion fra solen på sit højeste niveau kl. ca. 12.

## Fald i energiproduktionen

Figuren viser opgørelser fra Energinet.dk for den løbende elproduktion fra vind og sol den 20. marts 2015, hvor der var solformørkelse. Den grønne kurve viser den totale vindproduktion på dansk område (dvs. inklusive havmølleparker), mens den røde kurve viser produktionen fra landvindmøller vest for Storebælt. Bidrag fra solanlæg vises med den gule kurve. Bemærk, at skalaen for solenergiproduktion er en faktor 10 forskellig fra den tilsvarende for vindenergi. Det betyder, at produktionen fra solenergi kl. 12 kun er ca. 5 % af den samlede produktion fra vindmøllerne. De stiplede violette linjer viser start- og sluttid for solformørkelsen i Danmark (ca. kl. 9:40 og ca. kl. 12:00). Den mørke linje repræsenterer kulminationen af solformørkelsen, hvor ca. 85 % af solskiven i Danmark var dækket af månen.

← Foto af solformørkelsen i Danmark, marts 2015. Desværre var dagen præget af mange skyer, men indimellem var der kig til solen.

Foto: F. Baun



Det samlede relative fald for dansk område fra vindmølleproduktion var noget mindre. Det kan hænge sammen med, at den samlede vindmølleproduktion også omfatter havmølleparker. Vindenergiproduktionen over havet aftog ikke under solformørkelsen. Studerer man kurven over produktionen fra vindmøllerne, ser man, at produktionen begynder at aftage lidt før solformørkelsen. Andre meteorologiske forhold kan spille ind som forklaring på dette. Efter solformørkelsens afslutning kl. ca. 12 aftog produktionen fra Solen, mens produktionen fra vind steg. Det sidste hænger sammen med, at vindhastigheden over Danmark som følge af den almindelige vejrudvikling tiltog i løbet af dagen.

### Solformørkelsens effekt på vind og temperatur

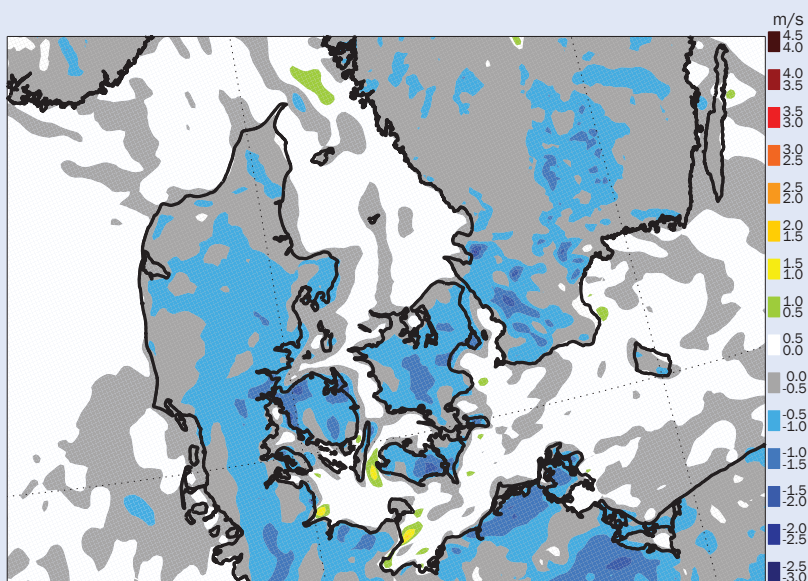
Faldet i solindstrålingen mellem kl. ca. 9:40 og 10:50 fører til en ændret energibalance ved jordoverfladen. Denne situation kan sammenlignes med solopvarmning, der aftager når det bliver aften. Ved solformørkelse sker processen blot hurtigere. Effekten er den samme: Temperaturen falder i den nederste del af atmosfæren. Den vertikale opblanding af luft i atmosfæren dæmpes, når der sker en afkøling tæt ved jorden i forhold til højere oppe. Derfor vil man teoretisk set forvente, at den friktion, som virker på strømningen tæt ved jordoverfladen, fordeles på et tyndere lag af luft. Som konsekvens bliver virkningen af friktionen mere effektiv og får vinden tæt ved jorden til at aftage og dreje til venstre. Sidstnævnte effekt optræder på

den nordlige halvkugle på grund af en ændret balance mellem friktionen og luftens acceleration i forbindelse med horisontale trykforskelle i atmosfæren samt acceleration som følge af bevægelse i forhold til jordens rotation. Sidstnævnte kaldes for Coriolis-accelerationen.

Hvis vinden i den nederste del af atmosfæren aftager, kan man forvente en aftagende energiproduktion fra vindmøller (hvis vinden er under 15-20 m/s, hvor møllernes ydeevne bliver maksimal, hvilket var tilfældet den 20. marts). Et fald i vindmølleproduktionen er netop, hvad der ses i målingerne fra Energinet.dk. Temperaturen fra målinger i 2 meters højde fra DMI's stationsnet viser et typisk fald på en enkelt grad. Vejtemperaturer faldt med op til ca. 3 grader. Over havet er temperaturændringerne ved overfladen små under solformørkelsen. Det skyldes, at Solens energi fordeles ned igennem det gennemsigtige vand og ikke kun afsættes i overfladen. Derfor sker der ikke nødvendigvis et fald i vindenergiproduktionen uden for landområderne.

### Hvad fortæller vejrmodellerne?

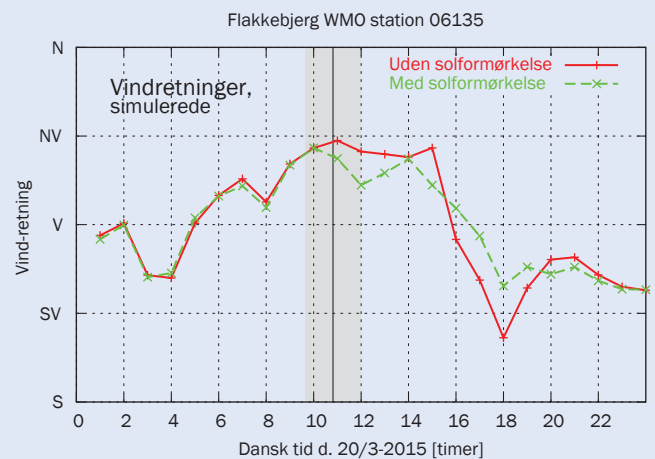
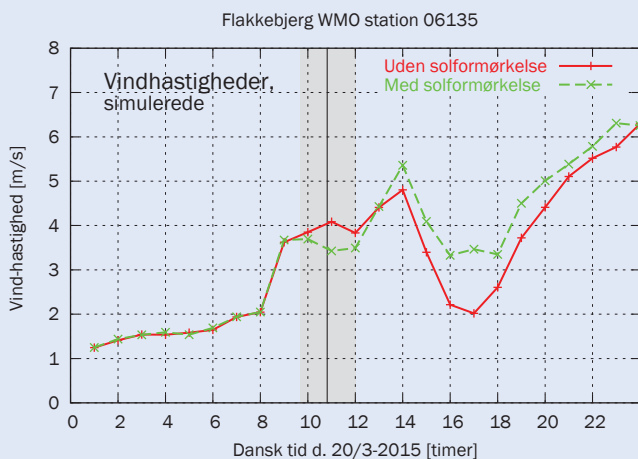
For at undersøge effekten af solformørkelsen på vinden yderligere har vi som nævnt anvendt en operationel vejrmodel til retrospektivt at udføre to forskellige simuleringer (prognoser). Den ene prognose har ikke indbygget en solformørkelse, mens den anden simulering har indbygget, at solskiven gradvis til-dækkes op til 85 % fra kl. 9:40 til kl. 10:50 og igen af-dækkes gradvis i tiden frem til kl. 12.



## Vind under solformørkelsen

På kortet er vist forskellen i vindens størrelse (fart) mellem en vejrprognose som gradvis ændrer solindstrålingen (85 % af solskiven dækkes midt i perioden for solformørkelsen den 20. marts) og en normal vejrprognose. Resultaterne viser en lavere vind over landområderne på typisk 1 m/s, med lokal maksimum op til 2 m/s.

Kurverne nederst viser en simulering af vindens størrelse og retning ved Flakkebjerg syd for Slagelse. De røde kurver er uden solformørkelse, mens der for de grønne kurver er indregnet effekten af solformørkelsen.



## Regulerkraftmarkedet og solformørkelse

Alle aktører på elmarkedet kan købe og sælge strøm indbyrdes indtil en time før en given driftstime. Derefter er det kun muligt at handle på det såkaldte regulerkraftmarked. Dette er et fælles marked, hvor alle aktører kan tilbyde at skrue op eller ned for deres produktion eller forbrug. Det er dog kun de nationale systemoperatører, der kan handle på dette marked. Systemoperatørerne beregner løbende, om el-systemet vil være i over- eller underskud den kommende time og accepterer på den baggrund de billigste bud fra aktørerne.

Det er sjældent muligt at handle sig fuldstændig i balance i regulerkraftmarkedet. Da elektricitet skal bruges i samme sekund, det produceres, suppleres dette marked med hurtige automatiske reguleringer. Derfor har systemoperatørerne mulighed for, i driftstimen, at justere på dedikerede kraftværker, typisk til en dårligere pris end på regulerkraftmarkedet. Dette sker enten gennem en automatisk regulator, der løbende måler den aktuelle ubalance eller direkte ude ved

produktionsanlægget ved at måle, om frekvensen er over eller under 50 Hz.

Reglerne for, hvor meget reserve Danmark skal have til rådighed til håndtering af ubalancer, aftales i det fælles europæiske netværk ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity). ENTSO-E vurderede de mulige konsekvenser af solformørkelsen den 20. marts 2015 i god tid forinden. Forud for solformørkelsen var der også en del skrivelser i medierne om en mulig stor udfordring ("stress-test") af det europæiske elnet. I Centraleuropa, særligt i Tyskland, spiller solenergi en større rolle end i Danmark. Det fremgår af officielle tyske opgørelser, at der i Tyskland i februar 2015 var installeret ca. 36.000 MW – det svarer til ca. 80 kraftværker. En væsentlig del kunne potentielt set under solformørkelsen falde ud af systemet i løbet af en times tid. Det viste sig dog, at det europæiske elnet klarede sig udmærket gennem solformørkelsen.

Resultaterne viser en lavere vind over landområderne i 10 meters højde på typisk 1 m/s i simuleringen med solformørkelse, nogle steder op til 2 m/s lavere. En sammenligning af de to simuleringer for en position svarende til landbrugsstation Flakkebjerg på Sjælland viser, at vindens hastighed og retning er næsten identiske frem til kl. ca. 9. Herefter er der en periode med aftagende vind (under 1 m/s) og en vinddrejning på op til ca. 15 grader mod vest. Efter solformørkelsen optræder der en periode med kraftigere vind, der drejer mod højre i simuleringen med indbygget solformørkelse. I aftentimerne bliver simuleringerne igen næsten ens.

De simulerede ændringer i kørslen med indbygget solformørkelse er i overensstemmelse med de teoretiske overvejelser omkring vinden samt målinger af den ændrede energiproduktion. Også ændringer i observeret vind fra 10 m højde ser ud til at understøtte resultatet af modelsimuleringerne.

### Erfaringer fra andre solformørkelser

Det er naturligt at spørge, om der findes andre undersøgelser af ændringer i temperatur og vind under en solformørkelse. Svaret er ja. Amerikansen H. Clayton skrev allerede i 1901 om ændringer i temperatur og vind, som han observerede under en solformørkelse i Amerika d. 28. maj 1900. Hans

studie omtales i en videnskabelig artikel af Gray og Harrison fra 2012, der ligeledes beskriver et studie af temperatur- og vindændringer i England under den sidste totale solformørkelse, der ramte Europa i 1999. Gray og Harrison anvendte i deres studie et tæt net af vind- og temperaturobservationer d. 11. august 1999 fra et område omkring Reading i det sydlige England. Observationerne blev sammenlignet med en finmasket modelforudsigelse udført med vejrmodellen fra det engelske meteorologiske institut. Denne prognose havde ikke indbygget en simulering af solformørkelsen. Sammenligningen med målingerne fra stationsnettet førte kvalitativt og til dels kvantitativt til det samme resultat som DMI's aktuelle undersøgelse: De når frem til en karakteristisk afkøling på ca. 1 °C ved formørkelsen, et fald i vindens størrelse på ca. 0,7 m/s og en vinddrejning på ca. 17 ° i forbindelse med solformørkelsen.

Den næste store solformørkelse i Europa vil finde sted den 12. august 2026, og den vil være total i Spanien og partiel i resten af Europa. Til den tid forventes installeret væsentlig mere vedvarende energi fra sol og vind. Men det europæiske samarbejde inden for regulering af elnettet klarer formentlig udfordringen, bl.a. fordi meteorologiske modeller kan forudsige de midlertidige ændringer i energiproduktionen fra sol og vind. ■

**Kilder og videre læsning**  
[www.platts.com/latest-news/electric-power/london/german-power-price-for-eclipse-hour-up-63-spot-26043031](http://www.platts.com/latest-news/electric-power/london/german-power-price-for-eclipse-hour-up-63-spot-26043031)

<http://m.motherjones.com/environment/2015/03/solar-eclipse-germany-power>

<http://planetsave.com/2015/03/21/how-europes-energy-grid-handled-the-3-20-2015-solar-eclipse/>

Holton, James R., 2004: An introduction to dynamic meteorology, Elsevier. [www.hirlam.org](http://www.hirlam.org)

Eerola, K. 2013: Twenty-one years of verification from the HIRLAM NWP system. *Wea. Forecasting* 28, 270-285. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/WAF-D-12-00068.1>

SL Gray and RG Harrison (2012): Diagnosing eclipse-induced wind changes. *Proc. R. Soc. A.* doi: 10.1098/rspa.2012.0007.