



Havvind - enkelt forklart

Thomas Hansen

thomas.hansen@uib.no



Bergen offshore Wind Centre (BOW)

UNIVERSITY OF BERGEN



Innhold



- Vindturbiner og energiproduksjon
- Aerodynamikk til vindturbiner
- Flytende havvind
- Norske vindressurser
- Forskningsutfordringer





Vindturbiner og energiproduksjon



Vindturbiner og energiproduksjon



- Vindturbiner konverterer den kinetiske energien i vinden og produserer fornybar energi i form av elektrisk strøm
- Mengden energi som produseres er avhengig av **vindens hastighet** og **turbinens størrelse**
- Effektiviteten (C_p) til moderne vindturbiner er omtrent 50%, noe som er svært høyt blant de fornybare energiløsningene



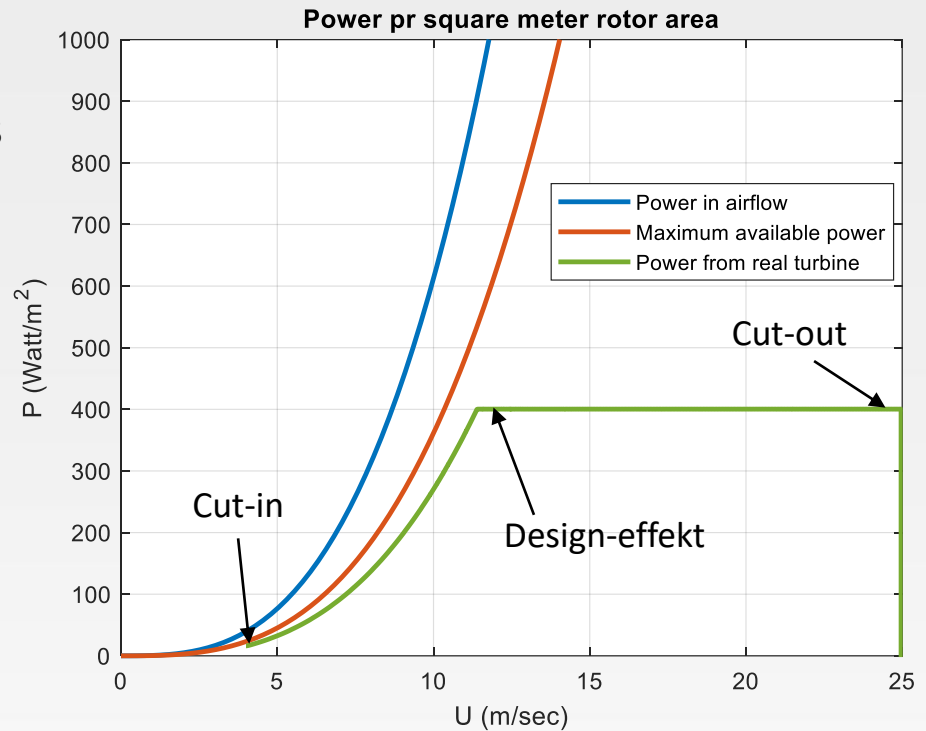
$$Power = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 A_{swept} C_p$$



Energiproduksjon og vindhastigheten



- Mengden energi som produseres er avhengig av vindens hastighet, U_{∞}
- U_{∞} er i 3. potens: En dobling i vindhastighet gir altså 8 ganger mer energi
- Denne fysikalske sammenhengen gjør havvind svært attraktivt, siden det blåser sterkere og mer stabile vinder til havs
- En vindturbin kan maksimalt konvertere 59.3% av energien i vinden (Betz grensen)



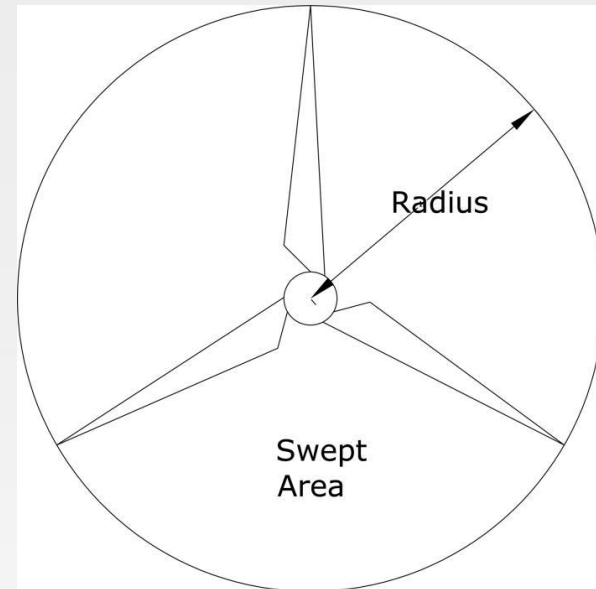
$$Power = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 A_{swept} C_p$$



Energiproduksjon og rotordiameter



- Det svepete arealet til rotorbladene er den variabelen vi enklest kan endre for å øke mengden energi en vindturbin produserer
- Størrelsen på vindturbinene vil derfor fortsette å øke, og utviklingen vil være styrt av hva som er teknologisk mulig og økonomisk fordelaktig
- For turbiner **på land** vil størrelsen begrense seg siden det ikke lenger blir mulig å transportere turbinen, eller ved at det innføres restriksjoner for å redusere påvirkning på mennesker



$$A = \pi r^2$$

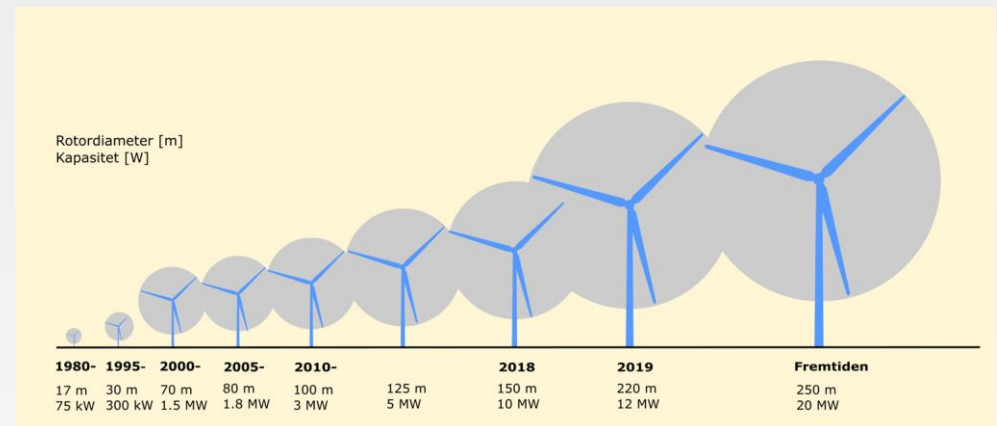
$$Power = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 A_{swept} C_p$$



Vindturbiner blir større



- Siden starten av den moderne vindturbin-industrien, har rotordiameteren økt med 1200%
- Den største turbinen idag har en rotordiameter på 220m og en kapasitet på 12-13 MW
- Turbinene vil fortsette å øke i størrelse, og i nær fremtid kan rotordiameter på over 250m bli vanlig for havvindturbiner
- Disse turbinene vil da kunne få en kapasitet på over 20MW



$$Power = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 A_{swept} C_p$$





Vindturbiner og aerodynamikk



Vindturbiner og aerodynamikk



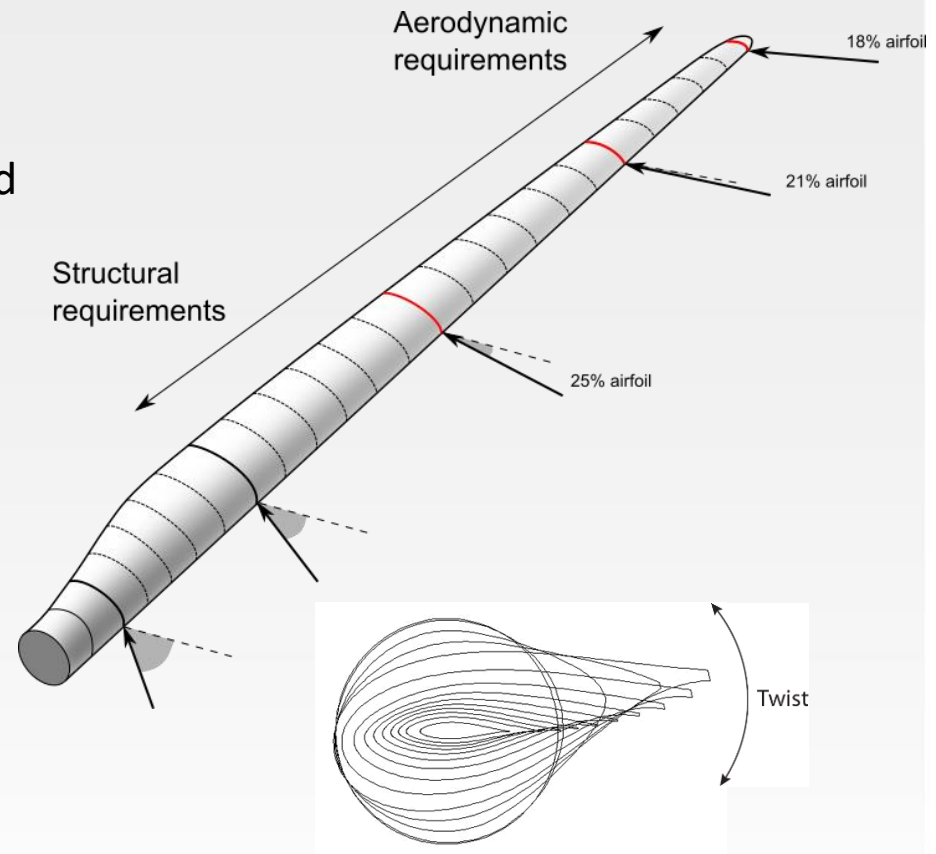
- Moderne vindturbiner har mer til felles med teknologien som er utviklet for fly-industrien enn de har med sine eldre slektninger, vindmøllene
- På moderne vindturbiner er det løft og drag kreftene på rotorbladene som bestemmer hvor mye energi en vindturbin produserer
- Rotorblader med høy løft-til-drag rate gir best virkningsgrad, og størst energiproduksjon for en vindturbin



Rotorblad aerodynamikk



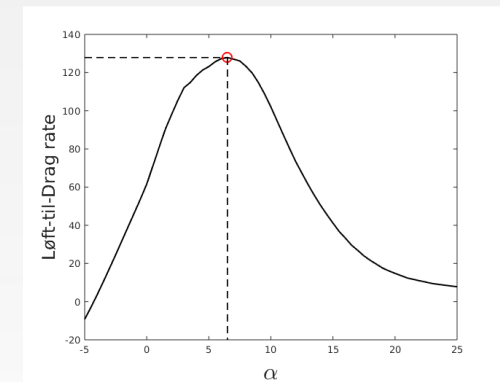
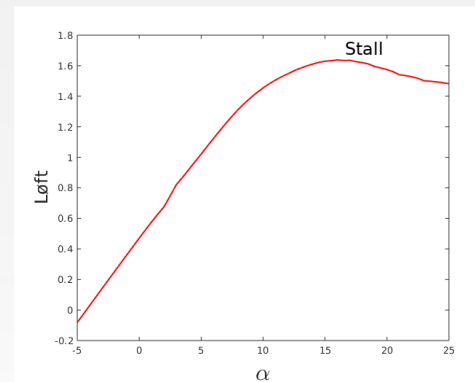
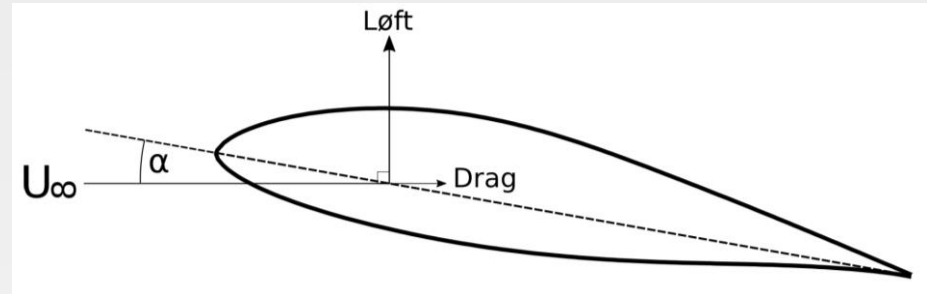
- På et rotorblad benyttes det en rekke forskjellige vingeprofiler
- Mot tippen benyttes vingeprofiler med høy løft-til-drag rate for å maksimere energi produksjonen
- Mot roten, hvor de strukturelle egenskapene dominerer, benyttes tykke vingeprofiler for å øke stivheten til rotorbladene
- For at alle vingeprofilene skal operere ved sin beste løft-til-drag angrepsvinkel, er rotorbladene vridd ifra rot til tipp



Vingeprofil aerodynamikk



- Løft skapes normalt på innkommende vind
- Drag skapes parallelt med innkommende vind
- Ved økende angrepsvinkel, α , øker løftet (og draget), opp til stall
- Vingeprofiler med høy løft-til-drag rate er viktig for å konstruere rotorblader med høy virkningsgrad





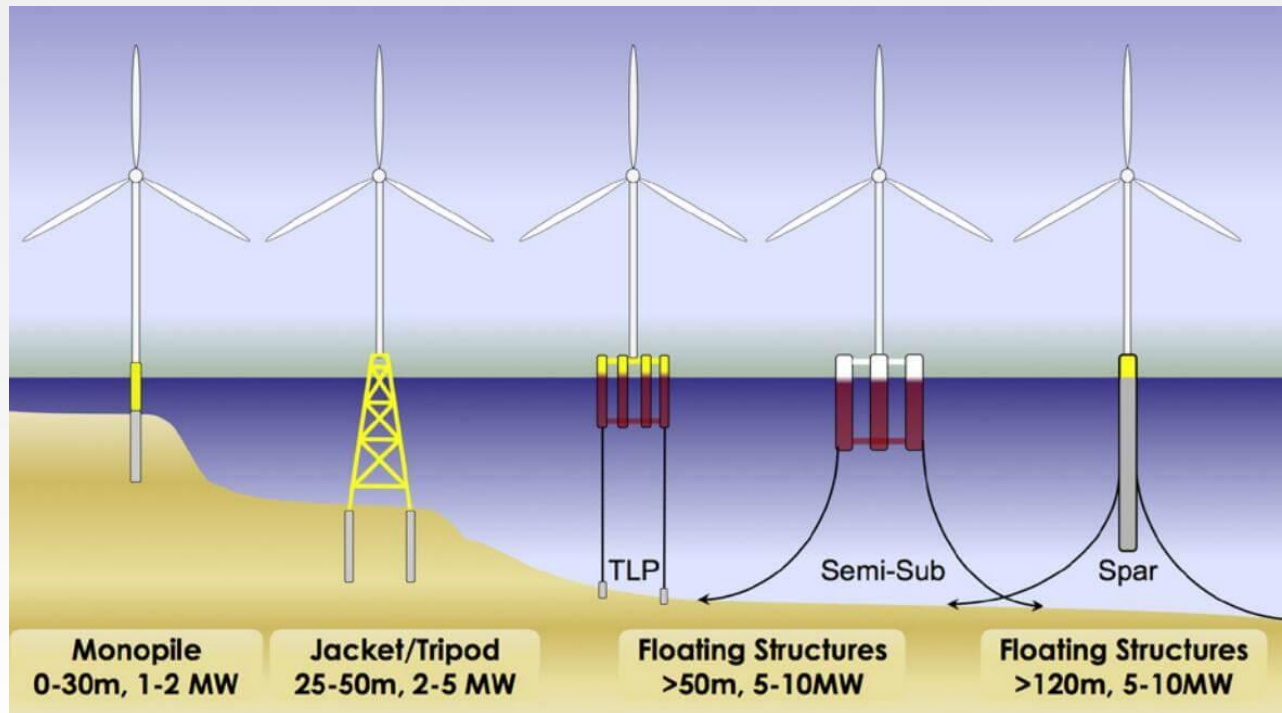
Flytende havvind



Hvorfor flytende vind?



- Havdybden utenfor de fleste land i verden (80%) er for stor for å kunne benytte bunnfaste løsninger (> 50 m), **flytende fundamenter** er en svært viktig teknologi
- Forskjellige flytende fundamenter er mer kostnadseffektive ved økende havdybder



Energiproduksjon på land vs. til havs



$$\text{Kapasitetsfaktor} = \frac{\text{Årlig energiproduksjon}}{\text{Teoretisk maksimal produksjon}} = \frac{\text{AEP}}{P_{\text{turbine}} \cdot 8760}$$

	Innstallert effekt (GW)	Produksjon (TWh)	Kapasitetsfaktor	Gjennomsnittlig turbinstørrelse (MW)	Referanse
Norge	1,165	2,85	0,32	2,5	Vindinfo.no
Midtfjellet	0,110	0,325	0,34	2,5	Midtfjellet.no
Midtfjellet estimat 2018	0,150	0,434	0,33	2,73	Midtfjellet.no
EU offshore	15,78 (4149 turbiner)	55,3 ¹	0,29 – 0,48	5,9 ²	Windeurope.org
Hywind Scotland (1. år)	0,030	0,147	0,56	6,0	Equhttp//inor.com
Sheringham Shoal (UK)	0,317	Ca 1,1	Ca. 0,40	3,6	http://www.sheringhamshoal.co.uk/

1): Antatt $C_p = 0.4$

2): Gjelder nye turbiner i 2017





Forskningsutfordringer



Vaker



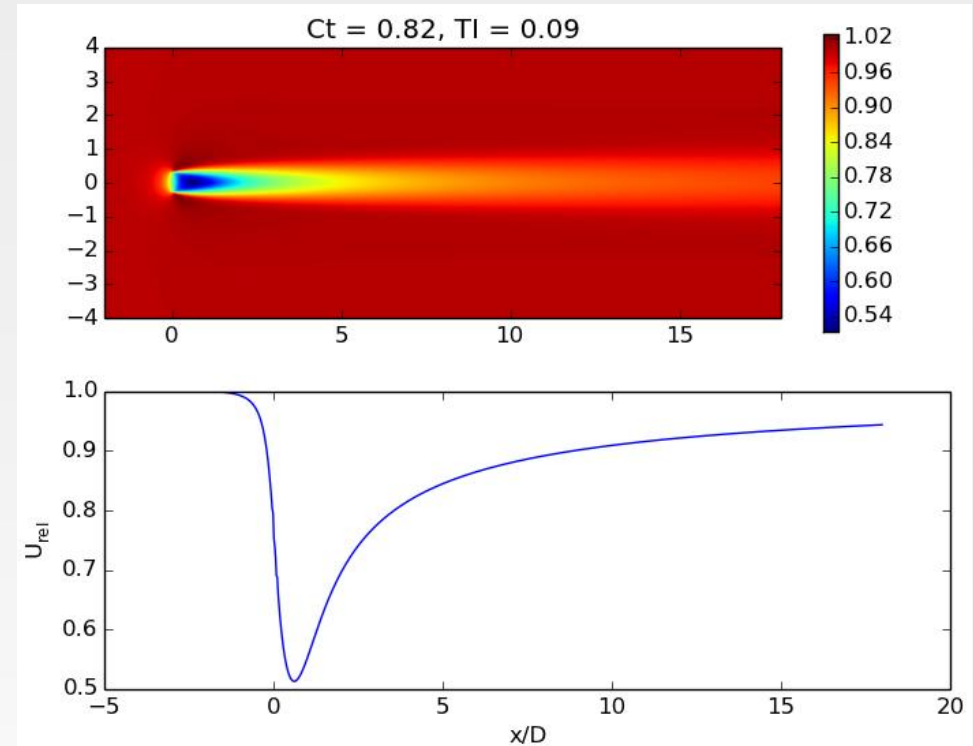
- Vindturbiner produserer vaker som påvirker turbinene og økonomien til vindparker
- I vaker blir vindhastigheten redusert
- I vaker økes mengden turbulens
- Dette fører til at turbinene som operer i vaker både produserer mindre energi og får redusert levetid grunnet økt belastning



Redusert vindhastighet i vaker



- Turbiner som opererer i vaker opplever redusert vindhastighet
- Redusert vindhastighet resulterer i lavere energiproduksjon for nedstrøms turbinene
- Det største tapet i energiproduksjonen eksisterer for turbinen i første og andre rad i en vindpark



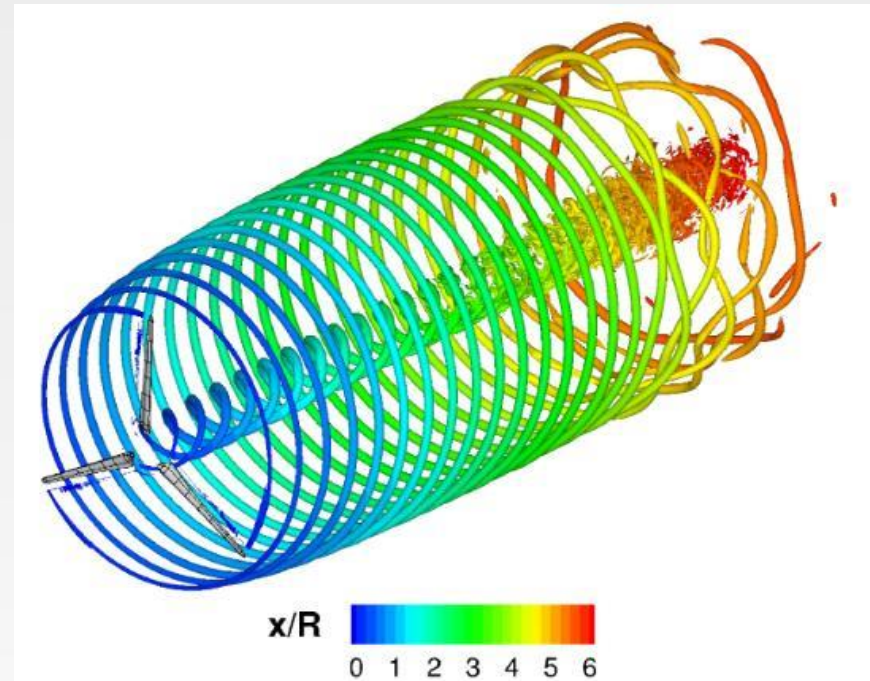
$$Power = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 A_{swept} C_p$$



Økt turbulens i vaker



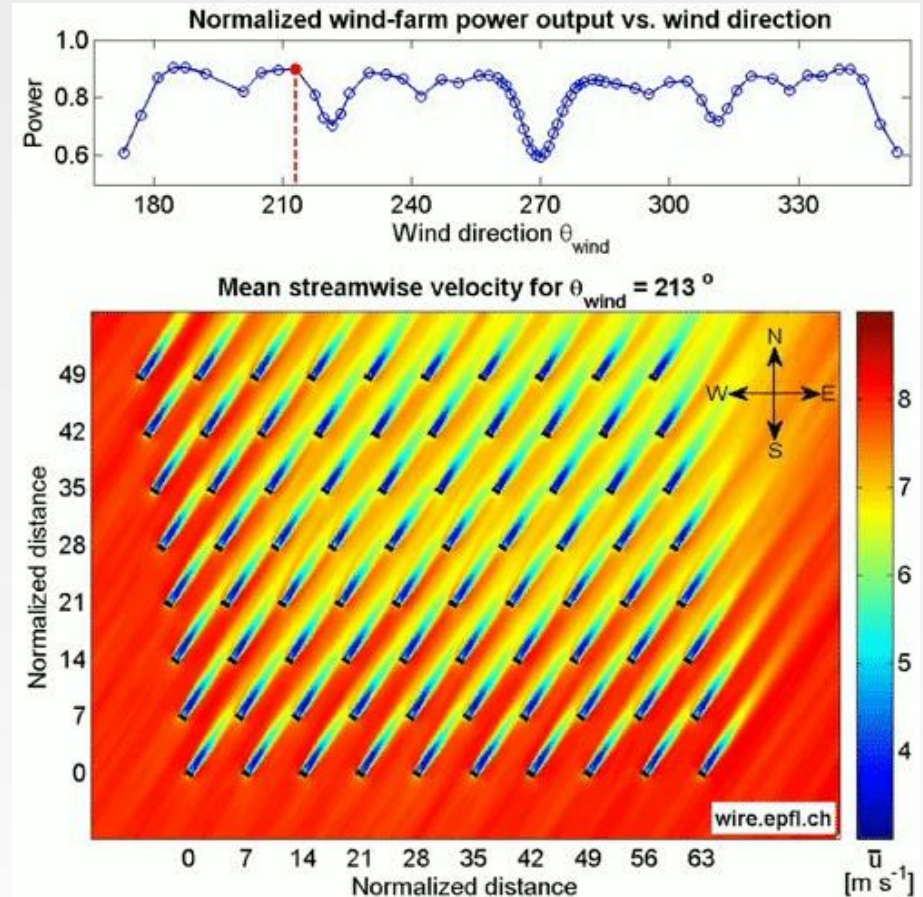
- Turbulente vaker genereres ifra tipp og rot til de roterende rotorbladene
- Rotorbladenes utforming og turbinens rotasjonshastighet bestemmer distansen det tar før vakene løser seg opp
- Distansen det tar før virvlene i vaken løser seg opp bestemmer også distansen det tar før vindhastigheten bak en turbin normaliseres



Vaker og energiproduksjon



- Denne numeriske simuleringen viser den totale energiproduksjonen til en vindpark ved forskjellige vindretninger
- Gjennomsnittstapet i energiproduksjon på grunn av vaker er mellom 10-20%
- Numerisk modellering, og optimering av turbinenes plassering i en vindpark for å minimere tap fra vaker er viktige problemstillinger



Atmosfærisk stabilitet



- Vaker blir påvirket av stabiliteten i atmosfæren på samme måte som røyken ifra en skorstein
- Hvis luften er ustabil, mikses vakene raskt og distansen det tar før vakene løser seg opp er kort
- Hvis luften er stabil, er det lite miksing og vake-strukturene kan beholde sin form og styrke store distanser bak vindturbinene



Forkant erosjon



Luftbårne partikler eroderer forkanten til rotorbladene:

- Insekter
 - Regn
 - Salt
 - Hagl
 - Sand
- Partikler som fører til erosjon på vindturbiner til havs



Forkant erosjon:

- Reduserer energiproduksjonen til vindturbinene
- Reduserer levetiden til rotorbladene





UNIVERSITY OF BERGEN