

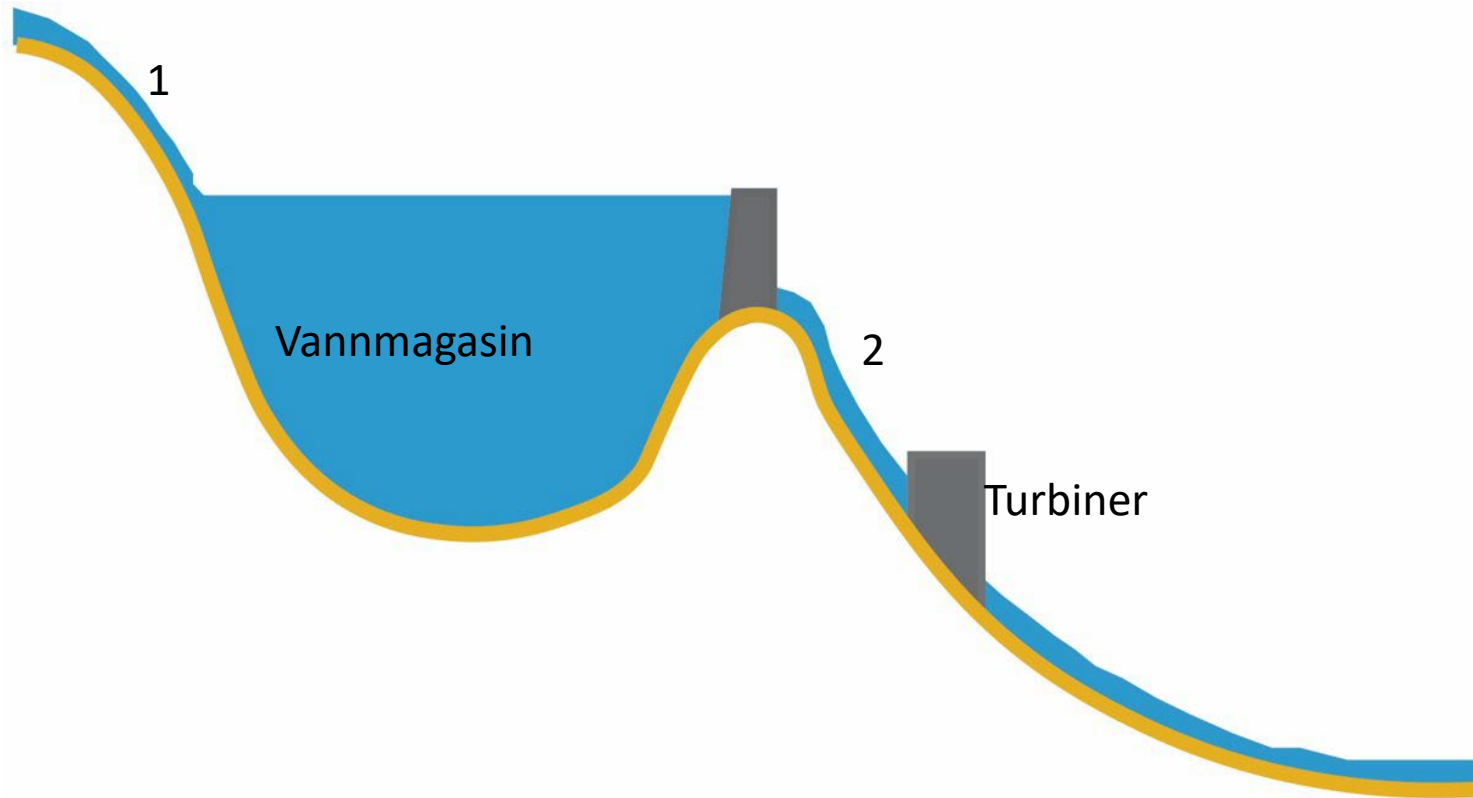
Den mekaniske energibalansen i
atmosfæren og kraftpotensialet til
vindkraftverk:

Hvor mye kraft kan atmosfæren
levere per areal?

Ole Anders Nøst

Oceanbox.io og Nord Universitet

Det er ikke mulig å produsere mer kraft enn energitilførselen til systemet.



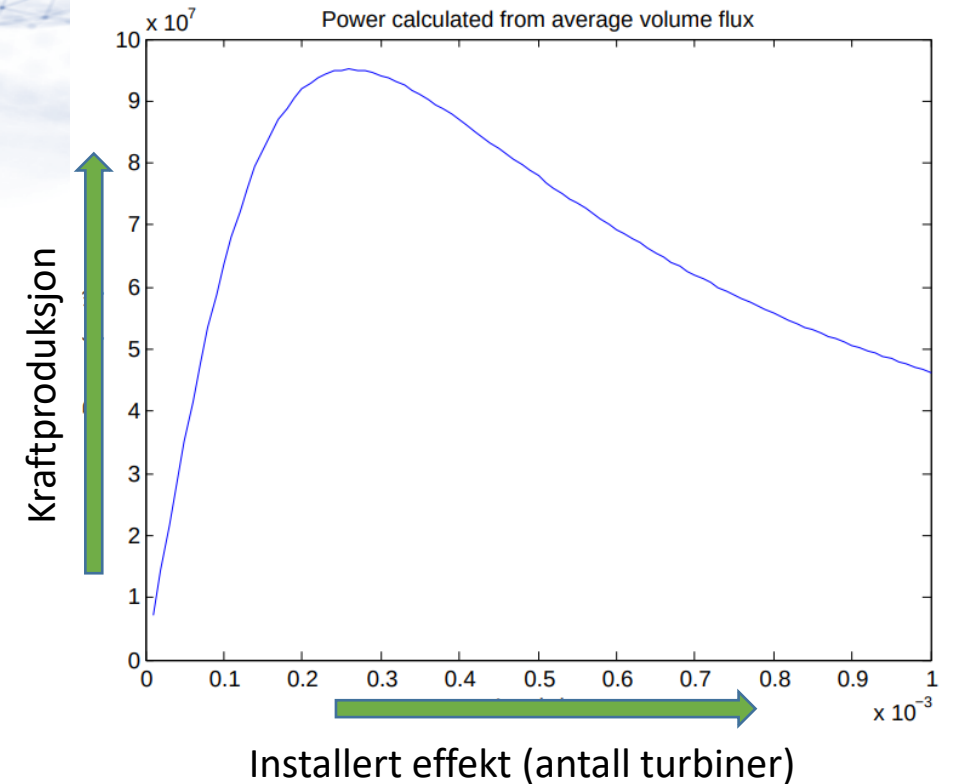
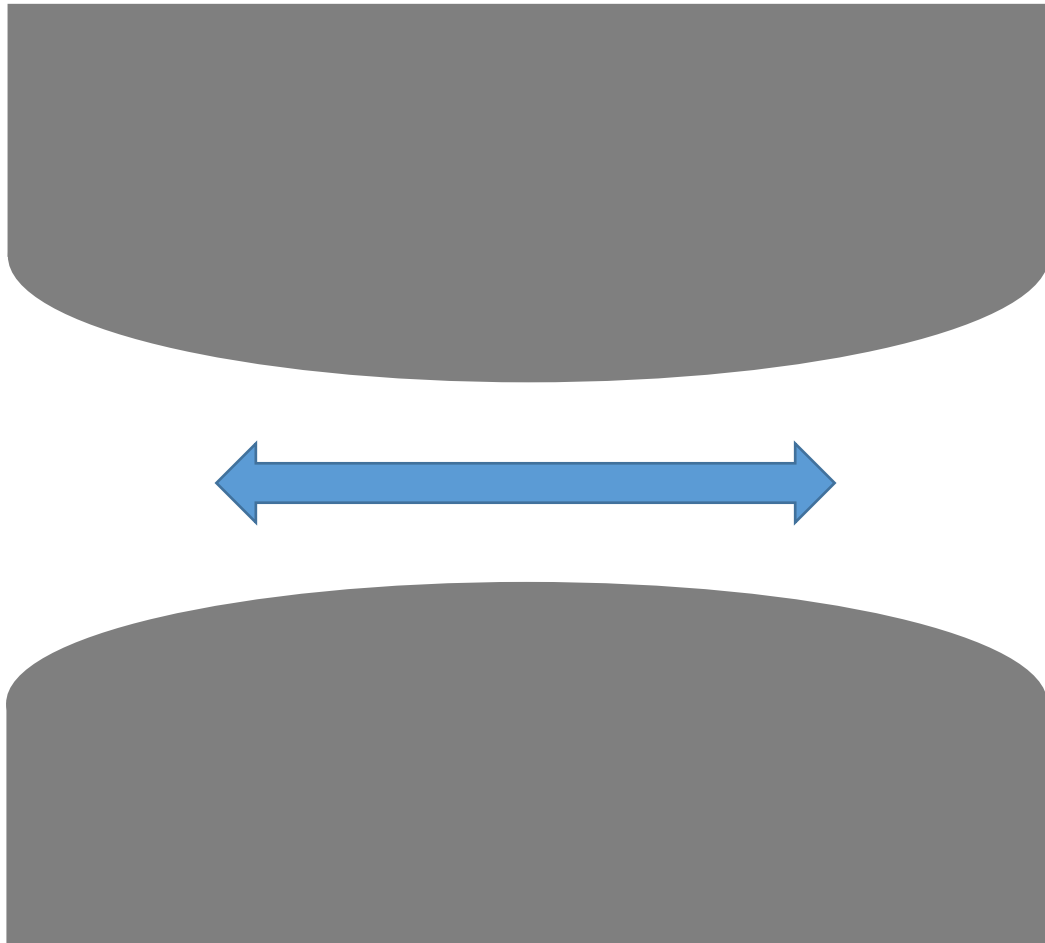
Vannkraftverk:

1. Tilførsel av potensiell energi i magasinet.
2. Fall fra magasin til kraftverk.

Til sammen gir dette en absolutt øvre grense for kraftproduksjon.

Kan vi beregne kraftpotensial med antall turbiner det er rom for?

Et eksempel fra tidevannskraft:



Produksjon av kraft kan beregnes med antall turbiner kun hvis kraftproduksjonen er mye mindre enn tilførselen av energi til systemet.

Når kraftproduksjonen er sammenlignbar med tilførselen av energi vil ikke flere turbiner gi mer kraft.

VINDKRAFT

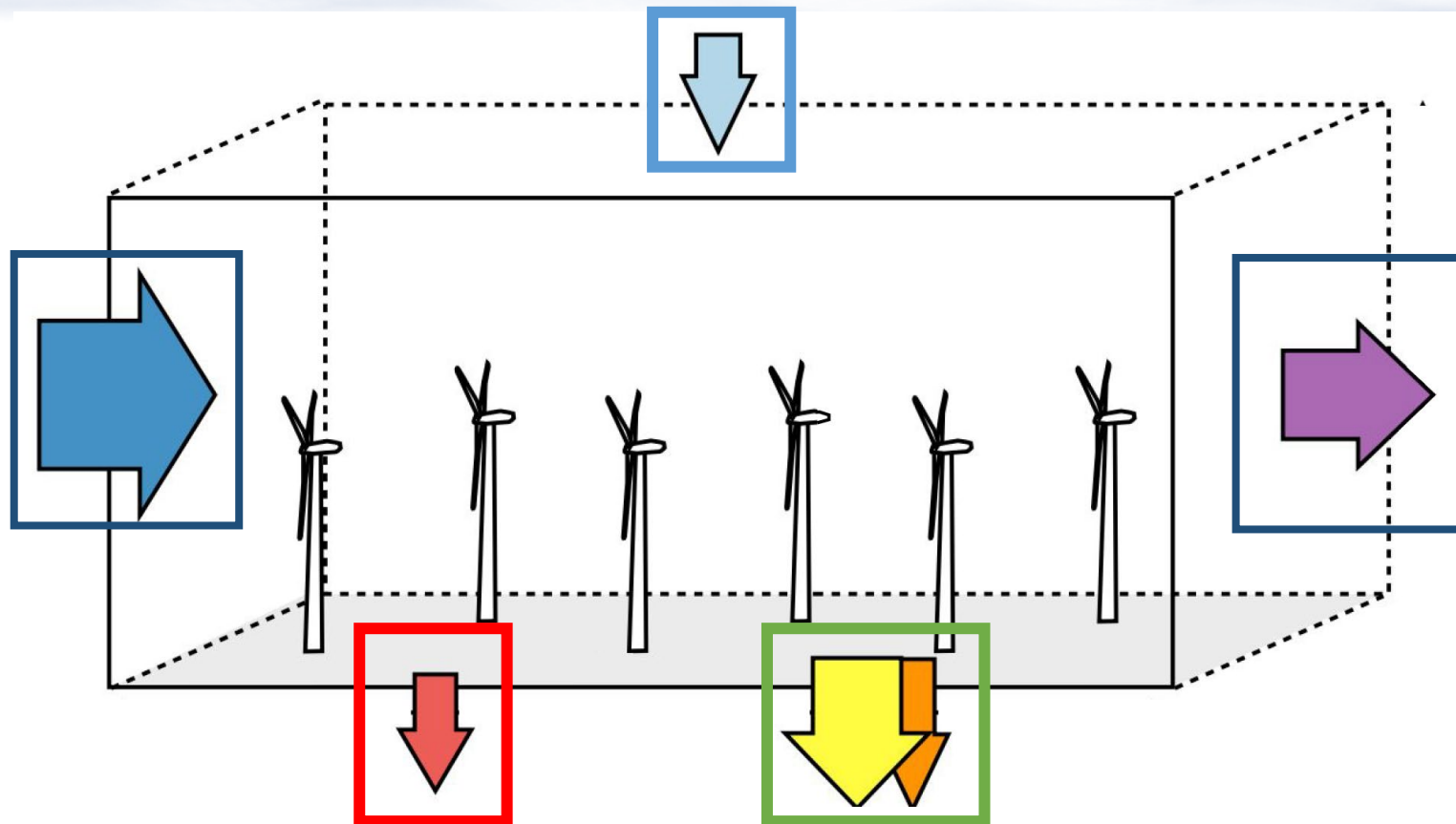
Er det også en grense for hvor mye kraft vindkraft kan produsere?

Hva er tilførselen av energi til et vindkraftverk?

Den mekaniske energibalansen i atmosfæren er godt kjent. I globalt middel går det $\sim 2.5 \text{ W/m}^2 = 2.5 \text{ MW/km}^2$ inn i driving av vind.

(Lorenz 1954; Peixoto & Oort 1992; Li et.al., 2007; Pan et. al., 2017; Ma et. al, 2021).

Et vindkraftverk som dekker hele jordas overflate vil ha en energitilførsel på ca 2 MW/km^2 . Kraftproduksjonen vil være ca 0.5 MW/km^2 (Miller & Kleidon 2016).



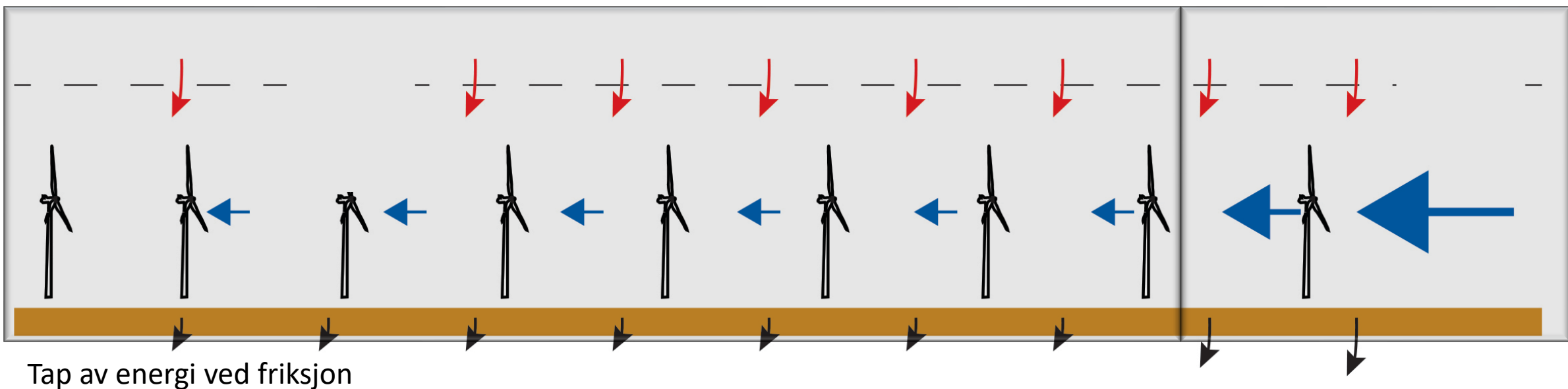
- Horizontal vind
- Friksjon
- Produksjon av elektrisk kraft + ekstra friksjon gitt av turbulens skapt av turbiner
- Overgang fra potensiell til kinetisk energi (trykkgradienter som akselererer vinden)

Kleidon & Miller 2020

Energibudsjettet i et vindkraftverk avhenger av størrelsen til kraftverket

Energitilførsel ved trykkrefter som akselererer vinden inne i vindkraftverket.

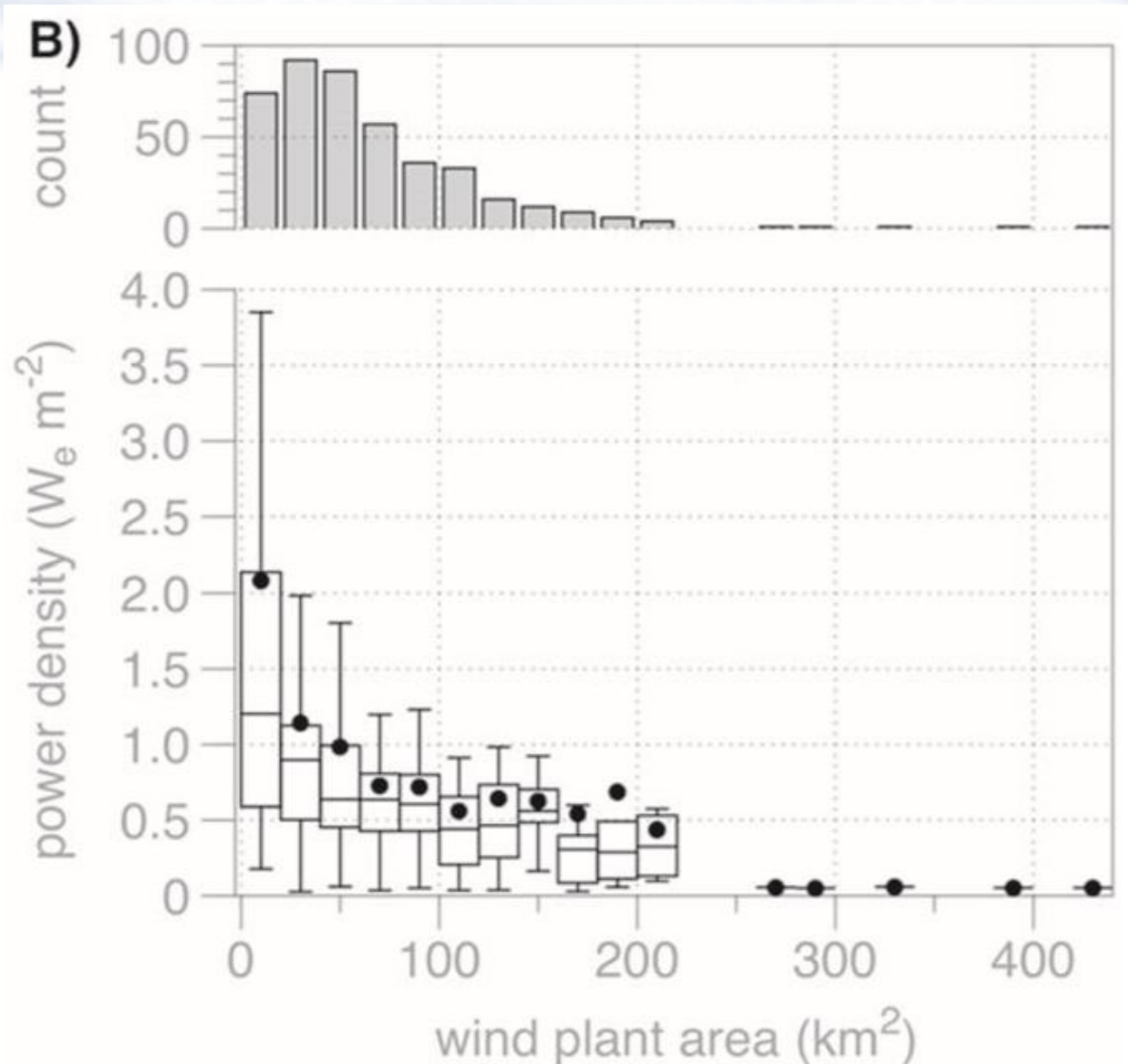
Energitilførsel ved innkommende vind blir tatt opp av de ytre turbinene i store vindkraftverk.



I store vindkraftverk er energitilførsel fra innkommende vind av lite betydning fordi denne energien blir tatt opp av de ytre turbinene.

Kraftproduksjonen er da begrenset av i hvilken grad trykkrefter inne i kraftverket akselererer vinden.

Se. f.eks. Stevens & Meneveau (2017), Antonini & Caldeira (2021)



Monitorering av kraftproduksjon per areal i ~400 vindkraftverk i USA avdekker en klar avhengighet av vindkraftverkernes areal (Miller and Keith, 2018, 2019).

Vindkraftverk med areal større enn 100 km^2 produserer $\sim 0.5 \text{ W/m}^2$.

Midlere produksjon for alle kraftverk er 0.9 W/m^2 .

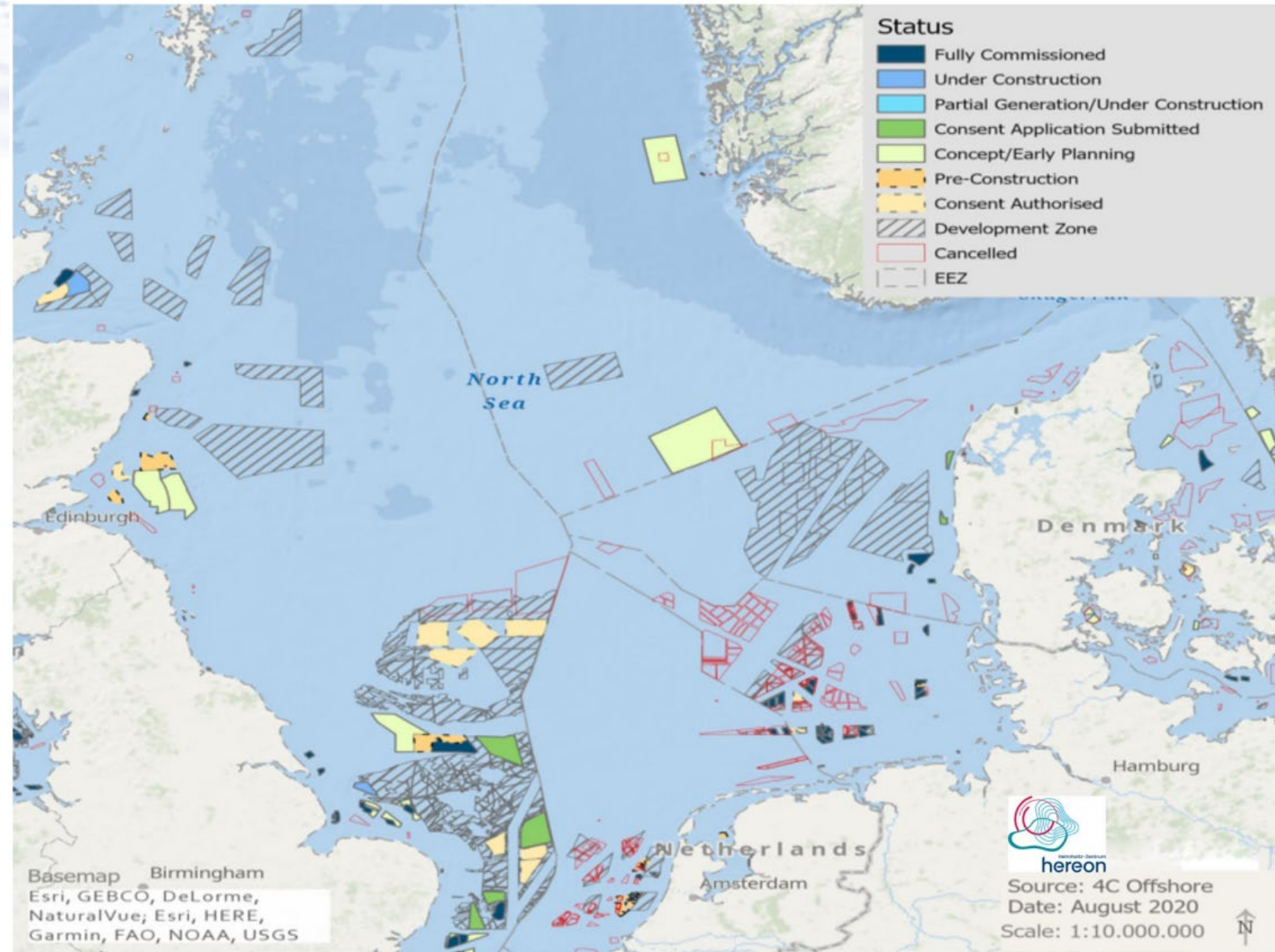
OPEN

Accelerating deployment of offshore wind energy alter wind climate and reduce future power generation potentials

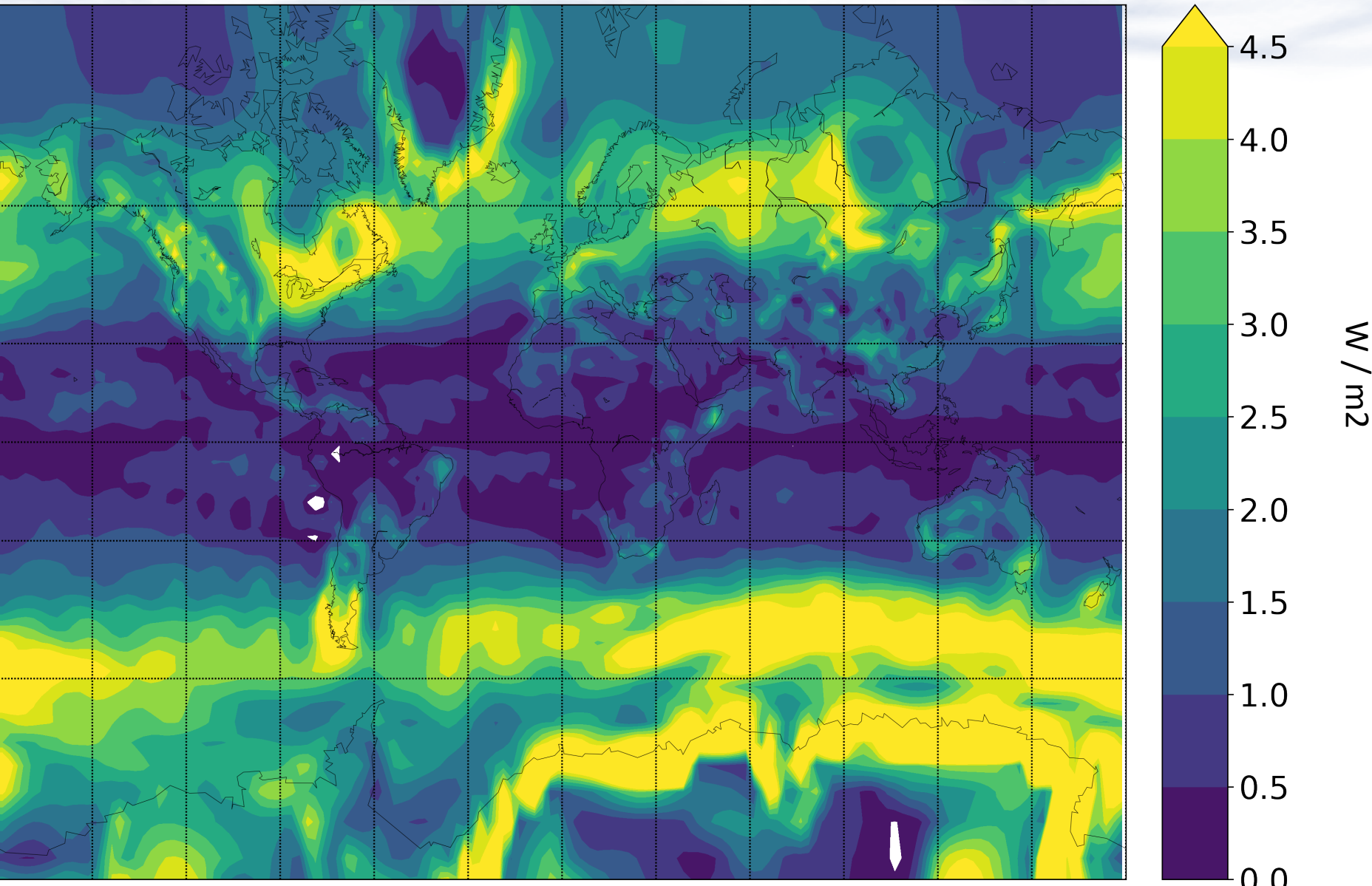
 Naveed Akhtar[✉], Beate Geyer, Burkhardt Rockel, Philipp S. Sommer & Corinna Schrum

The European Union has set ambitious CO₂ reduction targets, stimulating renewable energy production and accelerating deployment of offshore wind energy in northern European waters, mainly the North Sea. With increasing size and clustering, offshore wind farms (OWFs) wake effects, which alter wind conditions and decrease the power generation efficiency of wind farms downwind become more important. We use a high-resolution regional climate model with implemented wind farm parameterizations to explore offshore wind energy production limits in the North Sea. We simulate near future wind farm scenarios considering existing and planned OWFs in the North Sea and assess power generation losses and wind variations due to wind farm wake. The annual mean wind speed deficit within a wind farm can reach 2–2.5 ms⁻¹ depending on the wind farm geometry. The mean deficit, which decreases with distance, can extend 35–40 km downwind during prevailing southwesterly winds. Wind speed deficits are highest during spring (mainly March–April) and lowest during November–December. The large-size of wind farms and their proximity affect not only the performance of its downwind turbines but also that of neighboring downwind farms, reducing the capacity factor by 20% or more, which increases energy production costs and economic losses. We conclude that wind energy can be a limited resource in the North Sea. The limits and potentials for optimization need to be considered in climate mitigation strategies and cross-national optimization of offshore energy production plans are inevitable.

Akhtar et al., 2021

 Check for updates


ENERGITILFØRSEL TIL STORE VINDKRAFTVERK



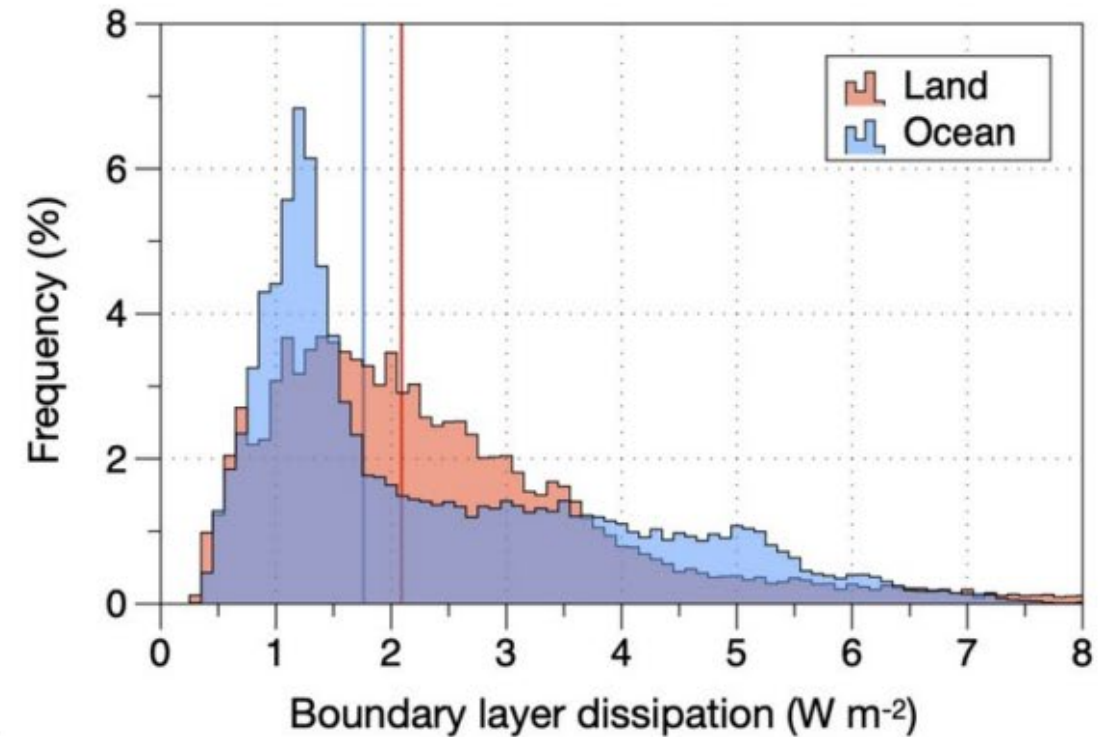
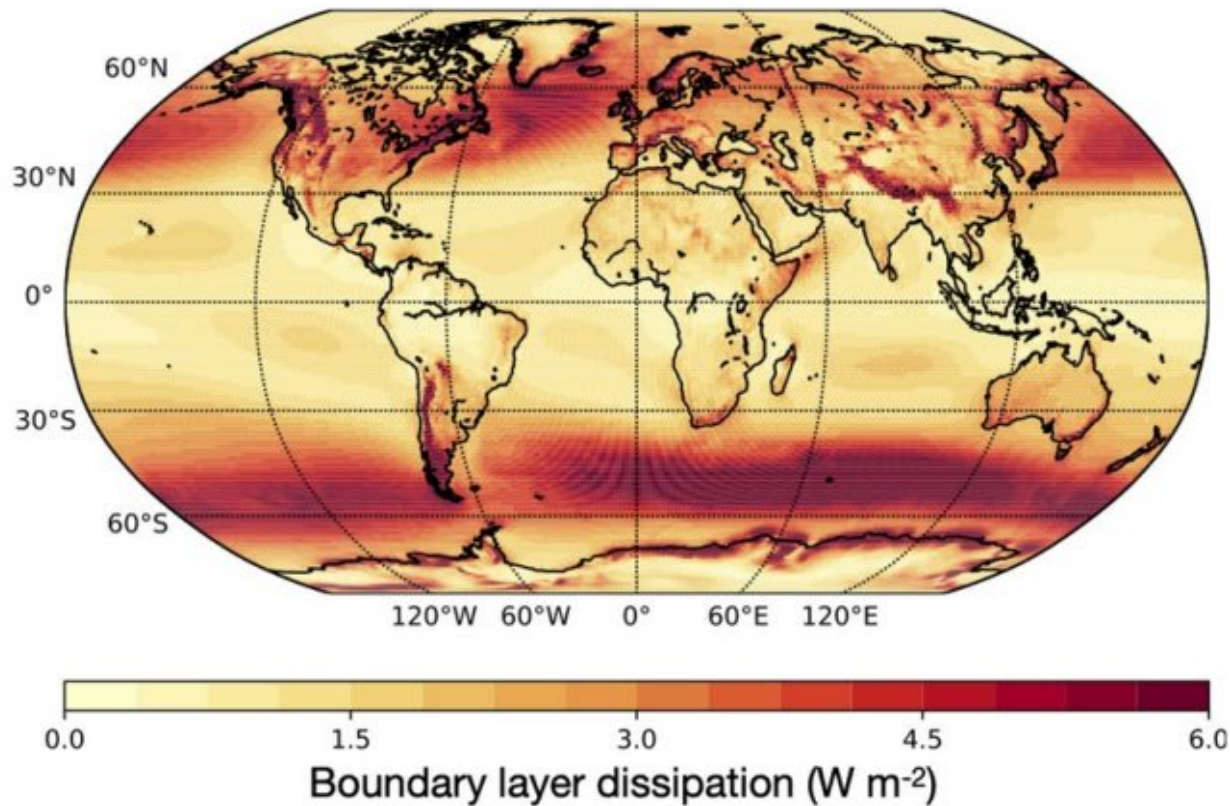
Global fordeling
av energitilførsel til driving av
vind. Global middel : 2.5 W/m²

Beregningene er utført med data
fra NCEP/NCAR Reanalysis.

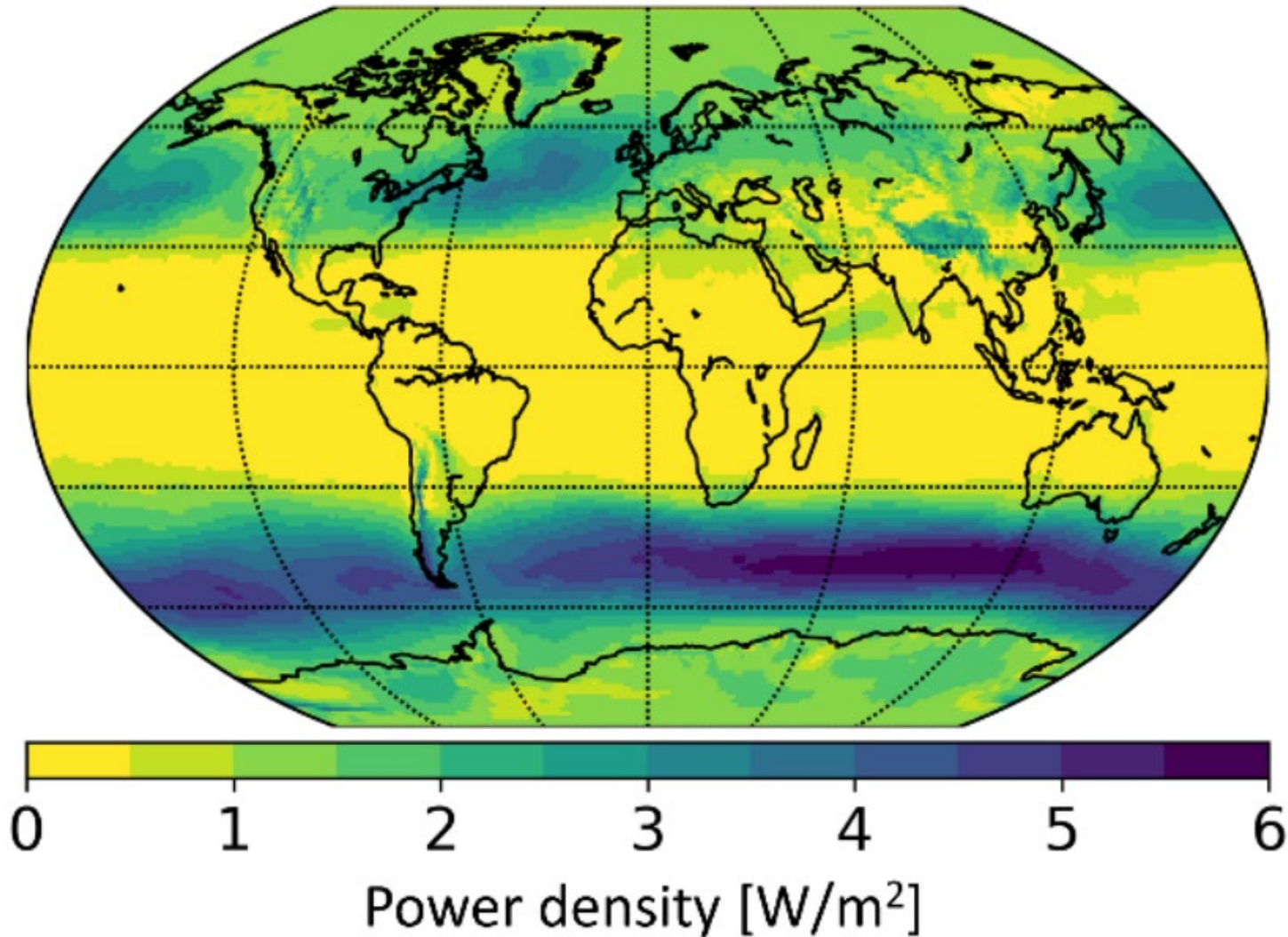
Dette representerer energi-
tilførselen til store vindkraftverk
og energiproduksjon vil trolig
være ¼ til ½ av dette.

ENERGITILFØRSEL TIL STORE VINDKRAFTVERK

Global fordeling av energitilførsel til driving av vind.
Beregnet med data fra ERA5 (Kleidon 2021)



KRAFTPRODUKSJON I STORE VINDKRAFTVERK

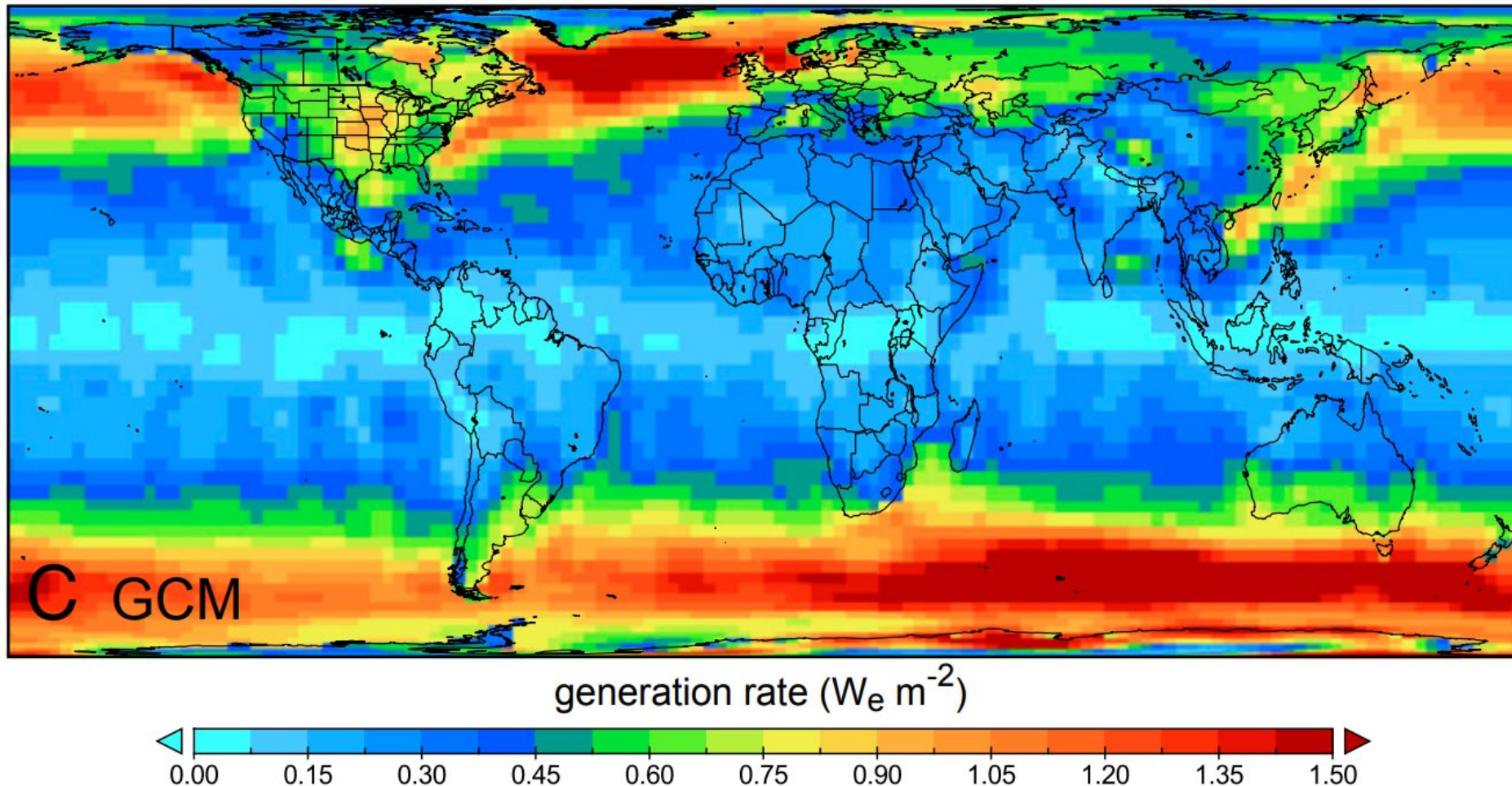


Beregnet kraftproduksjon i store vindkraftverk
(Antonini & Caldeira, 2021)

Resultatet tilsvarer 1.28 W/m^2 i globalt middel.

Dvs. at ca halvparten av energien som driver
vinden er tatt ut i kraftproduksjon.

KRAFTPRODUKSJON I STORE VINDKRAFTVERK



Beregnet kraftproduksjon i store vindkraftverk (Miller & Kleidon, 2016)

Resultatet tilsvarer $0.6 W/m^2$ i globalt middel.

Dvs. at ca en fjerdedel av energien som driver vinden er tatt ut i kraftproduksjon.

Sannsynlig energiproduksjon for store vindkraftverk i Nordsjøen er 1 – 2 MW/km².

Kraftproduksjonen vil være begrenset av energitilførsel fra atmosfæren og kan derfor ikke forbedres ved teknologiutvikling.

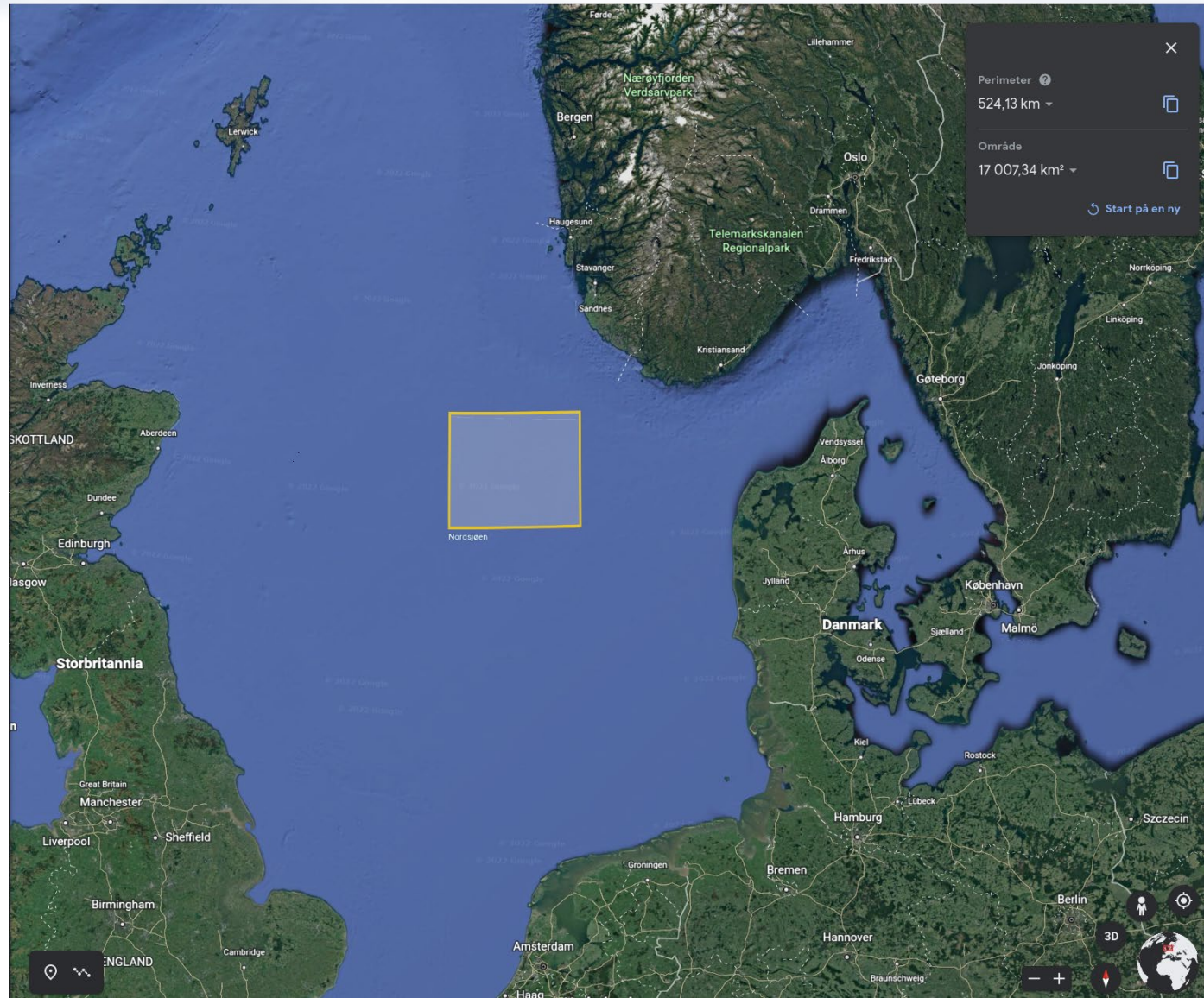
I følge resultatene presentert her ser arealbehovet ut til å være undervurdert.

Fordi vindkraftverk påvirker vindstyrken i stor grad vil kraft-potensialet og arealbruket per energienhet avhenge av hvor mye vindkraft som blir utbygd i området.

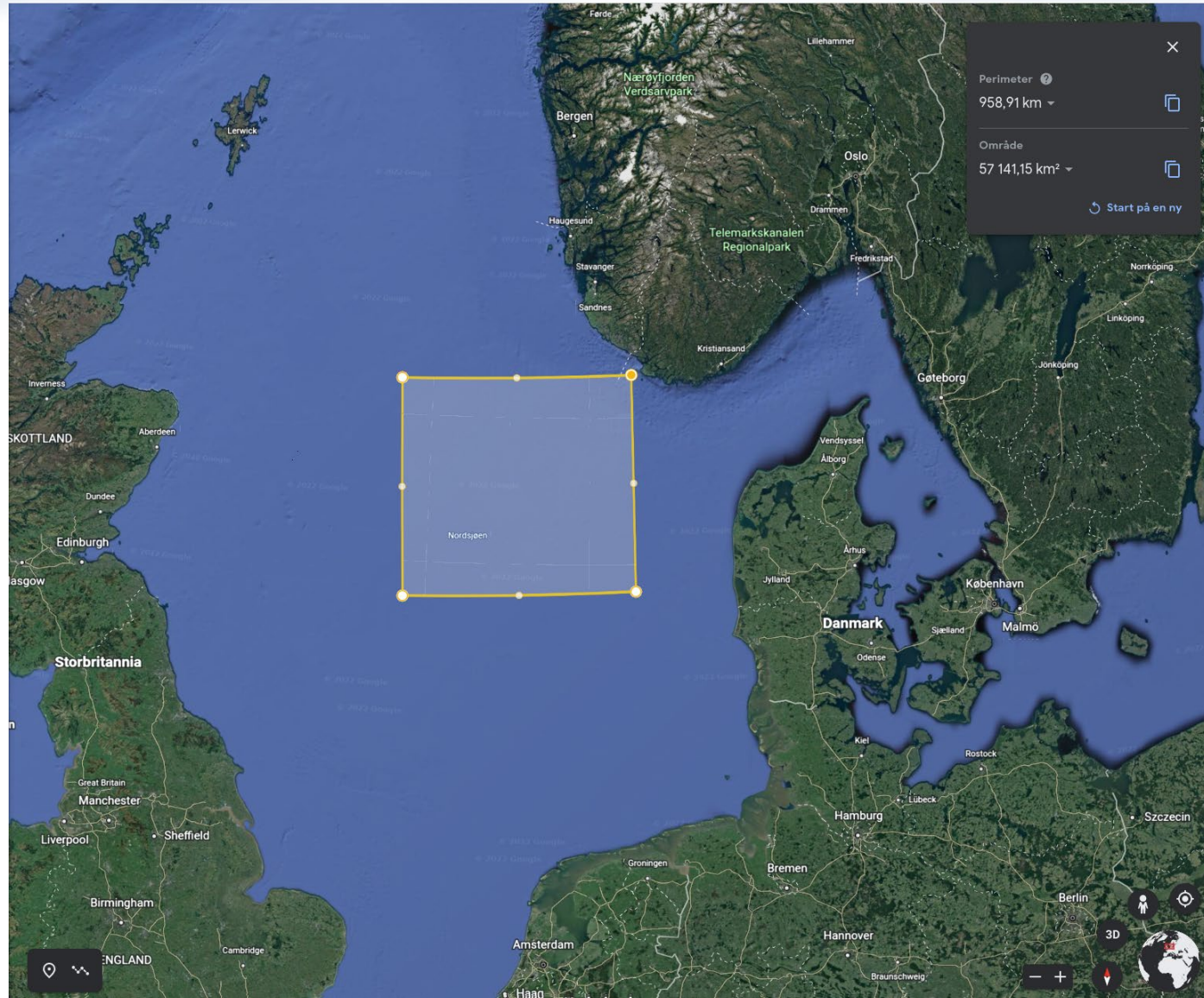
Estimater av kraftproduksjon bør derfor inneholde planer for framtidig utbygging og beregning av hvordan dette påvirker potensialet.

En beregning av atmosfærens energitilførsel til området må ligge til grunn.

150 TWH – 17000 KM2 ~ 130 * 130 KM



500 TWH – 57000 KM² ~ 240 * 240 KM



450 GB INSTALLERT EFFEKT ~ 200000 KM2



REFERANSER

- Akhtar, N., Geyer, B., Rockel, B., Sommer, P. S., & Schrum, C. (2021). Accelerating deployment of offshore wind energy alter wind climate and reduce future power generation potentials. *Scientific reports, Nature Publishing Group*, 11(1), 1–12.
- Antonini, E. G., & Caldeira, K. (2021). Atmospheric pressure gradients and coriolis forces provide geophysical limits to power density of large wind farms. *Applied Energy*, 281, 116048.
- Garrett, C., & Cummins, P. (2005). The power potential of tidal currents in channels. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 461(2060), 2563–2572.
- Kim, Y.-H., & Kim, M.-K. (2013). Examination of the global lorenz energy cycle using merra and ncep-reanalysis 2. *Climate Dynamics*, 40(5-6), 1499–1513.
- Kleidon, A. (2021). Physical limits of wind energy within the atmosphere and its use as renewable energy: From the theoretical basis to practical implications. *arXiv preprint arXiv:2010.00982*.
- Kleidon, A., & Miller, L. M. (2020). The kinetic energy budget of the atmosphere (keba) model 1.0: a simple yet physical approach for estimating regional wind energy resource potentials that includes the kinetic energy removal effect by wind turbines. *Geoscientific Model Development*, 13(10), 4993–5005.
- Li, L., Ingersoll, A. P., Jiang, X., Feldman, D., & Yung, Y. L. (2007). Lorenz energy cycle of the global atmosphere based on reanalysis datasets. *Geophysical Research Letters*, 34(16).
- Lorenz, E. N. (1955). Available potential energy and the maintenance of the general circulation. *Tellus*, 7(2), 157–167.
- Ma, Q., Lembo, V., & Franzke, C. L. (2021). The lorenz energy cycle: trends and the impact of modes of climate variability. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 73(1), 1–15.
- Marques, C. A., Rocha, A., Corte-Real, J., Castanheira, J. M., Ferreira, J., & Melo-Gonçalves, P. (2009). Global atmospheric energetics from ncep-reanalysis 2 and ecmwf-era40 reanalysis. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(2), 159–174.
- Miller, L. M., & Keith, D. W. (2018). Observation-based solar and wind power capacity factors and power densities. *Environmental Research Letters*, 13(10), 104008.
- Miller, L. M., & Keith, D. W. (2019). Corrigendum: Observation-based solar and wind power capacity factors and power densities (2018 environ. res. lett. 13 104008). *Environmental Research Letters*, 14(7), 079501.
- Miller, L. M., & Kleidon, A. (2016). Wind speed reductions by large-scale wind turbine deployments lower turbine efficiencies and set low generation limits. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(48), 13570–13575.
- Pan, Y., Li, L., Jiang, X., Li, G., Zhang, W., Wang, X., & Ingersoll, A. P. (2017). Earth's changing global atmospheric energy cycle in response to climate change. *Nature communications*, 8(1), 1–8.
- Peixoto, J. P., & Oort, A. H. (1992). Physics of climate.
- Stevens, R. J., & Meneveau, C. (2017). Flow structure and turbulence in wind farms. *Annual review of fluid mechanics*, 49, 311–339.