

## POLICY BRIEF

### Energieffektiv elektrisitetsproduksjon

Analyse av energieffektiviteten til ulike former for elektrisitetsproduksjon i Norge ved hjelp av internasjonalt etablerte indikatorer



## Sammendrag av funn

Energiindikatorer kan brukes til å analysere energieffektiviteten av ulike former for energiomforming og elektrisitetsproduksjon. Ved en strategisk analyse av en framtidig utvikling av energiresurser vil det være interessant å vite "hvilke energiformer og –anlegg gir det mest fordelaktige forholdet mellom investert energi og ferdig produsert elektrisitet?".

Denne studien har analysert data fra en rekke norske og internasjonale energianlegg innenfor teknologiene vannkraft, vindkraft, bio-energi, gass og kull, og beregnet energi-effektiviteten av disse ved hjelp av indikatorene Energy Payback Ratio (EPR), Net Energy Ratio (NER) og Cumulative Energy Demand (CED).

Resultatene fra analysene viser at vannkraft har klart høyest energieffektivitet sammenlignet med de andre vurderte elektrisitetsteknologiene, deretter fulgt av vindkraft. Elektrisitet produsert fra bio-energi, gass og kull har generelt en mye lavere energi-effektivitet enn vannkraft og vindkraft. Dette er i samsvar med tidligere internasjonalt publiserte resultater. Videre er det interessant at opprustning og utvidelse av vannkraftanlegg gir har en svært høy energieffektivitet, spesielt målt gjennom EPR.

Det er viktig å være klar over at EPR-indikatoren har andre systemgrenser enn NER og CED. Valg av energiindikator kan derfor påvirke rangeringen av anlegg, både mellom anlegg av samme teknologi og mellom teknologier. Energiindikatorer inkluderer ikke faktorer slik som tap av biologisk mangfold, klimagassutslipp, økonomi eller kvalitet av den leverte elektrisiteten.

## Hvem står bak notatet?

Notatet er resultat av et samarbeidsprosjekt i forskningssenteret CEDREN, koordinert av SINTEF Energi med deltagelse fra Østfoldforskning og NTNU Institutt for Industriell økologi. Statkraft, Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) og Direktoratet for Naturforvaltning (DN) har vært aktive høringspartnere i prosjektet.

### Notatet er forfattet av

Tor Haakon Bakken – SINTEF Energi og CEDREN

Hanne Lerche Raadal – Østfoldforskning

Ingunn Saur Modahl – Østfoldforskning

Studien er gjennomført innenfor CEDREN, et av 11 forskningssentra for miljøvennlig energi (FME), opprettet av Forskningsrådet og finansiert av norsk energibransje og Norges forskningsråd. Prosjektet har mottatt finansiell støtte direkte fra Direktoratet for Naturforvaltning (DN) utover midlene allokert gjennom CEDREN.

### Viktige referanser for studien

- Edenhofer, O., Pichs, R., Madruga, Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., von Stechow, C.E., 2011. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Gagnon, L. Civilisation and energy payback. Energy Policy 36 (2008) 3317– 3322. 2008.
- Raadal, H.L., Modahl, I.S. & Bakken, T.H. (2012). Energy indicators for electricity production – Comparing technologies and the nature of the indicators Energy Payback Ratio (EPR), Net Energy Ratio (NER) and Cumulative Energy Demand (CED). Ostfold Research, OR 09.12, ISBN 978-82-7520-666-2/82-7520-666-9, May 2012.

## Hvorfor måle energieffektiviteten av elektrisitetsproduksjon?

I en strategisk vurdering av utvikling av energiresurser vil man vurdere ulike former for energiomforming og elektrisitetsproduksjon ved hjelp av et bredt sett av kriterier – kostnadene skal totalt sett være lavest mulig, den leverte energien av tilfredsstillende kvalitet og miljøkonsekvensene innenfor akseptable grenser. I et livsløpsperspektiv er det også interessant å vite hvor mye energi man er nødt til å investere for å kunne "høste" en bestemt energimengde fra investeringen. Eksempelvis vil bygging og drift av et energianlegg kreve en energiinvestering i produksjon av infrastruktur, transport av råmaterialer (byggevarer, metall, brensel, osv.) og selve energikilden (for eksempel kull) vil bruke energi og noe energi vil gå over til varme ved konvertering til elektrisitet. Energiindikatorer som inkluderer alle disse investeringene og "tapene" i et livsløpsperspektiv vil derfor danne grunnlag for å vurdere:

- Hvilke energiformer og – anlegg gir det mest fordelaktige forholdet mellom investert energi og ferdig produsert elektrisitet?

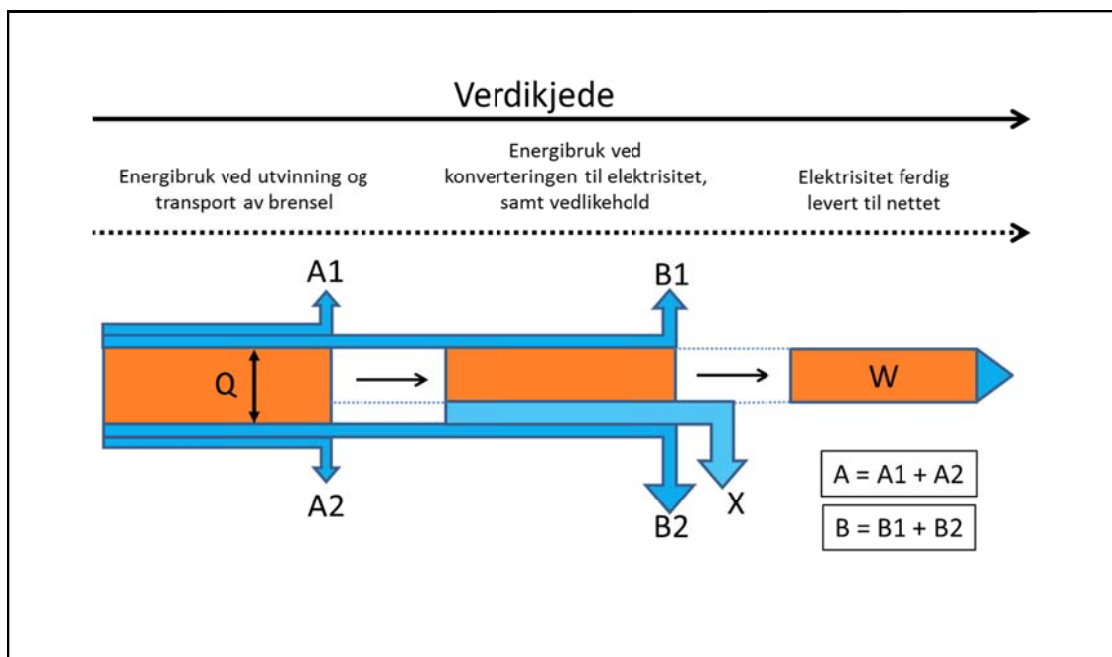
Denne studien har analysert energieffektiviteten av elektrisitetsproduksjon for en rekke energianlegg av ulike produksjonsteknologier ved hjelp av energiindikatorer. Resultatene fra studiet vil kunne danne grunnlag for en politisk og forvaltningsmessig prioritering av enkelte typer energiproduksjon gjennom et bredere sett av kriterier, herunder også energieffektivitet.

Det er for øvrig interessant å merke seg at beregnede EPR-verdier, som er en av 3 energiindikatorer anvendt i denne studien, også ble brukt for sammenligning av ulike former for elektrisitetsproduksjon i IPPC sin spesialrapport om fornybar energiproduksjon og tiltak mot klimaendringer (IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, 2011). Med bakgrunn i dette har vi valgt å fokusere utvalget av resultater på denne indikatoren. For en bredere og mer detaljert presentasjon av alle resultatene fra alle energiindikatorerne henviser vi til Raadal et al., 2012.

## Hva er en energiindikator?

En god indikator for energieffektivitet bør være enkel å forstå, robust og vise "hva de er tenkt til å vise", det vil si være i stand til å skille de energieffektive formene for elektrisitetsproduksjon fra de mindre effektive. Til denne studien er det valgt å benytte indikatorer som er veletablerte innenfor dette fagområdet, er vitenskapelig dokumenterte og på ulike måter belyser effektiviteten i utvinningen av energikilden/brenselet med iboende energi fram til og med konverteringen til elektrisitet. Indikatorerne som ble valgt ut i denne studien er presentert i tabell 1 og de ulike faktorene i formlene er forklart i prinsippskissen under. Det er i dette notatet beholdt den engelske terminologien da det ikke er skikkelig innarbeidede og dekkende norske begrep for disse indikatoren.

Figur 1 viser skjematisk og generelt livsløpet fra energikilde/brensel med et gitt iboende energiinnhold, via utvinning med en energiinvestering og –tap i utvinningsanlegg, og transport av brensel og andre råmaterialer til anlegg for konvertering til elektrisitet. For vann- og vindkraft vil det være begrensede energiinvesteringer ved utvinningsanlegg og transport av energikilden, da anlegg for konvertering til elektrisitet i større grad vil lokaliseres der råmaterialet finnes.



**Figur 1.** Prinsippskisse som sammen med tabell 1 viser hvilke faktorer som er med i de ulike indikatorene. Tapsleddene A1 og B1 representerer energiinvesteringer ved bygging av infrastruktur ved hhv. utvinningsanlegg og konverteringsanlegg, mens A2 representerer energibruk ved selve utvinningen, prosesseringen, samt nødvendig transport. B2 representerer energibruk ved vedlikehold i hele levetiden til konverteringsanlegget mens X er konverteringstapet ved konvertering fra energikilde/brensel til elektrisitet. W er ferdig levert elektrisitet til nettet, det vil si gjenværende energi fra den opprinnelige iboende energien (Q) i energikilden/brensel.

**Tabell 1.** Indikatorer for energieffektivitet ved elektrisitetsproduksjon, med matematisk formel og kort beskrivelse.

Indikator	Formel	Beskrivelse
Energy Payback Ratio (EPR)		Viser hvor mye elektrisitet som kommer ut i forhold til energiinvesteringer i infrastruktur, transport og vedlikehold, men inkluderer ikke konverteringstap. Høye verdier betyr høy energieffektivitet.
Net Energy Ratio (NER)		Viser det samme som EPR, men inkluderer også konverteringstap og kan følgelig skille på anlegg med høy og lav effektivitet i konverteringsleddet. Høye verdier betyr høy energieffektivitet.
Cumulative Energy Demand (CED)		Viser den inverse av NER og kan vise fordeling på livsløpsfaser og opprinnelsen til energien brukt i elektrisitetsproduksjonen. Merk at lave verdier betyr høy energieffektivitet.

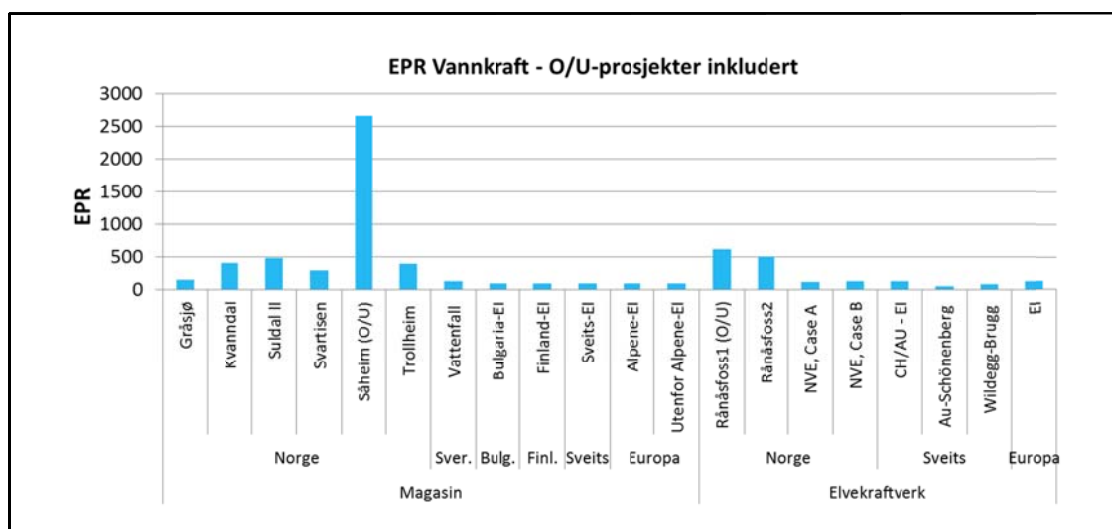
## Forutsetning for studien

Studien beregner energiindikatorer for elektrisitet fra en rekke anlegg og et bredt spekter av energiteknologier, herunder vannkraft, vindkraft, bio-energi og fossile kilder (gass og kull). Det er verdt å merke seg følgende forutsetninger for studien:

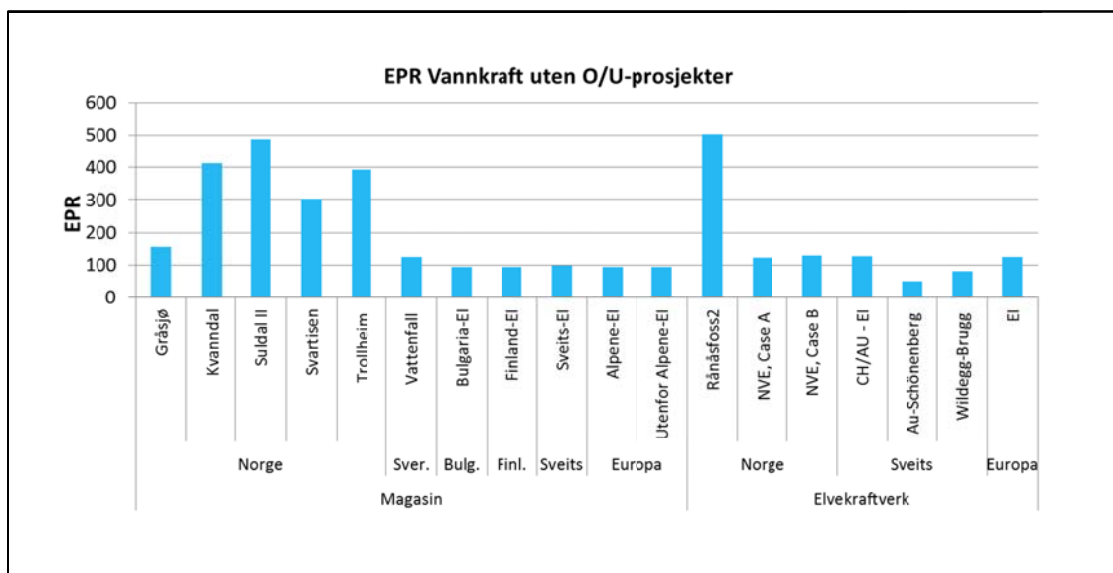
- Beregningene har elektrisitet som sluttprodukt for å etablere et ensartet grunnlag for sammenligning. Det presiseres at energikildene bio-energi og gass/kull også kan benyttes til å produsere varme som sluttprodukt, men dette er ikke analysert i denne studien.
- Beregningene inkluderer kun energiinvesteringer som skjer til og med konverteringsanlegget, og inkluderer ikke nett og andre ledd fram til sluttbruker med tilhørende energiinvesteringer og elektrisitetstap.
- Datagrunnlaget for studien er dels fra forfatterens egne analyser, dels data fra internasjonale databaser. Detaljer om datagrunnlaget kan derfor være ukjent for forfatterne og til en viss grad påvirke resultatene.
- Studien sier ikke noe om kvalitetene på den leverte elektrisiteten, slik som for eksempel regulerbarhet. Regulerbare kilder vil i et energisystem ha en større verdi enn ikke-regulerbare kilder.
- Indikatorene beskriver kun energieffektiviteten til de ulike anleggene og produksjonsformene, og inkluderer ikke andre miljøpåvirkninger som elektrisetsproduksjonen vil kunne medføre, som for eksempel tap av biologisk mangfold, tap av urørte områder og utslipp av klimagasser.

## Resultater

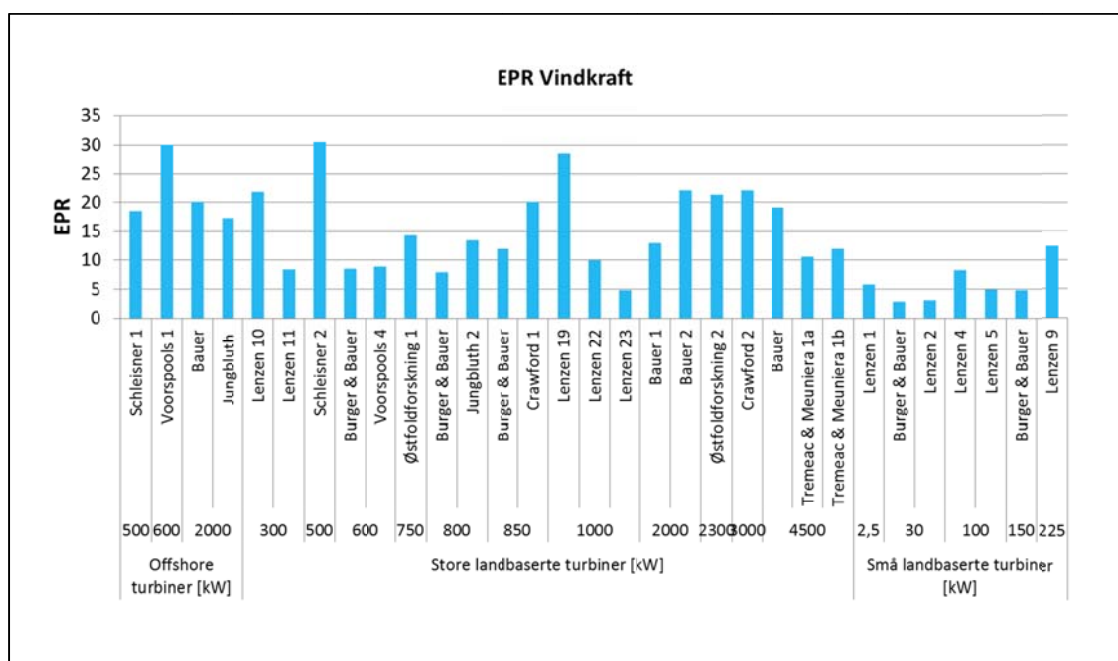
I det følgende er et utvalg av resultatene fra studien presentert, med en vektlegging av resultater som sammenligner energieffektivitet mellom ulike produksjonsformer. Resultatene er hentet fra rapporten (Raadal et al., 2012) og til en viss grad bearbeidet til dette policy-notatet.



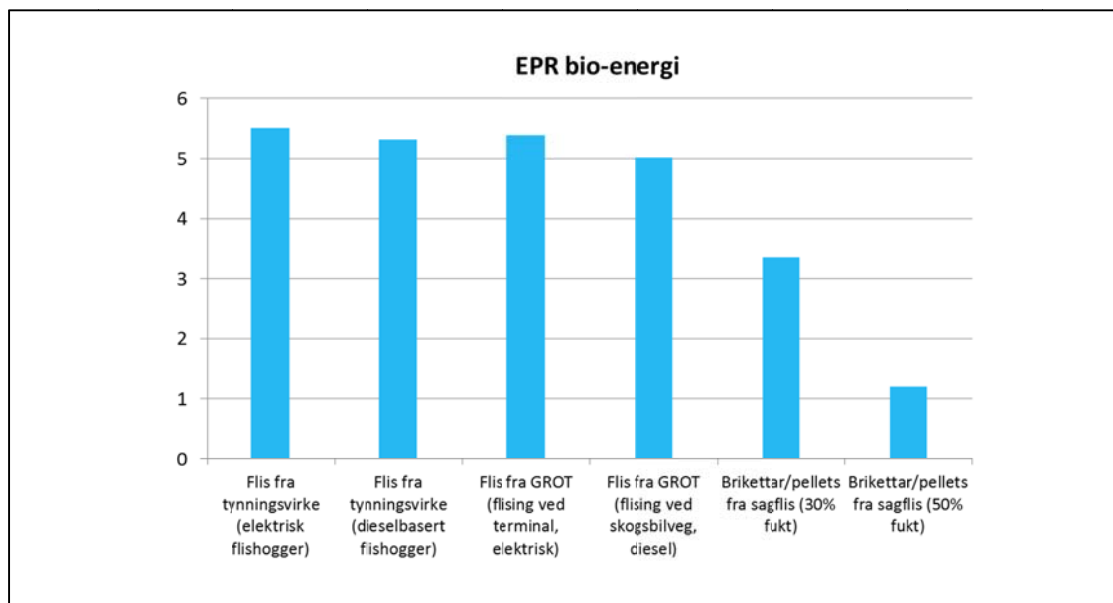
**Figur 2.** Figuren viser EPR-verdier for utvalget av vannkraftanlegg benyttet i denne studien. Såheim og Rånåsfoss 1 er gamle anlegg som er opprustet/utvidet (O/U) og EPR-verdiene inkluderer ikke energibruk ved den opprinnelige byggingen av anlegget, kun energibruken ved utvidelsen/opprustningen. De internasjonale resultatene publisert av Gagnon (2008) viser EPR-verdier i området 205-280 for vannkraftanlegg med magasinering og i området 170-267 for elvekraftverk. Jo høyere EPR-verdier jo høyere energieffektivitet.



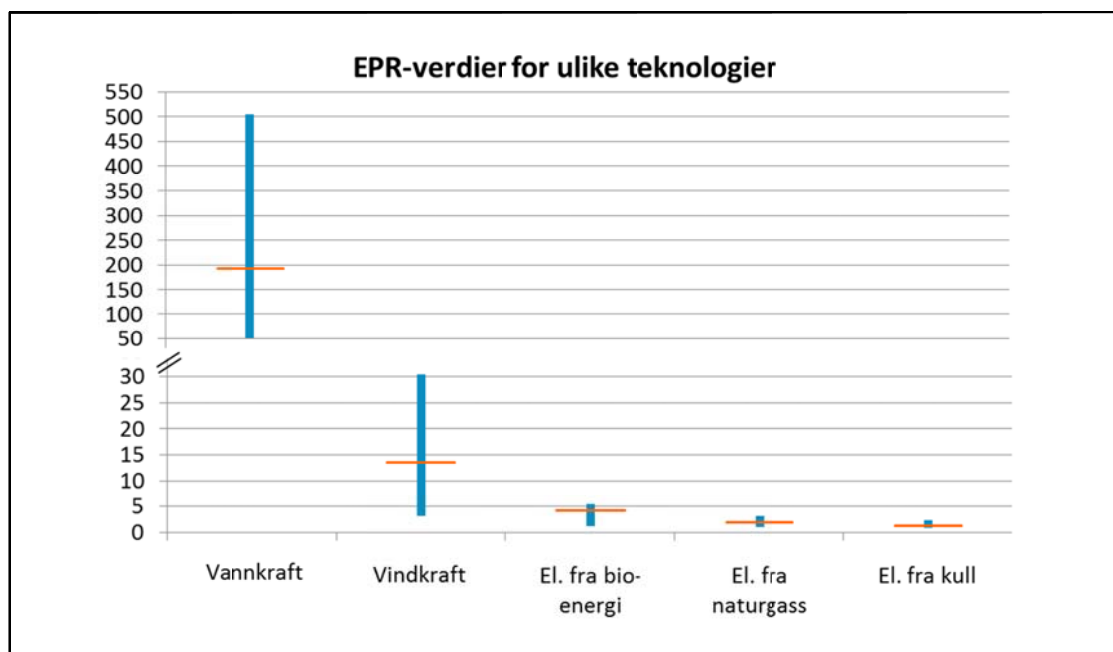
**Figur 3.** Figuren viser EPR-verdier for utvalget av vannkraftanlegg benyttet i denne studien, eksklusiv Såheim og Rånåsfoss 1 som er gamle anlegg som er gjennomgått opprusting/utvidelser (O/U). Anleggene er navngitt ved det faktiske anleggsnavnet, alternativt hvilket land/region dataene er fra. El indikerer at data er hentet fra Ecolnvent-databasen. De internasjonale resultatene publisert av Gagnon (2008) viser EPR-verdier i området 205-280 for vannkraftanlegg med magasinering og i området 170-267 for elvekraftverk. Jo høyere EPR-verdier jo høyere energieffektivitet



**Figur 4.** Figuren viser EPR-verdier for et utvalg av off-shore og landbaserte vindkraftanlegg, hvor de landbaserte er videre grupperte som store og små anlegg. Anleggene er i all hovedsak gitt navn etter hvilken studie dataene er hentet fra, etterfulgt av et nummer for unik identifisering i kildelitteratur-/database. Jo høyere EPR-verdier jo høyere energieffektivitet.

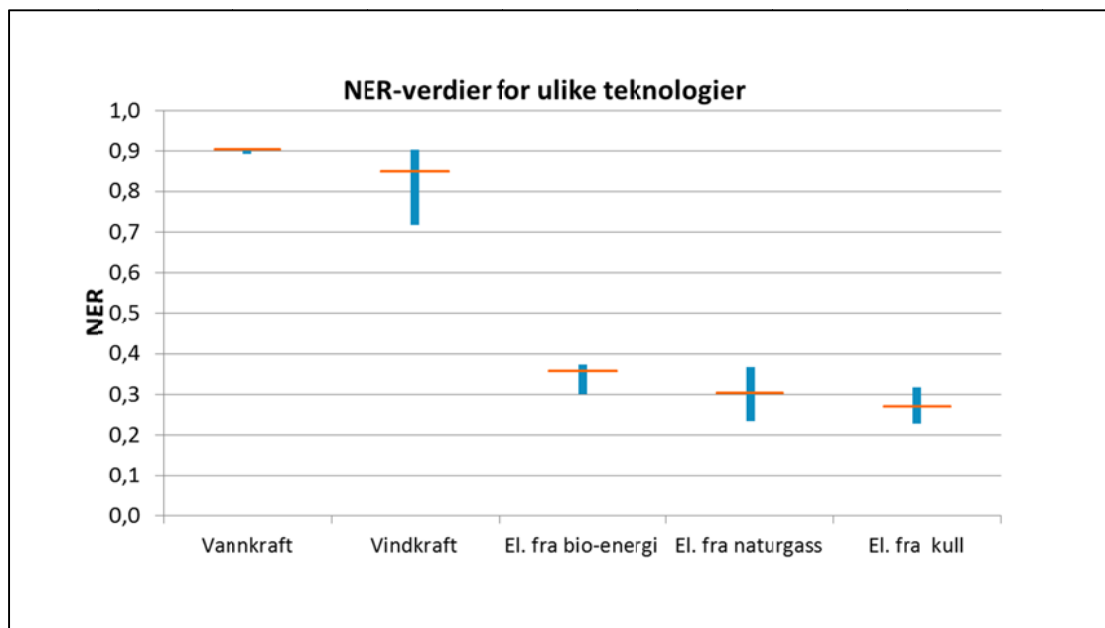


**Figur 5.** Figuren viser EPR-verdier ved konvertering til elektrisitet for et utvalg av bio-energianlegg, primært basert på data fra nordiske anlegg. Jo høyere EPR-verdier jo høyere energieffektivitet.

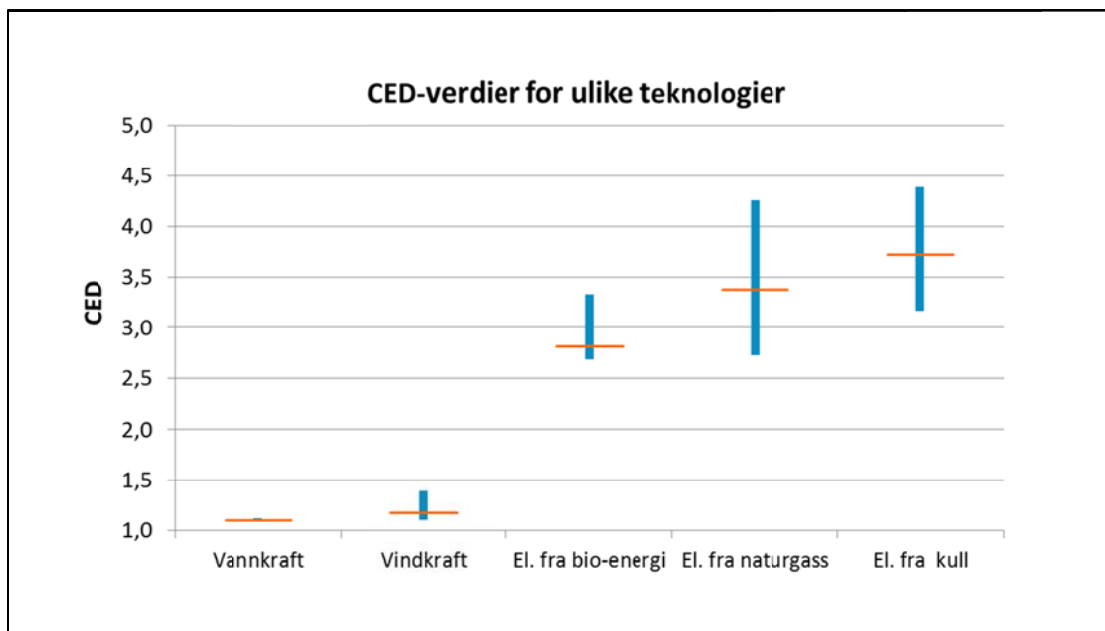


**Figur 6.** Figuren sammenstiller EPR-verdier på tvers av teknologier. Nedre ende viser den laveste EPR-verdien for den enkelte teknologi innenfor datasettet, øvre ende viser den høyeste verdien, mens den horisontale streken markerer middelveidien. Jo høyere EPR-verdier jo høyere energieffektivitet.

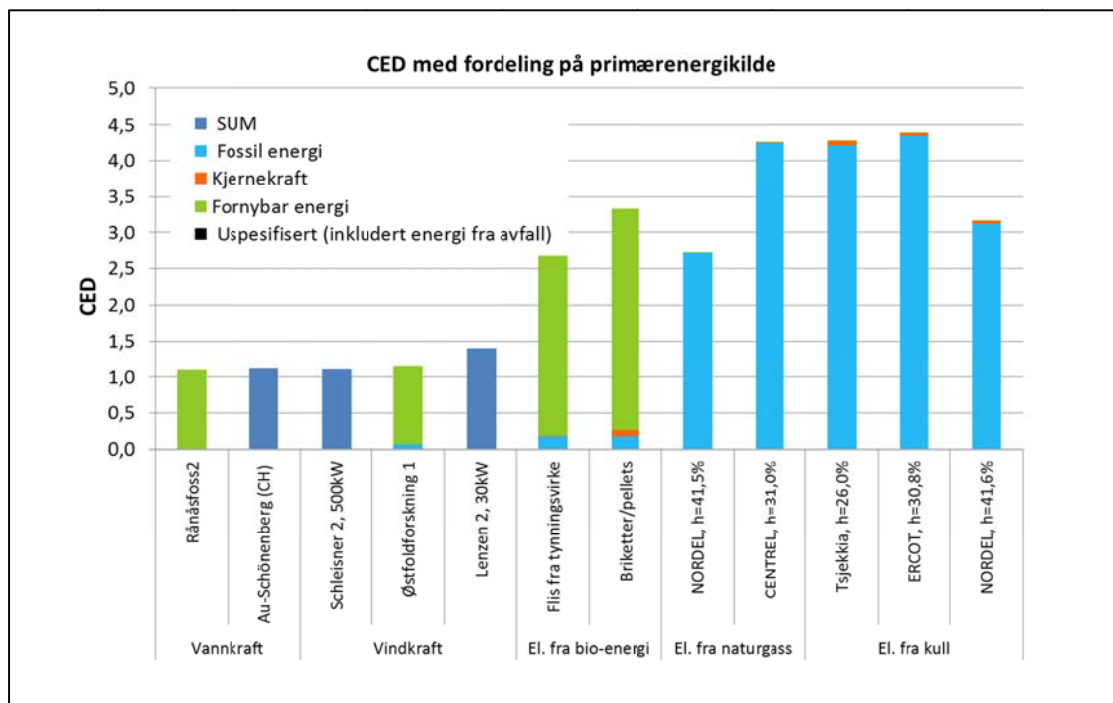




**Figur 7.** Figuren sammenstiller NER-verdier (Net Energy Ratio) på tvers av teknologier. Nedre ende viser den laveste NER-verdien for den enkelte teknologi innenfor datasettet, øvre ende viser den høyeste verdien, mens den horisontale streken markerer middelveien. Jo høyere NER-verdier jo høyere energieffektivitet.



**Figur 8.** Figuren sammenstiller CED-verdier (Cumulative Energy Demand) på tvers av teknologier. Nedre ende viser den laveste CED-verdien for den enkelte teknologi innenfor datasettet, øvre ende viser den høyeste verdien, mens den horisontale streken markerer middelveien. Jo lavere CED-verdier jo høyere energieffektivitet.



**Figur 9.** Figuren sammenstiller CED-verdier (Cumulative Energy Demand) på tvers av teknologier, presentert for beste og dårligste alternativ for hver teknologi. Datagrunnlaget er det samme som i figur 8. Fargene på søylene indikerer opprinnelsen til energien (primærenergikildene) som medgår for å produsere 1 kWh elektrisitet for de ulike teknologiene. De lyse grønne delene av stolpene indikerer fornybar energi, de lyseblå fossil energi og de oransje er kjernekraft. For de mørke blå stolpene er primærenergikildene ukjente. Jo lavere CED-verdier jo høyere energieffektivitet, dvs. mindre energi behøves for å produsere 1 kWh elektrisitet.

## Kommentarer og forbehold til resultatene

- Ved gjennomføring av en livssyklusanalyse vil valg av systemgrenser for verdikjeden tilhørende de vurderte elektrisitetsteknologiene (tidsperiode og hvilke aktiviteter som inkluderes/ekskluderes) påvirke resultatene og mulig rangering av teknologier, hvor forskjeller i systemgrensene for EPR-indikatoren skiller seg fra NER og CED ved at konverteringstapet ikke inngår i EPR.
- Ved bruk av data fra internasjonale databaser er det ikke alltid spesifisert hvilke energi-investeringer som er inkludert og det er følgelig ukjent for forfatterne hvor komplette enkelte av datasettene er, noe som til en viss grad kan påvirke resultatene.

## Konklusjoner

Resultatene fra denne studien viser:

- Vannkraft har klart høyest energieffektivitet sammenlignet med de andre vurderte elektrisitetsteknologiene. Grunnen til dette er at mengden levert elektrisitet er høy sammenlignet med investert energi til infrastruktur, transport, konvertering og vedlikehold. Dette er konklusjonen ved bruk av alle de tre anvendte energi-indikatorene og i tråd med tidligere publiserte internasjonale studier.
- Den nest beste av de vurderte energiteknologiene er vindkraft.
- Opprustning og utvidelse av vannkraftanlegg gir svært høy energieffektivitet for indikatoren EPR. Grunnen til dette er at mesteparten av energiinvesteringene allerede er gjort ved byggingen av anlegget.
- Elektrisitet produsert fra bio-energi, gass og kull har generelt en lav energi-effektivitet, med en svak tendens til at bio-energi er noe bedre enn de fossile.
- Det kan være store forskjeller i energieffektivitet mellom anlegg innenfor en og samme teknologi.
- EPR kan for termisk elektrisitetsproduksjon gi en ulik rangering av anlegg og produksjonsformer enn NER og CED. Årsaken til dette er at indikatorene benytter forskjellige systemgrenser i sine beregninger. EPR inkluderer ikke varmetap ved konvertering til elektrisitet (anleggets virkningsgrad) som investert energi.
- På generelt grunnlag er det vanskelig å konkludere hvorvidt vannkraft med større installasjoner har en høyere energieffektivitet enn de med mindre installert kapasitet eller motsatt. På samme måte er det vanskelig å si om magasinkraftverk har en høyere energieffektivitet enn elvekraftverk eller motsatt.

På bakgrunn av denne studien av energieffektiv elektrisitetsproduksjon kan vi gi følgende vurdering i forhold til strategi for framtidig utvikling av elektrisitetsproduksjon i Norge:

- Vannkraft er den mest energieffektive måten å produsere elektrisitet på, fulgt av vindkraft.
- Opprustnings- og utvidelsesprosjekter av vannkraftanlegg vil kunne ha en meget høy "energi-økonomi" grunnet små energiinvesteringer i infrastrukturleddet, herunder også tiltak for reduksjon av falltap i vannveier og økt virkningsgrad i elektro-mekanisk utstyr.

Det er viktig å understreke at bruken av energiindikatorer som underlag for strategiske beslutninger om utvikling av ny elektrisitetsproduksjon belyser bare ett av mange forhold som må vurderes samlet. Indikatorene benyttet i denne studien tar ikke hensyn til andre miljøforhold slik som tap av biologisk mangfold, reduksjon i urørte områder (INON-områder), endringer i forholdene for fisk og andre vannlevende organismer, regulerbarhet, utslipp av klimagasser og økonomi, som også er viktige vurderinger i beslutningssammenheng.

## Kortfattet konklusjon

- Vannkraft har klart høyest energieffektivitet sammenlignet med de andre vurderte elektrisitetsteknologiene, deretter fulgt av vindkraft.
- Elektrisitet produsert fra bio-energi, gass og kull har generelt en mye lavere energi-effektivitet enn vannkraft og vindkraft.
- Opprustning og utvidelse av vannkraftanlegg gir har en svært høy energieffektivitet, spesielt målt gjennom EPR.
- Resultatene tyder på at flere norske vannkraftverk har en like god eller bedre energieffektivitet, målt ved EPR, enn mange internasjonale anlegg.
- Det er viktig å være klar over at EPR-indikatoren har andre systemgrenser enn NER og CED (EPR inkluderer ikke varmetap ved konvertering til elektrisitet som investert energi). Valg av energiindikator kan derfor påvirke rangeringen av termiske anlegg internt og mellom termiske teknologier.
- Energiindikatorer inkluderer ikke faktorer slik som tap av biologisk mangfold, klimagassutslipp, økonomi eller kvalitet av den leverte elektrisiteten.

Foto omslag: K. Bevanger, Å. Killingtveit, Harald Pettersen - Statoil, SINTEF/Lars Sørum

*Fornybar energi på lag med naturen*  
*Renewable energy respecting nature*

**CEDREN**

Centre for Environmental Design of Renewable Energy

