

## Nasjonal ramme for vindkraft

---

Temarapport om klimaavtrykk og livssyklusanalyser

*Jon Krogvold*



# Rapport, bokmål nr 17-2019

## Nasjonal ramme for vindkraft

**Utgitt av:** Norges vassdrags- og energidirektorat  
**Redaktør:** Erlend Bjerkestrand  
**Forfatter:** Jon Krogvold

**Trykk:** NVEs hustrykkeri  
**ISBN:** 978-82-410-1841-1  
**ISSN:** 1501-2832

**Sammendrag:** I denne rapporten går vi gjennom klimaavtrykk og livssyklusanalyser for vindkraft.

**Emneord:** Nasjonal ramme, klima, LCA, klimaavtrykk, energiregnskap, vindkraft, klimagassutslipp

Norges vassdrags- og energidirektorat  
Middelthunsgate 29  
Postboks 5091 Majorstua  
0301 OSLO

Telefon: 22 95 95 95  
Epost: [nve@nve.no](mailto:nve@nve.no)  
Internett: [www.nve.no](http://www.nve.no)

1.4.2019

# Innhold

Forord .....	2
Sammendrag .....	3
1 Innledning .....	4
2 Klimaregnskapet til vindkraft i et livssyklusperspektiv .....	4
3 Drivere for klimagassutslipp fra vindkraft.....	6
4 Energiregnskapet til vindkraft i et livssyklusperspektiv .....	7
5 Miljøavtrykket til vindkraft i et livssyklusperspektiv .....	7
6 Påvirker vindkraft lokalklima og værssystemer? .....	8
7 Referanser .....	9

# Forord

Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) har fått i oppdrag av Olje- og energidepartementet (OED) å lage et forslag til en nasjonal ramme for vindkraft på land.

Den nasjonale rammen skal bestå av:

- Et oppdatert kunnskapsgrunnlag om virkninger for miljø og samfunn
- Kart over de mest egnede områdene for vindkraft

I denne rapporten presenterer vi en gjennomgang av litteratur om klimaavtrykk og livssyklusanalyser. Andre rapporter og mer informasjon om nasjonal ramme for vindkraft finnes på [www.nve.no](http://www.nve.no).

Oslo, april 2019



Rune Flatby  
direktør



Erlend Bjerkestrand  
prosjektleder

# Sammendrag

En livssyklusanalyse (LCA) er en beregning av miljø- eller klimapåvirkning fra hele livssyklusen til f.eks. en vindturbin. Livssyklusanalyser er viktig for å få kunnskap om det totale miljø- og klimaavtrykket til vindkraft. I livssyklusanalysen inngår avtrykket fra produksjon av alle komponenter, transport, installasjon, vedlikehold, nedleggelse og resirkulering. I arbeidet med denne rapporten har vi gjennomgått LCA-studier av vindkraft. I denne rapporten tar vi for oss vi enhetene gram CO<sub>2</sub>-utslipp per produserte kWh, energiregnskap/tilbakebetalingstid og miljøavtrykk fra vindkraftverk.

Studiene viser at klimaavtrykket til vindkraft i et livssyklusperspektiv er på mellom 3 - 46 g CO<sub>2</sub>/kWh. Til sammenligning er klimaavtrykket til kullkraft og gasskraft på henholdsvis ca. 1000 g CO<sub>2</sub>/kWh og 500 g CO<sub>2</sub>/kWh, avhengig av effektiviteten på kraftverkene. Kildene til utslipp fra vindkraftverk kommer hovedsakelig fra transporten av turbinene og fra produksjon av betong til fundamentering. Utslipp av klimagasser relatert til arealbruksendringer og bearbeiding av jordsmonn i forbindelse med anleggsarbeid avhenger av gjenbruk av jordmasser, lokalklima, hva slags jordtype som bearbeides og hvordan bearbeidingen gjøres.

Å produsere komponentene som inngår i en vindturbin krever energi. Tiden det tar for en vindturbin å produsere den samme mengden energi som det kreves for å produsere turbinen, er ifølge gjennomgåtte studier mellom 3-7 måneder. På grunn av teknologiutviklingen, herunder installert effekt, lengre rotorblader og bedre styringssystemer, er det sannsynlig at energitilbakebetalingstiden til dagens vindturbiner ikke vil overstige 3-5 måneder.

I et livssyklusperspektiv kan ulike energiteknologier påvirke miljøet gjennom blant annet forsuring, eutrofiering, økotoksikologi og utslipp av ozonpåvirkende gasser. De gjennomgåtte studiene viser at miljøpåvirkningen fra vindkraft er betydelig lavere sammenlignet med kull- og gasskraft.

# 1 Innledning

En livssyklusanalyse (LCA) er en beregning av miljø- eller klimapåvirkning fra hele livssyklusen, vugge til grav, til f.eks. en vindturbin. Livssyklusanalyser er viktig for å få kunnskap om det totale miljø- og klimaavtrykket til vindkraft. I livssyklusanalysen inngår avtrykket fra produksjon av alle komponenter, transport, installasjon, vedlikehold, nedleggelse og resirkulering. Analyser kan gjøres for ulike enheter, hvor den vanligste enheten for energi er gram CO<sub>2</sub>-utslipp per produserte kWh. I denne rapporten gjennomgår vi enhetene gram CO<sub>2</sub>-utslipp per produserte kWh, energiregnskap/tilbakebetalingstid og miljøavtrykk.

## 2 Klimaregnskapet til vindkraft i et livssyklusperspektiv

Klimaregnskapet til ulike energiteknologier defineres her som klimagassutslipp per produserte kWh gjennom et kraftverk sin livssyklus. Den vanligste måten å fremstille dette på er utslipp i et livssyklusperspektiv dividert på produksjon i et livssyklusperspektiv. Dette kalles også for utslippsfaktoren til ulike energiteknologier. For vindkraft vil det ikke oppstå klimagassutslipp ved kraftproduksjon. Utslipp relatert til vindkraft vil derfor komme fra bruk av fossil kraft til å produsere turbinkomponenter eller i tilknytning til anleggsarbeid ved bygging av vindkraftverket og lignende.

En vindturbiners energiproduksjon har blitt fordoblet siden 2012<sup>1</sup>. Samtidig har ikke utslipp eller energibruk relatert til produksjon av selve turbinen økt nevneverdig. Derfor får moderne turbiner en lavere utslippsfaktor og en kortere energitilbakebetalingstid enn eldre turbiner. Den gjennomgåtte litteraturen er fra en periode mellom 2005 til 2015. Fordi dagens vindturbiner produserer langt mer energi enn i 2015, forutsetter NVE at den gjennomgåtte litteraturen presenterer for høy utslippsfaktor sammenlignet med dagens turbiner i Norge.

Den gjennomgåtte litteraturen er enstemmig i resultatene der vindkraft, sammenlignet med andre kraftteknologier, kommer godt ut som en teknologi med et lavt klimaavtrykk sett i et livssyklusperspektiv. En litteraturstudie gjennomført av NTNU i 2013 (Arvesen, 2013) fant at gjennomsnittlig CO<sub>2</sub>-utslipp lå på 8-20 g CO<sub>2</sub> per produserte kWh.

Hondo (2005) gjorde en livssyklusanalyse av klimagassutslipp for produksjon av 1 kWh fra alle energiteknologier i Japan, henholdsvis kullkraft, oljekraft, LNG, kjernekraft, vannkraft, geotermisk kraft, vindkraft og solkraft. Livssyklusanalysens resultater viser at vindkraft hadde lavt utslipp per produserte kWh sammenlignet med andre teknologier, ettersom vindkraft ikke har noen utslipp ved selve kraftproduksjonen.

---

<sup>1</sup> Se mer om teknologiutvikling i hovedrapport Nasjonal Ramme for vindkraft

**Tabell 1 Sammenligning av litteratur med beregning av utslipp av gram CO<sub>2</sub>-ekvivalenter per produserte kWh for ulike energiteknologier.**

Teknologi	Utslipp av klimagasser (gram CO <sub>2</sub> -eq/kWh)	Kilde
Kullkraft	975,5	Hondo (2005)
	1000	Arvesen (2013)
	750-1000	Asdrubali m.fl. (2015)
Oljekraft	742	Hondo (2005)
Gasskraft	519-608	Hondo (2005)
	500-600	Arvesen (2013)
	350-400	Asdrubali m.fl. (2015)
Kullkraft med CCS	180-220	Arvesen (2013)
	255-442	Jacobsen (2009)
Gasskraft med CCS	140-160	Arvesen (2013)
Kjernekraft	22-24	Hondo (2005)
	8-45	Arvesen (2013)
	9-17	Jacobsen (2009)
Vannkraft	11	Hondo (2005)
	4-7	Arvesen (2013)
	17-22	Jacobsen (2009)
Geotermisk kraft	15	Hondo (2005)
Solkraft	26-53	Hondo (2005)
	29-80	Arvesen (2013)
	19-59	Jacobsen (2009)
Vindkraft	20-30	Hondo (2005)
	8-20	Arvesen (2013)
	3-7	Jacobsen (2009)
	6-46	Asdrubali m.fl. (2015)

Studiene viser at utslippene per kWh fra fossil kraft ikke har endret seg vesentlig de siste årene. Fornybar energi har imidlertid en relativt stor variasjon i utslipp per kWh. Årsaken til den store variasjonen for vindkraft ligger i variasjon i hvilke vindturbiner og størrelsen på vindkraftverkene som er studert. Asdrubali m.fl. (2015) gjorde en litteraturstudie av 50 LCA-analyser som undersøkte klimagassutslipp per kWh fra fornybare energikilder. Litteraturen varierer i resultatene på utslipp per kWh for vindkraft mellom ytterpunktene 6,2 - 46,0 g CO<sub>2</sub>/kWh, hvorav gjennomsnittet fra den gjennomgåtte litteraturen viste 9,4 g CO<sub>2</sub>/kWh. Variasjonene avhenger av effekt på turbinene og størrelsen på vindkraftverket. Desto høyere installert effekt på turbinene og desto større vindkraftverk, desto mindre utslipp per produserte kWh fra hele vindkraftverket. Ifølge Asdrubali m.fl. (2015) er utslippene fra gasskraft og kullkraft henholdsvis 350-400 g CO<sub>2</sub>/kWh og 750-1000 g CO<sub>2</sub>/kWh.

Nyere analyser av Xu m.fl. (2018) sammenlignet utslipp fra vindkraftproduksjon og fossil kraftproduksjon i et livssyklusperspektiv. Resultatene viser at per kWh produsert har vindkraft et klimagassutslipp som utgjør 0,8 % og 1,2 % av utslippene fra henholdsvis kullkraft- og gasskraftproduksjon.

Av teknologiene som i dag er kommersielt konkurransedyktige, viser den gjennomgåtte litteraturen at vindkraft sammen med vannkraft er de teknologiene som bidrar til minst CO<sub>2</sub>-utslipp per produserte kWh.

### 3 Drivere for klimagassutslipp fra vindkraft

Hovedsakelig finner Martínez m.fl. (2009), Hondo (2005) og Asdrubali m.fl. (2015) at det er produksjon av betongen til fundamentene som har den største klimapåvirkningen av alle faktorene i livssyklusanalysen. Gravitasjonsfundamenter til turbiner, som krever store mengder betong, brukes der det ikke er solid fjell å forankre turbinen i. Forankring i fjell krever langt mindre betong, i størrelsesorden 10 % av det som brukes ved gravitasjonsfundamentering. Det samlede klimaavtrykket til en turbin med en slik fundamenteringsløsning, er dermed også betydelig lavere. I Norge er de aller fleste turbiner forankret i fjell. Klimaavtrykket for en gjennomsnittlig turbin i Norge vil derfor samlet sett være langt lavere enn for lokaliteter der gravitasjonsfundamenter brukes, ettersom fundamentene står for en stor del av utslippene ved bygging av vindturbiner.

Av andre klimapåvirkninger fra vindkraftverk viser resultater at transporten av selve turbinkomponentene også bidrar til en stor andel av de totale klimagassutslippene i livssyklusanalysen av en vindturbin.

En kilde til klimagassutslipp som ikke nevnes i livssyklusanalysene, er utslipp relatert til arealbruksendringer og bearbeiding av jordsmonn. Utbygging av vindkraft medfører arealbruksendringer i form av blant annet anleggsveier og oppstillingsplasser ved turbinpunktene. Organisk jord lagrer store mengder karbon, og dersom dette bearbeides kan det oppstå utslipp av klimagasser. Bearbeiding av myr kan medføre frigjøring av metan og lystgass som har ligget lagret i det organiske materialet. Drenering av myr kan føre til at den biologiske nedbrytningsprosessen øker, og det vil dermed slippes ut mer CO<sub>2</sub>.

NVE er ikke kjent med at det er gjort undersøkelser av klimagassutslipp fra bearbeiding av jordsmonn i forbindelse med anleggsarbeid ved bygging av vindkraft. Statens Vegvesens metode for beregning av CO<sub>2</sub>-utslipp knyttet til arealbeslag ved vegbygging (Asplan Viak, 2015) er relevant også ved arealbeslag ved bygging av vindkraftverk. I metoden er det beregnet en utslippskoeffisient som beskriver kg CO<sub>2</sub>-utslipp per m<sup>2</sup> beslaglegning av ulike areal- eller naturtyper. Utslippskoeffisientene er listet i tabell 2.

**Tabell 2** Utslippskoeffisienter for ulike kategorier av skog, myr og dyrket mark (Asplan Viak, 2015)

Arealtyper	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	
	Biomasse	Jord
Skog - Lav bonitet	12,00	48,4
Skog - Middels bonitet	20,30	48,4
Skog - Høy bonitet	31,90	48,4
Myr		201,9
Jordbruksareal (inkl. inmarksbeite)		55,1

Metoden tilsier eksempelvis at dersom man bearbeider én kvadratmeter med skog med lav bonitet, vil det slippes ut totalt 60,4 kg CO<sub>2</sub>. Det finnes imidlertid en rekke forutsetninger som må legges til grunn ved beregning av en utslippskoeffisient for bearbeiding av arealtyper.



Utslippskoeffisientene i tabell 2 illustrerer et teoretisk scenario der *alt* lagret karbon som finnes i den bearbejdede kvadratmeteren, blir omdannet til CO<sub>2</sub> over tid. I realiteten vil jordmasser i forbindelse med anleggsarbeid som regel bli værende på anleggsområdet og gjenbrukes til bygging av vei og annen infrastruktur. Dermed vil mesteparten av karbonet bli bevart og utslippene vil være betydelig lavere enn utslippskoeffisientene tilsier. Utslipp av CO<sub>2</sub>-ekvivalenter ved bearbejding av jordsmonn vil også variere etter jordtype, klima og hvordan jordsmonnet bearbejdes.

Selv om et vindkraftverk kan ha et relativt stort planområde utgjør de *fysiske* inngrepene i størrelsesorden 2-4 prosent av vindkraftverkets totale planområde. Dette betyr at det fysiske arealinngrepet og dermed utslipp relatert til bearbejding av jordmasser ved utbygging av vindkraft, er relativt begrenset i forhold til planområdets størrelse. Samtidig er det ofte uaktuelt å bygge turbiner og anleggsveier over myrområder, og dette unngås i den grad det er mulig.

## 4 Energiregnskapet til vindkraft i et livssyklusperspektiv

Energiregnskapet til en vindturbin defineres som mengden energi som er brukt for å produsere en enhet energi. Alternativt kan man beregne tiden det tar for turbinen å produsere den energien som er brukt for å sette turbinen i drift.

Her er også resultatene fra den gjennomgåtte litteraturen relativt enstemmig om at vindkraft kommer godt ut som en energieffektiv teknologi sett i et livssyklusperspektiv. En litteraturstudie gjennomført av Arnesen (2013) fant at det kreves 0,06 kWh for å produsere 1 kWh med vindkraft.

Resultatene fra Arnesen m.fl. (2009) angir en gjennomsnittlig energitilbakebetalingstid på 3,2 måneder. En annen studie beregner tilbakebetalingstiden til å være 4,8 måneder, eller 2 % av 20 års produksjonstid (Martínez m.fl., 2009). Tremeac og Meunier (2009) hevder at energitilbakebetalingstiden for en 4,5 MW turbin er på 7 måneder. Dette vil si at turbinene som ble analysert i studiene brukte 3 måneder, 4,8 måneder og 7 måneder på å produsere tilsvarende mengde energi som ble brukt for å få turbinene i drift, i tillegg til energien som kreves for å resirkulere turbinene. På grunn av teknologiutviklingen, herunder installert effekt, lengre vinger og bedre styringssystemer, er det sannsynlig at energitilbakebetalingstiden til dagens turbiner ikke vil overstige 3-5 måneder.

## 5 Miljøavtrykket til vindkraft i et livssyklusperspektiv

I motsetning til klimaregnskapet som begrenser seg til å se på virkninger kun for klima som indikator, innebærer et miljøregnskap flere indikatorer. Dette kan eksempelvis innebære vannforbruk, bruk av sjeldne metaller, økotoksikologi eller utslipp av forsurende elementer som svovel. Summen av alle disse virkningene kan refereres til som miljøavtrykk. Typen miljøvirkninger ulike energiteknologier potensielt kan ha på flora og fauna, er ikke analysert i den gjennomgåtte litteraturen.

Resultatene fra Xu m.fl. (2018) sine analyser viser at vindkrafts miljøpåvirkning med hensyn til miljøindikatorer som forsuring, eutrofiering og økotoksikologi, er signifikant lavere sammenlignet med kull- og gasskraft. Asdrubali m.fl. (2015) viser i sine resultater at vindkraft også er den mest miljøvennlige teknologien, målt med hensyn til forsuring, eutrofiering, klimapåvirkning, utslipp av ozonpåvirkende gasser. På samme måte viser en livssyklusanalyse av energiteknologier og utslipp av NO<sub>x</sub>,- SO<sub>2</sub>, at vindkraft har minst utslipp av alle energiteknologier over en livssyklus (Sathaye m.fl., 2011).

I enkelte av komponentene som inngår i en vindturbin brukes sjeldne metaller og jordarter (REE<sup>2</sup>) som neodmium (Nd) og dysprosium (Dy) (Elshaki, A. & Graedel, T.E., 2014). Metallene brukes hovedsakelig i permanentmagneter som benyttes i direktdrevne turbiner.

Utvinning av sjeldne metaller medfører et miljøavtrykk. Enkelte forekomster av REE inneholder helsefarlige, radioaktive stoffer. I sørlige deler av Kina<sup>3</sup> har gruvedriften medført arealbeslag som videre har medført tap av økosystemer og biodiversitet. Gruvedriften produserer også avfall og det kreves mye vann ved utvinningen (Yang, X.J. m.fl., 2013).

## 6 Påvirker vindkraft lokalklima og værsystemer?

Vindkraftverk produserer kraft ved at turbinene omdanner kinetisk vindenergi til elektrisk energi. Oktober 2018 publiserte Miller, L & Keith, D (2018) en studie som konstaterte at omfattende vindkraftutbygging i USA vil kunne påvirke overflatetemperaturen rundt vindkraftverkene. Studien påpeker at det kan skje en temperaturøkning fordi vindkraft bremser vindhastigheten og påvirker temperatursjiktningene i troposfæren. Studien er imidlertid forbeholdt en rekke forutsetninger som gjør det vanskelig å overføre resultatene til norske forhold. Dette innebærer blant annet at det modellerte området dekker 1/3 av USA og at modelleringen legger til grunn 460 GW utbygd vindkraft<sup>4</sup>.

NVE har konferert meteorologisk institutt og bedt om en vurdering av om vindkraft av det omfang som kan forventes utbygd i Norge vil påvirke lokalklima og værsystemer. Meteorologisk institutt antar at vindkraftproduksjon i Norge har en minimal effekt på værsystemnivå, og at energiuttaket ved omdanningen fra kinetisk vindenergi til elektrisk energi dermed er ekstremt liten. For lokalklimatiske forhold vurderer Meteorologisk institutt at luftmassen bak turbinen blir mer turbulent. Utover umiddelbar nærhet til turbinene vil denne effekten også bli ekstremt liten på større nivå. Det er derfor svært usannsynlig at turbulensen vil påvirke lokalklimatiske forhold i noen større grad enn øvrige, naturlige variasjoner i lokalklimatiske forhold.

---

<sup>2</sup> REE står for Rear Earth Elements

<sup>3</sup> Kina utvinner mer enn 90 prosent av den globale etterspørsel etter REE.

<sup>4</sup> Til sammenligning var installert effekt av vindkraft i Norge om lag 1,7 GW i fjerde kvartal 2018.

## 7 Referanser

Arvesen, A (2013) *Understanding the Environmental Implications of Energy Transitions. A case study for wind power*. NTNU, Doctoral thesis.

Arvesen, A. & E. G. Hertwich. (2012). *Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16(8): 5994-6006

Asdrubali m.fl. (2015) *Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization*. Science direct, Energy reviews 42 s.1113-1122

Asplan Viak (2015) *Statens Vegvesens metode for beregning av CO<sub>2</sub>-utslipp knyttet til arealbeslag ved vegbygging*. Utgave 1, 30.11.2015.  
<https://d21dbafykfdck9.cloudfront.net/1518099797/sluttrapport-co2-arealbruksendring-2017.pdf>

Elshaki, A. & Graedel, T.E. (2014). *Dysprosium, the balance problem, and wind power technology*. Applied Energy, 136, 548 – 559.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.064>

Hondo, H. (2005) *Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case*. Science Direct, Energy 30 s.2042 - 2056

Jacobsen, M.Z. (2009) *Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security*. Energi and Environmental science, Issue 2.  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2009/ee/b809990c#!divAbstract>

Martínez m.fl. (2009) *Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine*. Science direct, Renewable Energy 34 (2009) s.667–673

Miller, L & Keith, D (2018) *Climate impact of Wind Power*. Science direct, Volume 2, Issue 12, Pages 2618-2632

Sathaye, J. m.fl. (2011). *Renewable Energy in the Context of Sustainable Energy*. In O. Edenhofer, R. P. Madruga, & Y. Sokona (Eds.), *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* (pp. 707-790). Cambridge, MA: Cambridge University Press.

Tremeac, B & Meunier, F. (2009) *Life cycle analysis of 4,5 MW and 250 W wind turbines*. Science Direct, Energy reviews 13 s.2104-2110

Xu, L. m.fl. (2018) *Life cycle assessment of onshore wind power systems in China*. Science Direct, Resources, Conservation & Recycling 132 (2018) s.361-368  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.014>

Yang, X.J. m.fl. (2013). *China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation*. Environmental Development, 8 (2013), s. 131 - 136



NVE

## Norges vassdrags- og energidirektorat

---

MIDDELTHUNSGATE 29  
POSTBOKS 5091 MAJORSTUEN  
0301 OSLO  
TELEFON: (+47) 22 95 95 95

[www.nve.no](http://www.nve.no)