TR A6071

Vindkraft FoU seminar 26. - 27. januar 2005

www.energy.sintef.no

SINTEF Energiforskning AS

Februar 2005

SINTEF

Institutt for Energiteknikk
Postboks 40
2027 Kjeller
Tlf: 63 80 60 00*
www.ife.no

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
7491 Trondheim
Telefon: 73 59 50 00*
www.ntnu.no

SINTEF

SINTEF Energiforskning AS

Postadresse: 7465 Trondheim
Resepsjon: Sem Sælands vei 11
Telefon: 73 59 72 00
Telefaks: 73 59 72 50

www.energy.sintef.no

Foretaksregisteret:
NO 939 350 675 MVA

TEKNISK RAPPORT

SAK/OPPGAVE (tittel)

Vindkraft FoU seminar 26. – 27. januar 2005

SAKSBEARBEIDER(E)

John Olav Tande

OPPDRAGSGIVER(E)

TR NR.	DATO	OPPDRAGSGIVER(E)S REF.	PROSJEKTNR.
TR A6071	2005-02-07		12X27801

ELEKTRONISK ARKIVKODE	PROSJEKTANSVARLIG (NAVN, SIGN.)	GRADERING
050207RHA124645	John Olav G. Tande	ÅPEN

ISBN NR.	RAPPORTTYPE	FORSKNINGSSJEF (NAVN, SIGN.)	OPPLAG	SIDER
82-594-2772-9		Petter Støa	10	105

AVDELING	BESØKSADRESSE	LOKAL TELEFAKS
Energisystemer	Sem Sælands vei 11	73 59 72 50

RESULTAT (sammendrag)

SINTEF, IFE og NTNU samarbeider om vindkraft FoU. Dette gjøres gjennom NFR KMB prosjektet "Utvikling av norsk vindkraftteknologi" (2001-2005), NFR "Strategisk vindkraftprogram" (2003-2007) og gjennom etablering av teststasjon for vindkraftverk på Valsneset i regi av selskapet VIVA AS.

Vindkraft FoU Seminar 26-27 Januar 2005, Royal Garden Hotel, Trondheim presenterte resultat fra disse aktivitetene, samtidig som det også var innlegg vedrørende industriutvikling og utbygging av vindkraft i Norge. Følgende tema ble presentert:

- Beregning av vindforhold
- Aerodynamikk og Strukturdynamikk
- Elektrisk Design og Styring
- Industri og Kompetanse
- Perspektiv, Politikk og Planlegging

Totalt ble det holdt 23 presentasjoner som alle er gjengitt i denne rapporten.

Seminaret ble arrangert av NTNU, IFE og SINTEF i fellesskap ved: John Olav Tande (SINTEF Energiforskning), Per Finden (IFE/NTNU), Tore Undeland (NTNU) og Terje Gjengedal (NTNU/Statkraft).

STIKKORD

EGENVALGTE		

INNHOLDSFORTEGNELSE

Side

PROGRAM 3
DELTAKERLISTE 4

PRESENTASJONER:

Åpning/innledning ved John Olav G. Tande, SINTEF Energiforskning AS 7
”Evaluering av WASP”, Erik Berge, Kjeller Vindteknikk 10
”Modellerte terrengeffekter”, Ove Undheim, Institutt for energiteknikk 13
”Eksperimentell studie av terrengmodell”, Kjersti Røkenes, NTNU 20
”Beregning av vindforhold i fjellterreng”, Karl Eidsvik, SINTEF Anvendt Matematikk 23
”Bladtipp design”, Andreas Knauer, Institutt for energiteknikk 43
”Teknologiskifte for store vindturbinblad i arktiske strøk”, Jørg Høyland, NTNU 47
”Ising på vindkraftverk – status IEA Wind R&D Annex 19”, Lars Tallhaug, Kjeller Vindteknikk 50
”Islaster på offshore vindkraftverk”, Asle Skiple, NTNU 58
”Offshore vindkraft på dypt vann”, Eystein Borgen, SWAY 60
”Regelverk for design av offshore vindmøllekonstruksjoner”, Knut Ronold, DNV 62
”Systemkrav til vindkraftverk”, Kjetil Uhlen, SINTEF Energiforskning 63
”Transient stabilitet av synkron og dobbeltmatet asynkrongenerator, Jarle Eek, NTNU 68
”Reguleringsteknikk for vindkraftverk”, Thomas Fuglseth, NTNU 71
”DFIG modeller for transiente simuleringer”, Bjarne Næss, NTNU 74
”Modellering av vindkraftverk – Status IEA Wind R&D Annex 21”, John Olav Tande, ... 76
SINTEF Energiforskning
”Eksperimentelt studie av bruk av STATCOM for reaktiv kompensering av vindkraftverk”, ... 79
Jorun Marvik, NTNU
”Control of a Doubly-Fed Wind Generator Connected to an Unbalanced Grid, Ted Brekken, ... 81
visiting phd stud NTNU
“Ny generator teknologi – Smart Generator”, Ulf Aakenes, SmartMotor AS 85
“Behov for vindkraft kompetanse”, Terje Gjengedal, Statkraft Energi / NTNU 89
”Teststasjon for vindkraftverk”, Per Finden, IFE / styreleder VIVA AS 91
”Utsira vind/hydrogen system”, Pål Otto Eide / Jan Schelling, Hydro Markets 94
”Fibermatter til produksjon av blader”, Baard Røsvik, Devold AMT 97
”Vindsatsning i NTE og ScanWind”, Pål Engebretsen, NTE 98

PROGRAM

Vindkraft FoU Seminar, 26-27 Januar 2005, Trondheim

26 Januar 2005	
11.00-12.00	**Registrering & Lunsj (enkel servering)**
12.00-12.20	**Åpning/innledning v John Olav Tande, SINTEF Energiforskning**
12.20-13.50	**Beregning av vindforhold (ordstyrer Per Finden, IFE / prof NTNU)**
(20 min)	*Evaluering av WASP*, Erik Berge, Kjeller Vindteknikk
(20 min)	*Modellerte terrengeffekter*, Ove Undheim, phd stud NTNU
(20 min)	*Eksperimentell studie av terrengmodell*, Kjersti Røkenes, phd stud NTNU
(20 min)	*Beregning av vindforhold i fjellterreng*, K Eidsvik, SINTEF Anvendt Matematikk
13.50-14.10	Kaffe/mineralvann/frukt
14.10-15.40	**Aerodynamikk og Strukturdynamikk (ordstyrer Jørgen Løvseth, prof NTNU)**
(20 min)	*Bladtipp design*, Andreas Knauer, IFE
(10 min)	*Teknologiskifte for store vindturbinblad i arktiske strøk*, J Høyland, phd stud NTNU
(20 min)	*Ising på vindkraftverk – status IEA Wind R&D Annex 19*, L Tallhaug, Kjeller Vindteknikk
(10 min)	*Islaster på offshore vindkraftverk*, Asle Skiple, phd stud NTNU
(20 min)	*Offshore vindkraft på dypt vann*, Eystein Borgen, SWAY
(10 min)	*Regelverk for design av offshore vindmøllekonstruksjoner*, Knut Ronold, DNV
15.40-16.00	Kaffe/mineralvann/frukt
16.00-17.00	**Elektrisk Design og Styring – del I (ordstyrer Trond Toftevaag, SINTEF)**
(20 min)	*Systemkrav til vindkraftverk*, Kjetil Uhlen, SINTEF Energiforskning
(10 min)	*Transient stabilitet av synkron og dobbeltmatet asynkrongenerator*, J Eek, phd stud NTNU
(10 min)	*Reguleringsteknikk for vindkraftverk*, Thomas Fuglseth, phd stud NTNU
(10 min)	*DFIG modeller for transiente simuleringer*, Bjarne Næss, phd stud NTNU
17.00-17.10	Kaffe/mineralvann/frukt
17.10-18.20	**Elektrisk Design og Styring – del II (ordstyrer Tore Undeland, prof NTNU)**
(20 min)	*Modellering av vindkraftverk – Status IEA Wind R&D Annex 21*, John Olav Tande, SINTEF Energiforskning
(10 min)	*Eksperimentelt studie av bruk av STATCOM for reaktiv kompensering av vindkraftverk*, Jorun Marvik, vitenskaplig assistent, NTNU
(10 min)	*Control of a Doubly-Fed Wind Generator Connected to an Unbalanced Grid*, Ted Brekken, visiting phd stud NTNU (scholarship from University Minnesota, USA)
(20 min)	*Ny generator teknologi - Smart Generator*, Ulf Aakenes, SmartMotor AS
18.30-	Middag
27 Januar 2005	
09.00-10.30	**Industri og Kompetanse (ordstyrer Terje Gjengedal, Statkraft Energi / prof NTNU)**
(10 min)	*Behov for vindkraft kompetanse*, Terje Gjengedal, Statkraft Energi / prof NTNU
(10 min)	*Teststasjon for vindkraftverk*, Per Finden, IFE / styreleder VIVA AS
(20 min)	*Utsira vind/hydrogen system*, Pål Otto Eide, Hydro Markets
(20 min)	*Fibermatter til produksjon av blader*, Baard Røsvik, Devold AMT
(20 min)	*Vindsatsning i NTE og ScanWind*, Pål Engebretsen, vise adm dir NTE
10.30-10.50	Kaffe/mineralvann/frukt
10.50-12.20	**Perspektiv, Politikk og Planlegging (ordstyrer Per Finden, IFE / prof NTNU)**
	Innlegg og Paneldebatt; Deltagere: Jørund Leknes (Energi og Miljø komiteen), Harald Rikheim (NFR), Nere Skomedal (adm.dir. Umoe Ryving), Terje Gjengedal (Statkraft), Torolf Pettersen (adm.dir. ScanWind), John O Tande (SINTEF), Tore Undeland (NTNU)
12.20-12.30	**Oppsummering v Per Finden, IFE / prof NTNU**
12.30-13.30	Lunsj

DELTAKERLISTE

Navn:	Firma:	E-mailadr.
Albert Leirbukt	ABB AS	albert.leirbukt@no.abb.com
Amir Messiha	NVE	ame@nve.no
Anna Johnsen	NTNU	
Anders Elvebakk	NTNU	anders.elvebakk@elkraft.ntnu.no
Andreas Knauer	IFE	Andreas.Knauer@ife.no
Anja Saxebøl	NVE	ang@nve.no
Arne Reidar Gravdahl	VECTOR AS	gravdahl@vector.no
Arne Nysveen	NTNU	arne.nysveen@elkraft.ntnu.no
Asbjørn Andersen	Transtech AS	asbjorn.andersen@transtech.no
Aslak Mæland	NTNU	
Asle Skiple	NTNU	asle.skiple@ntnu.no
Bjarne Idsøe Næss	NTNU	bjarneid@stud.ntnu.no
Bjørn Hugo Jenssen	Statnett	bjorn.jenssen@statnett.no
Baard Aslak Birkeland	NTNU	
Baard Røsvik	Devold AMT	br@amt.no
Celin Tonheim	NTNU	
Erik Berge	Kjeller Vindteknikk	erik.berge@ife.no
Espen Hagstrøm	E-CO Tech	espen.hagstrom@e-co.no
Eystein Borgen	SWAY AS	eb@sway.no
Finn Gunnar Nielsen	Norsk Hydro	Finn.Gunnar.Nielsen@hydro.com
Geir Inge Berg	NTNU	
Guro Sylling	NTNU	
Giuseppe Guidi	NTNU	giuseppe.guidi@elkraft.ntnu.no
Harald Rikheim	Norges Forskningsråd	hri@forskningsradet.no
Helge M. Eklund	Troms Kraft Produksjon AS	helge.eklund@troms-kraft.no
Ingrid Øverås	NTNU	
Jan Schelling	Norsk Hydro	Jan.Schelling@hydro.com
Jarle Larsen	Lyse Produksjon AS	jarle.larsen@lyse.no
Jörg Høyland	NTNU	jorg.hoyland@ntnu.no
Jørgen Hjulstad Nilsen	NTNU	
Jørgen Løvseth	NTNU	Jorgen.Lovseth@phys.ntnu.no
Jørund Leknes	Stortinget	jorund.leknes@stortinget.no
Jarle Eek	NTNU	Jarle.Eek@elkraft.ntnu.no
Johan F. Bratt	NTNU	Johan.F.Bratt@ntnu.no
John Olav Tande	SEfAS	John.O.Tande@sintef.no
Jorun Marvik	NTNU	jorun.marvik@elkraft.ntnu.no
Jøran Solli	NTNU	jorans@hf.ntnu.no
Karl Eidsvik	SINTEF	karl.j.eidsvik@sintef.no

Kjersti Røkenes	NTNU	kjersti.rokenes@ntnu.no
Kjetil Uhlen	SEfAS	Kjetil.Uhlen@sintef.no
Knut Helge Midtbø	Meterologisk Institutt	knut.helge.midtbo@met.no
Knut Hofstad	NVE	kho@nve.no
Knut Loneland	Statnett SF	knut.loneland@statnett.no
Knut O. Ronold	DNV	Knut.Ronold@dnv.com
Kåre Lorås	TrønderEnergi	KL@tronderenergi.no
Lars Tallhaug	Kjeller Vindteknikk	lars.tallhaug@ife.no
Leif Jankila	Varanger Kraft	leif.jankila@varanger-kraft.no
Lars André Dahle	Norges forskningsråd	lad@forskningsradet.no
Lars Norum	NTNU	norum@elkraft.ntnu.no
Lars Vormedal	Statnett	lars.vormedal@statnett.no
Leif Warland	SEfAS	leif.warland@sintef.no
Martin Geving Pedersen	NTNU	
Mette Høyseth	SEfAS	Mette.k.hoiseth@sintef.no
Magnus Korpås	NTNU	magnusk@ntnu.no
Marta Molinas	NTNU	marta.molinas@elkraft.ntnu.no
Martine H. Wilberg	NTNU	wilmah@online.no
Morten Aspnes	NTNU	
Morten Gaustad	GETEK AS	morten@getek.no
Nere Skomedal	Umoe Ryving AS	nere.skomedal@umoe.no
Nicolai Løvdal	NTNU	
Nils Reidar Skauen	Transtech AS	nils.skauen@transtech.no
Oddvar Njå	Lyse Produksjon AS	
Olav Morten Christensen	NTNU	
Ole-Morten Midtgård	Agder University College	ole-morten.midtgard@hia.no
Ole Svendgård	Svendgård Nexus	olesve@online.no
Olve Mo	SEfAS	Olve.Mo@sintef.no
Ottar André Sandvik	NTNU	ottarand@stud.ntnu.no
Ove Undheim	IFE	Ove.Undheim@ife.no
Per Finden	IFE	Per.Finden@ife.no
Pål Engebretsen	NTE	Pal.Engebretsen@nte.no
Pål Otto Eide	Hydro Markets	Pal.Otto.Eide@hydro.com
Reidar Anderssen	Umoe Ryving AS	Reidar.Anderssen@umoe.no
Roy Nilsen	NTNU	roy.nilsen@elkraft.ntnu.no
Sigurd Øvrebø	SmartMotor	
Simon-Philippe Breton	NTNU	simon.breton@ntnu.no
Stein Erik Hilmersen	NTNU	
Steinar Anders Hestnes	NTNU	
Svein Hestevik	SmartGenerator	
Svein Peder Berge	ScanWind Group	
Svein Kjetil Haugset	NTNU	
Sverre Flack	NTNU	sverre.flack@ark.ntnu.no
Ted Brekken	NTNU	

Terje Gjengedal	Statkraft Energi	Terje.Gjengedal@statkraft.com
Thomas Bjørnerud	NTNU	
Thomas Fuglseth	NTNU	thomas.fuglseth@elkraft.ntnu.no
Thomas C. Wiborg	EBL Kompetanse	TCW@ebl-kompetanse.no
Tor David Hanson	Norsk Hydro	Tor.David.Hanson@hydro.com
Torbjørn Vatn	NTNU	
Tore Undeland	NTNU	Tore.Undeland@elkraft.ntnu.no
Torolf Pettersen	ScanWind Group	Torolf.Pettersen.SCANWIND.NO
Trond Kvamsdal	SINTEF	trond.kvamsdal@sintef.no
Trond Olsen	TrønderEnergi	tro@tronderenergi.no
Trond Toftevaag	SEfAS	Trond.Toftevaag@sintef.no
Ulf Hanssen	Nordkraft Vind	urh@Narvik-Energi.no
Ulf Kolstad	Statnett	ulf.kolstad@statnett.no
Ulf Aakenes	SmartMotor AS	ulfaa@smartmotor.no
Veronica Håkonsen	NTNU	
Vibeke Strømme	FOBOX AS	Vibeke.Stromme@fredolsen.no

Vindkraft FoU Seminar
26-27 Januar 2005
Royal Garden Hotel, Trondheim

John Olav Giæver Tande
john.o.tande@sintef.no
SINTEF Energiforskning AS

26 Januar 2005	
11.00-12.00	**Registrering & Lunsj (enkel servering)**
12.00-12.20	**Åpning/innledning v John Olav Tande, SINTEF Energiforskning**
12.20-13.50	**Beregning av vindforhold (ordstyrer Per Finden, IFE / prof NTNU)**
(20 min)	*Evaluering av WASP*, Erik Berge, Kjeller Vindteknikk
(20 min)	*Modellerte terrengeffekter*, Ove Undheim, phd stud NTNU
(20 min)	*Eksperimentell studie av terrengmodell*, Kjersti Røkenes, phd stud NTNU
(20 min)	*Beregning av vindforhold i fjellterreng*, K Eidsvik, SINTEF Anvendt Matematikk
13.50-14.10	Kaffe/mineralvann/frukt
14.10-15.40	**Aerodynamikk og Strukturdynamikk (ordstyrer Jørgen Løvseth, prof NTNU)**
(20 min)	*Bladtipp design*, Andreas Knauer, IFE
(10 min)	*Teknologiskifte for store vindturbinblad i arktiske strøk*, J Høyland, phd stud NTNU
(20 min)	*Ising på vindkraftverk – status IEA Wind R&D Annex 19*, L Tallhaug, Kjeller Vindteknikk
(10 min)	*Islaster på offshore vindkraftverk*, Asle Skiple, phd stud NTNU
(20 min)	*Offshore vindkraft på dypt vann*, Eystein Borgen, SWAY
(10 min)	*Regelverk for design av offshore vindmøllekonstruksjoner*, Knut Ronold, DNV
15.40-16.00	Kaffe/mineralvann/frukt
16.00-17.00	**Elektrisk Design og Styring – del I (ordstyrer Trond Toftevaag, SINTEF)**
(20 min)	*Systemkrav til vindkraftverk*, Kjetil Uhlen, SINTEF Energiforskning
(10 min)	*Transient stabilitet av synkron og dobbeltmatet asynkrongenerator*, J Eek, phd stud NTNU
(10 min)	*Reguleringsteknikk for vindkraftverk*, Thomas Fuglseth, phd stud NTNU
(10 min)	*DFIG modeller for transiente simuleringer*, Bjarne Næss, phd stud NTNU
17.00-17.10	Kaffe/mineralvann/frukt
17.10-18.20	**Elektrisk Design og Styring – del II (ordstyrer Tore Undeland, prof NTNU)**
(20 min)	*Modellering av vindkraftverk – Status IEA Wind R&D Annex 21*, JO Tande, SINTEF Energiforskning
(10 min)	*Eksperimentelt studie av bruk av STATCOM for reaktiv kompensering av vindkraftverk*, J Marvik, vitenskaplig assistent, NTNU
(10 min)	*Control of a Doubly-Fed Wind Generator Connected to an Unbalanced Grid*, T Brekken, visiting phd stud NTNU (scholarship from University Minnesota, USA)
(20 min)	*Ny generator teknologi - Smart Generator*, Ulf Aakenes, SmartMotor AS
18.30-	Middag

27 Januar 2005	
09.00-10.30	**Industri og Kompetanse (ordstyrer Terje Gjengedal, Statkraft Energi / prof NTNU)**
(10 min)	*Behov for vindkraft kompetanse*, Terje Gjengedal, Statkraft Energi / prof NTNU
(10 min)	*Teststasjon for vindkraftverk*, Per Finden, IFE / styreleder VIVA AS
(20 min)	*Utsira vind/hydrogen system*, Pål Otto Eide, Hydro Markets
(20 min)	*Fibermatter til produksjon av blader*, Baard Røsvik, Devold AMT
(20 min)	*Vindsatsning i NTE og ScanWind*, Pål Engebretsen, vise adm dir NTE
10.30-10.50	Kaffe/mineralvann/frukt
10.50-12.20	**Perspektiv, Politikk og Planlegging (ordstyrer Per Finden, IFE / prof NTNU)**
	Innlegg og Paneldebatt; Deltagere: Jørund Leknes (Energi og Miljø komiteen), Harald Rikheim (NFR), Nere Skomedal (adm.dir. Unoe Ryving), Terje Gjengedal (Statkraft), Torolf Pettersen (adm.dir. ScanWind), John O Tande (SINTEF), Tore Undeland (NTNU)
12.20-12.30	**Oppsummering v Per Finden, IFE / prof NTNU**
12.30-13.30	Lunsj

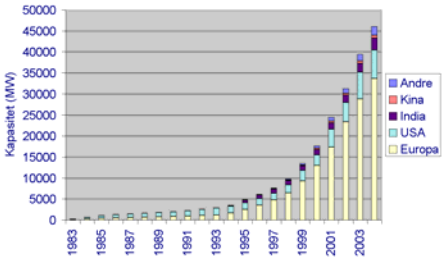
Vindkraft FoU Seminar
– kan vindkraft gi både energi og industri i Norge?

- SINTEF, IFE og NTNU samarbeider om vindkraft FoU. På seminaret vil disse vindkraft FoU aktivitetene presenteres, samtidig som det også vil bli innlegg vedrørende industriutvikling og utbygging av vindkraft i Norge.
- Spesiell oppmerksomhet vil gies til perspektivene for vindkraft i Norge:
  - Offisielt mål for vindkraft i Norge er 3 TWh produksjon i 2010, men hva bør målet være på lengre sikt?
  - Det satses på industriutvikling og vindkraft FoU, men satses det riktig og hva kan vi forvente av resultater?
- Tid til spørsmål og diskusjon vil vektlegges som en viktig del av seminaret.
- Seminaret er en oppfølging av tilsvarende seminar holdt 26-27 Januar 2004 i Trondheim

Vindkraft FoU Seminar, 26-27 Januar 2005

- Programstyre:
  - John Olav Tande (john.o.tande@sintef.no)
  - Per Finden (per.finden@ife.no)
  - Tore Undeland (Tore.Undeland@elkraft.ntnu.no)
  - Terje Gjengedal (Terje.Gjengedal@statkraft.com)
- Sekretær
  - Randi Aukan (randi.h.aukan@sintef.no)

INSTALLERT VINDKRAFT I VERDEN

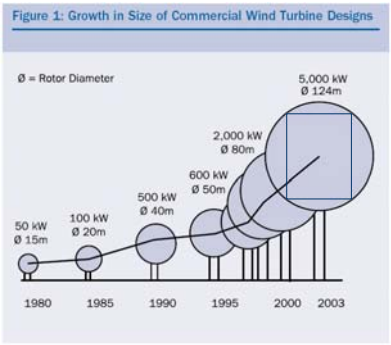


EWEA press release 03-2004:

"*.. even on a conventional scenario the total wind power installed worldwide could quadruple from 40GW to 160GW by 2012. The next ten years will also see a broadening of the global wind energy market to engage a spread of new countries across continents*"

UTVIKLINGS TRENDER

- Fabrikanter:
  lokale (1980) ~ konsern (2000); total omsetning ~ 50 GNOK/år
  5 på topp: Vestas, Enercon, Gamesa, GE, Simens
- Samme konsept (HAWT); mer avansert design
- Større:
  50 kW (1980) ~ multi MW i store parker (2000)
- Kostnad:
  +100 øre/kWh (1980) ~ 25-35 øre/kWh (2000)
- Støtteordninger:
  direkte støtte er på vei ut; erstattes med grønne sertifikater
  (Norge 2003: ~10 % investeringsstøtte + ½ forbruksavgift)
  (Norge 2004: ~25 % investeringsstøtte + ½ forbruksavgift)



Source: www.ewea.org

VINDKRAFT I NORGE STATUS ULTIMO 2004

- **I drift:**
  164 MW (0,5 TWh/år)
- **Medelt konsesjon:**
  955 MW (3,0 TWh/år)
- **Søkt:**
  406 MW (1,2 TWh/år)
- **Totalt:**
  1525 MW (4,6 TWh)
  + 40 meldinger (10-15 TWh/år)
- **Målsetning i st. meld. 29:**
  1000 MW (3 TWh) i år 2010

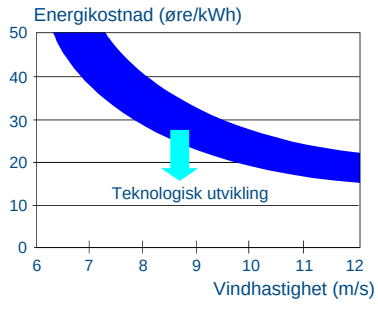
3 TWh vindkraft vil "oppta" ~60 km²

3 TWh vindkraft sparer 2 mill tonn CO_2

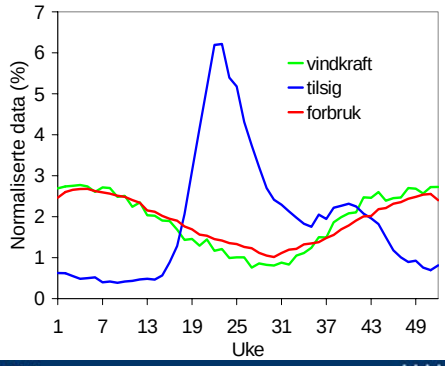
HVORFOR SATSE PÅ VINDKRAFT I NORGE?

- Norge har blant verdens beste vindforhold
  - norske vindparker gir +1,5 x produksjonen av tilsvarende i Tyskland
- Den norske vannkraften er en ideell partner til vindkraft
  - det danske kullbaserte kraftsystemet takler 20 % andel årlig vindenergi
- Vindkraft er en ren og fornybar energikilde
  - energi til fabrikasjon, frakt og oppstilling reproduseres på ~ 3 mnd
- Vindkraft er moden teknologi
  - profesjonelle aktører, kort byggetid, sikker drift, forutsigbar kostnad
  - stadig mulig å redusere kostnad ved utvikling av teknologi og kompetanse
- Norsk utbygging gir potensial for utvikling av industri
  - verdensmarket + 50 GNOK i 2004
  - norsk eksport ~ 400 MNOK i 2004 (Umoe, Devold, Kristiansand J., mfl)
  - utvikling krever tung & langsiktig satsning – sterk internasjonal konkurranse

KONKURRANSEDYKTIG VINDKRAFT



VIND OG VANN – ET VINN/VINN CASE



VINDKRAFT INDUSTRI I NORGE

Etablert eksportvirksomhet – status 2004

- Kristiansand Jernstøperi (turbinnav): 215 Mkr / 200 årsverk
- Devold AMT (glassfibermatter): 110 Mkr / 50 årsverk
- UMOE Ryving (blader): 40 Mkr / 45 årsverk
- Møre Trafo, Jotun, Dokka, Ullstein,..: ++
- SUM eksport fra norsk industri: ~ 400 Mkr / 350 årsverk

- Verdensmarked: ~ 50 Gkr / 200 000 årsverk*
  (* årsverk inkluderer både direkte og indirekte effekter)
- (1996: norsk eksport ~ 100 Mkr / verdensmarked ~ 12.5 Gkr)

VINDKRAFT INDUSTRI I NORGE

Up and coming – status 2004

- ScanWind (design og fabrikasjon av store vindturbiner):
  2x3 MW prototyp i drift,
  avtale om leveranse av ytterligere 14x3 MW til NTE
- Sway, Owec Design, ..: innovativt design for offshore vindkraft
- SmartMotor ++ (konsortium): innovativ generator design
- VIVA AS – test stasjon for vindkraftverk på Valsneset:
  planlegger sammen med SINTEF, IFE og NTNU utvikling og test av vindturbin med avansert styring og kontroll, bla individuell bladvinkelkontroll og fulleffekt frekvensomformer

SINTEF, IFE og NTNU samarbeider om vindkraft FoU

- NFR KMB "Utvikling av norsk vindkraftteknologi" (2001-2005) med deltagelse fra Statkraft, Umoe Ryving og Norsk Hydro
  http://www.energy.sintef.no/prosjekt/vindkraftteknologi/index.asp
- NFR "Strategisk vindkraftprogram" (2003-2007)
  http://www.energy.sintef.no/prosjekt/SIP/SIP_JOT/wind.asp
- Teststasjon for vindkraftverk på Valsneset (VIVA AS) med støtte fra Enova og TrønderEnergi
- Vindkraft elektroteknisk lab (NTNU & SINTEF)
- Total FoU ramme er + 40 MNOK og + 10 phd innen 2007

Overordnet mål er å redusere kostnad for vindkraft

- utvikle norsk industri og kompetanse for rasjonell utbygging og drift
- forbedre vindmodeller for layout av vindparker i komplekst terreng
- øke struktur- og aerodynamikkforståelse for forbedring av vindturbindesign
- utvikling av vindparkmodeller og kontrollkonsept som muliggjør økt andel vindkraft i svake nett, for eksempel store vindparker i Finnmark
- identifisere strategier som styrker folkelig aksept og støtte til vindkraft
- delta i internasjonale fora (IEC, IEA, EU-prosjekt, konferanser)

OUTLOOK
EWEA/Greenpeace (Wind Force 12)

- 1.2 million MW of wind power worldwide by 2020
- 12 % (3000 TWh) of the world's electricity requirements by 2020
- create 2.3 million jobs worldwide
- reduce CO_2 emissions by more than 10 billion ton
- world market increase from present 8 to 80 billion Euro by 2020
- 20 % this total capacity would be installed in Europe

WIND POWER IN NORWAY
SUMMARY

- Large areas with high average wind speeds – theoretical potential according to resource study + 1000 TWh/year
  (annual electricity consumption in Norway is ~ 120 TWh)
- Hydro-based system is excellent counterpart to wind
- On good Norwegian sites wind energy can be the least cost option for new electricity generation (0.20 NOK/kWh)
- Official target is 3 TWh wind energy production in 2010
- Slowly starting - 164 MW (0.5 TWh) was installed by end 2003
- Introducing green certificates will accelerate development
- Total planned projects by end 2004: +15 TWh (3 TWh w. concession)
- Potential for development of Norwegian industry
  (ScanWind, Dewold, Kr.sand Jernstøperi, Umoe, ++)
- Vision for wind power in Norway by 2020 is 20 TWh (land + offshore)
- Norway could be a leading wind energy country!

Evaluering av WAsP

Erik Berge
Kjeller Vindteknikk AS

Vindkraft FOU Seminar 26-27 Januar 2005 Trondheim

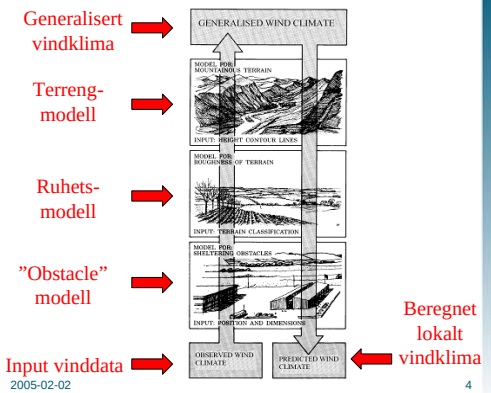
Innhold:

- Beskrive WAsP modellen
- Beskrive feltdata
- Sammenligne WAsP og målinger
- WAsP og terrenganalyse
- Oppsummering

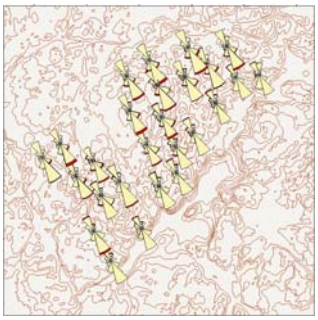
WAsP: ”Wind Atlas Analysis and Application Program”

- Beregner vindklima:
  - Målt vind, topografi, ruhet, skyggeeffekter (obstacles) som input.
- Beregner energiproduksjon:
  - Effektkurver, vake-tap
- WAsP er en industristandard i vindkraftmiljøet.

WAsP metodikken

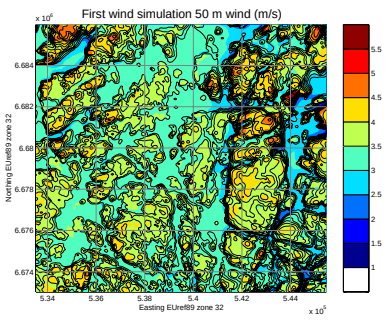


Eksempel på output fra WAsP



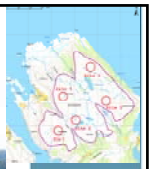
Årlig energiproduksjon og vaketap (rødt) som funksjon av vindretning for enkeltturbiner

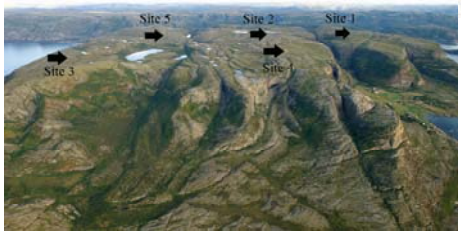
Vindkart



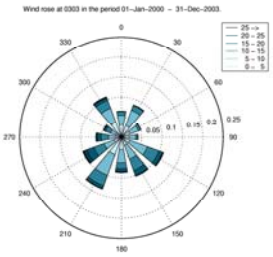
Harbaksfjellet

(An evaluation of the WAsP model at a coastal mountainous site in Norway, E.Berge et al. (2004), EWEC 2004, London).





Referanse site 1



Fire år med vindmålinger i 10m, 30m and 50m.

Bakgrunns-vind langs kysten:

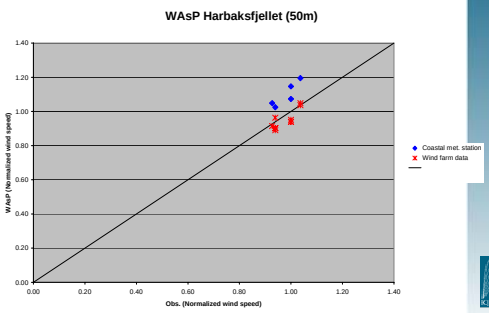
Årsmiddel på 7.4 m/s i 10m på Buholmråsa Fyr

Beregning av 4 års midlere vindhastighet på de andre stasjonene.

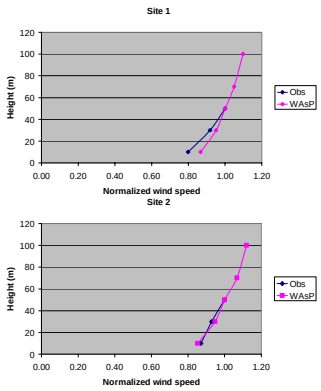
1: Antar samme vindrose for alle fire stasjonene

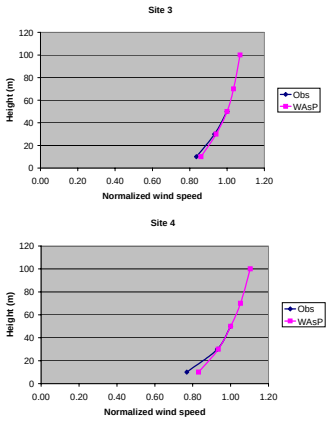
2: Skalerer vindhastigheten i hver sektor vhja. vinddata fra stasjon 1.

WAsP vs. Obs.



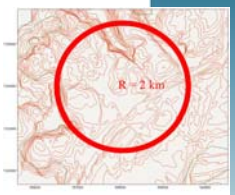
Vertikalprofiler





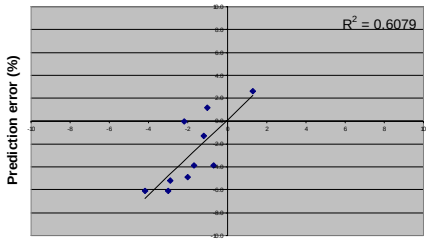
RIX-verdier (WAsP model)

- Den delen av terrenget med en helning på mer enn 30% innenfor en valgt radius
- dRIX = (RIX_{site} - $RIX_{met.mast}$)
- Bowen and Mortensen, 1996
  dRIX~0 Pålitelig prediksjon
  dRIX>0 Overpredikering
  dRIX<0 Underpredikering

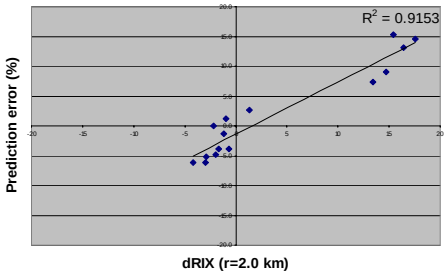


RIX-verdier i intervallet 13-18% for de 5 stasjonene

Vindparkstasjonene



Vindparkstasjonene og bakgrunnstasjon – (Buholmråsa).

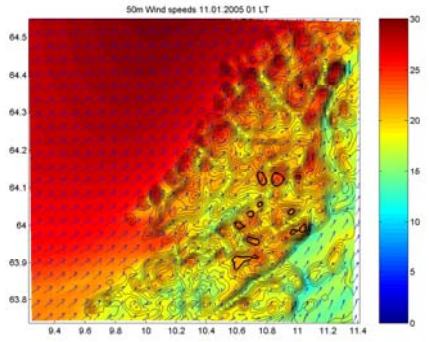


Sammendrag og konklusjoner

- WAsP feil på 8-15% for kystnære fjell ved å anvende meteorologisk bakgrunnstasjon (stor dRIX, 13-18%)
- Liten WAsP feil innen for vindparkområdet (0-6%) til tross for betydelig kompleksitet i terrenget (lav dRIX, 0-4%).
- Feil i vindprofilet mellom 10m og 50m varierer fra 2-8%
- Godt samsvar mellom dRIX og WAsP feil.
- Ingen sammenheng mellom WAsP feil og horisontal/vertikal avstand mellom stasjonene i vindparken.
- Det er ikke tatt hensyn til meso-skala effekter

Orkanen Hårek Jan-2005

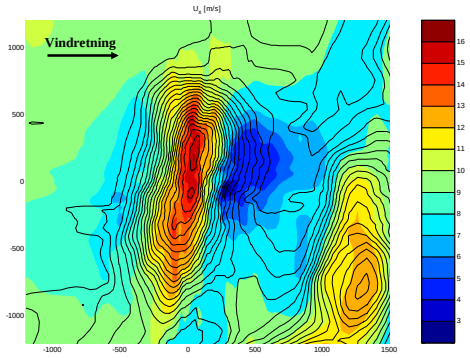
(WRF mesoskala modell, 1km gitter)



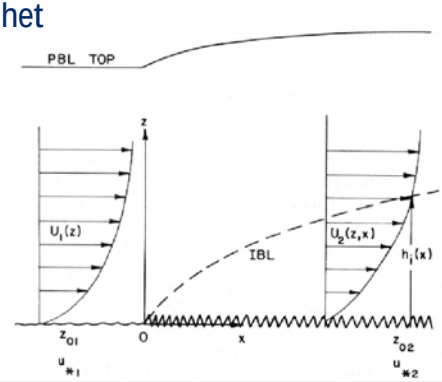
Modellerte terrengeffekter

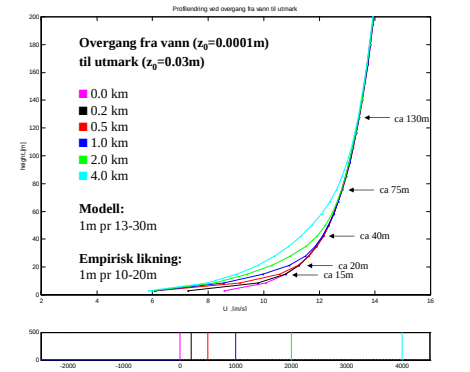
Vindkraft FoU Seminar Trondheim 26-27 Januar 2005

Ove Undheim



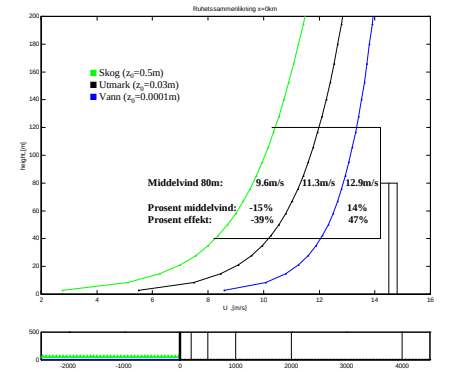
Ruhet

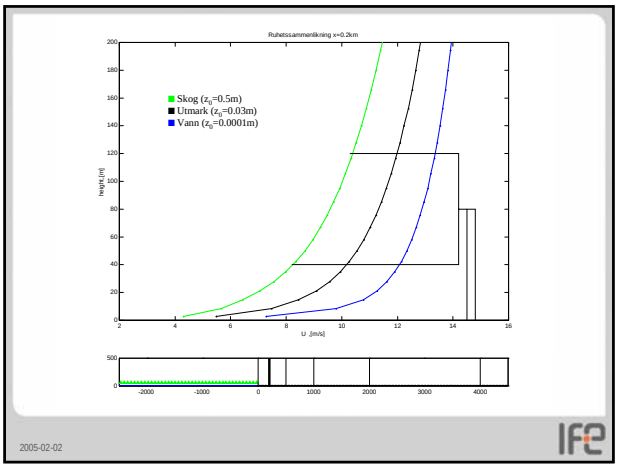


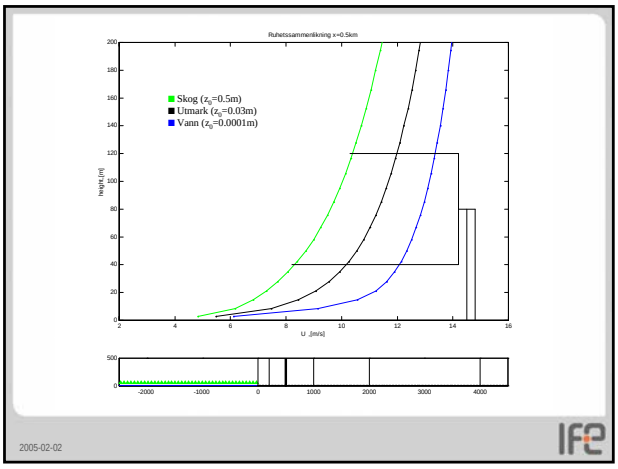


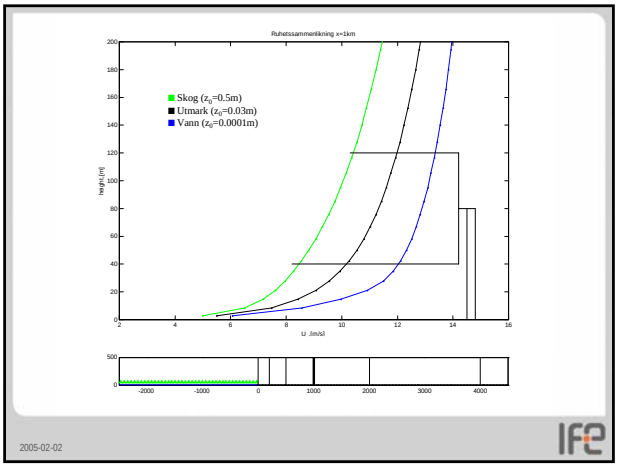
Ruhetseffekter

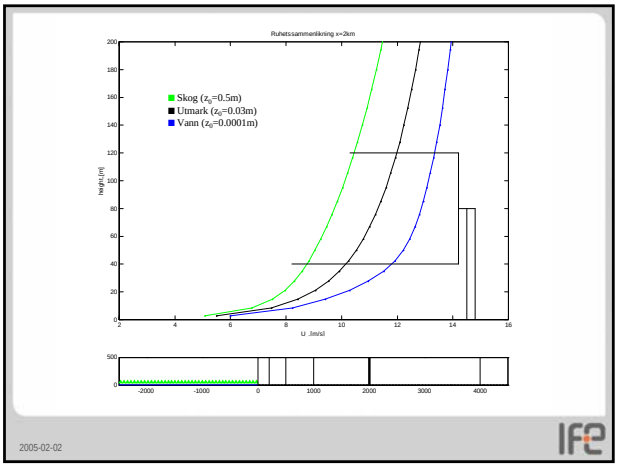
1. **Hvordan påvirker ruheten hastighetsprofilet som utvikles ved langvarige homogene forhold?**

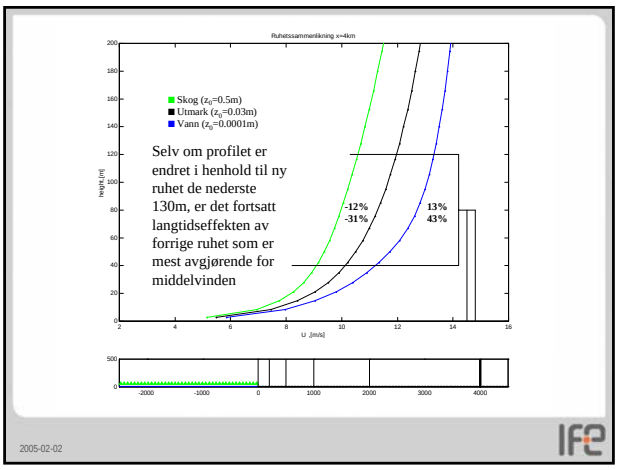








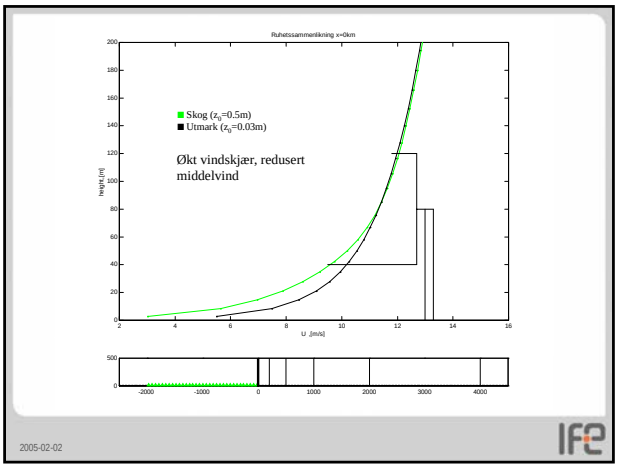


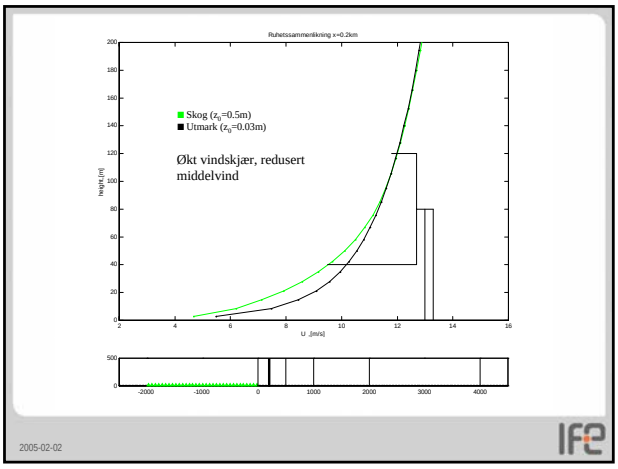


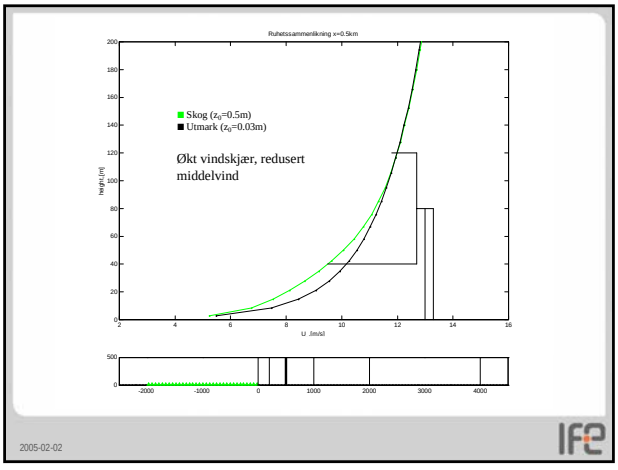
Ruhetseffekter

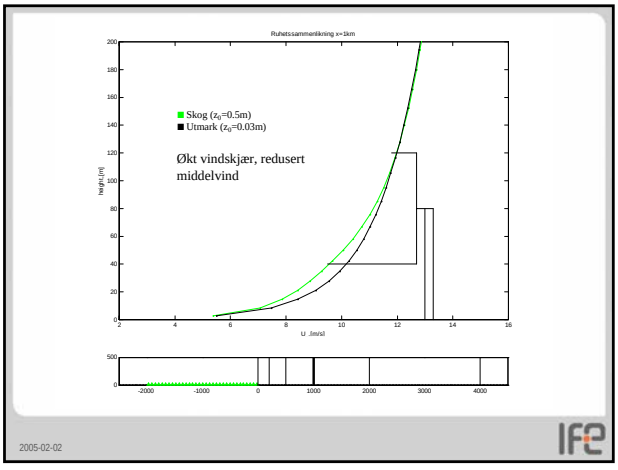
1. Hvordan påvirker ruheten hastighetsprofilet som utvikles ved langvarige homogene forhold?
2. **Hvordan påvirker en skog (▲▲▲▲) hastighetsprofilet bakenfor skogen?**

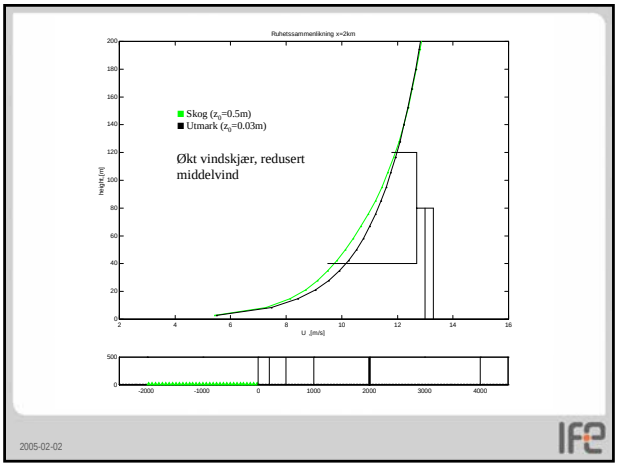
2005-02-02

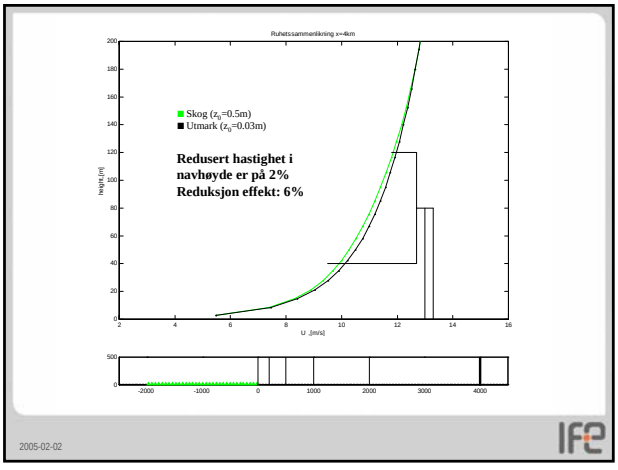

Ruhetssammenlikning x=0km
Skog (z_0=0.5m)
Utmark (z_0=0.03m)
Økt vindskjær, redusert middelvind
height_[m]
U_[m/s]
2005-02-02


Ruhetssammenlikning x=0.2km
Skog (z_0=0.5m)
Utmark (z_0=0.03m)
Økt vindskjær, redusert middelvind
height_[m]
U_[m/s]
2005-02-02


Ruhetssammenlikning x=0.5km
Skog (z_0=0.5m)
Utmark (z_0=0.03m)
Økt vindskjær, redusert middelvind
height_[m]
U_[m/s]
2005-02-02


Ruhetssammenlikning x=1km
Skog (z_0=0.5m)
Utmark (z_0=0.03m)
Økt vindskjær, redusert middelvind
height_[m]
U_[m/s]
2005-02-02


Ruhetssammenlikning x=2km
Skog (z_0=0.5m)
Utmark (z_0=0.03m)
Økt vindskjær, redusert middelvind
height_[m]
U_[m/s]
2005-02-02

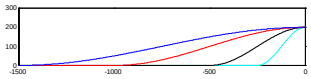

Ruhetssammenlikning x=4km
Skog (z_0=0.5m)
Utmark (z_0=0.03m)
Redusert hastighet i navhøyde er på 2%
Reduksjon effekt: 6%
height_[m]
U_[m/s]
2005-02-02

Topografieffekter

1. **Hvordan utvikler hastighetsprofilet seg innover et heng?**

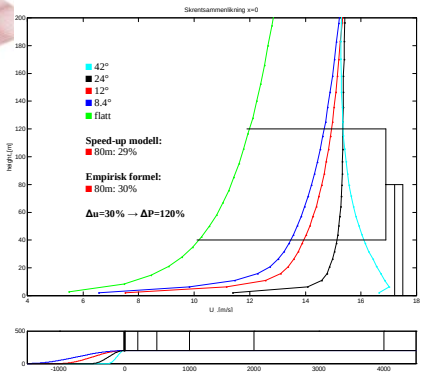
2005-02-02

Stigning

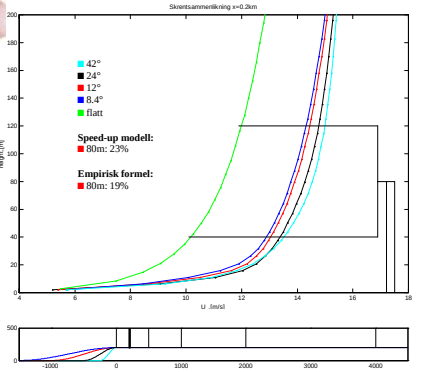


- Ser på fire forskjellige stigninger med sinusform
- Høyde på toppen er 200m
- På det bratteste er stigningene
  - 42° (unnarennet i Holmenkollen er 38°)
  - 24° (typisk stigning i utfor er 25°)
  - 12°
  - 8.4° (14% er på nivå med våre bratteste veier) (Oslofjordtunnellen 7%)

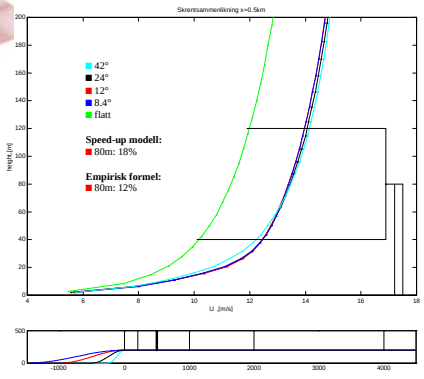
2005-02-02



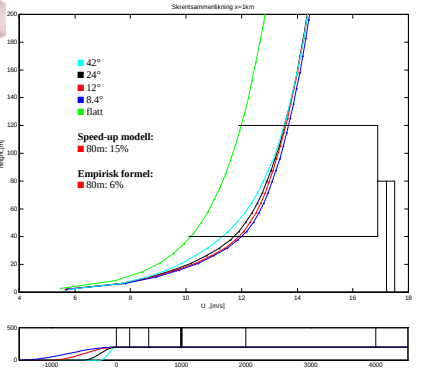
2005-02-02



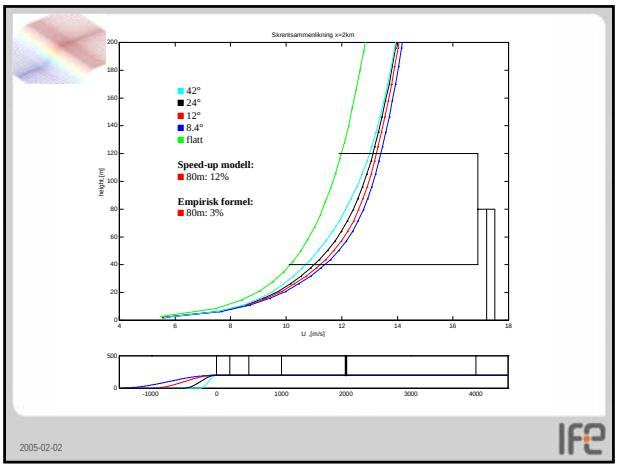
2005-02-02

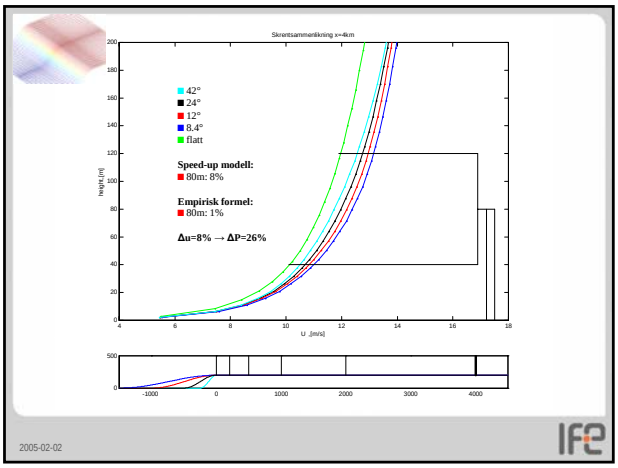


2005-02-02



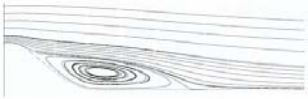
2005-02-02

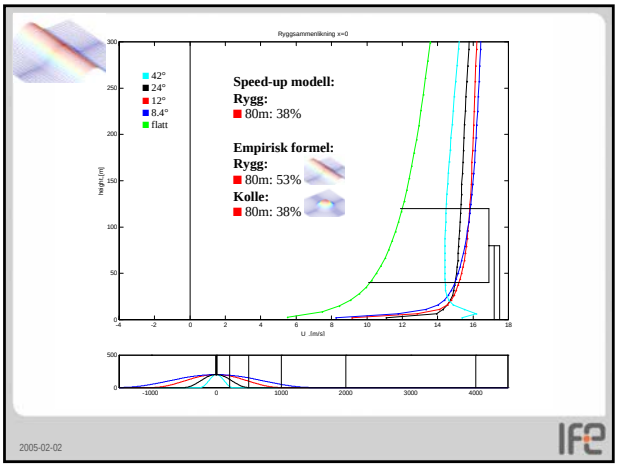


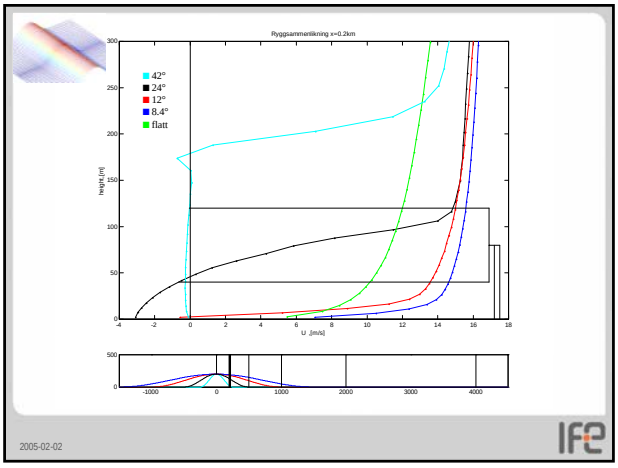


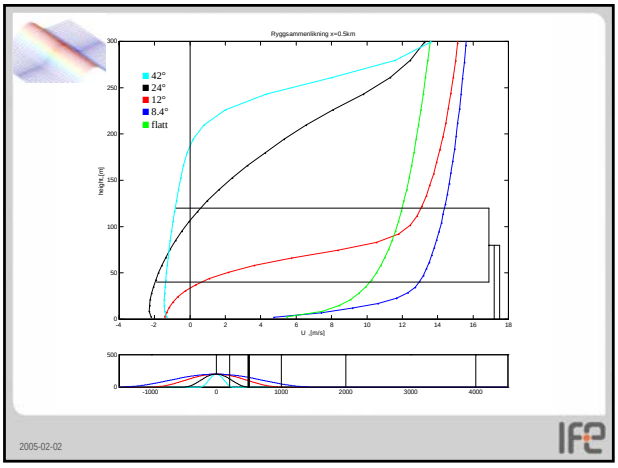
Topografieffekter

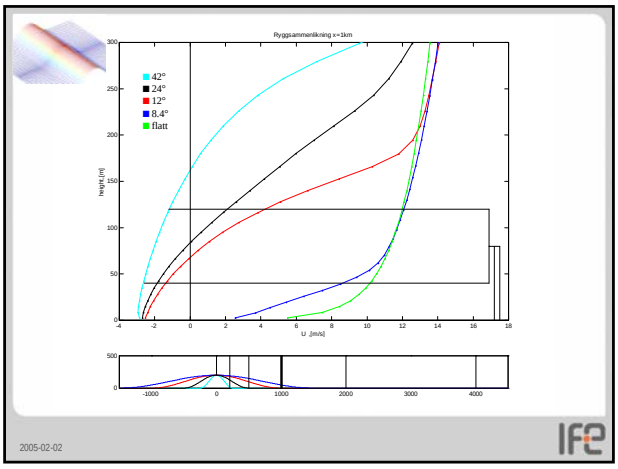
1. Hvordan utvikler hastighetsprofilet seg innover et heng?
2. **Hvordan utvikler hastighetsprofilet seg bak en rygg? (avløsning)**

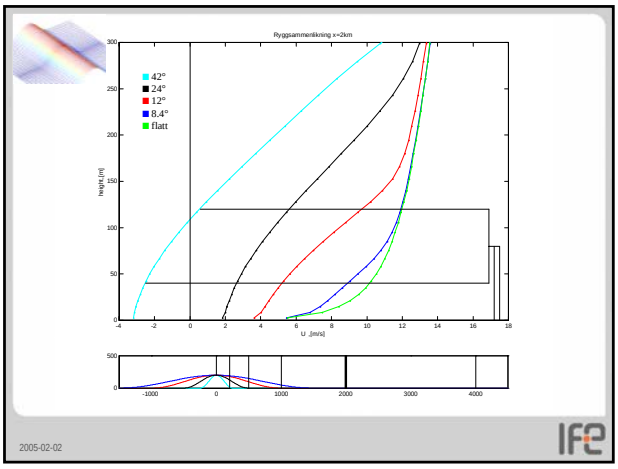


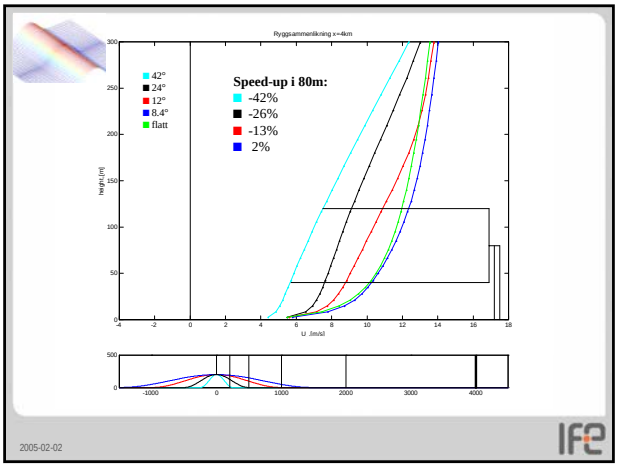






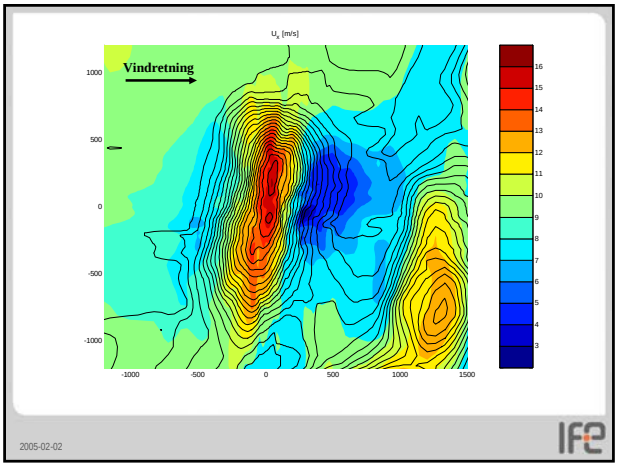


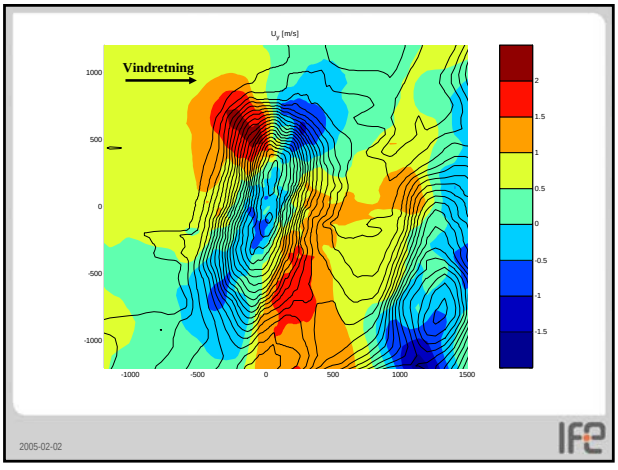


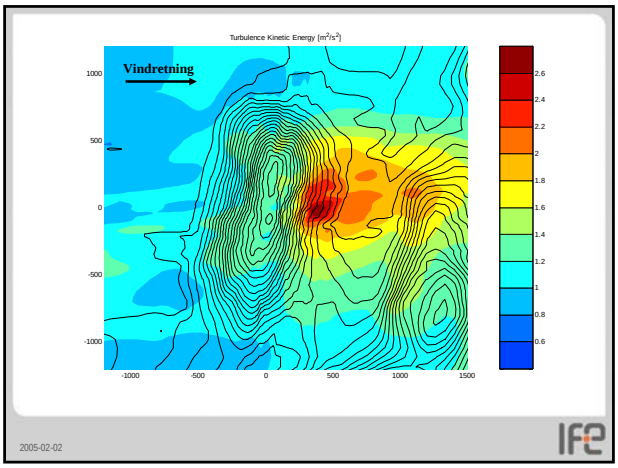


Konklusjon

- Terrengeffekter er viktig for totale vindforhold i et område
- Vanskelig å forutsi effektene og summen av disse (ikke lineært)
- Nyttig tilleggsinformasjon til målinger kan oppnås med simulering med ikke lineær strømningsløser (f.eks 3DWind)






Turbulence Kinetic Energy [m²/s²]
Vindretning
1000
500
0
-500
-1000
-1000
-500
0
500
1000
1500
2.6
2.4
2.2
2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
2005-02-02

Eksperimentell studie av terrengmodell

Kjersti Røkenes

Stipendiat
Strategisk Vindkraftprogram 2003 – 2007

Institutt for energi- og prosessteknikk
Veileder: Per-Åge Krogstad

Royal Garden Hotel, Trondheim
26. januar 2005

1

Innhold

- Bakgrunn for studiet
- Planer og samarbeid
- Litt om vindtunnelen
- Oppbygging av terrengmodellen
- Målemetoder
- Generering av grensesjikt
  - Ønsker
  - Resultater
- Status og konklusjon

2

Bakgrunn for studiet

- Plassering av vindparker- og turbiner har betydning for
  - Effekten som kan hentes ut
  - Belastning på turbinene
- Komplekst terreng i Norge
  - Gir komplisert strømningsbilde
  - En rekke vindparker planlegges i slikt terreng
- Data for vindhastighetsvariasjoner i komplekst terreng
  - Nyttig informasjon til bruk under planlegging av parker
  - Bidra til å forbedre numeriske modeller

3

Planer og samarbeid

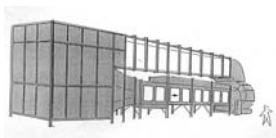
- Generisk terrengmodell skal studeres i vindtunnel
  - Terrengtrekk fra aktuelle norske steder
  - Konstruert for å gi kompliserte strømninger
  - Vind inn mot kysten
  - Detaljerte målinger
- Resultater vil bli benyttet som test-case for å videreutvikle og verifisere numeriske mikroskala strømingsmodeller
  - SIMa (Karl Eidsvik)
  - IFE (Andreas Knauer)

4

Vindtunnelen

Hastigheter:
0.5 – 30 m/s

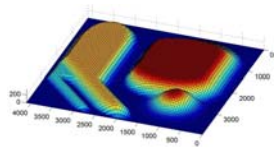
Størrelse testseksjon:
Lengde 11 m
Bredde 2.7 m
Høyde 1.9 m

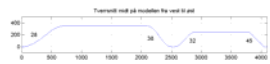


5

Terrengmodellen I

- Skala 1:1000
- 4 m x 4 m
- Må deles for å få plass
  - moduler
- Høyder ”fjell”
  - 250 m
  - 350 m
- Skråninger
- Vindretninger og måleposisjoner

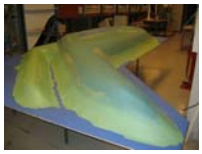


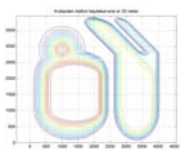


6

NTNU

Terrengmodellen II





7

NTNU

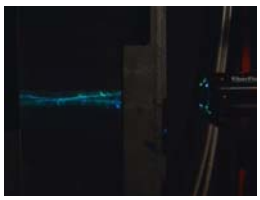
Terrengmodellen III

8

NTNU

Målemetoder

- Pitot-rør
- Hetetrådsanemometri (hot-wire)
- Laser Doppler Anemometry (LDA)



9

NTNU

Innkommende vindfelt I

Atmosfærisk grensesjikt inn fra hav

- Høyde 300 m, dvs. 30 cm i tunnel
- Profil som følger potenslov, med α i området rundt 0.11 $\quad \frac{U(z)}{U(z_{ref})} = \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^{\alpha}$
- Turbulensintensitet ved 30 m med omtrent samme verdi som α
- Spekter som følger velkjente modeller (Harris) $\quad \frac{fS(f)}{\overline{u'^2}} = \frac{4X}{2.58^2\left(2+X^2\right)^{5/6}} \qquad X = \frac{fL}{U_{10m}}$
- Godt utviklet og homogent på tvers

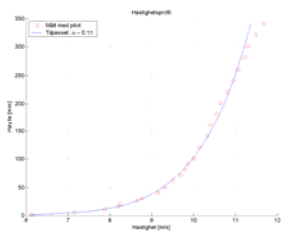
10

NTNU

Innkommende vindfelt II

Middelhastighetsprofil

- Følger potensloven godt i de nederste 30 cm
- Eksponenter: 0.10 – 0.11



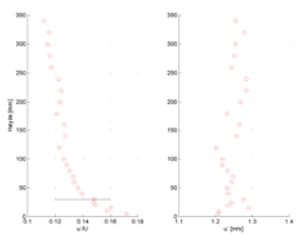
11

NTNU

Innkommende vindfelt III

Turbulensintensitet

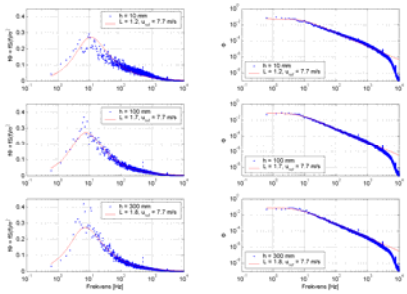
- $\left(\frac{u'}{U}\right)_{30} \approx 0.14$
- Litt høye verdier



12

NTNU

Innkommende vindfelt IV



13

NTNU

Status og konklusjon

- Modell laget
- Innkommende grensesjikt generert
- Diverse forberedelser
- Målinger startes snart

- Spørsmål?

14

.

SITING OF WIND ENERGY SYSTEMS IN MOUNTAINOUS TERRAIN. A NEW METHOD APPLYING RATIONAL METHODS AND AVAILABLE DATA

Karl J. Eidsvik
SINTEF Applied Mathematics

1): Over mountainous terrain the wind energy gain factor vary by about $E/E_0 = \mathrm{O}(5)$ from one location to another, while over flat land it is only: $E/E_0 = \mathrm{O}(1)$. Wind energy siting most important in mountainous terrain.

2): However: **" A flow model that works in terrain steeper than 14 degrees is extraordinary difficult to make"**. (Mann J., Ott S., Jørgensen B.H., Frank H.P. 2002; **WASP** Engineering 2000, Risø-R-1356 EN)

3): Existing ad. hoc. siting methods gather new local data, wait for statistical significance and hope for accurate wind energy estimates.

.

IDEA FOR MOUNTAINOUS TERRAIN:

LOW LEVEL FLOW HIGHLY TURBULENT AND SMALL-SCALED, SO LOW LEVEL DATA ALONE MAY CONTAIN LITTLE INFORMATION ABOUT THE LOCAL FLOW.

FLOW ABOVE TERRAIN IS LESS TURBULENT AND MORE LARGE-SCALED, SO DATA FROM THERE CONTAIN MORE INFORMATION.

TRANSFORM TO LOCAL FLOW IN TERRAIN BY MEANS OF MODELS. **IF MODELS ACCURATE**, DOWN-SCALED FLOW THE MOST SIGNIFICANT INFORMATION ABOUT THE LOCAL FLOW.

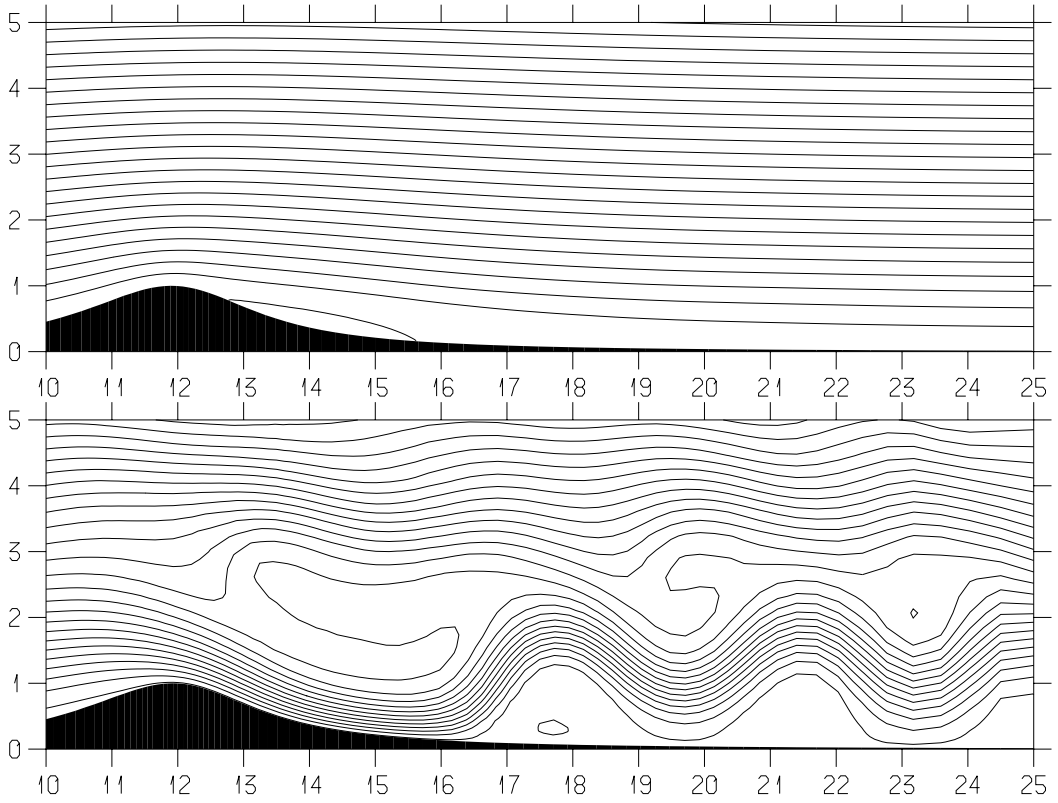


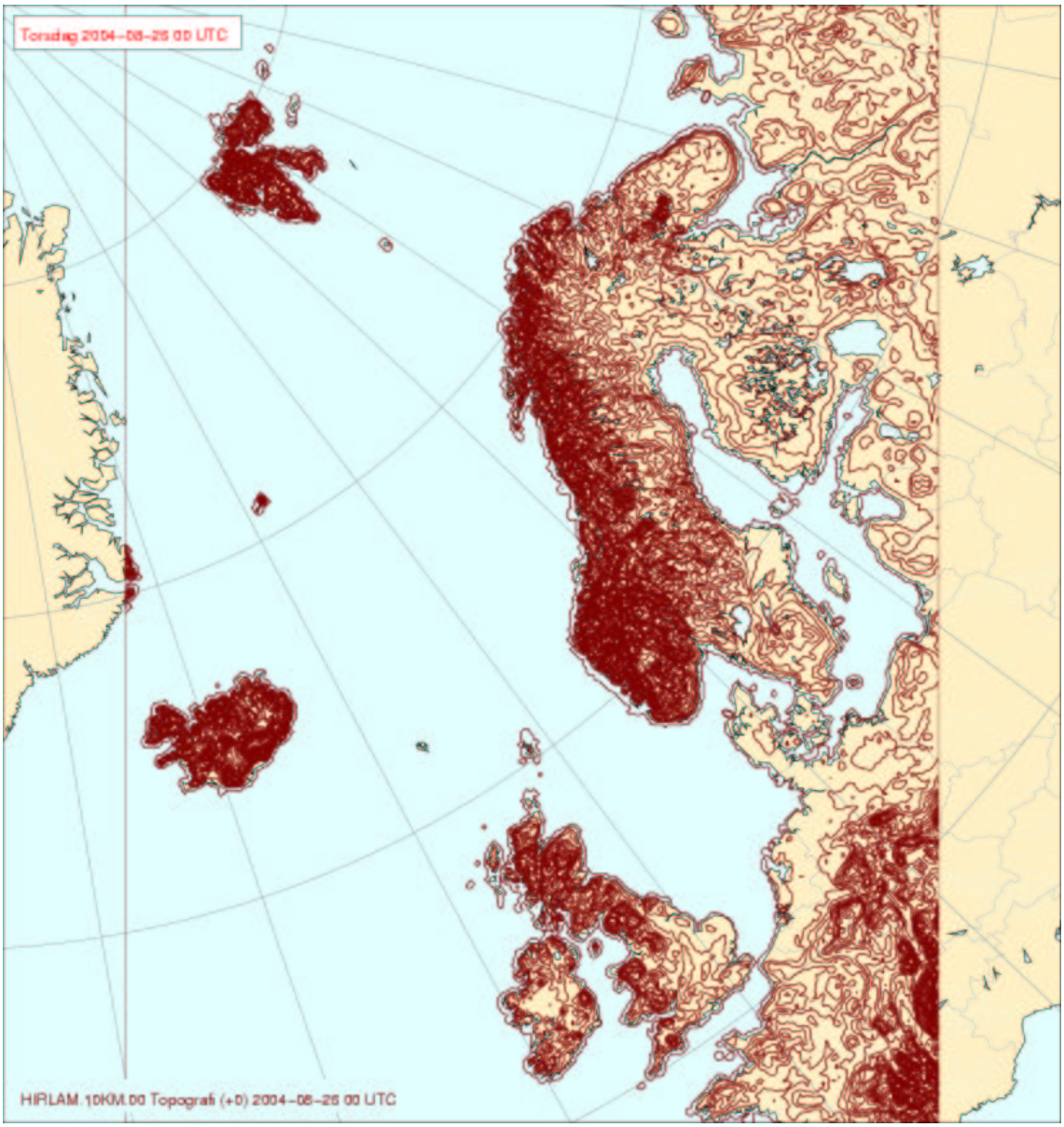
Figure 1: Streamlines for different stratification a): $Nh_m/U = 0$ b): $Nh_m/U = 2$ (Eidsvik and Utnes 1997). HOW COULD A FEW LOCAL MEASUREMENTS IDENTIFY FLOWS LIKE THIS ?

.

DATA ON LARGE SCALE FLOW FROM WEATHER PREDICTION SYSTEM

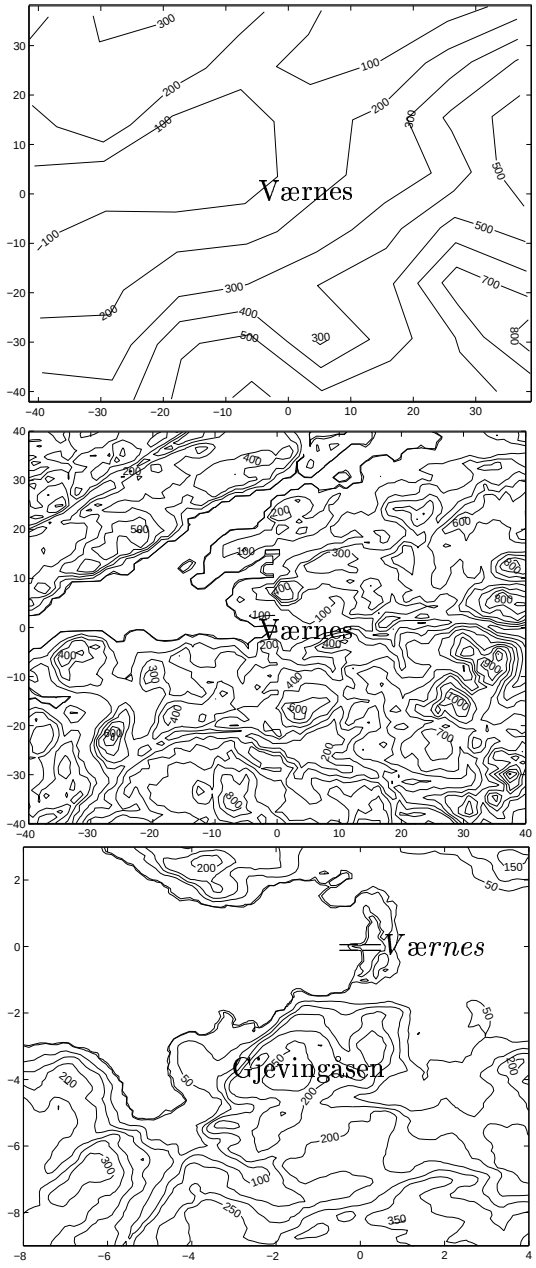
GLOBAL→ HIRLAM with horizontal and minimum vertical resolution: $(\triangle x_1, \triangle x_3) \approx$(10 Km, 200m)

Estimated-, Predicted-, Historic- Data



.

PREDICTION SYSTEM FOR LOCAL FLOW IN MOUNTAINOUS TERRAIN



HIRLAM, hydrostatic weather prediction model. Contains estimated and forecasted large scale flow. Near ground resolution: $(\triangle x_1, \triangle x_3) \approx$ (10 km, 200 m)
Provides boundary conditions for UM
$\Downarrow$

UM, non-hydrostatic model. K-equation turbulence. Near ground resolution: $(\triangle x_1, \triangle x_3) \approx$(1 km, 20 m)
Provides boundary conditions for SIMRA
$\Downarrow$

SIMRA, non-hydrostatic model. (K, ϵ)-turbulence. Near ground resolution: $(\triangle x_1, \triangle x_3) \approx$(100 m, 1 m)
Contains predicted local flow

Figure 2: Prediction system for local flow illustrated by the representation of the topography in the different models (Eidsvik et al 2004). The HIRLAM topography is only shown over the integration domain of the UM model, illustrated in the middle panel. Coordinates in km. Except for the two isolines applied for contouring the sea-shore, the height isoline increment are 100m in the two first figures and 50m in the last. Værnes airport is indicated in each panel. The Gjevingåsen hill is about 300 m high.

.

MODELS BASED UPON FIRST PRINCIPLES:

conservation of:

momentum, mass, energy, water components:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\rho u_i u_j + \epsilon_{ijk} f_j \rho u_k$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho g \delta_{i3} - \frac{\partial}{\partial x_j} < \rho u_i^{'} u_j^{'} > \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\theta u_j = S_\theta - \frac{\partial}{\partial x_j} < \theta^{'} u_j^{'} > \quad (3)$$

$$\frac{\partial W_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} W_i u_j = S_{Wi} - \frac{\partial}{\partial x_j} < W_i^{'} u_j^{'} >, \quad (4)$$

generally validated turbulence closures and statistical methods.

.

GLOBAL→ HIRLAM→ UM→ SIMRA DESIGNED FOR PREDICTION,
so parallel integration techniques necessary.

SIMRA in NOTUR-project.

figur ulesbar

EXAMPLE FLOW PREDICTION

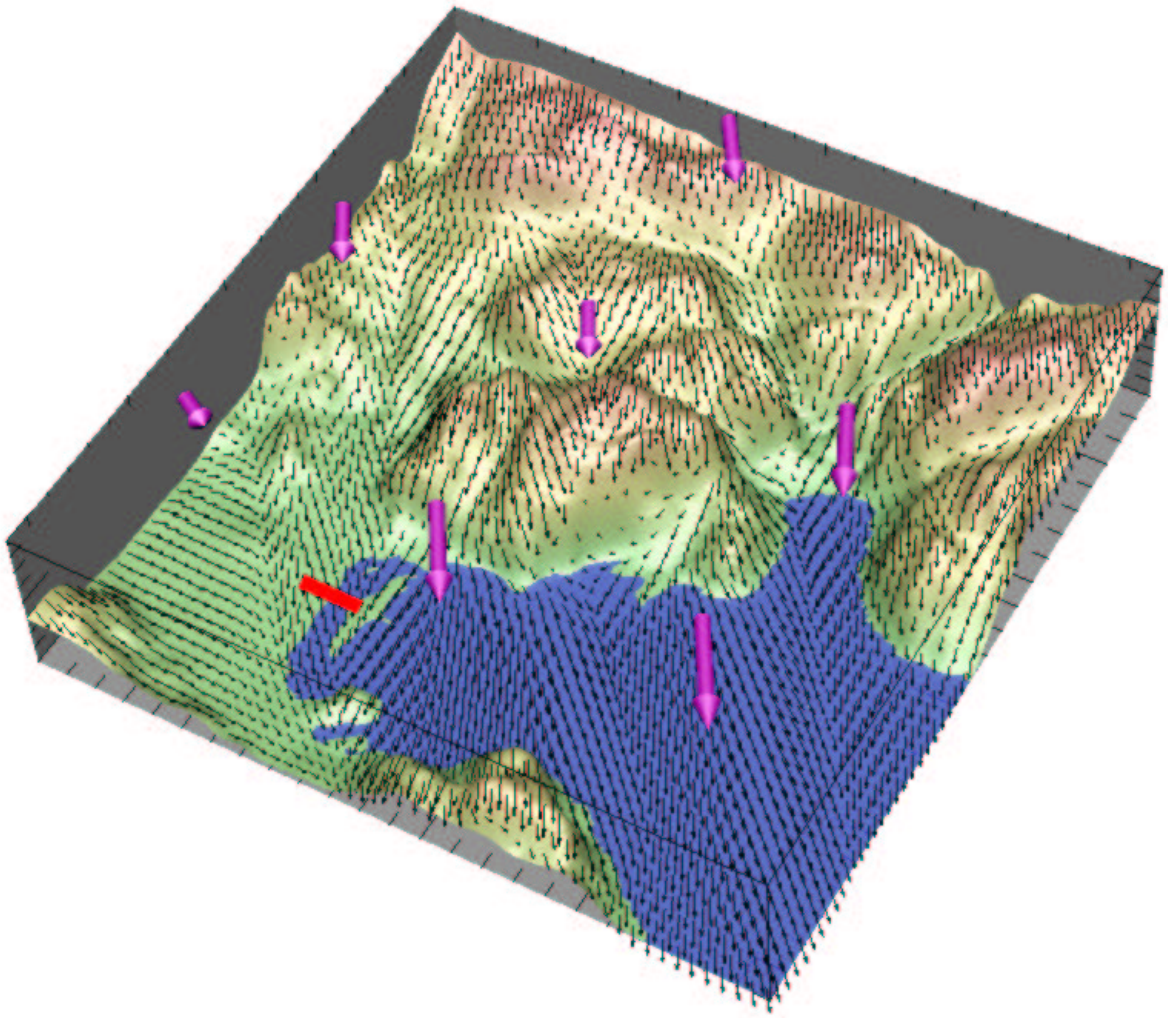


Figure 3: Estimated actual flow over mountains near Værnes airport 18.11.00 at 12 o'clock, as estimated with the system illustrated in Figure 2. Flow at approximately 10m above the ground and at 300m above the sea.

EXAMPLE FLOW PREDICTION

Værnes

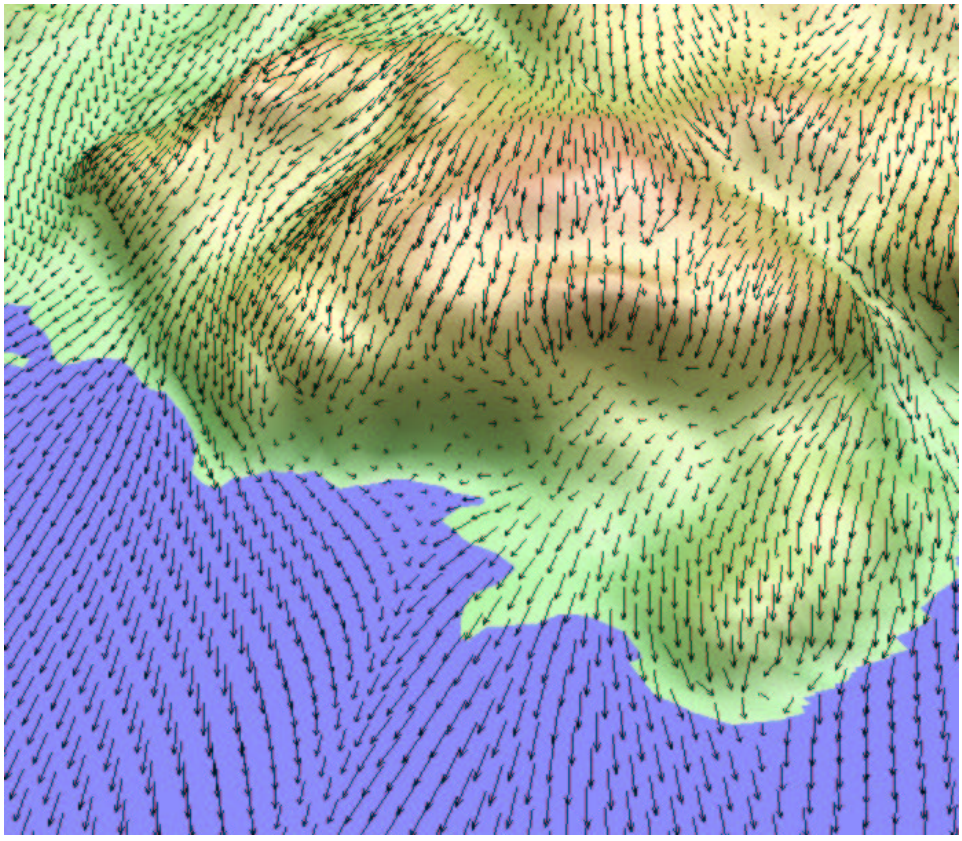


Figure 4: Estimated actual flow over mountains near Værnes airport 18.11.00 at 12 o'clock, as estimated with the system illustrated in Figure 2.

.

CORRESPONDING WIND POWER

$$\frac{E}{E_0} = \frac{(\int_A |\mathbf{u}| dA)^3}{(\int_A |\mathbf{u}_0| dA)^3} \sim (\frac{|\mathbf{u}|}{|\mathbf{u}_0|})^3, \qquad \frac{\triangle E}{E_0} = \frac{E - E_0}{E_0} \tag{5}$$

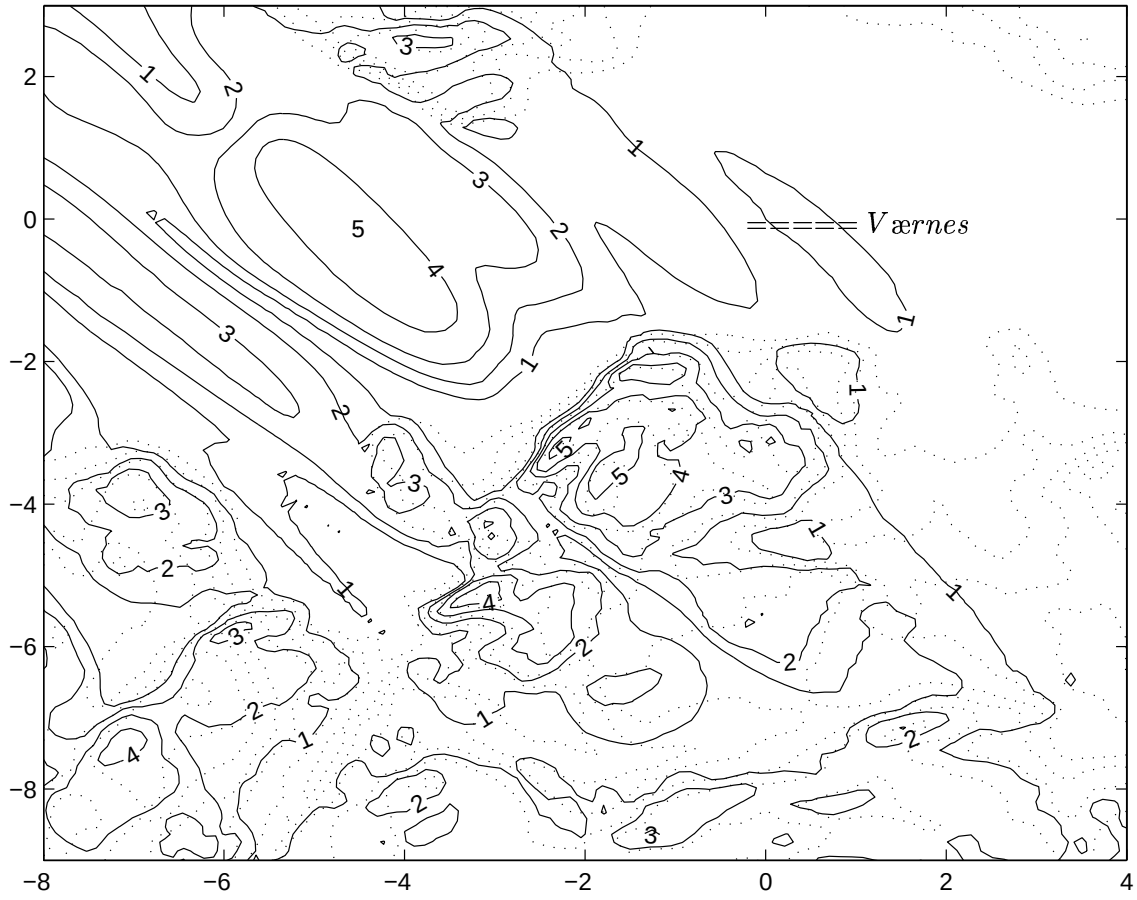


Figure 5: Isolines for relative wind power $E/E_0 = \triangle E/E_0 + 1$ over the local terrain in the neighborhood of Værnes airport 18.11.00 at 12 o'clock, as estimated with the system illustrated in Figure 2. Terrain height isolines as dotted curves. Windmill rotor diameter d_w =80m, centered h_w =70m above terrain. The streak structure of the flow behind the hills comes from cork-screw vortexes with longitudinal axes, which turns out to be predicted as soon as the flow becomes weakly stratified ($N_0 \approx 6 \times 10^{-5} s^{-1}$).

.

IDEA

Data from flow above terrain representative. Transform to local flow in terrain by means of models. **If models confident**, down-scaled flow accurate.

MODELS HAVE BEEN ASSIGNED CONFIDENCE:

1): Models based upon first principles, generally validated turbulence closures and statistical methods.

2): HIRLAM and UM extensively validated weather prediction models.

3): SIMRA-comparisons with the best and most relevant laboratory scale data (Separated flows over buildings, pipelines, oil platforms and model mountains. Sediment entrainment and transport in oscillatory flows over sand ripples).

4): SIMRA-comparisons with the best full scale data from flows over mountains (Separated flows, mountain waves, hydraulic transitions, airports , Askervein Hill).

EXAMPLE: Askervein Hill

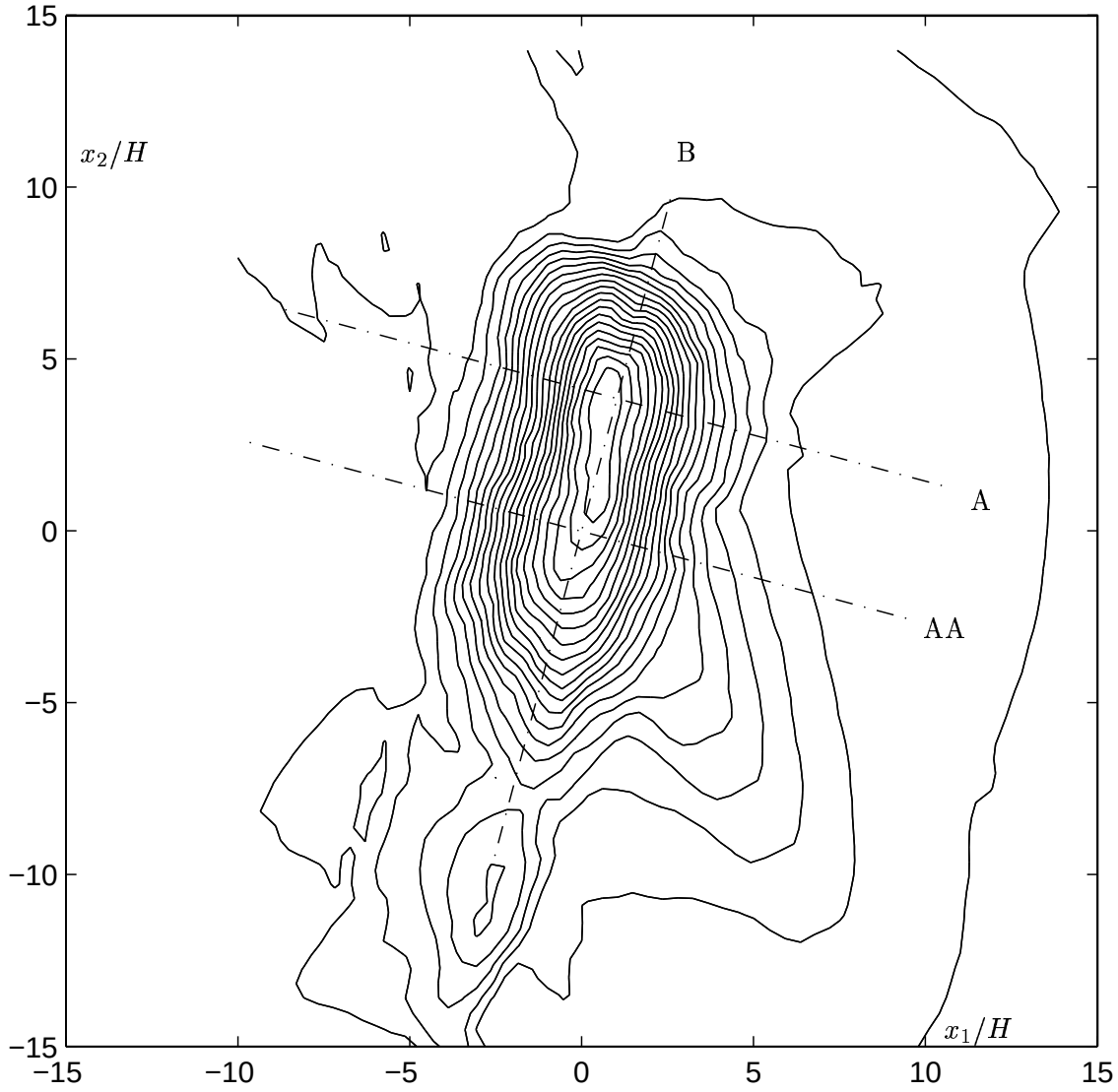


Figure 6: Askervein hill in $(x_1, x_2)/H$-coordinates, aligned with the x_1-axis along the in-coming mean wind (from 210 deg). $H \approx$116m. Height isolines each 6m. Measurements along the lines AA,A and B.

$$TerrainInducedFlow: \quad \frac{\triangle u(x_3)}{u_0(x_3)} = \frac{u(x_3) - u_0(x_3)}{u_0(x_3)} \tag{6}$$

EXAMPLE: Askervein Hill

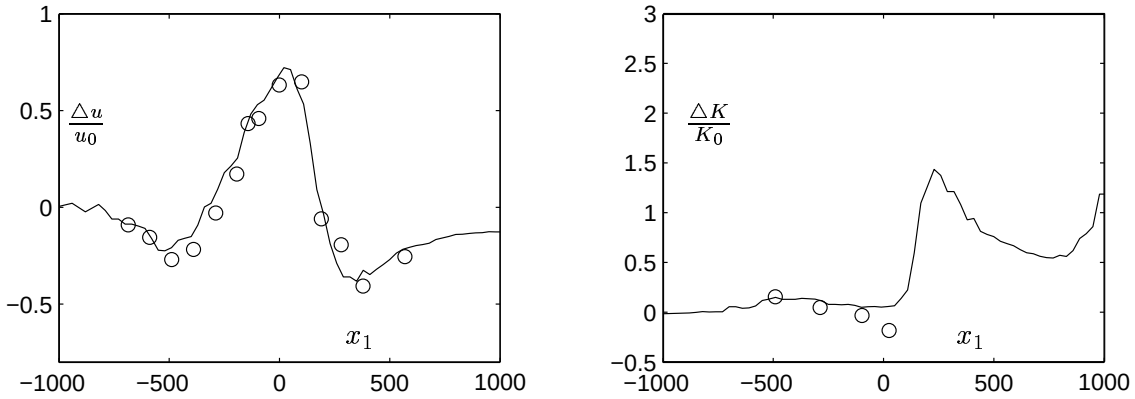


Figure 7: Estimated and measured profiles along AA at 10 m height. D/H≈13. a): Mean wind speed defect,$\triangle|u|/u_0$ b): Turbulent kinetic energy defect $\triangle K/K_0$, $u_0(10m) = 10m/s$. Turbulence data normalized with predicted inflow value $K_0(10m) \approx C_\mu^{-1/2} u_{*0}^2 \approx 1.73(m/s)^2$. Data from Castro et al (2003)

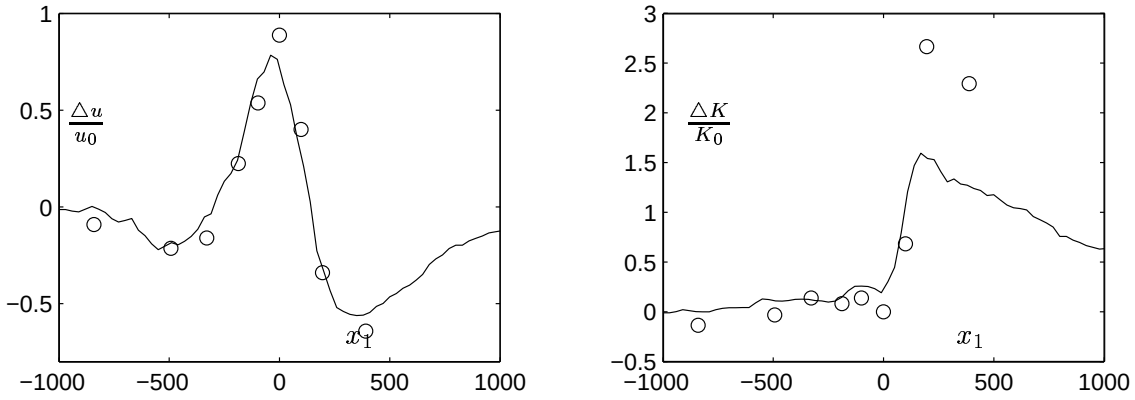


Figure 8: As in Figure 7. Profiles along A at 10 m height.

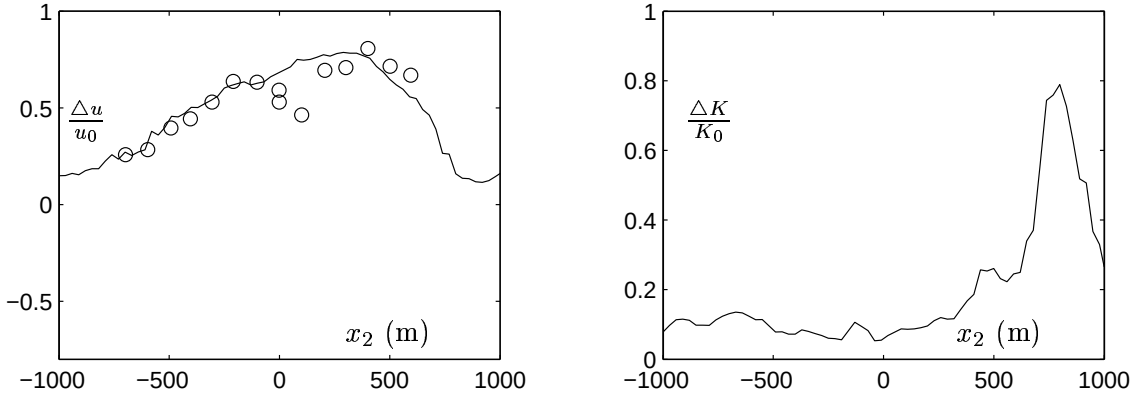


Figure 9: As in Figure 7. Profiles along B at 10 m height.

HILLTOPS MAY OR MAY NOT BE OPTIMAL FOR WINDMILLS

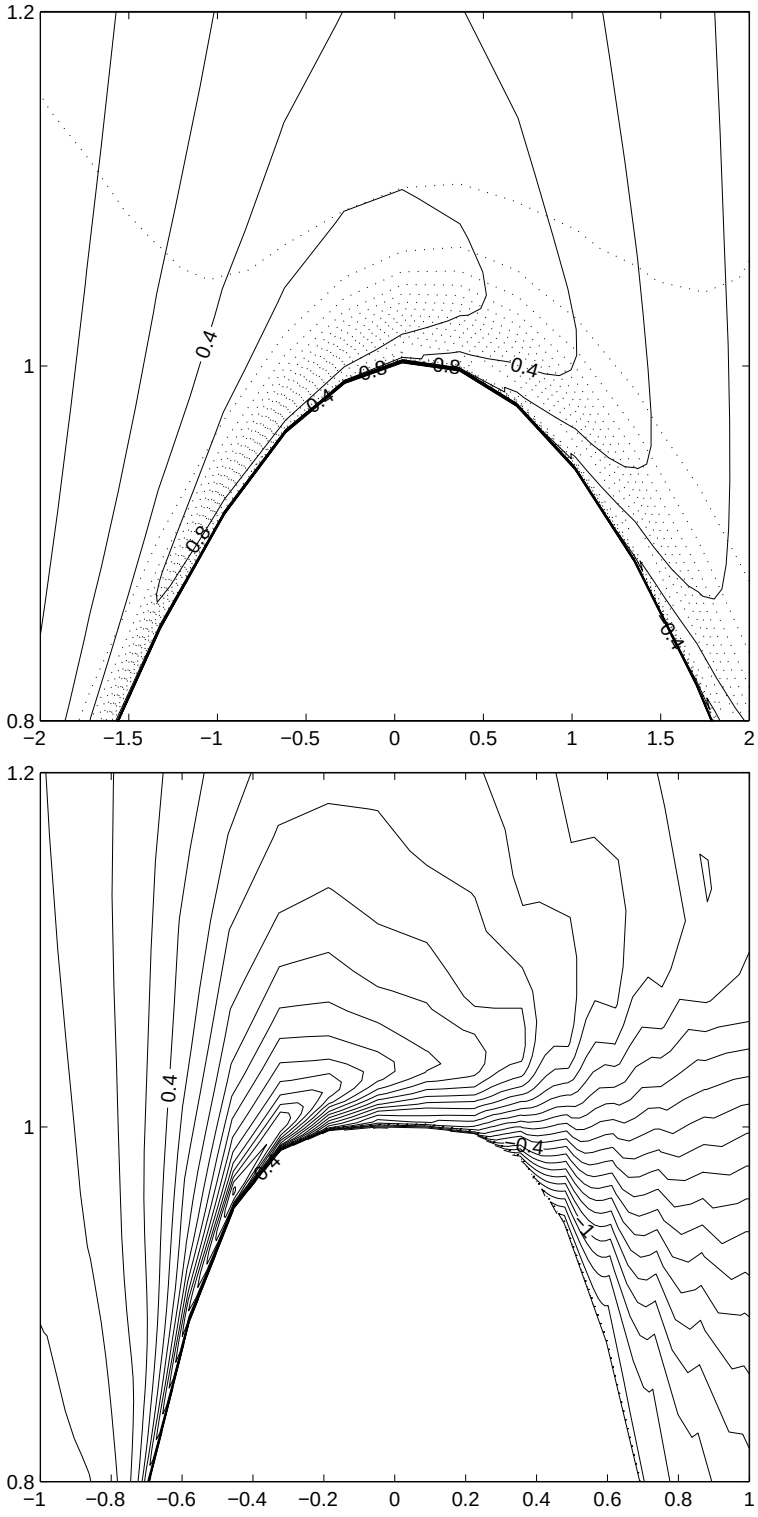


Figure 10: Terrain induced neutrally stratified flows over the Askervein and Hunt hillcrests, H=116m. Isolines each 0.1, for $\triangle u_1/u_0$:—– and $\triangle \tau/\tau_0$:..... $(x_1, x_3)/H$-coordinates

.

STRATIFICATION, $N^2 = (g/\theta)(\partial\theta/\partial x_3)$, ALSO IMPORTANT

Over the hillcrest the most intense speedup may be moved from the upwind- to the downwind slope. Behind the hill there may be hydraulic transitions.

Over large downwind distances behind hills the flow may be dominated by gravity waves and rotors.

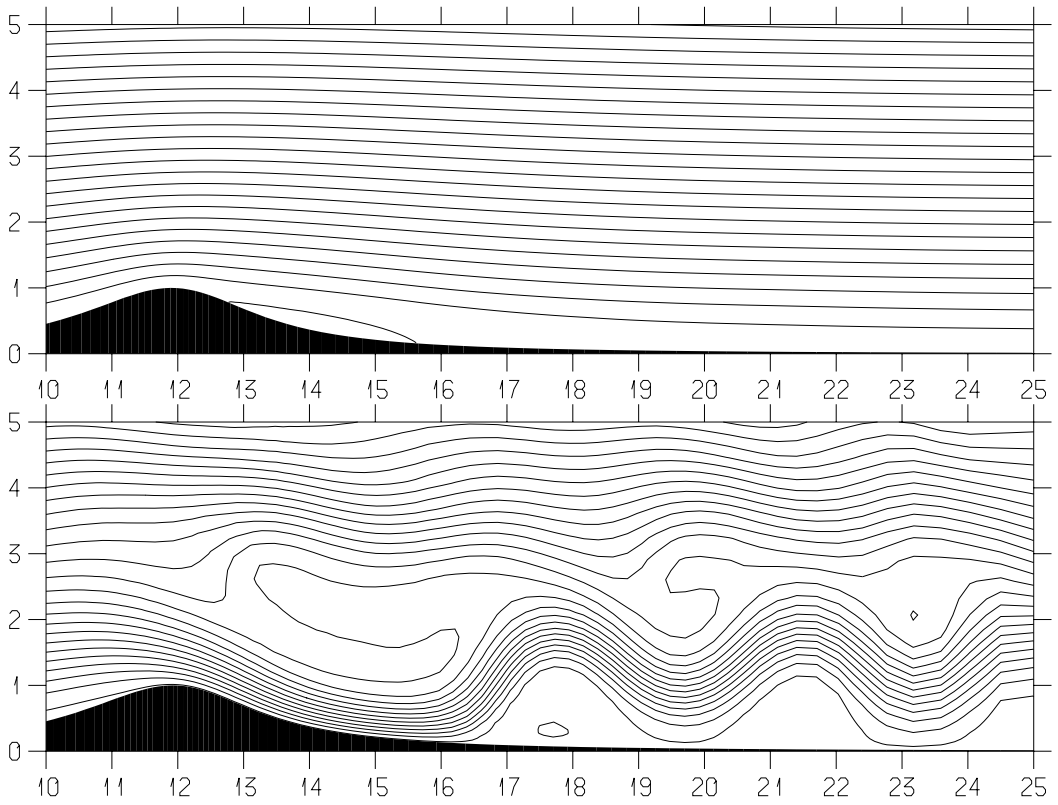


Figure 11: Streamlines for different stratification a): $Nh_m/U = 0$ b): $Nh_m/U = 2$ (Eidsvik and Utnes 1997).

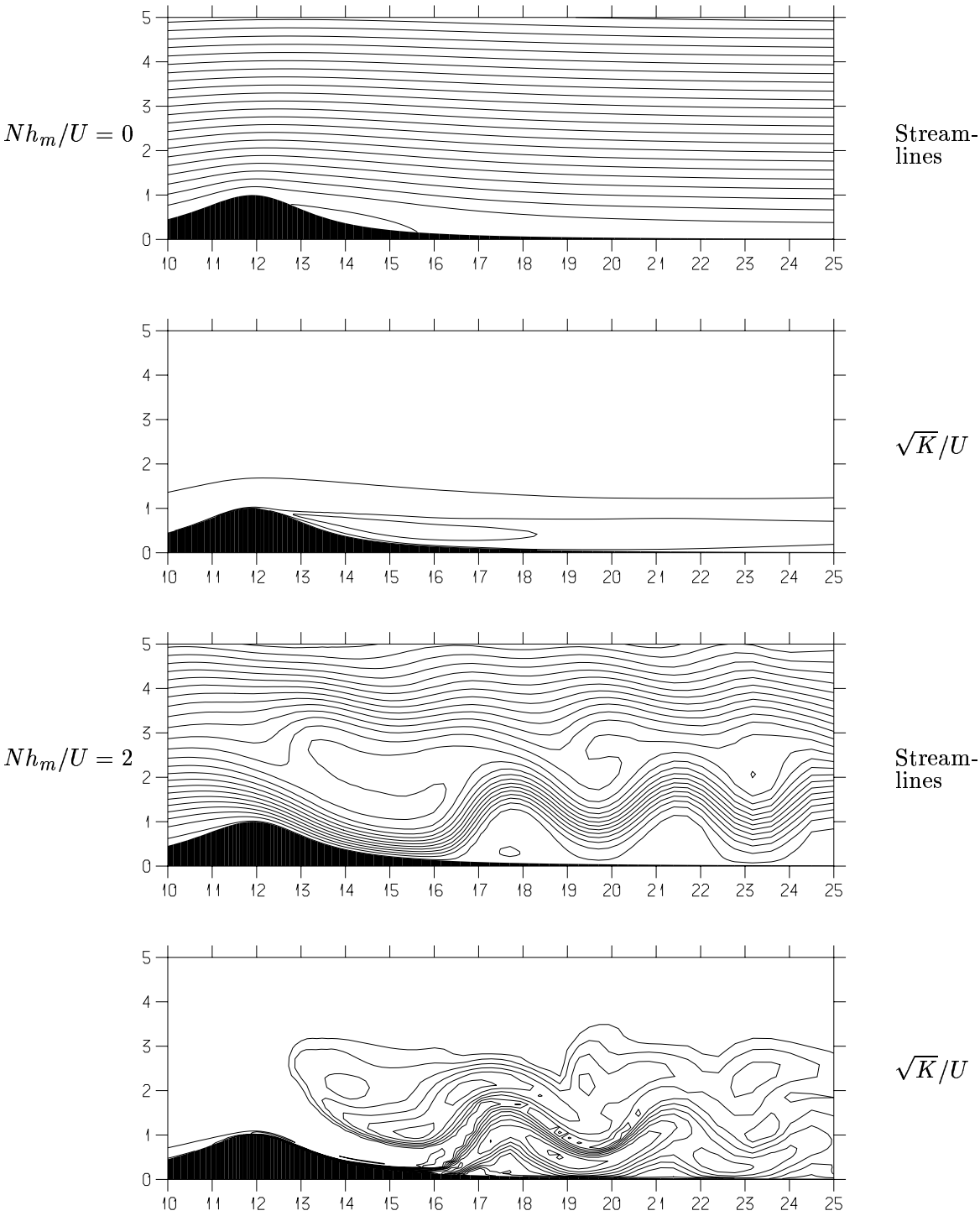


Figure 12: Streamlines and turbulent intensity. **(a)** Streamlines for $Nh_m/U = 0.0$. Minimum velocity -0.08, maximum velocity over top 1.16. **(b)** corresponding $\sqrt{K}/U$ with maximum value 0.18. **(c)** Streamlines for $Nh_m/U = 2.0$. Minimum velocity -0.37, maximum velocity in downslope jet 4.0. **(d)** corresponding $\sqrt{K}/U$ with maximum 0.56. (Eidsvik and Utnes 1997).

RESENT REFERENCES HIRLAM, UM, SIMRA

Unden P., Rontu L., Jarvinen H., Lynch P. (ed.) 2002. HIRLAM-5 Scientific Documentation. Available from *SMHI, S-601 Norrkoping, Sweden.*

Staniforth A., White A., Wood N., Thusburn J., Zerroukat M., Cordero E., Davies T. 2003. Joy of UM 5.5- Model Formulation. *Met Office, Exeter EX1 3PB, Unoted Kingdom*

Eidsvik K.J., Holstad A., Lie I., Utnes T. 2004. A Prediction System for Local Wind Variations in Mountainous Terrain. *Boundary-Layer Meteorology. Vol 112 pp 557–586*

Eidsvik K.J. 2004. Some Contributions to the Uncertainty of Sediment Transport Predictions: *Continental Shelf Research Vol 24 pp 739–754*

Eidsvik K.J. 2005. A System for Wind Power estimation in mountainous Terrain. Prediction of Askervein Hill Data. Accepted in: *Wind Energy*

Lie I., Utnes T., Blikberg R. 2003. On preconditioned iterative solution of distributed sparse linear systems in SIMRA. *http://balder.ntnu.no/ttp*

Utnes T. 2002. Numerical formulation of a semi-implicit Reynolds-averaged model. *http://balder.ntnu.no/ttp*

.

WIND ENERGY SITING AT NEW LOCATIONS NOW:

1): Apply existing large scale historic wind data available in the HIRLAM system.

Down-scale the most accurate fields, at 00 GMT and 12 GMT, to estimate the corresponding local flow and wind power, say over one year.

2): Estimate the statistical properties of the local wind power (and other relevant variables such as turbulence and icing conditions).

CPU-TIME and CPU-COST

One down-scaling with about 20 processors: 30 min. Data from one year: $2 \times 360 = 720$ down-scalings, equivalent to: **O(15 days)** CPU-time on 'Gridur'. CPU-cost: **O(200 KNOK)**

.

OTHER WIND ENERGY APPLICATIONS:

1): If positive siting estimates from existing data, but improved estimation accuracy sought: Apply the simulations to judge how new data should best be obtained for improving the estimation accuracy.

2): With a local assimilation technique, apply the system to interprete the new data so that maximal estimation accuracy is achieved.

3): For optimal windfarm operation: Apply the already existing system for prediction.

.

SYSTEM *POSSIBLY* INACCURATE, BUT *CERTAINLY* A RATIONAL BASIS FOR SYSTEMATIC IMPROVEMENTS

1): Assimilation of local data.

2): Modelling of stratified geophysical turbulence.

3): Local physics such as surface heating/cooling and icing conditions.

MOSTPROBABLY: IN A FEW YEARS, SITING, MEASUREMENT DESIGN AND OPTIMAL WINDFARM OPERATION WILL BE BASED UPON SYSTEMS LIKE THIS

.

CONTINUED DEVELOPMENT

1): Estimate the accuracy of the prediction system as compared to ad. hoc. methods presently applied.

2): Improve the prediction system and the **Expertise on Flows over Mountains**.

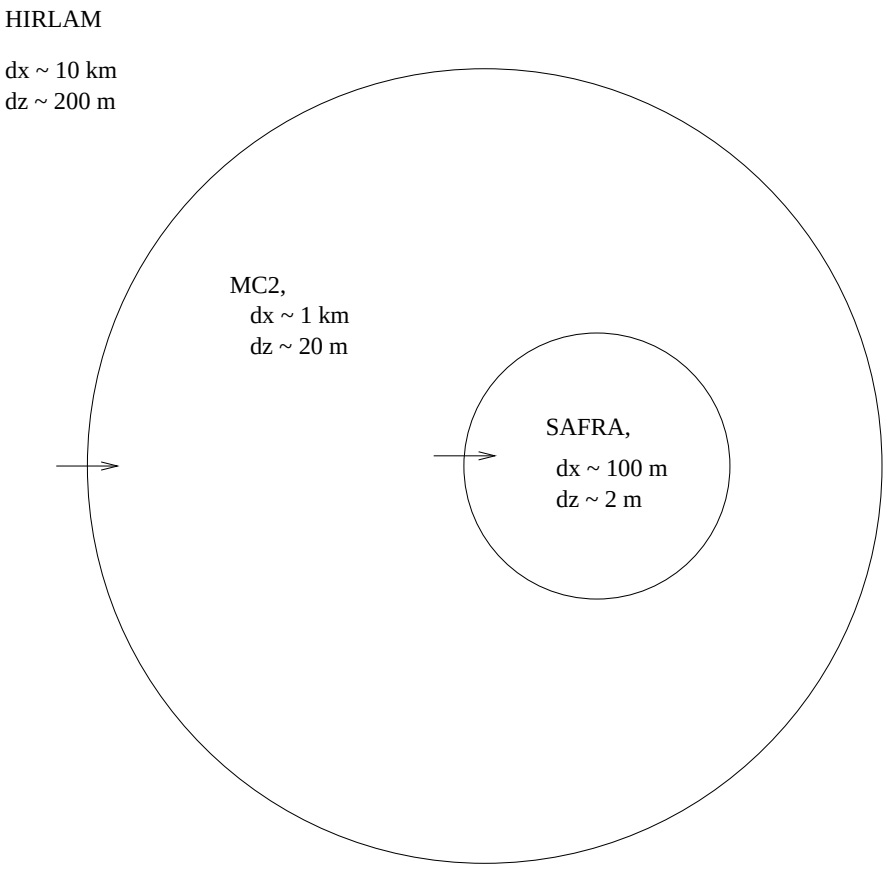


Figure 13: From the weather prediction scale to the local scale in mountainous terrain. Schematic integration domains and typical horizontal and vertical resolutions. Boundary conditions illustrated by arrows.

Blade tip design issues

Andreas Knauer
Institute for Energy Technology

Overview

- Introduction
- Aerodynamic codes
- Parameter study results
- Winglets
- Outlook

Rotor blade tips

Tip design affects:

- Aerodynamics – Effect on AEP
- Aerodynamic damping – Effect on loads
- Aeroacoustics – Effect on homo sapiens

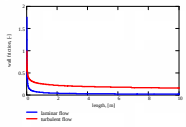
Little research has been carried out on wind turbine blade tips. Present design is based on simple methods like the BEM method, experiments and intuition.

Drag and its components

$$C_D = C_{Df} + C_{Dp} + C_{Dw} + C_{di}$$

Friction drag

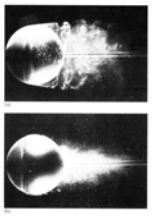
$$C_D = C_{Df} + C_{Dp} + C_{Dw} + C_{Di}$$



Frictional drag comes from friction between the fluid and the surfaces over which it is flowing. This friction is associated with the development of boundary layers, and it scales with Reynolds number. Frictional drag is important for attached flows (that is, there is no separation), and it is related to the surface area exposed to the flow.

Pressure drag

$$C_D = C_{Df} + C_{Dp} + C_{Dw} + C_{Di}$$

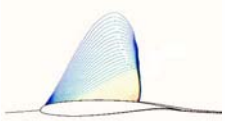


Pressure drag comes from the eddying motions that are set up in the fluid by the passage of the body. This drag is associated with the formation of a wake. Pressure drag is important for separated flows, and it is related to the cross-sectional area of the body.

Wave drag

$$C_D = C_{Df} + C_{Dp} + C_{Dw} + C_{Di}$$

Wave drag is generated in transonic and supersonic flows in shocks. The entropy generation in the shock creates momentum losses in the flow field (here above a A340 airfoil).



2005-02-02

Induced drag

$$C_D = C_{Df} + C_{Dp} + C_{Dw} + C_{Di}$$

Induced drag is generated by lift. On airfoils, the different pressure distributions on the upper and lower side of the profile generate the horse-shoe vortices at the blade tips.

2005-02-02

Vortex-Lattice method

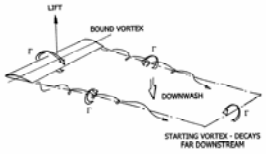
Vortex lattice methods like VLM and Tornado are based on potential theory and simulate incompressible 3D flow without friction effects.

Pro:

- Fast simulation
- Effective for conceptual design

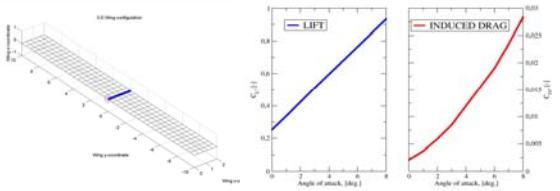
Con:

- No boundary layer, only suitable for attached flow
- Limitations for rotor- aerodynamics



2005-02-02

Influence of lift on induced drag



2005-02-02

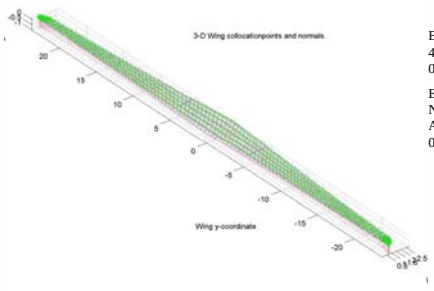
Influence of span/chord ratio

Blade 01: 2 x 10 m, 4 deg. AOA, Cl = 0.595, Cdi=0.0128

Blade 02: 1 x 20 m, 3 deg. AOA, Cl = 0.602, Cdi=0.0035

2005-02-02

Influence of tapering



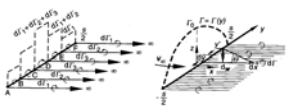
B04: 2 x 20 m, NACA 4412, 4 deg. AOA, Cl = 0.85, Cdi = 0.0128

E01: 2 x 24 m tapered, NACA 4412, 3.5 deg. AOA, Cl = 0.85, Cdi = 0.0086

2005-02-02

A good solution: elliptic lift distribution

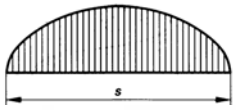
Elliptic lift distribution minimizes induced drag at airplane wings and on **outer** rotor-blade sections.



Measures:

- Tapering
- Geometric twisting
- Aerodynamic twisting

But induced drag still appears at off-design conditions!



2005-02-02

Damping of induced drag

Concepts of drag reduction at wing tips have been discussed even before mechanisms were full understood.

- Endplates (Lancaster, 1897)
- Winglets (Whitcomb, 1976)
- Hoerner tips (Chessna)
- Droop nose (Grob Twin)

2005-02-02

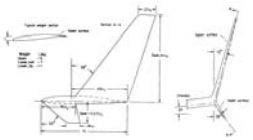
Winglets

R.T. Whitcomb (1974):

Winglets have been designed to produce side forces to suppress vortices. Measured in a NASA Langley Windtunnel were:

- 20% reduction of induced drag
- 9% reduction of overall drag

Whitcomb: Basic physical effect of the winglets is a vertical diffusion of the tip vortex flow.



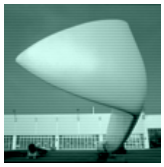
2005-02-02

Winglet technology on wind turbines

Traditional methods as tapering and twisting have been used to create elliptic load distributions on wind turbine tips.

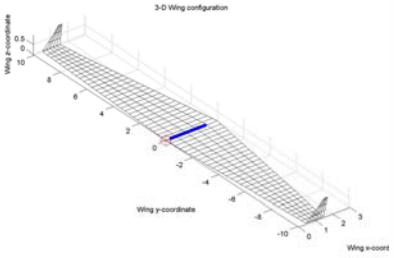
In 2004, one Wind turbine manufacturer has introduced blades with modified wingtips.

Reported is an increase of aerodynamic performance (in combination with increased span at inner sections) and damping of noise emissions.



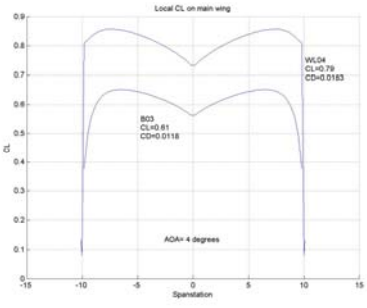
2005-02-02

Test of winglets



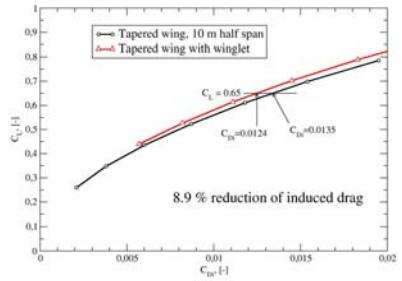
2005-02-02

Test of winglets



2005-02-02

Test of winglets



2005-02-02

Activities

Initial simulations of 3D wind turbine tip flows have been conducted with two models based on the Vortex Lattice Method.

The design of a winglet device for the UM77 blade is an ongoing activity in the KMB-project 'Development of Norwegian wind energy technology'. Industry partner is UMOE Ryving AS. A cooperation with Scanwind AS will start in a BIP-project.

2005-02-02

Outlook

Numerics: A variety of simulation models will be used for design of blade tips. 3D Navier-Stokes simulations might be most suitable for more detailed estimation of flow effects in the tip region.

Experiments: Tests are regarded as necessary to verify designs and will be conducted in NTNU facilities or at Valsneset.

2005-02-02

Vindkraft FoU Seminar 2005

Teknologiskifte for store vindturbinblad i arktiske strøk.

av
Jörg Höyland
PhD Student

Institutt for Produktutvikling og Materialer
Gruppe for Plast og Kompositter
NTNU

Vindkraft FoU Seminar 2005

- Start: 1. mars 2004
- Oppgaven:
  "Målet med arbeidet er å finne frem til optimale fordelinger av mekaniske egenskaper som stivhet, masse og demping i blader med hensyn til reduksjon av svingninger, utmatningsskader og kostnader. "
- Veiledere: Andreas Echtermeyer
  Nils Petter Vedvik
  Claes-Göran Gustafson

NTNU, Institutt for Produktutvikling og Materialer

Vindkraft FoU Seminar 2005

- Stadig lengre vindmølleblad stiller høyere og høyere krav til materialene som brukes.
- Glassfiber/karbon: optimalisere bruken.
- Kombinere FE analyse og testing.

NTNU, Institutt for Produktutvikling og Materialer

Vindkraft FoU Seminar 2005

- FE analyse: Unit Cell
- Testing: Strekk og kompresjonsforsøk.
- Stemmer FE analyse med test data?

NTNU, Institutt for Produktutvikling og Materialer

Vindkraft FoU Seminar 2005

Testing av kompositter

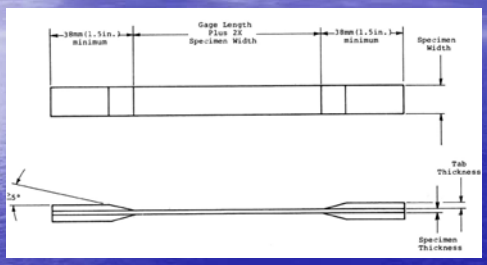
- Strekkforsøk
- Trykkforsøk

Verdier veldig avhengige av innspenning. Kan vi stole på standarden?

NTNU, Institutt for Produktutvikling og Materialer

Vindkraft FoU Seminar 2005

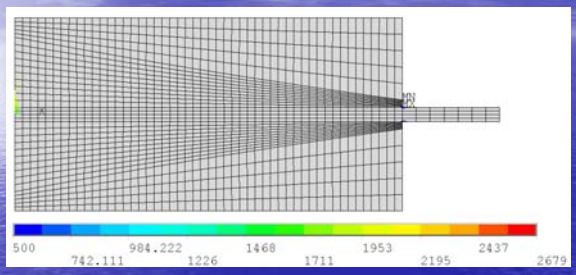
ASTM D3039: Strekktesting av fiber-resin kompositt



NTNU, Institutt for Produktutvikling og Materialer

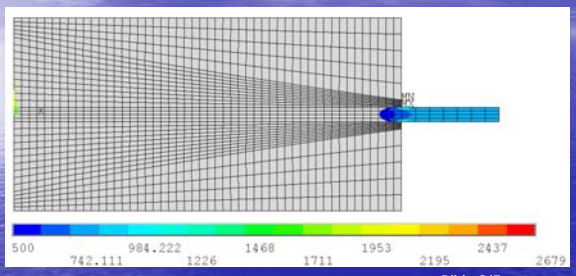
Testrigg ved IPM: 160 kN

Konvensjonell innfestning



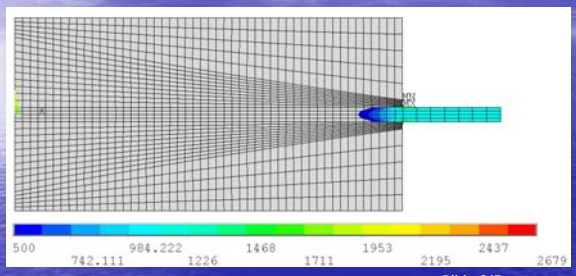
Bilde 1/5

Konvensjonell innfestning



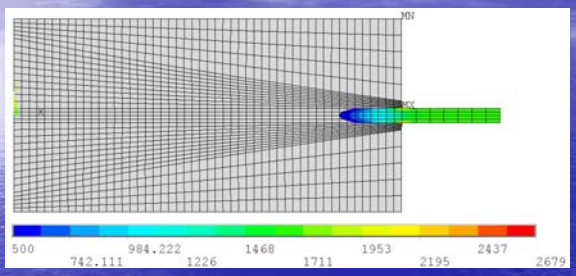
Bilde 2/5

Konvensjonell innfestning



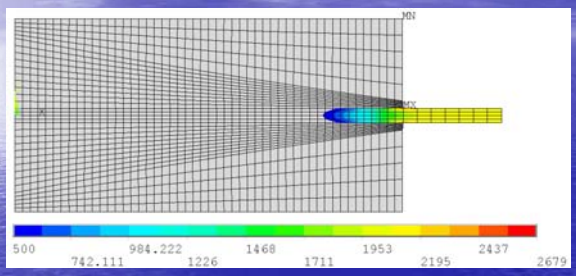
Bilde 3/5

Konvensjonell innfestning



Bilde 4/5

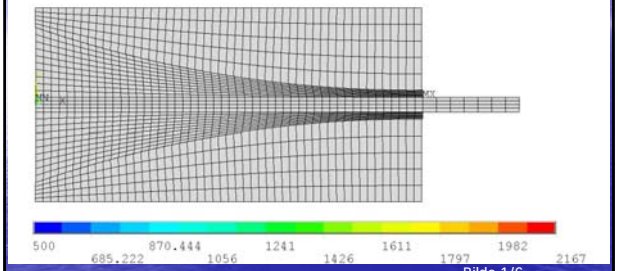
Konvensjonell innfestning



Bilde 5/5

Vindkraft FoU Seminar 2005

Optimalisert innfestning

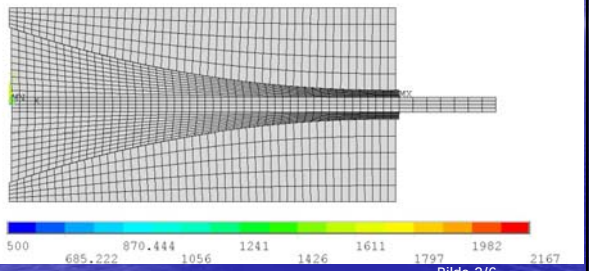


Bilde 1/6

NTNU, Institutt for Produktutvikling og Materialer

Vindkraft FoU Seminar 2005

Kileformet innfestning med bue

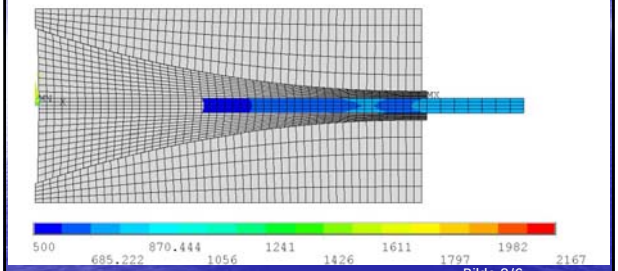


Bilde 2/6

NTNU, Institutt for Produktutvikling og Materialer

Vindkraft FoU Seminar 2005

Kileformet innfestning med bue

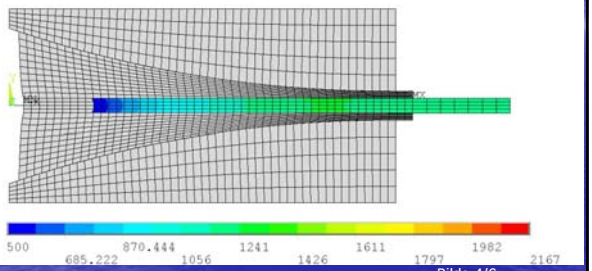


Bilde 3/6

NTNU, Institutt for Produktutvikling og Materialer

Vindkraft FoU Seminar 2005

Optimalisert innfestning

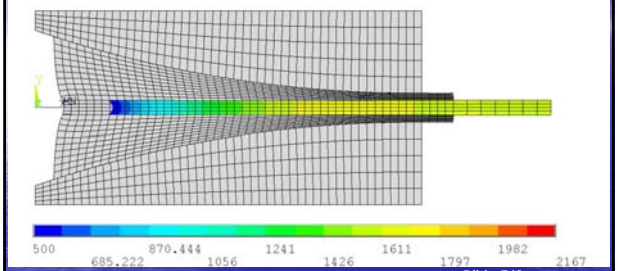


Bilde 4/6

NTNU, Institutt for Produktutvikling og Materialer

Vindkraft FoU Seminar 2005

Optimalisert innfestning

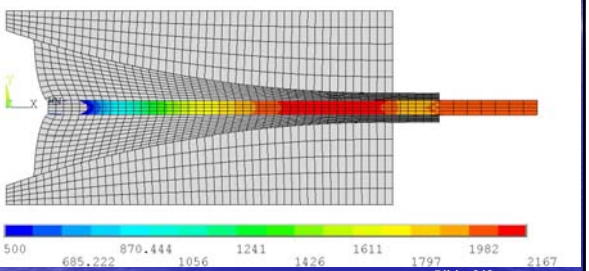


Bilde 5/6

NTNU, Institutt for Produktutvikling og Materialer

Vindkraft FoU Seminar 2005

Optimalisert innfestning



Bilde 6/6

NTNU, Institutt for Produktutvikling og Materialer

Ising på vindkraftverk

Status IEA R&D wind annex 19

Lars Tallhaug
Kjeller Vindteknikk

Innhold

- Fysisk grunnlag.
- Resultater fra FoU prosjektet ”Atmosfærisk ising på vindkrafverk”.
- Vindmåling i kaldt klima.
- Resultater fra IEA annex XXI ”Wind Energy in Cold Climate”.

Typer av is

- Rim
  Kondensering og frysing på overflater som har lavere temperatur enn omgivelsene.
- Blåis
  Underkjølt regn.
- Våt snø
- Tåkerim
  Vanndråper som fryser.

T < 0°C
Vann eller isfase?

- Vann fryser spontant ca. -40°C
- Før det trengs frysekjerner
- Effektive frysekjerner:
  - Is
  - Mineraler (-7 -15°C)
  - Biologisk materiale (-2 -5°C)

Isen legger seg på fremkanten

Foto: VTT, Finland

Pyha – Finland

”Ice storm” i USA

Nacelle instrumentering i Finland

Gütsch - Sveits

Gűtsch - Sveits

Gűtsch - Sveits

FoU prosjektet Atmosfærisk ising på vindkraftverk

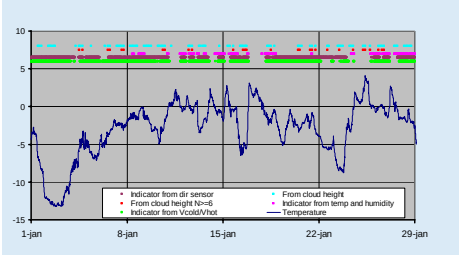
- Hovedmål: videreutvikle metodikk for å kunne beregne forventet ising på gitt lokalitet uten bruk av feltmålinger.
- Delmål: videreutvikle metodikk for måling av vind i klima med ising.
- Støttet av Hydro, Statkraft og Norges Forskningsråd.

Hvordan måle ising?

- Isingsmålere (vibrasjon, optisk, annet?)
- Web kamera
- Kombinasjon av varmt og kaldt anemometer.
- Standardavvik av vindretning.
- Luftfuktighet og lufttemperatur.

Avstandsbilde

Indikatorer for ising fra prosjektstasjon 790 moh



Hvordan beregne ising?

- Fysiske modeller.
- Metoder som kombinerer statistikk og indirekte observasjoner fra meteorologistasjoner.

Hentet fra Knut Harstveit, met.no

Rime ice accretion

$$\frac{dM}{dt} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \cdot w \cdot A \cdot V$$

- M - Ice accretion
- w - Water content
- A - Object cross section
- V - Wind speed
- α_1 - Collision coefficient
- α_2 - Sticking coefficient (=1)
- α_3 - Accretion coefficient

The rate of icing increases with the liquid water content of the air, the cross section of the object, and the wind speed.
Not all droplets hit the object ($\alpha_1 \leq 1$), and during temperatures not far from 0°C, some of the colliding droplets may not freeze and blow off the object ($\alpha_3 \leq 1$).

Hentet fra Knut Harstveit, met.no

Ice Melt

$$Q_M \approx Q_H + Q_E + Q_N$$

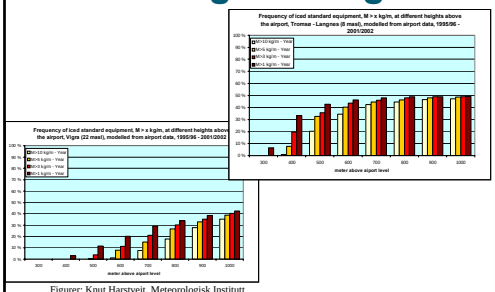
$$Q_H = h(t_s - t_a)$$ **Turbulent flux of sensible heat**

$$Q_E = h \frac{\varepsilon L_e}{c_p P}(e_s - e_a)$$ **Turbulent flux of latent heat**

$$Q_N = Q_{L\downarrow} - \sigma T_s^4 + Q_S(1 - a)$$ **Net radiation**

$$Q_N \approx f(T_a; T_s = 0\,°C; Q_{EX})$$ **Net radiation during melting**

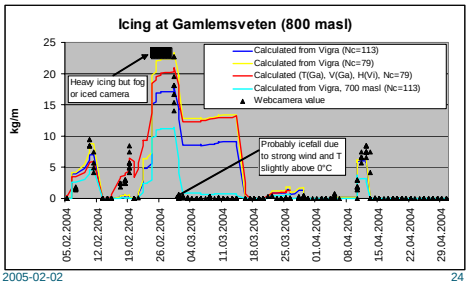
Beregnet ising



Figurer: Knut Harstveit, Meteorologisk Institutt

Detaljbilde

Sammenligning av måling og beregning



Vindmåling i kaldt klima

- Mast og utstyr må tåle merbelastning fra ising.
- Oppvarmet anemometer og retningsgiver er viktig.
- Strømforsyning er en utfordring.

På en 50 m høy mast er det ca 1000 m wire. 5 cm tykke "pølser" med is har en total masse på ca 2.000 kg.

Oppvarmede sensorer

Strømforsyning - kabel

Strømforsyning - lokal

Strømforsyning - lokal

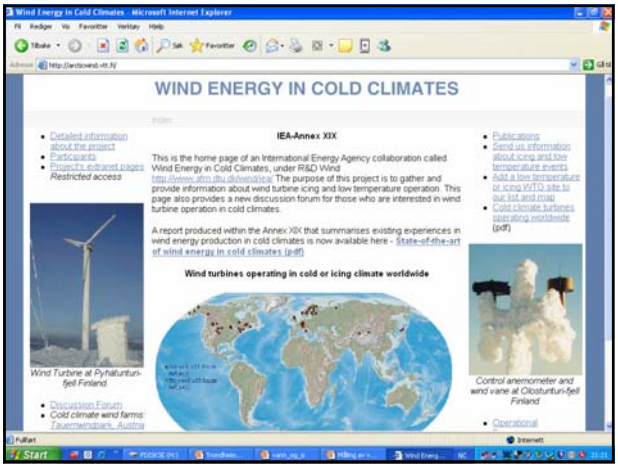
Strømforsyning - lokal

Strømforsyning - lokal

IEA Wind R&D annex XIX

Wind Energy in Cold Climate

- Finland, VTT (OE)
- Sverige, FOI
- Sveits, Swiss Federal Office of Energy
- USA, NREL
- Canada, Natural Resources Canada
- Norge, Kjeller Vindteknikk



IEA Wind R&D annex XIX

Wind Energy in Cold Climate

- Samle og dele informasjon om vindkraftverk som opererer i kaldt klima.
- Utvikle en ”site-classification formula”.
- Være forum for utveksling av erfaringer og nye prosjektideer.
- Utvikle retningslinjer for vindkraft i kaldt klima.

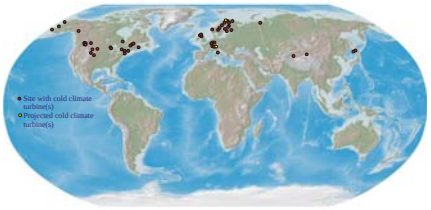
”State of the art” rapport

State-of-the-art of
wind energy in cold climates

T. Laakso, H. Holttinen, G. Ronsten, L.Tallhaug, R. Horbaty, I. Baring-Gould, A. Lacroix, E. Peltola, B. Tammelin

April, 2003

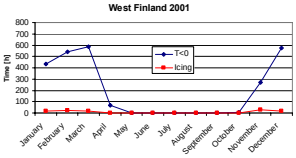
Turbiner i kaldt klima



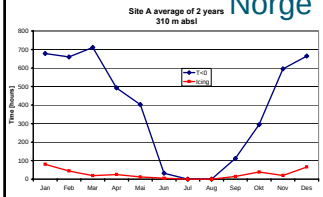
Fra IEA annex XIX Wind Energy in Cold Climate

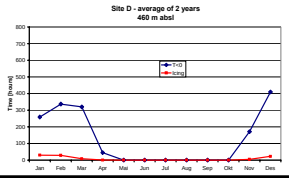
http://arcticwind.vtt.fi

Site classification
Finland



Site classification
Norge





a) Cold climates issues for standards and guidelines (Review of existing standards and guidelines. Recommendations for the modification of existing standards and guidelines for low temperature and icing environments.) – manf, developers, bankers, insurance, certification bodies, owners
   a. Power performance standards
   b. Design loads standards
   c. *Development and implementation planning and design process.*
b) Operational Experience – Very little really good data on performance and loading in public domain – Research orgs, IEA (everybody)
   a. Monitoring of new and improved cold climate test sites
   b. Evaluation of anti-icing and deicing technologies/technologies
   c. Specific test projects / sites
c) Measurement (cold and artic climates) – developers, owner, banks
   a. *Analysis of measurements, measurement program assessment,*
   b. Classification or level of measurement programs (power performance) after installation of project.
d) Icing – Research orgs, utilities, operators, insurance, public.
   a. *Collaboration with COST 727*
   b. *Statistical analysis (Mapping, assessments etc)*
   c. *Ice detectors (Evaluation, comparison, specification of detection, requirements for different wind turbine functions)*
   d. *Ice throw (Current or new formulas, insurance issues)*
   e. Evaluation of icing codes (Turbice (FI), Lewice (UST), ONERA-France code(SWE), Meijer(SWE), others??)
e) Cold climate issues for off shore – developers, owners, companies outside wind industry,
   a. *Ice and foundations*
   b. Salt ice spray / Ice
   c. *Turbine / water access – artic issues with turbine maintenance (boats etc)*
f) Multi-megawatt turbines – Research
   a. Partially iced blades (loading issues)
g) *Verify the classification formula to assess production impacts of temperature and icing. Would need include verification. - Economics – how to assess impact in cold climates (temp, ice and accessibility) - – manf, developers, bankers, insurance, certification bodies, owners*
h) *Update the state of the art report – everybody. IEA (IEA Activity)*
i) *Market survey – manuf, governments, developers (IEA Activity?)*
   a. Potential market based on site classification
   b. Project survey (Turbines, manufactures, etc.
j) *Experience group / Outreach – everybody (IEA Activity?)*
   a. Verification of recommendations document
   b. Maintenance of the web site
   c. Other outreach (meetings, papers, conferences, two way communication) – Should this be one of the matrix of success? – work outside of the web site – invite other experts to the meeting.

Development of a steering committee (Experts, industry, ...)

Mulig fortsettelse av annexet

Mulig fortsettelse av annexet

- Ferdigstille retningslinjer.
- Innsamling av erfaringer.
- Sammenligning av isdetektorer
- Kald klima problematikk ifbm off-shore.
- Multi-megawatt turbiner og ising.

Sikkerhet

- Is kan kastes av vinger. Isen kan ha høy tetthet.
- Normalt sett faller isen av ved oppstart, eller når turbinen står rolig.
- En sikkerhetsavstand på: 1.5 x (D + H) anbefales. Tilsvarer ca 250 m for en stor turbin.
- Uansett bør det settes opp varsling.

Fra Überzeiring i Østerrrike

Rodovålen, Sverige

Islaster på offshore vindkraftverk – dynamiske effekter

Asle Skiple, NTNU-BAT,
2005

1

Motivasjon

- Store vindparker planlagt i Østersjøen
- Må ta hensyn til drivende sjøis, og derved dynamiske islaster
- (Statiske laster også viktig – Vind størrelsesorden 1 MN / Is størrelsesorden 5 MN)

2

Hva er spesielt med vindturbiner?

- Slanke konstruksjonselementer
- Liten strukturdemping
- Stor masse på toppen av tårnet som ikke bør eksiteres

3

Globale islaster er rateavhengige

- Stokastisk knusing -> Statisk struktur, høy hastighet, kald is
- Resonant knusing -> Egensvingninger, “lock-in”
- Duktil knusing -> Statisk struktur, lav hastighet, varm is
- (Også dynamikk ved isflak første kontakt)

4

Behov for full-skala tester?

- Verdi av modell-skala eksperiment kan være tvilsomme på grunn av skalering av isegenskaper
- Derimot har en mye erfaring og noe data fra bygging av fyrtårn i Østersjøen

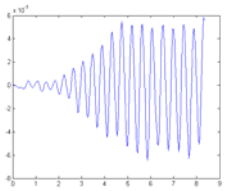
5

Erfaringer

- Ekstrem vibrasjon og ekstrem istykkelse/styrke/hastighet ikke korrelert ->Typisk karakteristisk hastighetsområde
- Pælede ståltårn ->kraftig vibrasjon, >g
- Ballasterte betongtårn ->i mindre grad

6

Isinduserte vibrasjoner



- Ingen generell enighet om teori bak isindusert "lock-in"
- Forskjellige teorier framsatt
- Konservativt design: 50% av statisk last ved egenfrekvens.

7

Eksisterende turbinfundament

- Reduserer lastamplituden med iskjegler
- Øker bølgelaster, for dyrt for større dyp?

(Fig: Middelgrundens Vindmøllelaug I/S

8

Alternativ 1) Økt kunnskap

- Forstå mekanisme fra fullskala målinger
- Analogier vindteknikk

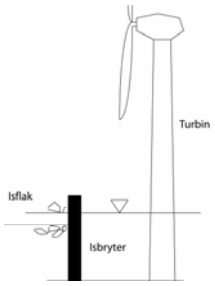
-Scruton tall,

-Kritiske hastigheter

- Svingninger 1./2.egenmode (Modellforsøk)

9

Alternativ 2) Ingeniørmessige løsninger



- Store parker->
- Kun beskytte utsatte turbiner
- Kunstige "skjær" for å stoppe/splitte isflak

10

Potensial i Norge

- Totalt teoretisk potensial for norsk økonomisk sone 20 ganger olje & gass per år
- 0.5 % av dette tilsvarer 120 TWh og kan gi 30 milliarder kr i årlige inntekter
- De svarte boksene tilsvarer et område på 12x12km
- Totalt 6 områder=33TWh.

Hvorfor dypt vann?

- Store områder med større vindhastighet tilgjengelige for utbygging av vindkraft.
  =>Økt inntjenning
- Vindturbinene kan plasseres ute i havet slik at de er usynlige fra land.
  =>Bedre miljøprofil
- Fleksibel plassering i nærheten av lastsentra og sterke noder i nettet.
  =>Mindre behov for nye overføringslinjer på land
- Flytende konstruksjoner med enkle forankrings-system er rimeligere å installere og flytte.
  =>Lave kostnader for installasjon og fjerning

Vind-hastighet	10MSL m/s	90MSL m/s
Nordsjøen	8.6	11.5
Frigg	8.7	11.6
Jotun	8.5	11.3
Kristin	8.6	11.5
Troll	8.6	11.5
Statfjord	8.6	11.5

3

Marked for flytende vindkraft

- Krafteksport til distribusjon på landnettet – Japan, USA, Europa etc.
- Elektrifisering av offshore installasjoner.
- Autonom offshore energi kilde / plattform der regularitet ikke er kritisk, som f.eks vanninnjeksjon.
- Mobile energi kilder i områder med midlertidige kraftunderskudd.

4

Markedseksempel - Japan

- Lavt kraftforbruk per innbygger idag
- Japan har en kystlinje lenger enn Norge's
- Nesten bare dypvannsområder
- Gjennomsnittlig vindhastigheter tilnærmet lik Nordsjøen
- Kraftprisen i Japan er ca 3 ganger høyere enn i Norge
- I størrelsesorden 50-100 GW installert offshore vindkraft ser ut til å være mulig i Japan
- Regulerkraft kan bli begrensende faktor.

5

Utfordringer flytende fundament for vindturbiner

- Yaw kontroll
- Tårn pitch stabilitet
- Vær/Bølgeforhold
- Nacelle bevegelser
- Utmatning av tårn
- Anker system
- Pitch/thrust feed-back
- Installasjon
- Vekt / total kostnad

Eksempel på foreslått teknologi

6

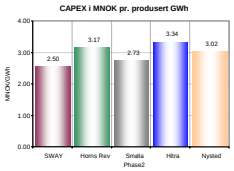
Typisk enhet installasjon i 200MW vindpark Nordsjøen

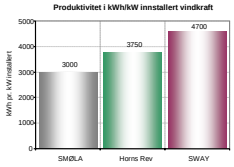
- Vanndyp 300m,
- Gjennomsnitts vindstyrke 11.5m/s
- Generator effekt: 4,5-5 MW, Rotor Diameter:116-126m
- Grid connection 50km fra land
- Årlig netto produksjon per enhet: 22-24 GWh
- 25 års levetid for tårn
- Total Investeringskostnad € 7-8 Mill
- Årlig operasjon og vedlikeholdskostnad € 170.000
- € 0,032/kWh (0,26NOK) med 5% kapitalavkastning
- Grønne subsidier ikke inkludert i disse tallene
- Gass turbin fuel kostnad (excl. investeringskostnad og drift) : 0,041 €/ kWh

SWAY

7

Benchmarking av kostnader og produksjon





- CAPEX pr. produsert GWh viser at en flytende vindpark i nordsjøen ventes å få 10-30% bedre inntjening enn bunnfaste offshore vindparker.
- Produktiviteten av en flytende vindpark i nordsjøen er høy p.g.a de gode vindforholdene.

SWAY

8

SWAY aktiviteter

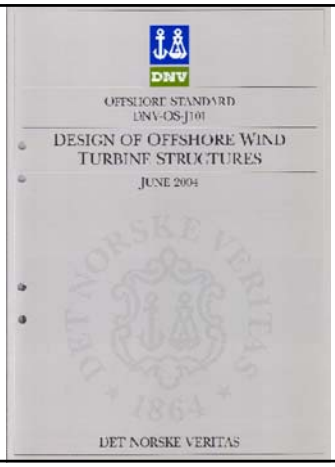
- 2005, Oppstart av BIP prototyp prosjekt sammen med Statkraft, Shell Technology Norway og NFR
- 2006, Planlagt uttesting av skalamodel
- 2008, Offshore Installasjon av fullskala protoyp (4,5-5MW)

SWAY

9

Regelverk for design av offshore vindmøllekonstruksjoner

Knut O. Ronold
Det Norske Veritas



Bakgrunn

- Foranlediget av markedets behov
- Regelverk fantes ikke
- Nødvendig for DNVs tjenesteytelser
- Tilsv. IEC regelverk er lenge underveis

Sammenheng

- Er første regelbok i en serie regelbøker for vindmøller
- Kan anvendes både offshore og på land
- Dekker alt fra toppen av tårnet og ned til og med fundament, men ikke selve vindmøllen
- Gir regelkrav og mye veiledningsstoff
- Neste regelbok blir for vindmøllevinger

Innhold 1

- Designprinsipper
- Miljøforhold og grunnforhold
- Last og lasteffekt, inkl. lastkombinasjoner
- Sikkerhetsfaktorer
- Materialer
- Design av stålkonstruksjoner
- Design av betongkonstruksjoner
- Design av groutede forbindelser

Innhold 2

- Fundamentering
- Inspeksjon under fabrikasjon
- Korrosjonsbeskyttelse
- Transport og installasjon
- Inspeksjon i driftsfasen, vedlikehold og overvåking

Presentasjon ved Vindkraft FoU Seminar
Royal Garden, Trondheim, 26. januar 2005

SYSTEMKRAV TIL VINDKRAFTVERK

Aktuelle problemstillinger og behovet for systemkrav ved nettilknytning av større vindkraftanlegg

Kjetil Uhlen
SINTEF Energiforskning AS

INNHOLD

- Problemstillingene i et systemperspektiv
  - Generell oversikt (og forsøk på strukturering av problemstillingen)
- Eksempler på Systemkrav (og problemstillinger knyttet til disse)
  - Eksempel: Transient stabilitet ("Fault ride through")
  - Eksempel: Spenningsregulering og Reaktiv effektytelse
  - Eksempel: Effektregulering/balansehåndtering
- Oppsummering (og evt. diskusjon)

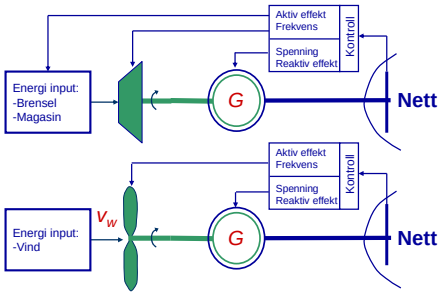
Systemdrift - problemstillinger
(overordnete hensyn/krav)

- Effektbalanse (frekvens)
- Driftssikkerhet
- Spenningskvalitet
- Spenningsstabilitet
- Termisk grenselast (kabler og linjer)
- Stabilitet (elektromekaniske forhold)
  - Transient stabilitet
  - Demping (effektpendlinger)
- Krav til utstyr
  - Reguleringsevne
  - Toleranser for utstyr (for eksempel ref. til spenning)
- osv.

Systemkrav - Motivasjon

- At det i utgangspunktet kan/bør stilles samme krav til systemegenskaper og regulerbarhet for vindkraftverk som for andre kraftverk.
- Restriksjoner med hensyn til
  - overføringskapasitet
  - Spenningsforhold / elkvalitet
  - effektbalanse
  - reserver (effektverdi)
- Behov for reguleringsevne med hensyn til
  - Produksjon (Effekt- og frekvensregulering)
  - Spenning og reaktiv kompensering)
  - Både primærregulering og sekundærregulering

Hva skiller vindkraftverk fra andre kraftverk?



- Vindkraftverk mangler energilager "bak" turbinen
- Vanskeliggjør produksjonsplanlegging

Problemstillinger oppsummert
(forsøk på å lage en struktur)

	Reguleringsevne		Systemproblemer
	Aktiv effekt (P)	Reaktiv effekt (Q)	
Primær-regulering Sekundområdet	▪Regulerstyrke (MW/Hz) ▪Transient stabilitet (fault ride through) ▪Demping (dempetilsatser, PSS)	▪Regulering av reaktiv effekt: ▪Spenningsregulering ▪Mvar-regulering ▪cosΦ-regulering	▪Spenningskvalitet (spenningsvariasjoner, ..) ▪Spenningskollaps ▪Transient ustabilitet ▪Effektpendlinger
Sekundær-regulering Minuttområdet	▪Settpunktsregulering (P_{set}, ΔP, P_{rampe}) ▪Samkjøring, AGC	▪Settpunktsregulering (koordinert sp.regulering) ▪Transformatortrinning ▪Kondensatorbatteri	▪Spenningskvalitet (overspenninger, harmoniske) ▪Utveksling av reaktiv effekt ▪Frekvensregulering (Balansehåndtering) ▪Flaskehalser (lokale og systemmessige) ▪Reserver (P og Q)

”Grid codes”

- Formålet er å sikre de egenskaper som er vesentlige for systemets drift med hensyn på forsyningssikkerhet, driftssikkerhet og elkvalitet på kort og lang sikt.
  - Energiloven
  - Forskrifter for elektriske anlegg
  - Forskrift om Systemansvar (FoS)
  - Nordisk Regelsamling (”Nordic Grid Code”)
    - Systemdriftsavtalen, Regler for nettilknytning, med mer.
- Vindkraft spesielt
  - Danmark: Teknisk Forskrift (TF 3.2.5): ” Vindmøller tilsluttet net med spændinger over 100 kV”
  - Norge: Statnett har hatt til høring: ”Veiledende spesifikasjon av systemkrav til vindkraftanlegg i Norge” (VtV)

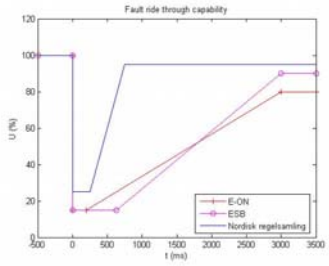
Systemkrav til vindkraftverk kan omfatte:

- Effekt og effektregulering
  - Produksjonsregulering (tall krav)
  - Start og stopp, maksimale endringsrater,..
- Frekvensforhold
  - Øvre og nedre grenser for når vindparken skal være i drift og når den skal kobles ut
- Spenningsforhold
  - Reaktiv effektkompensering
  - Krav til reguleringsutrustning (Mvar-regulering, spenningsregulering, osv.)
  - Spenningskvalitet (Hurtige spenningsendringer, spenningsvariasjoner og flicker, telefonforstyrrelser, harmoniske, forstyrrelser av telekommunikasjon. Tall krav)
  - Temporære overspenninger
- Samspill mellom elsystem og vindpark ved feil i elsystemet
  - Krav til stabilitet (Trefase feil og tofase feil. Tallkrav)
  - Mer omfattende feil (Tallkrav)
- Beskyttelse av selve vindparken ved feil i nettet
  - Normalt anleggseiers ansvar.
  - Denne beskyttelse må ikke være i strid med de øvrige krav i tilknytningsbetingelsene.
- Kommunikasjon til/fra vindparken
  - Går på ansvaret for gjensidig informasjon, driftsdata, osv.
- Krav til dokumentasjon, nettanalyser og prøver.

Eksempler
på problemstillinger relatert til systemkrav (grid codes)

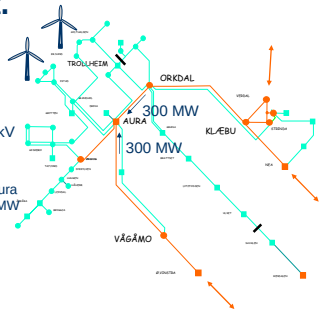
1) Eksempel for å illustrere behovet for og betydningen av ”fault ride through” egenskaper.
   - Diskusjon..
2) Eksempler for å vise behovet for spenningsregulering og (aktiv og reaktiv) effektkontroll
   - Diskusjon
3) Eksempel for å illustrere problemstillinger knyttet til flaskehalshåndtering og balanseregulering (frekvensregulering)
   - Diskusjon..

1. Transient stabilitet (Fault ride-through capability)



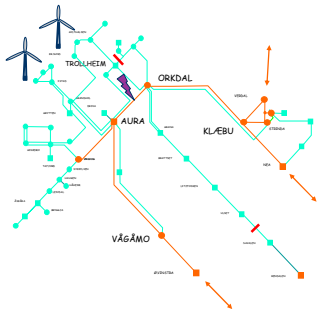
Eksempel: Feil og linjeutfall på nordvestlandet.

- Driftssituasjon:
  - Høy last og liten produksjon i Mørenettet (bortsett fra vindkraft).
  - Sum belastning på: 300 kV Vågåmo-Aura og 300 kV Orkdal-Aura er 600 MW
  - Lastgrensen på Vågåmo- Aura (mellom NO1-NO2) er 300 MW
- Kritisk driftsituasjon med effektunderskudd og lite produksjon i ”Mørenettet”.



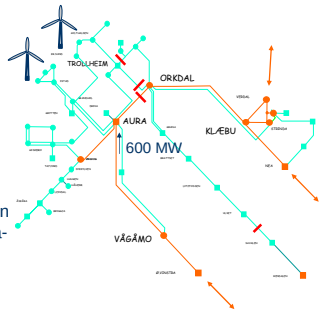
Feil: Kortslutning og utfall av 300 kV Orkdal - Aura

- Driftssituasjon etter feil:
  - 132 kV Orkdal-Trollheim kobles ut (systemvern)
  - Hele importbehovet til Mørenettet (600 MW) overføres på 300 kV Vågåmo-Aura



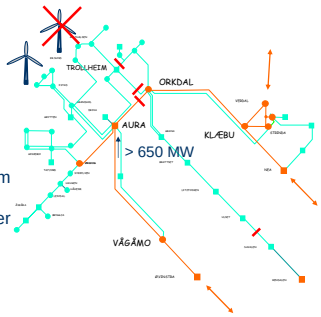
Feil: Kortslutning og utfall av 300 kV Orkdal - Aura

- Driftssituasjon etter feil:
  - 132 kV Orkdal-Trollheim kobles ut (systemvern)
  - Hele importbehovet til Mørenettet (600 MW) overføres på 300 kV Vågåmo-Aura
- Systemet er nå på grensen til spenningskollaps i Aura-området.

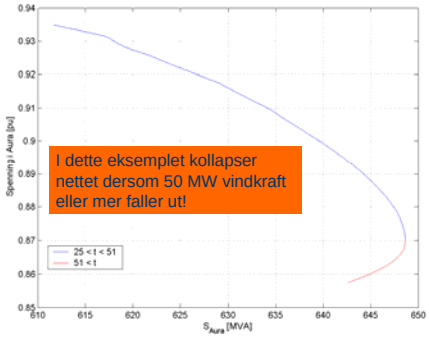


Konsekvens dersom vindparkene også faller ut :

- Driftssituasjon etter feil:
  - Hele importbehovet til Mørenettet overføres på 300 kV Vågåmo-Aura
- Nettet kan kollapse selv om bare deler av vindkraftproduksjonen faller ut!



Case # 1: Spenning som funksjon av snittflyt (P-V kurve)



Diskusjon:

- Eksemplet viser at det er behov for "ride through" egenskaper.
  - Eller må overføringsgrensene reduseres deretter..
- En kritisk feil i hovednettet vil ikke gi null spenning ved vindparken:
  - Hvor skal grensen for laveste spenningsdip settes?
- Det kan være lave spenninger over tid:
  - Det kan være avgjørende at vindparken bidrar med økt reaktiv kompensering etter feil (aktiv spenningsregulering)
- Feil nærmere vindparken:
  - I hvilken grad er det behov for at vindparken overlever slike?

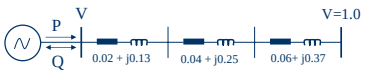
2. Regulering av vindkraftverk Spenningsregulering

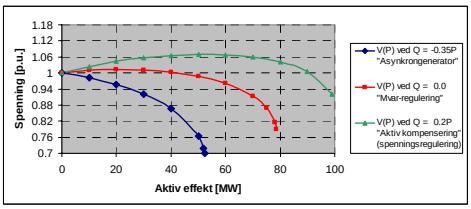
- Mulighetene avhenger av systemkonfigurasjon (el-konverteringssystem og nettilkobling)
- Ikke alle gir mulighet for levering av reaktiv effekt til nettet. Dette kan påvirke valg av teknologi, i lys av de krav som stilles

Eksempel:

- Relevant for større vindkraftutbygginger (50 – 100 MW)
  - Nettkonfigurasjon representativ for norskekysten
  - Utstrakt regionalnett (lange avstander til hovednett)
- Valg av teknisk løsning helt avgjørende for størrelsen på utbyggingen

Betydningen av reaktiv kompensering





Diskusjon
(reaktiv effekt / spenningsregulering)

- Dansk forskrift krever at Vindkraftverk tilknyttet spenningsnivå > 100 kV skal kunne operere i ulike modi:
  - Konstant Mvar
  - Konstant cosFI
  - Spenningsregulering
- Det er ikke et absolutt krav til reaktiv ytelse
- Stasjonære og dynamiske analyser er viktige for valg av systemløsning og kontrolltiltak

- Hva bør kreves i Norge?
- Bør det være et absolutt krav til ytelse eller avhengig av tilknytningspunkt (basert på nettanalyser)?

3. Eksempel på problemstillinger knyttet til balansehåndtering og systemdrift

- Frekvensregulering
- Flaskehalsproblematikk
- Regulerstyrke
- Reserver

- Effektproblematikk

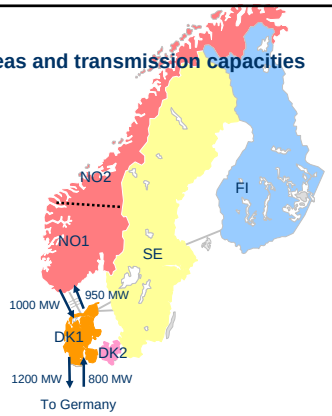
- Eksempel fra dagens virkelighet (8. januar)
  - Mer enn 1700 MW vindkraft kobles bort pga. sterk storm
  - Les mer: http://www.eltra.dk/composite-15751.htm

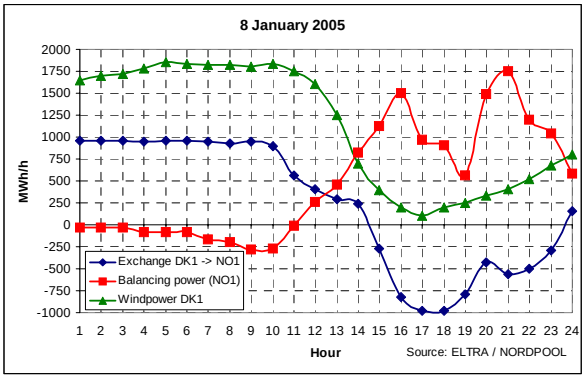
Nøkkeltall for Vest-Danmark (Eltra)

	MW	GWh
Central power plants	3,516	16,161
Decentralised CHP units	1,567	6,839
Decentralised wind turbines	2,374	4,363
Offshore wind farm Horns Rev A	160	
Consumption		21,043
Maximum load	3,780	
Minimum load	1,246	
Capacity export to UCTE	1,200	
Capacity import from UCTE	800	
Capacity export to Nordel	1,560	
Capacity import from Nordel	1,610	

Key counts of the power system of Eltra for the year 2003
(Source: Eltra)

Elspot areas and transmission capacities

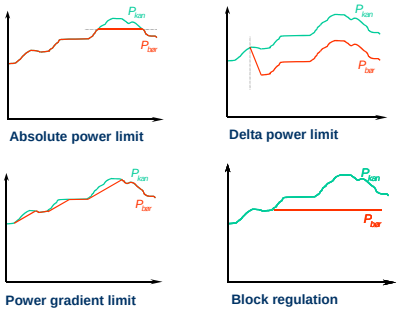




Diskusjon
(systemdrift / Balanseregulering)

- Det nordiske kraftsystemet og regulerkraftmarkedet håndterer bortfall av 1700 MW vindkraft
  - Eksempel på
    - Markedsbasert håndtering av et balanseproblem
    - Internasjonalt marked (Norge → Danmark)
    - To synkrone områder (Nordel → UCTE)
- Hvordan påvirkes regulerstyrke og krav til reserver?
- Hva er sannsynligheten for at tilsvarende kan skje når det er svært kaldt (topplast) i Norge/Sverige/Finland?
- Hva bør være minimumskrav til effektregulering fra vindkraftverk?
  - Av 1800 MW faller det ut max. 10 MW/minutt.

Wind Farm Controller



Oppsummering / Diskusjon

- Nettilknytning og systemaspekter
  - Ulike problemstillinger
- Krav, forskrifter, veiledninger
- Eksempler
  - Transient stabilitet ("Fault ride-through")
  - Behov for spenningsregulering og reaktiv kompensering
  - Effektregulering, muligheter og koordinering
- Er det en grense for hvor mye vindkraft systemet kan tåle?
- Hva er hovedutfordringen framover?

TRANSIENT STABILITY STUDIES COMPARING SYNCHRONOUS AND DOUBLY FED INDUCTION GENERATORS

Part of the Nordic Energy Research project:
"Large Scale Integration of Windpower in the Nordic Power Grid"

Jarle Eek

Nordic Energy Research Statnett Statkraft

Project goals

- Etablish benchmark models
  - Conventional Generation (synchronus machines)
  - "State of the art" wind-turbine technologies
- Etablish benchmark cases
  - Characterise generation
  - Grid topology
- Compare characteristics determining:
  - Transient stability (short term)
  - Small signal stability (short term)
- Define limitations/properties of integration
  - Identify problems, propose solutions (park/single turbine as part of a park)
  - Contribute to defining, technical optimal grid codes.
- Validate results

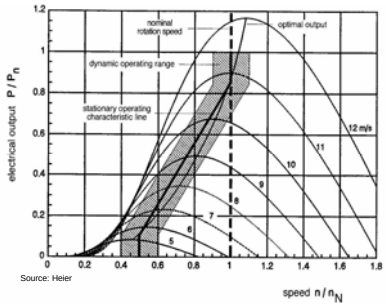
Background - Motivation

Table 1. Overview of leading wind turbine manufacturers generator technology

	Rating [MW]	Torque Control	Generator	Control Strategy
SIEMENS	2.3	Combistall	Asynch - sc	fixed
ENERCON	4.5	Pitch	SG - FSC	variable
GE-WIND	3.6	Pitch	DFIG	variable
GAMESA	2.0	Pitch	DFIG	variable
VESTAS	3.0	Pitch	DFIG	variable
NORDEX	2.5	Pitch	DFIG	variable
REPOWER	2.0	Pitch	DFIG	variable

~ 70 % market share

Variable speed generation



Source: Heier

Problem definition

- Given large penetration of state of the art variable speed, wind turbine generators with doubly fed induction generators;

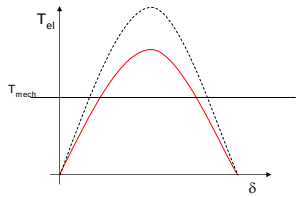
  - How will this technology perform in the sense of transient stability?

- The generators should fullfill the same terms concerning transient stability:

  - Perform stable subjected to a severe grid disturbance

Basic understanding

Transient stability of synchronous generator



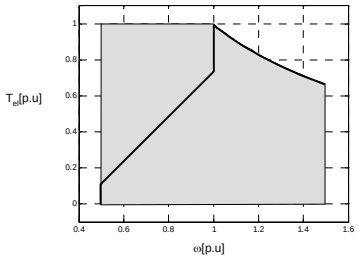
Swing equation determines load-angle movement:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J_{tot}}(T_{mech} - T_{el})$$

$$T_{el[p.u]} = \frac{E \cdot V_s}{X} \sin\delta$$

Basic Understanding

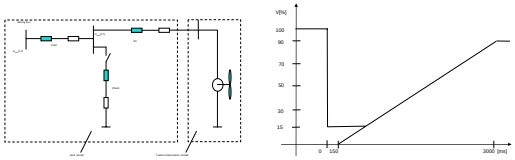
Electrical torque operational area for a DFIG



Problem Solution

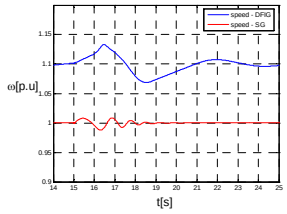
- State space modelling in Matlab/Simulink:
  - Doubly fed induction generator
  - Synchronous generator
  - Small grid equvivalent
- Simulation of a severe grid disturbance for both modelled generator technologies.

Grid topology and fault profile



Result - example

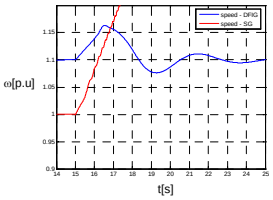
Nominal output power of both turbines at 40%



Both generators stable

Results - example

80% of nominal ouput power for both generators:



Doubly Fed Induction Generator: Stable

Synchronous generator: Unstable

Conclusions

- For this specific case with specific disturbance, the doubly fed induction machine performed stable in the range of operation, where a synchronous machine was unstable
- By defining transient stability from the generators stator to rotor flux relations variable and fixed speed generators can be compared.
- Doubly fed induction generators are potentially more transient stable than a conventional synchronus generator because of the flux-speed decoupling by adding controllability of the rotor converter circuit
- Regard has to be taken to how the ride-through sequence is realised, which may influence results.

Further work

- How will the technology diversity influence the basic results?
- How does grid topology and fault characteristics influence the basic results?
- What simplifications can be made when analysing transient stability involving these components?

Control of Wind Power Turbines

Thomas Fuglseth
NTNU – Dept. of Electrical Power Engineering
feb. 2004 – feb 2008
Supervisor: Tore Undeland

Ph. D.-project

- Part of the Wind Energy Strategic Program
  - A cooperation between NTNU, SINTEF and IFE
  - Funded by the Norwegian Research council, with additional funds from Statkraft.
- Started in feb. 2004, expected to be finished by feb. 2008

Background

- M. Sc. in Guidance, Navigation and Motion Control from dept. of Engineering Cybernetics.

Previous work

- Design of fixed-pitch, variable speed rotor for SiMiCon UAV using optimization techniques (5th year project)
- Thrust allocation with rudders using real-time optimization techniques (master thesis)

Wind turbine technology

- Older turbines
  - Limited or no pitch control
  - Commonly induction generators connected directly to the grid

  →Limited control options

Wind turbine technology (2)

- Modern turbines
  - Controllable pitch
  - Permanent magnet synchronous or double-fed induction generators
  - Converters can control generator torque

  →Greatly improved control possibilities

Control variables in wind power

- Pitch-control (Power curve following)
- Generator torque controlled with converters
- Active/reactive power control in converter-fed systems

Control theory in wind power (2)

- Primarily linear control theory
- Limited use of nonlinear and adaptive control schemes.
- Decoupled controllers
- Wind turbine inherently nonlinear system

  →Use of nonlinear control can improve performance

Control possibilities – areas of interest for research

- Nonlinear regulators
  - Integrator backstepping
  - Piecewise linear solutions
- Adaptive controllers
  - Combine parameter estimators (such as augmented Kalman filter) with on-line controller design
  - Useful when system parameters change or are unknown

Control possibilities (2)

- Sliding Mode Control (SMC)
  - Also known as Variable Structure Control (VSC)
  - Robust and simple to implement
  - Useful for Variable Structure Systems, such as switched circuits
  - Defines a “sliding surface” in the state space which the state will move towards

Control possibilities (3)

- Model Predictive Control (MPC)
  - Compute inputs by predicting system behaviour from a mathematical model
  - Mainly used in systems with slower dynamics due to computing needs
  - Increased computing power theoretically allows usage in systems with faster dynamics
  - Can be combined with adaptive schemes in case of unknown system parameters

Control possibilities (4)

- Optimal controllers
  - Find inputs by solving for the minimum point of a cost function
  - Linear or quadratic variants depending on system to be controlled
  - Little used because of computational requirements, but new solution techniques can compensate for this

Progress so far

- Some independent studies in power electronics, motor drives, DSP programming.
- Attended ”Danish Academy in Wind Energy 2004” Ph. D. course in Aalborg.
- Attended ”International Workshop on Power Electronics Applied to Wind Energy”, Madrid, Spain.
- Passed ET8300 Digital Signal Processing in Power Electronic Systems Ph. D. Course.
- Worked as teaching assistant in TET4100 Circuit Analysis last term

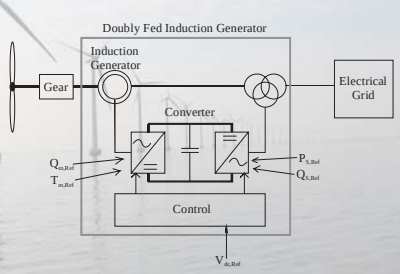
Areas of interest for future study

- Control of electrical drives/generators
- Control of power electronics connected to the grid
- Control of mechanical power from wind turbine (rotor pitch)
- Testing of different control strategies for the abovementioned areas
- Development of control schemes that will strengthen the role of wind power plants in the grid

DFIG Models for Transient Simulations

PhD Student: Bjarne Idsøe Næss Supervisor: Tore M. Undeland

Doubly Fed Induction Machine



Steady State Simulations

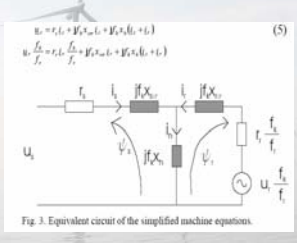
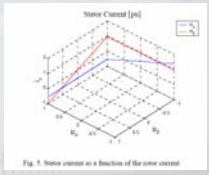
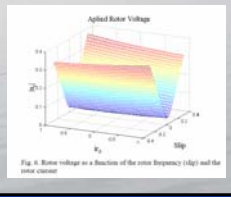
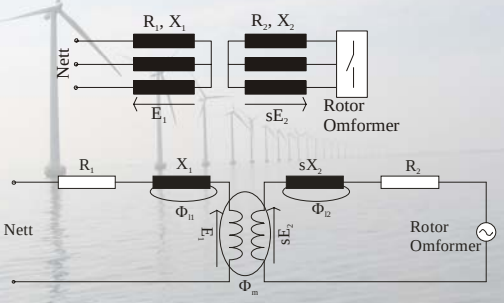


Fig. 3. Equivalent circuit of the simplified machine equations.





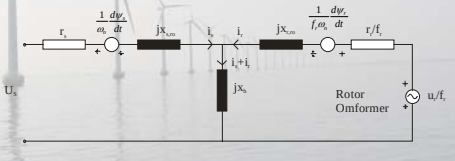
Transient Disturbance



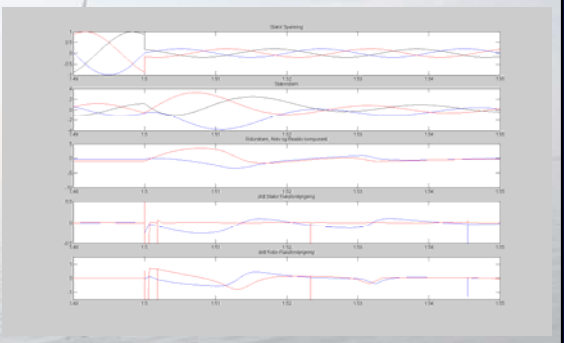
Transient Model

$$\bar{\psi}_s = x_s \bar{i}_s + x_h \bar{i}_r$$

$$\bar{\psi}_r = x_r \bar{i}_r + x_h \bar{i}_s$$

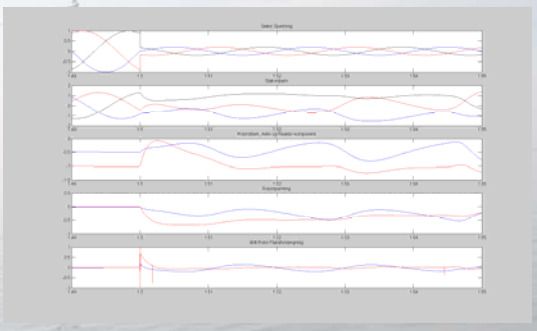


Simulations with Short-Circuit Rotor



NTNU

Simulations with Rotor Connected Converter

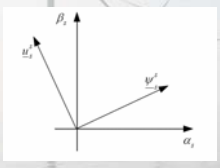


7

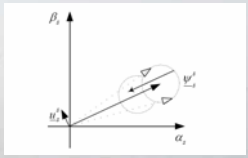
NTNU

DFIG Exposed for a Transient Voltage Dip

Before:



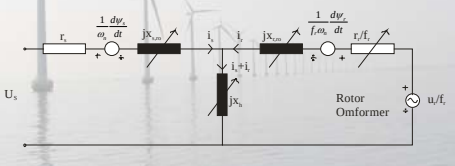
After:



8

NTNU

Transient Model Including Skin-Effect and Saturation



9

Modellering av vindkraftverk – Status IEA Wind R&D Annex 21

John Olav Giæver Tande
john.o.tande@sintef.no
SINTEF Energiforskning AS

IEA Wind R&D Annex 21 Partners

- SINTEF Energy Research, OA (NO, John Olav Tande)
- NREL (USA, Eduard Muljadi)
- Chalmers (SE, Ola Carlson)
- ECN (NL, Jan Pierik)
- INETI (PT, Ana Estanqueiro)
- Risø (DK, Poul Sørensen)
- UCD (IR, Mark O'Malley, Alan Mullane)
- UMIST (UK, Nick Jenkins, Olimpo Anaya-Lara)
- VTT (FI, Bettina Lemstrom

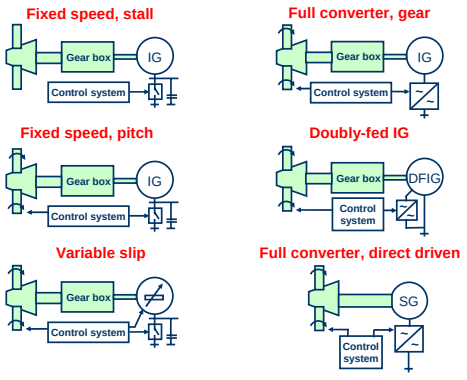
Introduction

- Dynamic models of wind farms for power system studies are at present not a standard feature of many software tools, but are being developed by research institutes, universities and commercial entities.
- Accurate dynamic wind farm models are critical; hence model validation is a key issue and taken up by IEA Wind R&D Annex 21.
- This international working group includes participants from nine countries, and has since start-up in 2002 developed a systematic approach for model benchmark testing.
- This paper present this methodology, including example benchmark test results, but also gives an overview of the various wind farm models now being available from both Annex partners and external entities.

Dynamic wind farm models

- Accurate simulation of wind farms relies on detailed modelling of the applied wind turbine technology, e.g. the dynamics of a fixed speed wind turbine may differ significantly from that of a variable speed wind turbine, but there will also be manufacturer specific variations.
- Wind farm models may be built to various level of detail ranging from one-to-one modelling to full aggregation.
- The one-to-one approach is computer demanding and in many cases not practical, hence aggregated wind farm models are often applied
- The aggregation is not trivial, i.e. considering that a wind farm may consist of hundreds of wind turbines distributed over a large area
- Aggregated models must therefore be applied with care. Possibly a cluster-by-cluster aggregation may constitute a fair approach.

Main types of wind turbine technologies



Models by participants of IEA Annex 21

Partner	Tool	Model	Type	Validated
Chalmers	Matlab	Fixed speed	Dynamic/Transient	Yes/Yes
		DFIG	Dynamic/Transient	Yes/Yes
		Direct Drive	Dynamic/Transient	(Yes/Yes)[1]
	PSSE	Fixed speed	Dynamic/Transient	Yes/Yes
	DigSilent	Fixed speed	Dynamic/Transient	Yes/Yes
		DFIG	Dynamic/Transient	No/No
ECN/TUD	Matlab	Fixed speed	Dynamic/Transient	No/No
		DFIG	Dynamic/Transient	No/No
		Direct Drive	Dynamic/Transient	No/No
		Full Converter[2]	Dynamic/Transient	No/No
INETI	INPark	Fixed speed	Dynamic/Transient[3]	Yes/Yes
		Direct Drive	Dynamic/(Transient)	No/No
	INDUSAT	WP Aggregate	Dynamic/Transient[4]	Yes/Yes
	Matlab	Fixed speed	Dynamic/Transient	Yes/No
		Direct Drive	Dynamic/(Transient)	No/No
NREL	PSSE	Fixed speed[5]	Dynamic/Transient	Yes/No
		DFIG[6]	(Dynamic)[8]/Transient	No/No
		Fixed-Speed[6]	(Dynamic)[8]/Transient	No/No
		Var Slip[6]	(Dynamic)[8]/Transient	No/No
		Full Converter[6]	(Dynamic)[8]/Transient	No/No
	RPM-Sim	Fixed speed[7]	Dynamic/(Transient)	Yes/No

Models by participants of IEA Annex 21

Partner	Tool	Model	Type	Validated
Risø/AAU	DigSilent	Fixed speed	Dynamic/Transient	Yes/Yes
		DFIG	Dynamic/(Transient)[8]	No/No
	Matlab	Fixed speed	Dynamic/Transient	Yes/No
		DFIG	Dynamic/(Transient)[9]	No/No
SINTEF	PSSE	Fixed speed	Dynamic/Transient	Yes/Yes
		DFIG	Dynamic/(Transient)[10]	No/No
		Direct Drive	Dynamic/Transient	No/No
	Matlab	Fixed speed	Dynamic/Transient	Yes/Yes
		DFIG	Dynamic/(Transient)[11]	No/No
		Direct Drive	Dynamic/Transient	No/No
	SIMPOW	Fixed speed	Dynamic/Transient	Yes/Yes
	PSCAD[12]	-	-	-
UCD	Matlab	Fixed speed	Dynamic/(Transient)	No/No
	PSS/E	DFIG	Dynamic/(Transient)	No/No
		Full Converter	Dynamic/(Transient)	No/No
UMIST	Matlab	Fixed speed[13]	Dynamic/Transient	No/No
		DFIG[13]	Dynamic/Transient	No/No
	PSCAD	DFIG[14]	Dynamic/Transient	No/No
VTT	ADAMS[15]	Fixed speed	Dynamic/Transient	No/No
	Matlab[15]			
	PSCAD[15]			

IEA Annex 21 measurement data base

- WT500 (Denmark); 500 kW fixed speed, stall controlled wind turbine, measurement during normal operation.
- Alsvik (Sweden); 4x180 kW wind farm (fixed speed, stall controlled), measurement during normal operation and measurement + simulated response to voltage dip.
- Olos (Finland); 5x600 kW wind farm (fixed speed, stall controlled), measurements during normal operation.
- Azores (Portugal); 4x100 + 1x150 kW wind farm (fixed speed, stall controlled), measurements during normal operation.
- DFIG850 (Sweden); 850 kW DFIG wind turbine, measured response to voltage dip.
- SimWT (Denmark); simulated response of fixed speed wind turbine on voltage dip (simulations in EMTDC and DIgSILENT).
- Smøla (Norway); 20x2 MW wind farm (fixed speed, active stall Bonus wind turbines), measurements during normal operation and response to voltage dips.

Benchmark test procedure (draft)

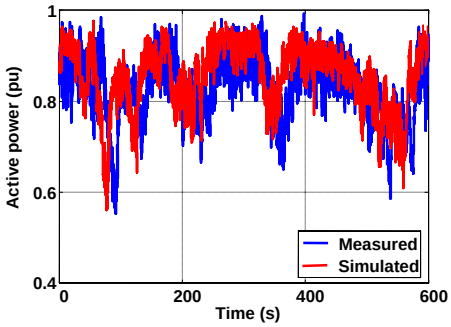
Dynamic operation during normal conditions:

- Input:
  - Wind speed time series (and optionally voltage time series)
- Output:
  - Time series plot of active power output, reactive power, and voltage (optionally)
  - Power spectral density of active power output
  - Short-term flicker emission
  - Optionally plots of Q(U) and Q(P)

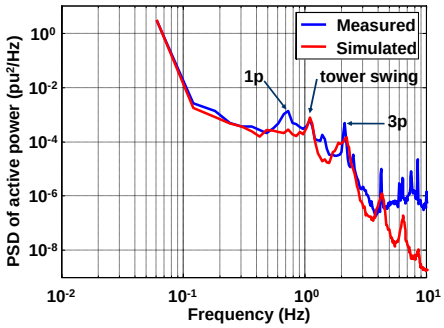
Response to voltage dip:

- Input:
  - Voltage time series and constant aerodynamic torque (or optionally wind speed time series)
- Output:
  - Time series plot of active and reactive power output
  - Time series of voltage at wind turbine terminals

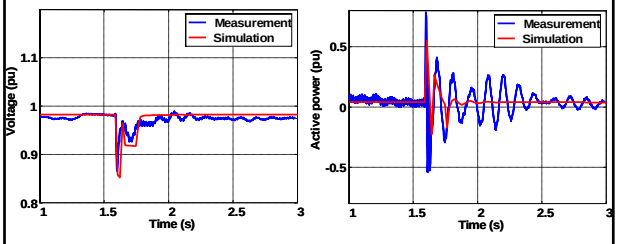
Example test result - Normal operation Fixed speed, stall controlled wind turbine



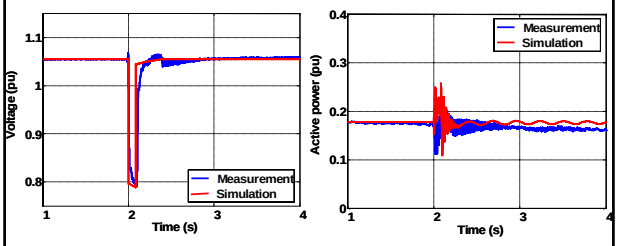
Example test result - Normal operation Fixed speed, stall controlled wind turbine



Example test result - Voltage dip response Fixed speed, stall controlled wind turbine



Example test result - Voltage dip response DFIG wind turbine



Conclusion (1 of 2)

- In general the progress is good on model development.
- Models are available on various platforms (Matlab, PSSE etc), some are freely available, and the Annex participants take model validation seriously providing confidence.
- One major challenge is seemingly to validate the response of models on grid faults such as severe voltage dips.
- Relevant measurements are not easy to obtain and the response may be very dependent on the detailed wind turbine control, i.e. specifications that are manufacturer business secret.

Conclusion (2 of 2)

- A proposal emerging from the Annex works is to update IEC 61400-21 to specify a standardized procedure for measurements and documentation of the response of wind turbines on voltage dips.
- Hence, in the future wind turbine manufacturers may refer to standardized test results for documenting response to voltage dips, but also these test results may be used for model validations.
- A committee draft revision of IEC 61400-21 is due by June 2005.
- The IEA Annex 21 work is ongoing, planned to being concluded by end 2005, and by then a more elaborate presentation of models and benchmark test results are expected.

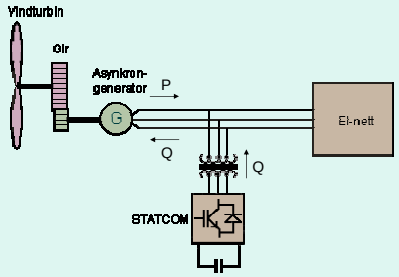
Eksperimentell studie av bruk av STATCOM for reaktiv effektkompensering i vindkraftverk

Jorun I. Marvik, NTNU

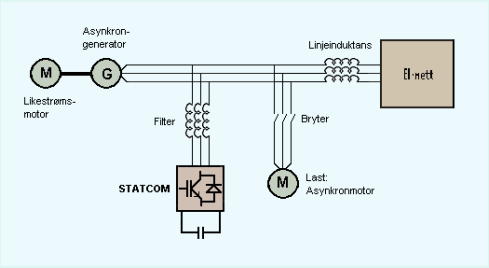
STATCOM

- Regulerer nettspenningen ved å levere eller absorbere reaktiv effekt
- DC/AC-omformer basert på IGBT, IGCT eller GTO, med kondensator på DC-siden
- Tilknyttes nettet i shunt
- Sammenlignet med SVC er en STATCOM raskere, mindre og yter bedre ved redusert nettspenning
- Responsen er rask nok til å takle transiente hendelser

Vindmølle kompensert med STATCOM

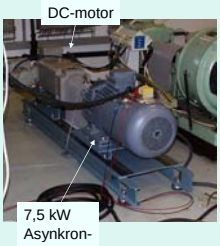


Laboppsett

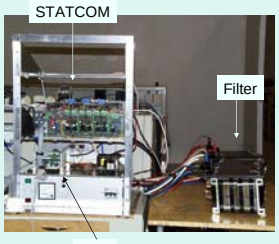


En spenningsdipp lages ved å koble til en asynkronmaskin som last

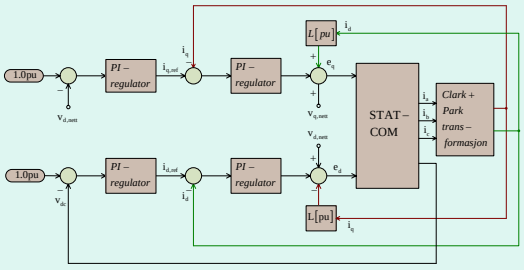
Bilder av laboppsett



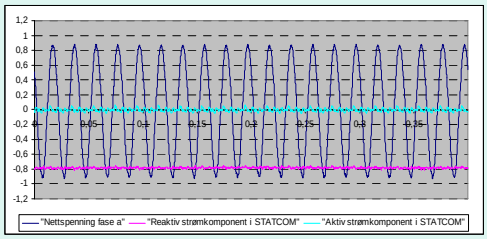
En 20 kVA omformer benyttes som STATCOM, kapasiteten kan begrenses



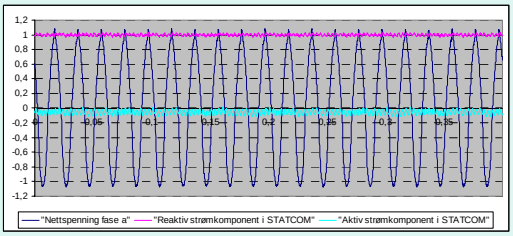
Blokkdiagram for styring



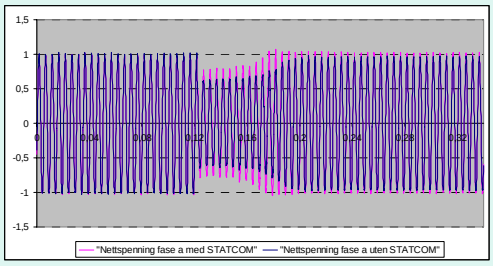
En STATCOM kan redusere nettspenningen ved å trekke en reaktiv strøm fra nettet



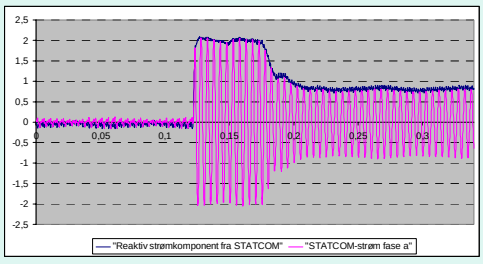
Tilsvarende kan nettspenningen økes ved at STATCOMen leverer reaktiv strøm til nettet



Test av STATCOMens evne til å kompensere nettspenningen ved en spenningsdipp



•Spenningsdippen blir redusert i størrelse og varighet



•Responsen til strømmen er veldig rask
•Maksimal strøm ytes under spenningsdippen
•Kapasiteten til STATCOMen er urealistisk høy, 2 pu

Konklusjon

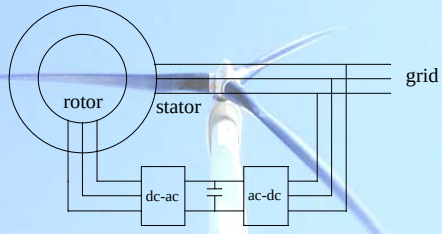
- En STATCOM kan levere eller absorbere en styrbar reaktiv strøm til nettet, og på denne måten hjelpe til med å stabilisere nettspenningen.
- Stor kapasitet må til for at en STATCOM skal kunne påvirke nettspenningen, er best egnet til å jevne ut små spenningsendringer
- Omformer i serie med vindmølla kanskje bedre løsning for å håndtere spenningsdipper i nettet

Control of Doubly-Fed Induction Wind Generator Connected to an Unbalanced Grid

Ted Brekken and Ned Mohan
University of Minnesota

1/18

Doubly Fed Induction Generator

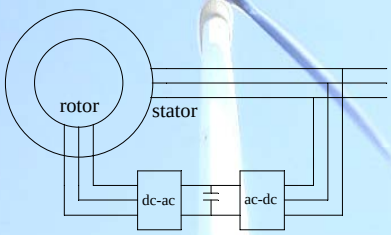


	squirrel cage	doubly-fed
complexity	low	high
speed	fixed	variable
reactive power	fixed	variable
capacity factor	low	high

2/18

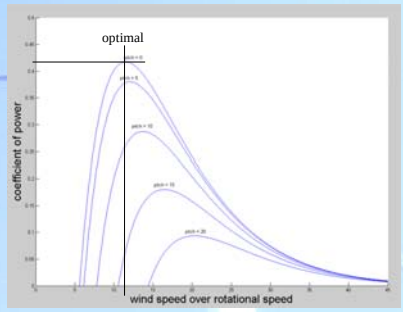
Control Design Objectives

By control of rotor circuit (20% generator rating):
1. Speed control
2. Reactive Power Control
3. Torque Pulsation Compensation (voltage unbalance)



3/18

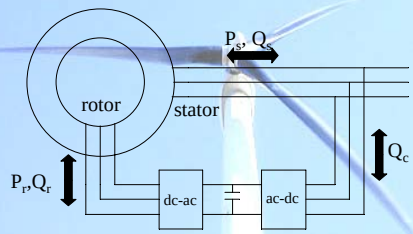
Speed Control



Maintain optimal wind speed to rotational speed ratio

4/18

Reactive Power Control

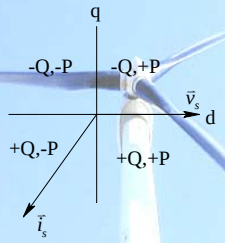


Reactive power control can provide grid stabilization

$Q_s \sim -Q_r/s$

5/18

Speed and Reactive Power Control



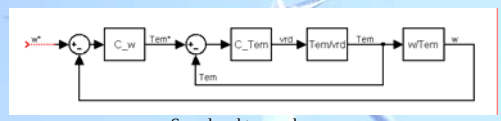
When d-axis is aligned with stator voltage space vector, location of stator current space vector in one of four quadrants determines generator production of real and reactive power.

Therefore, rotor d-axis (v_{rd}) controls torque and rotor q-axis (v_{rq}) controls reactive power.

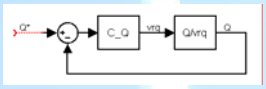
6/18

Speed and Reactive Power Control

Cascade loop design to control speed and reactive power



Speed and torque loops.



Reactive power loop.

7/18

Induction Generators and Voltage Unbalance

3-phase voltage unbalance is common on weak, rural grids. Voltage unbalance causes unbalanced currents in induction generators, resulting in:

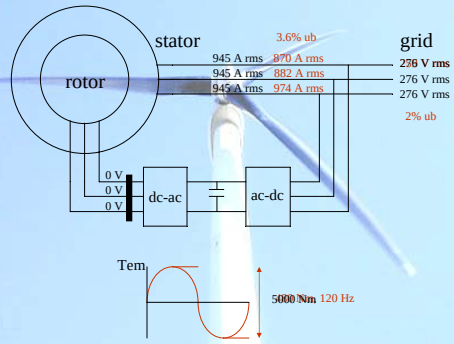
1. Over-current, excessive heating, and derating causing loss in productivity/capacity
2. Torque pulsations causing mechanical component fatigue
   a. Decreased capacity
   b. Severe failure

As a result, induction wind generators are often removed from the grid in the presence of a 3-phase unbalance.

One of the main goals of this research is to develop a control scheme for a doubly-fed induction generator that compensates for torque pulsations, allowing the wind generator to stay connect to an unbalanced grid.

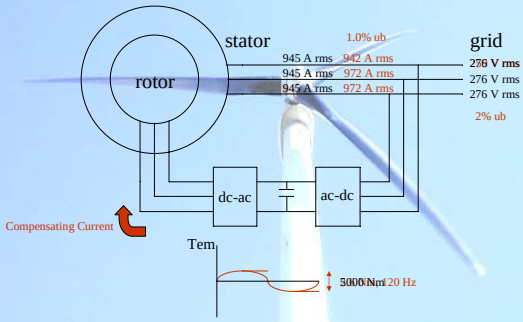
8/18

Cage Induction Generator



9/18

Doubly-Fed Induction Generator



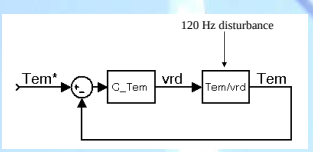
How do we realize speed and reactive power control with torque pulsation compensation?

10/18

Torque Pulsation Compensation (Disturbance Rejection)

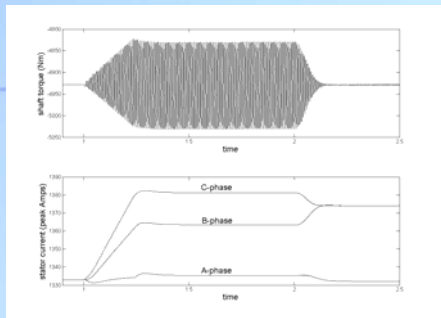
Torque loop controller is designed to have infinite gain at the known disturbance frequency. With negative feedback, the transfer function from the disturbance to the output (torque) will be 0.

$$C\_Tem = \frac{N(s)}{D(s)\left(s^2+\omega_{dist}^2\right)} = \frac{N(s)}{D(s)\left(s^2+(120*2\pi)^2\right)}$$



11/18

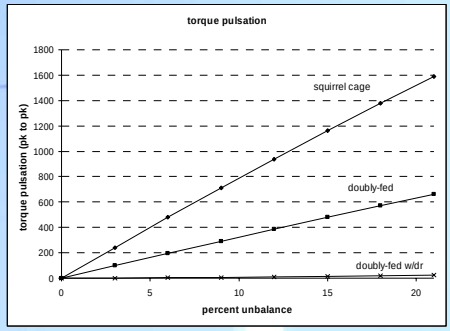
Simulation



750 kW generator with 2% unbalance. Grid unbalanced at 1 secs, torque compensation scheme activated at 2 secs.

12/18

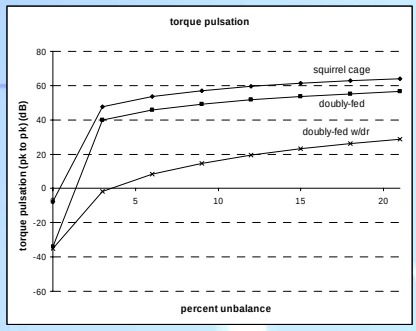
Simulation



Torque pulsation vs. unbalance for 750 kW generator

13/18

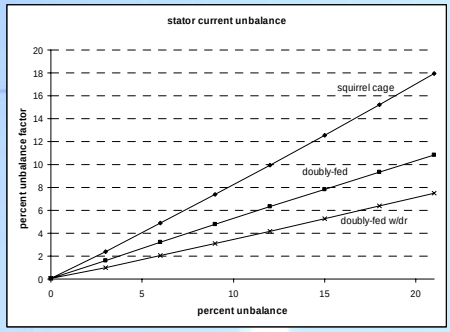
Simulation



Torque pulsation vs. unbalance for 750 kW generator (log scale)

14/18

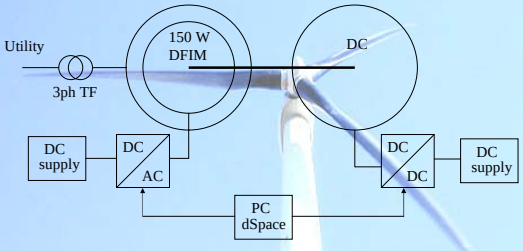
Simulation



Stator current unbalance vs. stator voltage unbalance for 750 kW generator

15/18

Hardware Test



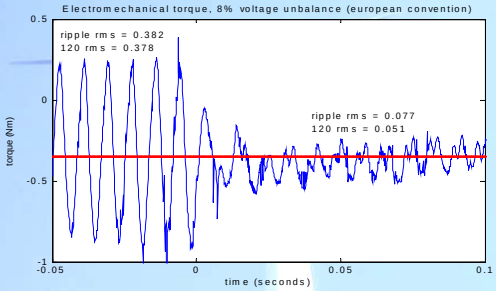
Power: 75 Watt, unity power factor

V_{sa} = 70V, V_{sb} = V_{sc} = 90V ➞ 8% unbalance

s = -0.1

16/18

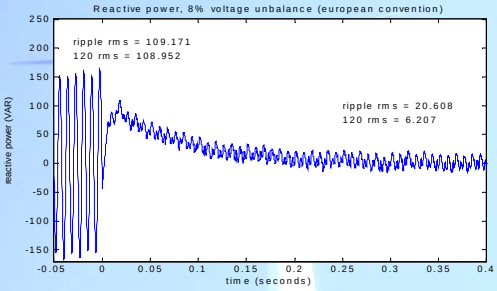
Hardware Results - Torque



0.378 / 0.051 = 7.4 times reduction in 120 Hz component

17/18

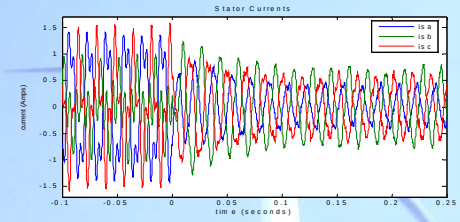
Hardware Results – Reactive Power



109 / 6.2 = 17.55 times reduction in 120 Hz component

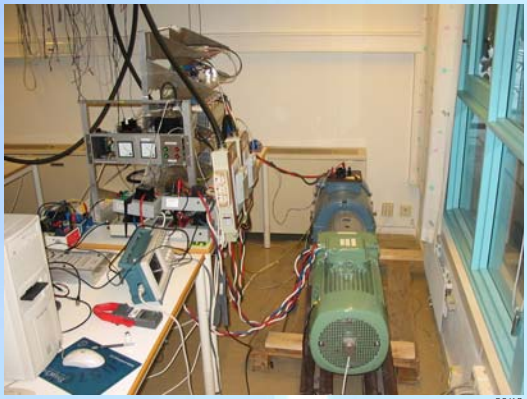
18/18

Hardware Results – Stator Current

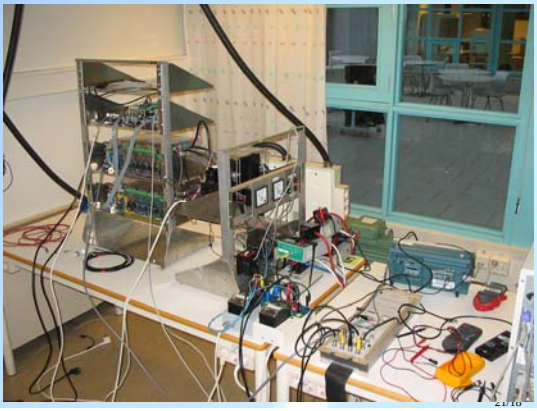


	Before	After	Reduction
THD	0.68	0.13	5.12
UB	0.25	0.16	1.58

19/18



20/18



Papers

- PESC 2003 (Older version of unbalance compensation)
- EPE 2005 (Pending. Will contain higher power results)

22/18

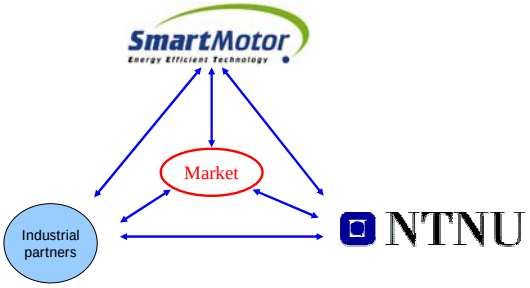
SmartMotor SmartGenerator

Competence, technology and applications

Innhold:

- **SmartMotor/SmartGenerator**
  - Teknologisk tilknytning
  - Kjernekompetanse
  - Applikasjoner av kjerneteknologi
- **Muligheter innenfor produksjon av kraft fra vind**
  - Energiscenario 2050
  - Utfordringer for Vindmøller mhp. Generatorteknologi
  - Evaluering av PM teknologi i vindkraftsystemer
- **Utviklingsprosjekter i SmartMotor og Smartgenerator rettet mot vindkraft**
  - Integrasjon av prosjekter
  - Hovedmål og delmål
  - Status

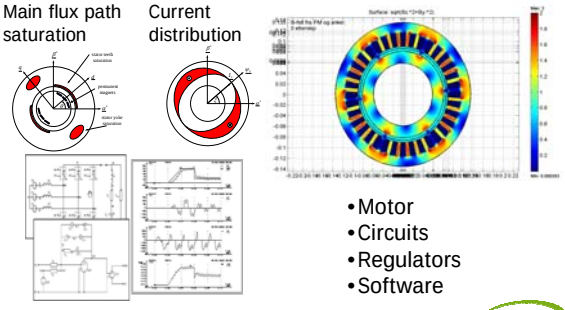
Organisation



SmartMotor Competence; PMSM

Main flux path saturation

Current distribution



- Motor
- Circuits
- Regulators
- Software

Quiet Traction - Wheelmotor

Description:	axial flux (rotor- stator- rotor), PMSM
Voltage:	>15 V, 3-phase
Diameter:	225 mm
Active length:	50 mm
Torque:	20 Nm nominal, 90Nm peak
Speed:	150 rpm nominal
Efficiency:	~80% nominal

SmartActuator

Description:	radial flux, PMSM
Voltage:	>120 V, 3-phase
Outer diameter:	200 mm
Active length:	38 mm
Torque:	25 Nm peak
Speed:	24 rpm nominal
Efficiency:	~50-60% nominal

HUGIN 3000 - Submercible

Description:	radial flux, PMSM	•Oil filled
Voltage:	>15 V, 3-phase	•Open in water
Outer diameter:	200 mm	•Pressure compensated
Active length:	46 mm	•Down to 3 500 m depth
Power:	300 W nominal	
Speed:	150 rpm nominal	
Efficiency:	~90% nominal	

SmartGenerator

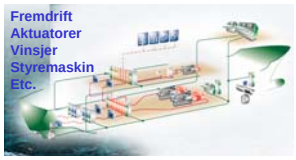
100 kW PM Rim driven thruster

Description:	radial flux, PMSM
Voltage:	400 V, 3-phase
Diameter:	800 mm
Active length:	150 mm
Power:	100 kW nominal
Speed:	700 rpm nominal
Efficiency:	~95 % nominal (calculated value)

SmartGenerator

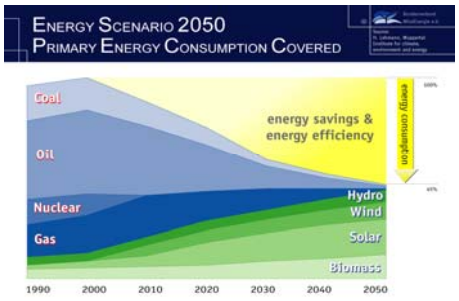
800 kW thruster

Description:	radial flux, PMSM
Voltage:	690 V, 3-phase
Diameter:	1875 mm
Active length:	412 mm
Power:	800 kW nominal
Speed:	265 rpm nominal
Efficiency:	~98 % nominal, (calculated value)



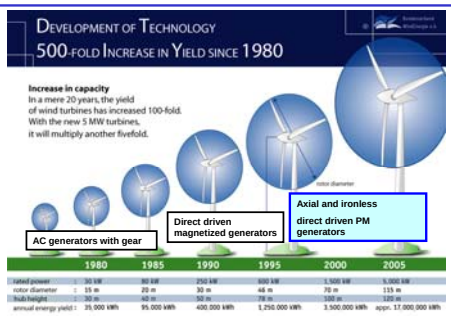
SmartGenerator

Expected Energy Scenario → 2050



SmartGenerator

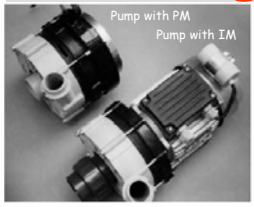
Mega-trends



SmartGenerator

PMSM vs IM

	Volume	Power	Price
Origin (IM)	1	1	1
PM at same volume	1	2,5	1,52
PM at same Power	1/ 2,5=0,4	1	1,52 / 2,5= 0,61



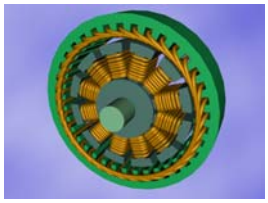
The table shows, and the picture indicates that **PM motors will be the cost efficient alternative of the future**

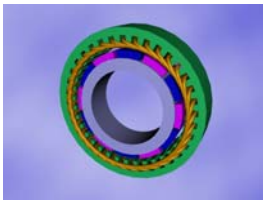
- learning curve
- standard production lines
- depreciation

} **PM**

SmartGenerator

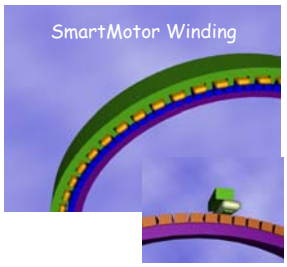
From field winding to PM





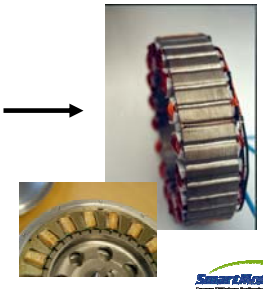
SmartGenerator

From traditional winding to concentrated coils



SmartGenerator

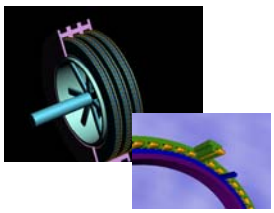
From traditional technology to SmartGenerator



SmartGenerator

SmartGenerator

Direct driven,
high efficient, ironless,
low weight generator



Reduced: weight, cost, maintenance
Strong point: permanent magnets

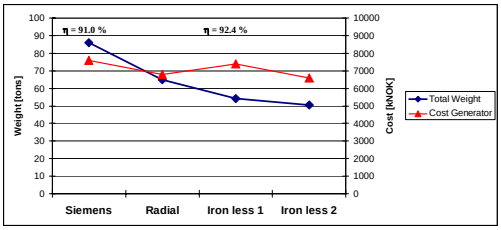
SmartGenerator

Comparison of consepts

	Siemens	Radiell	Jernløs 1	Jernløs 2	
Aktiv lengde	1 200	1 200	164	124	mm
System virkningsgrad	**91,0 %**	**90,9 %**	**92,4 %**	**90,3 %**	
Vekt					
Magnet 300 kr/kg	2 524	2 598	5 604	3 054	kg
Kobber 33 kr/kg	6 000	3 260	2 260	1 140	kg
Blikk 50 kr/kg	17 500	6 480	0	0	kg
Rotor-åk 12 kr/kg	8 300	1 500	6 400	6 400	kg
Aktive materialer totalt:	34 324	13 838	14 264	10 594	kg
Bærende konstruksjoner:	51 676	50 000	40 000	40 000	kg
Total masse:	**86 000**	**63 838**	**54 264**	**50 594**	**kg**
Vektreduksjon:	-	25,8 %	36,9 %	41,2 %	
Kostnader					
Aktive materialer:	1 930 000	1 230 000	1 830 000	1 030 000	kr
Bindemiddel stator,epoxy:	0	0	100 000	100 000	kr
Bærende konstruksjon:	620 000	600 000	480 000	480 000	kr
Arbeid/utvikling:	5 000 000	5 000 000	5 000 000	5 000 000	kr
Generator	7 550 000	6 830 000	7 410 000	6 610 000	kr
Omformer	6 000 000	6 000 000	5 500 000	5 500 000	kr
Total	**13 550 000**	**12 830 000**	**12 910 000**	**12 110 000**	**kr**
Ekstra tapskostnader i forhold til jernløs 1:	930 000	996 000	-	1 394 000	kr

SmartGenerator

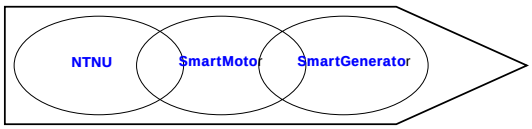
Weight and cost relations



SmartGenerator

Project interaction; SmartMotor, SmartGenerator and NTNU

Research and laboratory facilities | **Design and development** | **Specification and implementation**

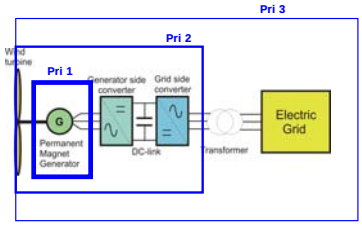


SmartMotor Project

SmartGenerator Project

SmartGenerator

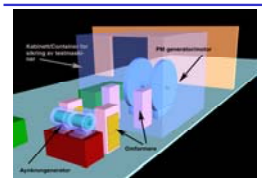
Main focus and priority

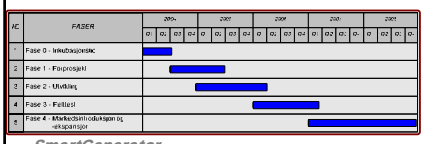


Project priority 1; Development of an optimal generator for wind energy production
Project priority 2; Design and development of a wind generator system
Project priority 3; Grid optimalization and effects

SmartGenerator

NTNU/SmartGenerator Wind lab



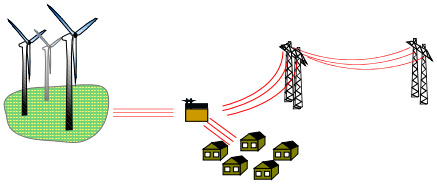


SmartGenerator

Behov for vindkraftkompetanse?

Terje Gjengedal
Statkraft Energi/NTNU

Vindkraft



Hva er kompetanse?

- **Formell utdannelse og skolegang**
- **Trening, trening, trening**
- **Anvendelse og praktisering**

- **For å få riktig kompetanse må alle tre områder ivaretas**

Spesialkompetanse på spesifikke fagtema

- **Vindforhold, terrengeffekter, prognosering +++++**
- **Strømningsteknikk, Aerodynamikk, strukturdynamikk**
  - Onshore, offshore
- **Mekanisk design og dimensjonering**
- **Elektrisk design og dimensjonering av komponenter**
- **Systemforståelse av turbinkonsept, styring og regulering**
- **Kraftsystem/energisystem:**
  - Systemintegrasjon, stabilitet, systemdrift
  - Markedsforståelse, balansehåndtering, samkjøring vind-vann og markedsløsninger++++
- **Miljøforhold, flora, fauna, fugl, visuelle forhold+++++**
- **Samfunnsforståelse; hvorfor protesterer folk, hvordan skal vi få aksept i samfunnet?+++++**
- **Politikk, politiske prosesser og beslutninger, rammebetingelser**
- **Finans, økonomi, risiko, garantier, avtaler, kontrakter**
- **Jus, lover, regelverk, konsesjoner ++++++**
- **++++++++++++++**

Generell kompetanse

- **Må ha breddekompetanse som ser helhet og sammenhenger mellom de ulike spesialkompetansene**

Eksempel:

- **'Potetingeniøren' som har 'dyp nok' oversikt og som kan hente inn spesialkompetanse ved behov**
  - Tverrfaglighet/multidisiplin med god nok dybdeforståelse
  - Det er få av disse i Norge

Hva gjør NTNU?

- **NTNU har våknet ..**
  - **Vindkraft inngår etter hvert i grunnutdanning på flere institutter**
    - Inngår som deler i grunnfag
    - Fordypningsfag for 5.klassestudenter
    - Noen fag på bredde andre på spesialisering
  - **Stort antall prosjekt og hovedoppgaver – og i samarbeid med industri/næringsliv**
  - **Stor aktivitet på dr.grader**
    - Spesialisering og dybde
- **Nært og godt samarbeid med Sintef**
  - Vinn-vinn situasjon

Kompetanse for fremtiden?

- **Utvikling av undervisning krever at instituttene samarbeider på tvers**
- **Jeg vil både ha tilgang på spesialisten og 'potetingeniøren'**
- **Få til enda bedre samhandling mellom NTNU, FoU-miljøene og industri/næringsliv?**
  - Jaaaaaaaaaaa
  - Dette krever vilje, samarbeid og innsats

Naturen i arbeid

Statkraft

02/02/2005 s. 7

Eksempel på fordypningsfag

Uke	Tema
1	Introduksjon til faget
	Aerodynamikk; vindforhold, Betz lov,
2	Turbinteknologi
3	Det elektriske systemet: generatorer; bruk av kraftelektronikk, tap, reaktiv effekt og kompensering med mer.
4	Oppbygging og utforming av vindparker
5	Ekskursjon/fabrikkbesøk teknologi
6	Vindkraft og nettstabilitet: dynamiske egenskaper, spenningsstabilitet, vinkelstabilitet, systemanalyse
7	Nettilknytning av vindparker:
8	Miljøforhold
9	Planleggingsprosessen, fra plan til konsesjon
10	Ekskursjon til Smøla
11	Vindkraft i Kraftmarkedet
12	Grønne sertifikater
13	Økonomi; investeringer, drift og vedlikehold, livssykluskostnader, mm

Naturen i arbeid

Statkraft

02/02/2005 s. 8

PARTNERE

IFE,SEFAS,NTNU,VEI,QBATOR

INFRASTRUKTUR

Det er planlagt for følgende innstallasjoner:

- En skala/forskningsturbin Vestas V- 27- 225 kW
- To MW-turbiner (2.5 - 5 MW)
- Tre meteorologiske master, en i front av hver turbin
- Servicehus med måleutstyr, kontor, kjøkken og sanitær.
- Veier, kabelgater og snuplasser

VIVA

”VIVA” et laboratorium for studenter og stipendiater

- Med NTNU som medeier og bidragsyter kan studenter og stipendiater benytte både testturbinen og måleutstyr tilhørende testsenteret i sitt arbeid.
- De kan planlegge og gjennomføre forsøk, tester og analyser og bruke testsentert som laboratorium.
- Testhuset har også muligheter for overnatting.
- Videobilder og måledate kan overføres til hvor du måtte ønske.

VIVA

”VIVA” et forskningslaboratorium for NTNU, IFE og SEFAS

- VIVA gir prioritert adgang til NTNU, SEFAS og IFE mot et årlig økonomisk bidrag.
- VIVA sørger for at både testturbin, måleutstyr og øvrig infrastruktur er oppdatert
- VIVA vil selv utføre utviklingsoppdrag, men engasjere NTNU, SEFAS og IFE i gjennomføringen

VIVA

”VIVA” et testsenter for industrien

- VIVA kan påta seg oppdrag for industrien ifm testing og utprøving av ny teknologi; det være seg komplette turbiner opp til f.eks. 5 MW eller enkeltkomponenter
- VIVA leier inn / engasjerer kompetent personell eller setter ut oppdrag til NTNU/ SEFAS/ IFE
- VIVA ønsker at industrien selv involverer seg og deltar aktivt med eget personell
- VIVA kan på spesielle betingelser ”leie ut fasiliteter” til bedrifter som selv ønsker å utføre tester

VIVA

Planlagte FoU-aktiviteter i regi av VIVA

- Individuell pitching- belastninger, effektfluktasjoner
  - Mekanisk ombygging av testtutbin
- Drift gjennon spenningsdip - regularitet i nett
  - Installering av frekvensomformer
- Integrering av energilager- styrbarhet, effektreserve
  - Installasjon av energilager (batterier)
- Akustisk støy fra vingetipp - høyere ytelse
  - Inst. av måleutstyr og fysisk ombygging av blader

TESTHUS

VALSNESET
Testsenter for vindkraft
VIVA

Takk for oppmerksomheten!

Oil & Energy

Pål Otto Eide, Jan Schelling
2005-01-27

Utsira
Wind-Hydrogen Stand-Alone Power System

Utsira – A Small Island off the Norwegian Coast

The Utsira demonstration project

A vision becomes reality

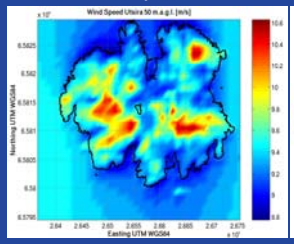
- Project purpose
  - Demonstrate how renewable energy can provide safe and efficient energy supply to isolated areas
- Project goals
  - Full scale demonstration and testing of a wind - H_2 energy system
- Project partners
  - Hydro, Enercon, Norwegian government
- Project status
  - Plant constructed and tested. Demonstration to run for 18 months

The First Full-Scale Stand-Alone Wind-Hydrogen Project in the World

- Hydrogen is used to store wind energy
- A fuel cell and a hydrogen combustion engine is producing power from stored hydrogen when no wind energy available
- Ten private households are part of the demo
- Remote-operated autonomous energy system

Why Utsira?

Very good wind conditions, small but representative load, power supply from main land by sub sea cable



…and a very supporting community

Project partner

ENERCON
ENERGY FOR THE WORLD

- 2 Enercon E40 wind turbines – 2 * 600 kW
- Experts in stand alone renewable power – solutions for balancing intermittent wind power
- Control system for entire plant – surveillance of total stand alone power solution
- Efficient project team, well received on the island

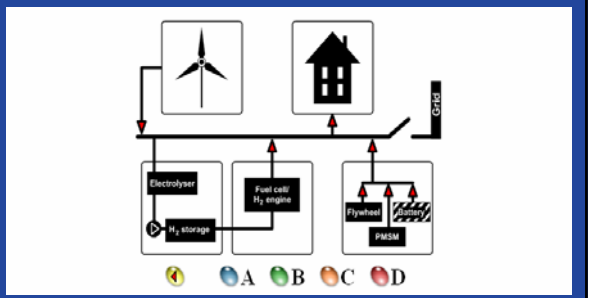
Project Plan – Milestones

Decision	April 2003
Site construction start up	June 2003
Wind turbines commissioned	September 2003
Electrolyser and H2 gen.set to site	winter 2004
Stand alone system ready for demo-phase	spring 2004
Fuel cell implementation	summer 2004
Inauguration	summer 2004

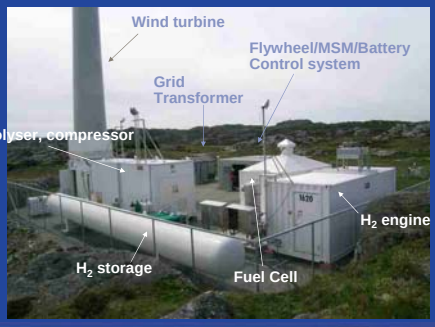
Demonstration period – main focus

- Making the installed components in the autonomous system function together
- Deliver power with the expected quality and reliability to the customers
- Cost reductions, technical/operational simplifications and optimisations
- Commercialisation and marketing

Utsira – How it works



The Utsira wind-hydrogen system



Main components

Wind turbines	2 * 600 kW
Hydrogen engine	55 kW
Fuel cell	10 kW
Electrolyser	10 Nm^3/h, 48 kW
Compressor	5.5 kW
Hydrogen storage capacity	2400 Nm^3, 200 bar
Flywheel	5 kWh
Battery	50 kWh
Master Synchronous Machine	100 kVA

Fuel Cell and Hydrogen Genset

The Electrolyser and Hydrogen Storage

Key lessons learned

- Do not underestimate the costs when realising projects in remote areas! Project execution gets more complicated.
- Interfaces in the hydrogen loop are critical. Careful considerations with respect to static and dynamic performance needed.
- Interfaces in the electrical loop must consider quality demands on the consumer side.
  - Individual equipment is generally not designed to operate in a very weak system with associated reduced power quality.
  - Any redundancy is cost driving. Consider reduced quality of supply!
- Interfaces in the control loop must be standardised.
  - Different suppliers normally has proprietary system.
  - Select a common base in early design phase, preferably based on industry standards.
- Operation philosophy is key in design.

keeps pushing the limits

Fibermatter til produksjon av vindmølle vinger

Royal Garden 26-27/1 2005

Baard Røsvik / Markedssjef / Devold AMT

keeps pushing the limits

Hvorfor fibermatter I vindmøllevinger !

- Material utlegging
  - Tidsforbruk til utlegging av fiber
  - Presisjon I orientering av fiber
- Forutsigbarhet I produksjonsforløpet
  - Permeabilitet
  - Mekaniske egenskaper
  - Laminat tykkelser og vekt

keeps pushing the limits

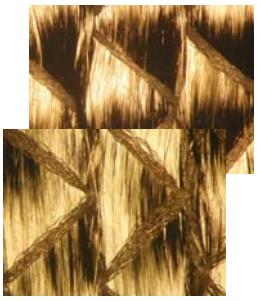
Hvordan kan Devold AMT bidra til vingeprodusenter?

- Kundespesifikke egenskaper
  - Flyt
  - Orientering
  - Drapering
  - Lay-up / håndterbarhet
  - Vekt toleranser

keeps pushing the limits

Hvordan kan Devold AMT bidra til vingeprodusenter?

- Materialspesifikke egenskaper
  - Utmatning
  - Kompresjon
  - Stivhet
  - ……..



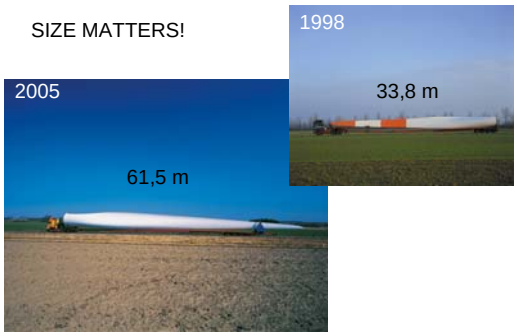
keeps pushing the limits

Konkurransekraft med produksjon i Norge?

- Kunnskapsbasert produksjon
- 151 år med fiberkompetanse
- Krevende hjemmemarked
  - Vindkraft største enkeltsegment for fibermatter
    - Gamesa, Suzlon, har etablert ”lytteposter”
  - Verdensledene miljø for militære kompositt fartøy

keeps pushing the limits

SIZE MATTERS!



NTE

Beina beveger seg - godt planta på jorda

NTE's vindsatsing
Viseadm.dir. Pål Engebretsen
27. januar 2005

NTE
Nord-Trøndelag Elektrisitetsverk

Hva er NTE?

HVA ER NTE?

NTE er et av landets største elektrisitetsverk – både som kraftprodusent, kraftomsetter og netteier.

Vi er også en stor aktør innen elektroentreprise, bredbånd og handel med forbruksartikler.

Vi er 950 ansatte og har en omsetning på 1.6 milliarder.

Kjernevirksomhet

HVA ER NTE?

- **Energiproduksjon og engrossalg**
- **Energisalg sluttbrukermarked**
- **Nett**
- **Elektroentreprise**

HVA ER NTE?

Nord-Trøndelag Elektrisitetsverk ble etablert i 1919 og er i dag verdens eneste fylkeskommunale foretak.

Vi har produsert elektrisitet siden Follafoss kraftstasjon ble satt i drift i 1923.

Denne stasjonen blir i disse dager oppgradert for om lag 300 millioner.

HVA ER NTE?

Oppkjøp av kommunale el-verk:
– Det e´ no dein bæst melkkua vi hi, da!

Allerede i perioden 1938-46 overtok NTE en rekke mindre kommunale e-verk i Nord-Trøndelag.

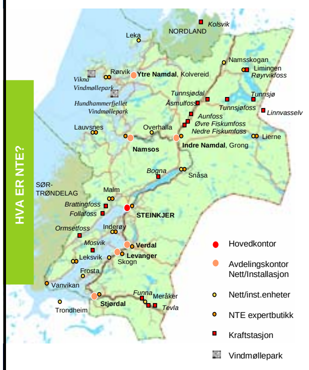
I 1969 ble de store kommunale e-verkene i Stjørdal, Levanger, Verdal, Steinkjer og Namsos overtatt av det fylkeskommunale foretaket.

HVA ER NTE?

Nesten hundre år er gått siden starten med tradisjonell vannkraftutbygging.

I dag er vi en aktør innenfor felt som bredbånd, vindkrafteknologi og internasjonal entreprenørvirksomhet. Vi har heleide datterselskap som jobber med VVS og data.

HVA ER NTE?



NTE har 22 små og store vannkraftverk – fra Røyrvik i nord til Meråker i sør. I tillegg er vi medeier i et vannkraftverk i Nordland og et i Sverige. NTE har i dag også to vindmølleparker.

NTE har et stort antall butikker og enheter for installasjon og nettdrift fordelt over hele Nord-Trøndelag.

HVA ER NTE?

NTE er en del av nærmiljøet og en sentral samfunnsaktør i Nord-Trøndelag.

Samtidig ser vi langt utover regionens og landets grenser. Noen ganger helt til Jerusalem, Montenegro og Afghanistan.

Nord-Trøndelag Fylkeskommune

Foretaksmøtet

Adm. direktør Torbjørn R. Skjerve
Viseadm. direktør Pål Engebretsen

Kommunikasjon Inge Bartnes

Personal Trond Knudsen

Staber

Divisjon Elektro Rune Evjen	**Divisjon Energi** Kenneth Brandsås	**Divisjon Nett** Jan A. Foosnæs	**Kraftsalg** Andreas Aa Mørkved	**Handel** Ivar Ramberg	**Bredbånd** Guttorm Haugan	**Ekstern** Guttorm Haugan	**Bil/Kjøretøy** Ståle J.Braset	**Eiendom** Karsten Ødegård

Dagens tema

Nyskapende

NYSKAPENDE

Vindkraft

Det blåser friskt på trøndelagskysten.

NTE begynte med vindkraftproduksjon i 1991. Vi ligger i dag helt i front når det gjelder utvikling av vindkraft, og blir sett på som en pioner i det norske miljøet.

Vindkraftproduksjon er et av de viktigste satsningsområdene for NTE.

NYSKAPENDE

Vindkraft

Som kraftprodusent samarbeider vi med både Hydro og TrønderEnergi om utvikling av vindkraftprosjekter.

Vi har planlagt prosjekter for 5 milliarder kroner.

Det vil gi en vindkraftproduksjon tilsvarende forbruket til 75.000 husstander.

Dette er en og en halv ganger strømforbruket i private husholdninger i Nord-Trøndelag.

NYSKAPENDE

Industriutviklingsfellesskapet ScanWind/NTE

ScanWind v/Torolf Pettersen representerte betydelig kompetanse og hadde gode ideer om vindkraft.

NTE var søkende etter fremtidig kraftproduksjon. Tilgjengelig vannkraftpotensialet i Norge var utbygget.

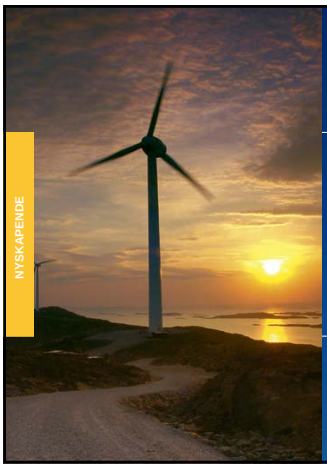
I 1999 ble partene enige om å samarbeide om å utvikle og bygge vindmøller for kraftproduksjon. Teknologifront var målet.

NYSKAPENDE

Industriutviklingsfellesskapet ScanWind/NTE

ScanWind/NTE gjorde avtale med Enova om et utviklingsprosjekt, Hundhammerfjellet.

Avtalen inkluderte både vindmølleparken og industrietablering for produksjon av vindmøller

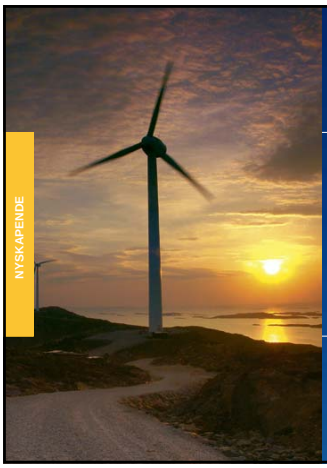


Hundhammerfjellet

Mølla vi nå har satt opp på Hundhammarfjellet er like høy som Tyholttårnet i Trondheim.

Vindmølla er 85 meter opp til navet og rotorbladene er 45 meter lange, noe som gir en rotordiameter på 90 meter.

NTE

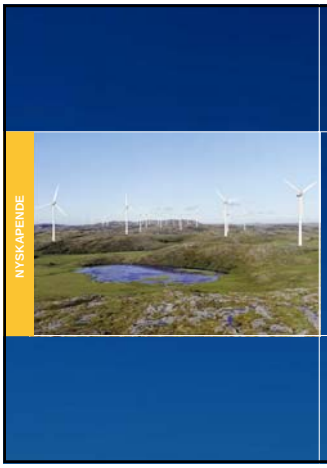


Hundhammerfjellet

Antall møller max	17 stk
Inst. effekt	48 MW
Årsproduksjon	175 GWh
Investering	450 mill
Tidsplan ferdig	År 2007

I tillegg til investeringen kommer er betydelig beløp investert i utvikling av teknologi og tilrettelegging for industriell produksjon av møllene

NTE



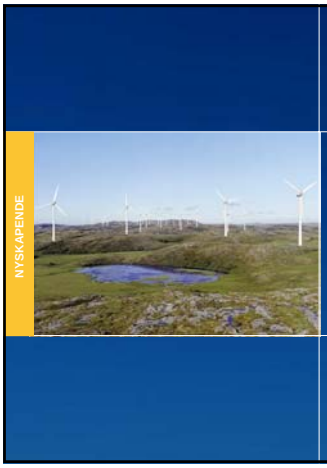
Ytre Vikna

For 2,5 milliarder planlegger NTE bygge en av verdens største vindmølleparker på Ytre Vikna. Konsesjon foreligger.

Parken vil bestå av nesten 100 kjempe-vindmøller, og vil ha en produksjon tilsvarende det samlede privatforbruket i Sogn og Fjordane.

Hvis vindkraften fra Ytre Vikna erstatter importert kullkraft til Norge, reduseres CO_2-utslippet med mer enn det årlige utslippet fra hele bilparken i Midt-Norge.

NTE



Ytre Vikna

Antall møller max.	83/3 MW – 99/2 MW
Inst. effekt	250 MW
Årsproduksjon	870 GWh
Investering	2.500 mill
Tidsplan ferdig	År 2010 (etappevis)

NTE

ScanWind Group AS

Eierfordeling pr. i dag	
• NTE	85 %
• Energiutvikling AS	15 %
Antall ansatte i dag	16 spesialister (ing/dr.ing) + tilsvarende innleide
Antall ansatte fremtid	Opp mot 250 stk

NTE

ScanWind Group AS

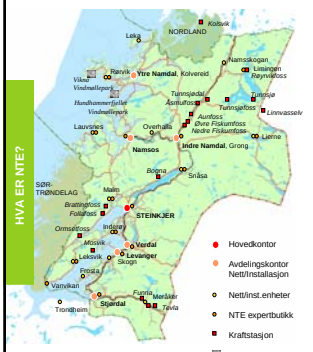
I dag på terskelen til industrialisering til en elektromekanisk industribedrift for produksjon av vindturbiner for det internasjonale marked.

Hva med virkemiddelapparatets rolle i industrietableringen?
- Mange enkeltvirkemidler gode for små prosjekter
- Ingen overordnet koordinering for større satsinger

Er det et ønske om nyetablering av industri i Norge?

NTE

HVA ER NTE?



NTE

Omsetninig konsern	**1.700 mill**
Res. f. skatt	**230 mill**
Bokf. EK	**1.500 mill/3.500 mill (ansv.lån 2.000 mill)**
Bokf.tot.kapital	**6.100 mill**
Verdijust EK	**5.500 mill/7.500 mill**
Antall ansatte konsern	**1000 stk**
Kraftproduksjon	**3.200 GWh/år**
Nett	**14.000 km**
Expert-butikker	**16 stk**
Installasjons-/nettentr.	**450 ansatte**

Aksjonær i 40 selskaper

SINTEF Energiforskning AS
Adresse: 7465 Trondheim
Telefon: 73 59 72 00

SINTEF Energy Research
Address: NO 7465 Trondheim
Phone: + 47 73 59 72 00