Simulering och Optimering av Vindparker

TOPFARM

Elforsk rapport 09:23

Ingemar Carlén

Februari 2009

Vindforsk
Energimyndigheten
ELFORSK

Simulering och Optimering av Vindparker

TOPFARM

Elforsk rapport 09:23

Ingemar Carlén

Februari 2009

Förord

Vid projektering av stora vindparker så ligger fokus alltid på att nå så hög och säker avkastning som möjligt på de mångmiljardinvestering som dessa projekt innebär. De programvaror för vindparksdesign som finns att tillgå idag måste betraktas som relativt enkla, då de ej beskriver den dynamik som storskalig turbulens och aktiv styrning medför. I en strävan att bidra till utvecklingen av morgondagens simuleringsverktyg för stora vindparker så deltar Teknikgruppen i EU-projektet TOPFARM, tillsammans med ledande universitet, forskningsinstitut, projektutvecklare, tillverkare, klass-sällskap samt vindkraftskonsulter. I december 2008 har TOPFARM pågått i ett år av tre. Rapporten ger en beskrivning av läget i projektet per december 2008 och utgör rapportering för den del av projektet som delfinansierats av VindforskII.

Arbetet har utförts av Ingemar Carlén, Hans Ganander, och Reidar Lindström på Teknikgruppen AB. Gunner Larsen på Risø DTU, och Graeme Mccann på GarradHassan, har också bidragit med värdefull input till rapporten. Värdefulla synpunkter på arbetet har erhållits från projektets referensgrupp bestående av Anders Björck, Elforsk, Sven-Erik Thor, Vattenfall.

Projektet har genomförts inom ramen för vindkraftforskningsprogrammet Vindforsk-II som projektnummer V-123. Vindforsk-II finansieras av ABB Corporate Research, EBL-Kompetanse, E.ON Vind Sverige, E.ON Elnät, Falkenberg Energi, Göteborg Energi, Jämtkraft, Karlstad Energi, Luleå Energi Elnät, Lunds Energi, Skellefteå Kraft, Statens Energimyndighet, Svenska Kraftnät, Tekniska Verken i Linköping, Umeå Energi Elnät, Varberg Energi, Vattenfall och Öresundskraft.

Stockholm februari 2009

Anders Björck

Programledare Vindforsk-II

El- och värmeproduktion, Elforsk

Sammanfattning

Dagens utbyggnad av vindkraft sker allt oftare genom etablering av vind-parker på land eller till havs. Fördelar med stora parker är att höga fasta kostnader fördelas på många enheter, samt att man genom stora beställningar av vindkraftverk kan sänka priset per installerad MW. För att få en ytterligare maximera avkastningen på investerat kaptal strävar man i projekteringsfasen självklart efter att nå hög energiproduktion, i kombination med låga kostnader för underhåll och reparationer. Detta åstadkommer man effektivast genom noggranna studier av verkens inbördes placering samt avancerad styrning av varje enskild enhet för hela parkens bästa.

De programvaror som idag används vid projektering av vindparker bygger huvudsakligen på modeller för optimering av energiproduktion, och beaktar endast summariskt de ökade belastningar i vitala komponenter och tvärsnitt som placeringen i vindpark innebär.

I december 2007 startade EU-projektet TOPFARM, där ledande tillverkare, klass-sällskap, universitet, forskningsinstitut, samt vindkraftskonsulter utvecklar morgondagens modeller och koncept för dynamisk simulering av vindparker. Verifiering av de utvecklade modellerna sker med såväl med nya avancerade experimentella metoder, som med högupplösta nummerikska strömningsberäkningar.

Målet är att kunna simulera hela vindparker med samma höga upplösning som man idag uppnår vid analyser av enskilda vindkraftverk. Tillsammans med skräddarsydda optimeringsmetoder ökar möjligheterna att utveckla vindparker med tillfredställande intäkter från energiproduktion i kombination med låga kostnader för reparationer och underhåll. Fokus bör då ligga på att välja bästa placering för varje vindkraftverk, samt att utveckla robusta koncept för optimal styrning av hela vindparken.

Under det inledande året har tyngdpunkten i TOPFARM legat på att vidareutveckla befintliga CFD-modeller för att möjliggöra tillförlitliga prediktioner av strömningen i en vindpark. Exempelvis har inledande beräkningar med instationära randvillkor genomförts vid universitetet i Madrid, och vid CERC i Cambridge har metoder ursprungligen utvecklade för spridning av föroreningar, använts för att studera den sammanlagda uppbromsningen inne i vindparken.

I Danmark har fältexperiment genomförts där man i vaken bakom ett vindkraftverk samtidigt lyckats mäta strömningen med både svepande LIDAR och pitot-rör. Dessa mätmetoder kommer att utvecklas vidare, och insamlade data är av stort värde vid validering av beräkningsmodeller.

Teknikgruppen har främst arbetat med utveckling av optimeringsmetoder, samt olika ansatser att effektivisera aeroelstiska beräkningar. De optimeringsverktyg som utarbetas inom TOPFARM måste kunna hantera vindparksanalyser av varierande komplexitet, för att på ett effektivt sätt söka optimala lösningar i en stor parameterrymd.

Teknikgruppen har även utvecklat algortitmer för att simulera marknära turbulens. Dessa kommer att appliceras såväl för lokal analys av strömningen i rotorplanet, som för de stora lågfrekventa rörelserna i en hel vindpark. En

fördel framför Risø's Mann-modell är här att man inte är bunden till approximationen *Taylors frozen turbulence*.

Syftet med denna rapport är att översiktligt beskriva pågående arbeten inom området dynamisk simulering av vindparker, främst med inriktning mot reglering och optimering.

Figur 1: Flygfoto över Horns Rev en tidig morgon under mycket speciella atmosfäriska förhållanden.

Summary

Today new wind energy production capacity is mainly developed by building onshore and offshore wind farms. By installing wind farms instead of solitary turbines, some of the relatively high initial costs may be *distributed* on several units in order to lower the costs per MW installed production capacity. In order to further increase the return of the large investments, it is essential to design a wind farm that combines high energy production with low costs for repair and maintenance. This is achieved through extensive analyses of the farm layout, in combination with advanced control strategies for the entire wind farm. The tools for wind farm analysis and development that are available today are mainly based on models for optimization of energy production, and deal with fatigue loading of vital components only to a limited extent.

A new research project called TOPFARM started in December 2007 within the 6th Framework Programme for Research and Technological Development (FP6). TOPFARM was initiated by some of the worlds leading universities, research institutes, wind turbine manufacturers, certification societies, project developers, and wind energy consultants. The main goal for the project is to develop new concepts and tools for dynamic simulation of wind farms that facilitate analysis of the same resolution that today is state of the art when designing individual wind turbines. Validation of the new models is performed using data from extensive field experiments, as well as results from advanced numerical simulations based on novel CFD-algorithms. Together with application specific optimization algorithms these new simulation tools will facilitate wind farm design that combines high energy yield and acceptable levels of increased fatigue loading due to wind farm operation.

During the first year the main focus of the project has been to further develop existing CFD-algorithms in order to facilitate reliable predictions of the flow inside a wind farm. One of the important achievements to be mentioned is the significant progress made with flow simulations of wind farms with boundary conditions at the Technical University of Madrid.

In Denmark advanced experimental setups have been used to measure the flow in the wake behind a wind turbine, using sweeping lidar and pitot tubes simultaneously. These setups will be further developed and the produced data will be of great value for model validation.

Teknikgruppen has mainly been involved with the development of robust methods for applied optimization, along with different approaches to speed up aeroelastic load calculations. The optimization tools being developed in TOPFARM need to handle wind farm analyses of varying complexity, in order to effectively search for solutions in a vast parameter space.

Teknikgruppen has also participated actively in the work with new algorithms for simulation of atmospheric boundary layer turbulence. The new algorithms can be applied for modeling local turbulent flow through the rotor plane, as well as for describing the large low frequency oscillations that have influence on the wake transport process.

This report aims to briefly describe ongoing activities within the field *dynamic simulation of wind farms*, mainly with emphasis on *optimization* and *wind farm control*

Innehåll

1 Bakgrund 1

2 Ny experimentell teknik 4

3 Framsteg inom numerisk strömningsmekanik 7

4 Utveckling av en dynamisk vindparksmodell 10

5 Laster och deformationer 12

6 Reglering 14

7 Optimering 16

8 Slutsatser - Visioner 20

Referenser 21

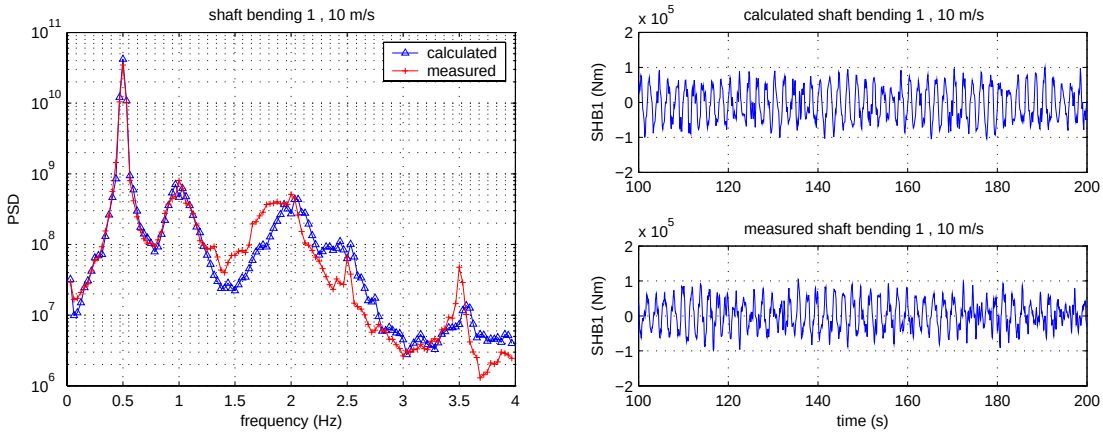
Appendix A: TOPFARM – fakta 23

1 Bakgrund

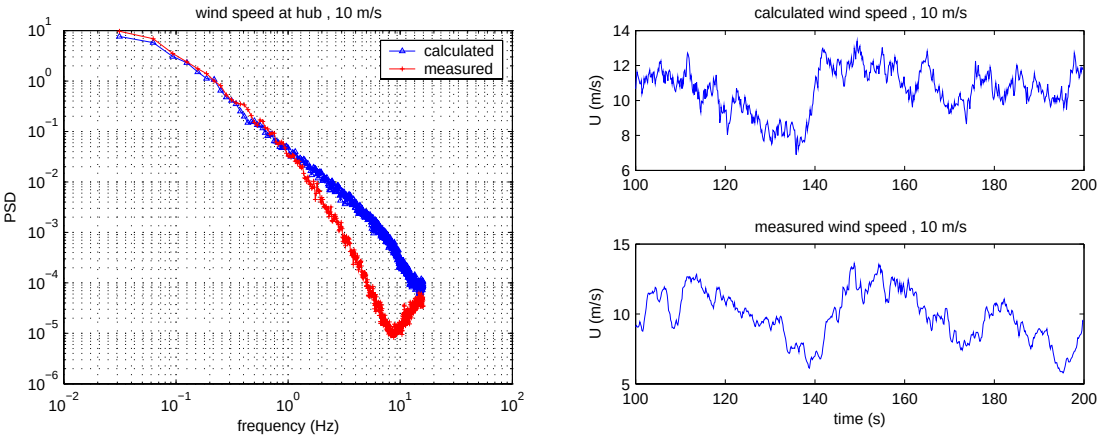
I början av 1990-talet tog utvecklingen av avancerade beräkningsverktyg för detaljerade studier av vindkraftverk ordentlig fart. Den ökande tillgången på datorkraft gjorde det möjligt för de flesta forskargrupper att studera alla ingående delar av ett vindkraftverk med tidssimulering. Grunden för de beräkningsverktyg som utvecklades var kopplingen mellan strukturdynamik och aerodynamik, men snart började man även att inkludera reglersystem samt detaljerade modeller av olika komponenter såsom generatorer, bromsar, girmotorer, pitchservon mm.

När även metoder för tidssimulering av marknära turbulens introducerades, så kunde man nå mycket god överensstämmelse mellan beräkningar och experimentella data (se Figur 1 och 2). Validering av beräkningsprogram var under en period ett ständigt återkommande tema för EU-projekt, tidskrifts-artiklar samt konferensbidrag, och allt mera resurser satsades i utvecklingen.

De nya simuleringsmetoderna kom snart att utgöra *state of the art* även hos den växande skaran av tillverkare.



Figur 2: Jämförelser mellan uppmätta och beräknade primäraxelmoment (Nordtank 500 kW). Beräkningar med Vidyn [1] inom EU-projektet COMTER-ID 1997 [2].



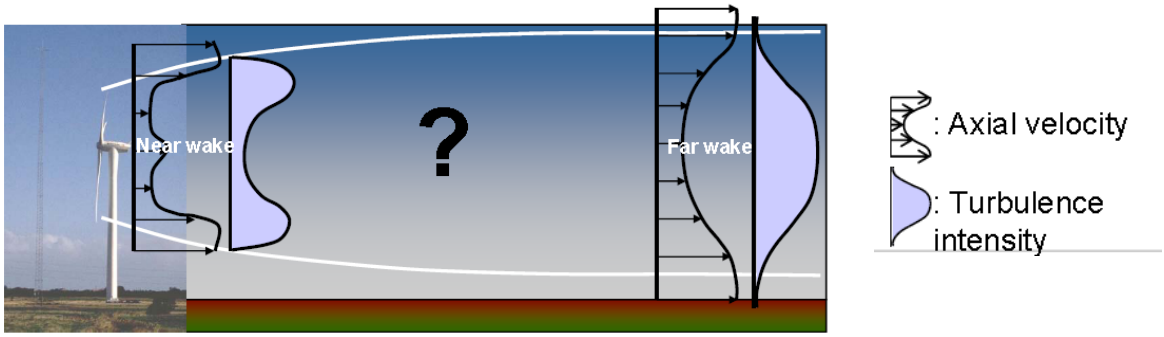
Figur 3: Jämförelser mellan uppmätt och simulerad turbulent vindhastighet. Simuleringar inom EU-projektet COMTER-ID 1997 [2]. (Avvikelsen för spektraltätetheten till vänster kommer av att signalen från en kopp-anemometer interpolerats upp över dess responsfrekvens)

Under senare delen av 90-talet ökade intresset för att bygga ut vindkraften till havs där vindresurserna var goda, och där intressekonflikterna möjligen skulle vara lättare att hantera än var fallet visat sig vara på land. Forskningens fokus riktades nu på att vidareutveckla de befintliga beräkningsvertygen till att även inkludera våglaster på fundament.

Figur 4: Koncept av offshore-fundament för vattendjup större (modell utvecklad av Teknikgruppen inom EU-projektet DOWNVInD)

Under denna period pågick parallellt även aktiviteter i syfte att öka förståelsen för hur vindkraftverk påverkas av att placeras tillsammans i vindparker. Många nationella och internationella projekt genomfördes [3][4][5], och ett antal modeller beskrivande strömningen bakom ett vindkraftverk presenterades. Modellerna beskrev främst uppbromsningen av vinden (vaken) för olika avstånd nedströms, samt rotorns påverkan på den loakala turbulensen. I de flesta fall var dessa modeller baserade på vindmätningar från master placerade inne i vindparker, och för att kunna identifiera väldefinerade vakar var man tvungen att studera medelvärden över långa

tidsperioder. Detta delvis på grund av att vaken inte ligger stilla, utan rör sig med den lågfrekventa variationen i vinden, både vertikalt och i sidled. De fluktuationer man kunde observera så som överlagrade det beräknade medelvärdet, betraktades som turbulens. Resultat av studier där simulerade laster och effektvariationer kunde jämföras med experimentella data från vindkraftverk i vakar, uppvisade varierande överenstämmelse. Detta berodde delvis på oförmågan att korrekt beskriva turbulensen i vindparken, men även på svårigheterna att formulera *stabila* empiriska modeller.



Figur 5: Principen för hur en vak bildas då vinden bromsas upp av rotorbladen, samt hur dess form jämnas ut under transporten nedströms.

Övertygade av behovet att öka förståelsen för vakströmning, så startade Risø i början av 2000-talet utvecklingen av *the Dynamic Wake Meandering model* (DWM)[6][7][8]. Den bärande idén bakom DWM-modellen var att vaken inte ligger stilla i samma position i åtskilliga minuter, utan istället följer de storskaliga rörelserna i atmosfärens ytskikt.

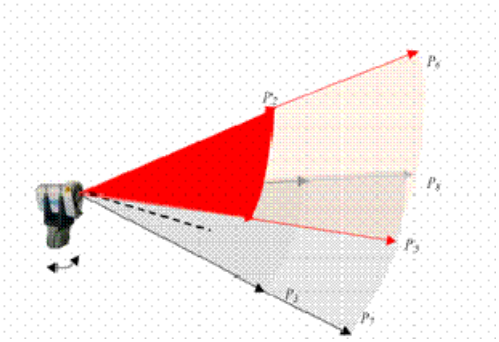
Ett vindkraftverk som som står nedströms ett annat kommer därför att utsättas för betydande belastningscykler orsakade av att vaken rör sig in i, och ut ur rotorplanet ett antal gånger under loppet av några minuter. Att betrakta dessa variationer som turbulens leder till en direkt felaktig tolkning av det man observerar när man studerar interaktionen mellan två vindkraftverk.

Ett steg på vägen att vidareutveckla DWM-modellen att beskriva strömningen i en vindpark, tas inom EU-projektet TOPFARM. Projektet startade i december 2007 och pågår under tre år. TOPFARM leds av Risø DTU, och genomförs i sam-arbete med Danmarks Tekniska Universitet (DTUMek), Tekniska universitetet i Madrid (UPM), Vestas, Dong Energy, Germanischer Lloyd, Garrad Hassan, samt Cambridge Environmental Research Consultants (CERC). Från Sverige deltar Teknikgruppen AB med stöd från Vindforsk II. En översikt av projektets organisation ges i Appendix A.

2 Ny experimentell teknik

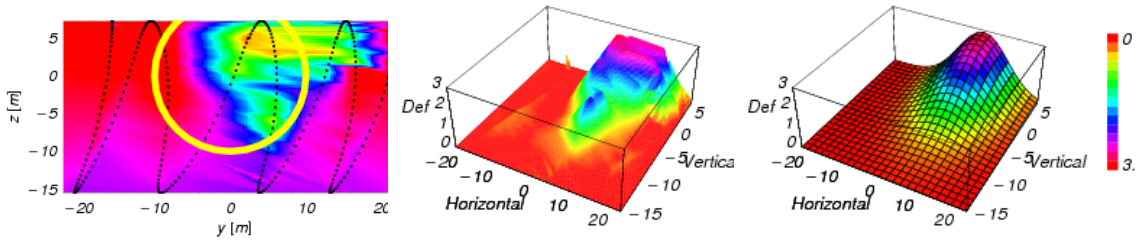
Under det senaste decenniet så har den sk. LIDAR-tekniken (**Li**ght **D**etection **a**nd **R**anging) börjat användas för allt fler tillämpningar inom vindkrafts-området. Främst har studier genomförts där man jämfört välbeprovade tekniker för vindmätning i master, med nya system baserade på markbaserad LIDAR [9]. Resultaten har uppvisat mycket god överensstämmelse, något som uppmuntrat till att vidareutveckla tekniken för andra användning-områden.

På RisøDTU har man arbetat med att ta fram ett nytt LIDAR-baserat instrument för att i detalj kunna mäta lokala vindhastigheter med hög rumslig upplösning. Genom att svepa med LIDAR-instrumentets laser i vaken bakom ett vindkraftverk, så kan man med tillräckligt hög upplösning fånga en ögonblicksbild av strömningen genom ett valt tvärsnitt, för att sedan med begränsad filtrering beräkna vakens momentana position.

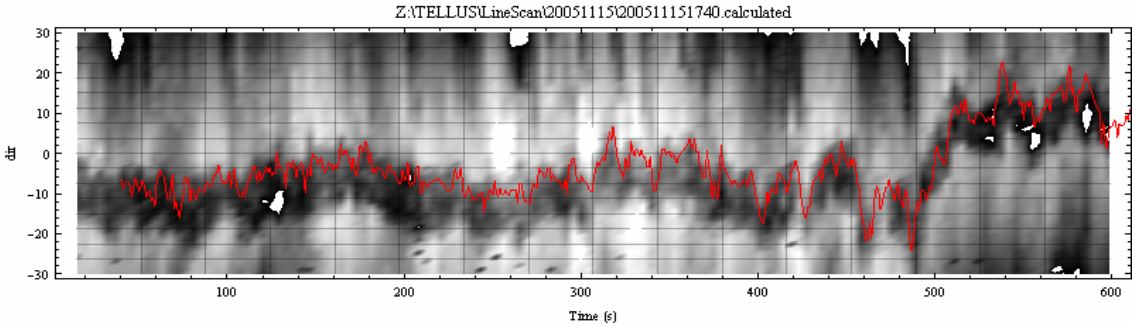


Figur 6: En prototyp av Risø's LIDAR-instrument, monterat på maskinhuset till den gamla forskningsturbinen Tellus.

Den svepande rörelsen åstadkoms dels med ett oscilerande prisma som avlänkar laserstrålen framför instrumentet, och dels med en motoriserad arm som adderar en vridande rörelse. De reflektioner som uppfattas av instrumentet, tolkas sedan med avancerad mjukvara till lokala strömnings-hastigheter. Genom anpassning av lämpliga matematiska funktioner så kan positionen för ett momentant vakcentrum beräknas (se Figur 7). Genom relativt enkla antaganden om kontinuitet och massflöden så kan den bestämda positionen för vaken sedan jämföras med en filtrerad mätsignal från en närbelägen vindriktningsgivare (se Figur 8).



Figur 7: Anpassning av en 2-dimensionell matematisk funktion för att bestämma positionen för ett momentant vakcentrum.



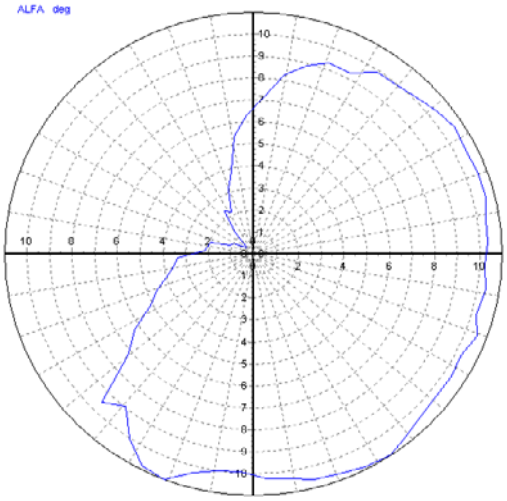
Figur 8: Filtrerad vindriktningssignal (röd) ovanpå registrerade lidar-ekon. Mätningar från forskningsturbinen Tellus.

Resultat från inledande mätkampanjer med den gamla forskningsturbinen Tellus indikerar en mycket god potential för den nya mätmetoden [10]. De första jämförelserna med tämligen enkla modeller för vakens transport i det omgivande lufthavet, måste betecknas som ett genombrott för möjligheterna att utveckla en praktiskt användbar dynamisk modell för strömningen i en vindpark.

En annan teknik som också vidareutvecklats de senaste åren är mätning av strömningen med sk. pitot-rör. Pitot-rör är samlingsnamnet på en typ av instrument med vilka man noggrant kan registrera trycket i ett antal små hål på en halvsfärisk spets. Genom att bilda ett antal tryckdifferenser mellan hålen så kan man, efter kallibrering i vindtunnel, beräkna hastighet och strömningsriktning i ett luftflöde kring instrumentet. Genom att placera ett pitot-rör långt ut på bladet till ett vindkraftverk så kan man mäta både anblåsningshastighet och lokal anfallsvinkel mot bladets framkant (se Figur 9). Detta har tidigare varit till stor hjälp inom forskningen kring vingprofiler och vindturbinaerodynamik.

Efter att ha samlat på sig värdefulla erfarenheter av att använda denna teknik i fält, så har man på RisøDTU även börjat studera möjligheten att mha pitot-rör använda vindkraftverk som vindmätare [11]. Istället för att betrakta

strömningen relativt bladet så använder man information om azimutal-vinkel och maskinhusriktning för att beräkna vindhastigheten i punkter på den cirkel som pitot-röret genomlöper. Särskilt intressant blir denna teknik då man önskar mäta i vaken bakom ett annat vindkraftverk, eftersom man då har möjlighet att identifiera vakens momentana position. Man kan då studera variationen i lokal vindhastighet över varvet, men även använda statistiska bearbetningar av den högfrekventa turbulensen i vinden eftersom tryck-variationerna kan registreras med mycket kort tidssteg. Man använder då kunskapen att den turbulenta energin ökar i kanten på vaken där gradienterna är som störst.



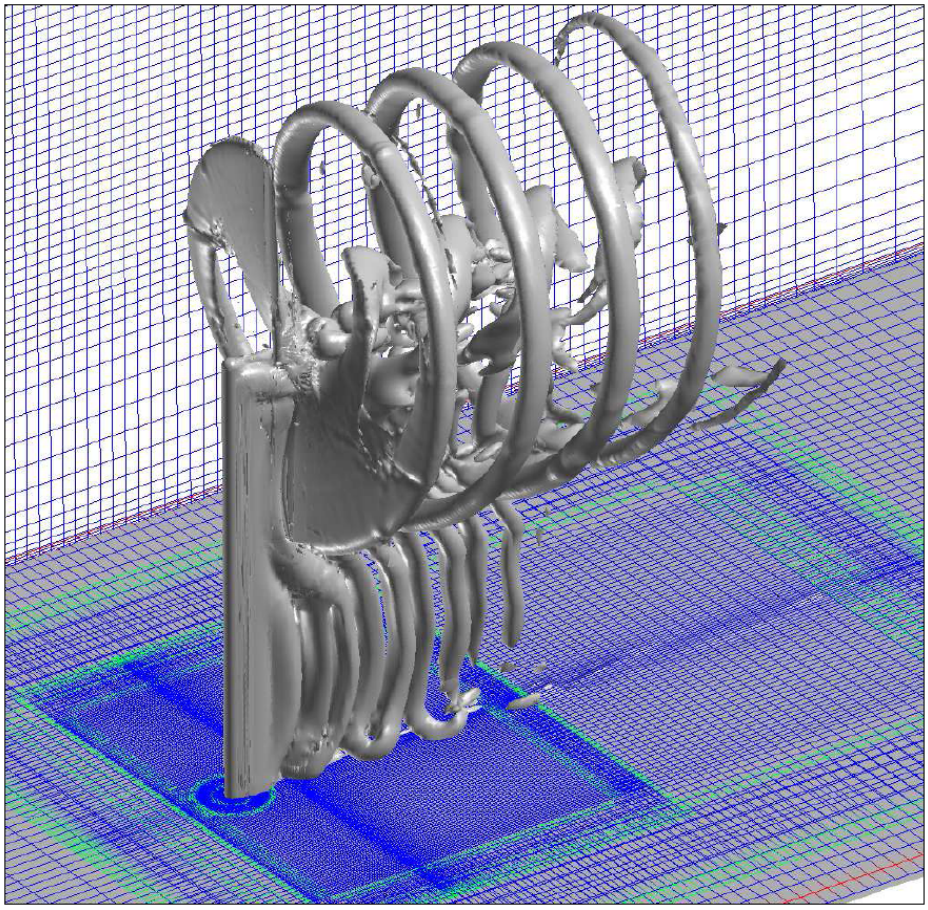
Figur 9 : Pitot-rör monterat nära bladspetsen på en 2 MW NEG-Micon utanför Tjæreborg, samt exempel på utvärderad lokal anfallsvinkel som funktion av rotor-vinkel då vindkraftverket till hälften står i vaken bakom ett annat.

Inom ramen för TOPFARM så genomförs i Tjæreborg under 2009 ytterligare experiment med de typer av instrument som beskrivits ovan. I maskinhuset på en NM80 (2MW) så har en vidareutvecklad version av Risø's svepande LIDAR monterats. Uppgraderingen innebär huvudsaklingen att mekanikens prestanda har ökat, samt att ny mjukvara möjliggör en högre samplings-frekvens i bearbetningen av registrerade ekon. Dessa förbättringar medför att strömningen i vaken bakom rotorn kan registreras med betydligt högre upplösning än tidigare.

Vidare har en annan NM80 placerad 4.7 rotordiametrar mot sydost, utrustats med pitot-rör, så att de båda mätsystemen kan kopplas till samma mät-system. Denna typ av kombinerade mätkampanjer saknar motsvarighet bland tidigare genomförda experiment i fält, och förväntas bidra till väsentligt bättre förståelse för hur vindkraftverk i en vindpark påverkar varandra.

3 Framsteg inom numerisk strömningsmekanik

Utvecklingen av beräkningsmetoder inom numerisk strömningsmekanik (*Computational Fluid Dynamics - CFD)* med tillämpning inom vindturbinteknik började på allvar ta fart i inledningen av 1990-talet. Till en början kunde endast mycket förenklade problem studeras pga begränsningar i tillgången på datorkapacitet, men sedan dess har det skett en dramatisk utveckling av såväl beräkningsalgoritmer som datorsystem. Idag kan man skörda frukterna av denna utveckling när man noggrannt modellerar strömningen utmed ett enskilt blad, eller med något enklare beskrivning av varje rotor studerar interaktionen mellan tiotals vindkraftverk i en vindpark. En fullständig beskrivning av denna utveckling, samt en komplett behandling av dagens olika forskningsfronter inom området, ges i en färsk doktorsavhandling vid KTH [12]. Här kommer därför endast CFD-aktiviteter med direkt anknytning till projektet TOPFARM att beskrivas.

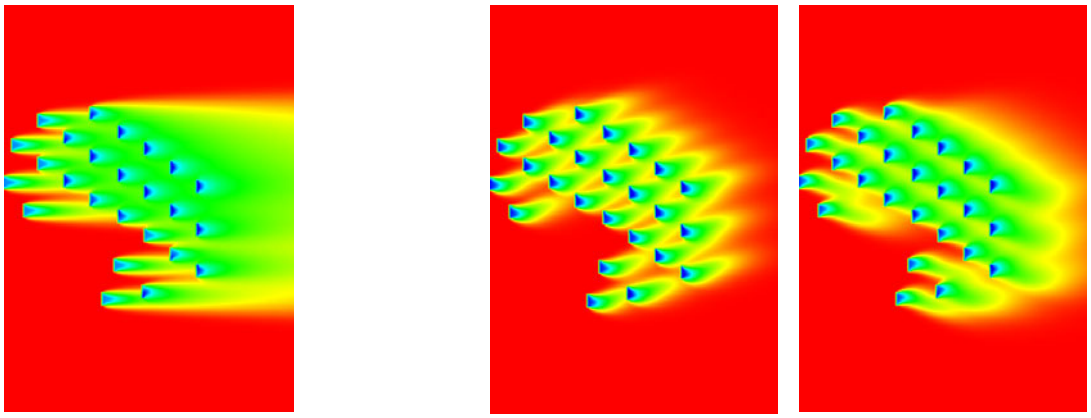


Figur 10: ISO-ytor av virvelstyrka för ett fall där bladen modellerats med *Actuator-Line*-teknik.

Ett av syftena med de stora satsningar på CFD som görs inom TOPFARM (se Appendix A) är givetvis att på bred front försöka bidra till utvecklingen av numeriska metoder för olika analyser av strömininingsförhållanden inom en vindpark. Speciellt fokus kommer dock att ligga på kopplingen till snabbare ingenjörsmetoder som är praktiskt användbara för konkret vindparksdesign och/eller certifieringsaktiviteter.

Flera av de CFD-beräkningar som genomförs vid UPM, RisøDTU, och DTUMek tar idag veckor att exekvera på datorkluster med 100-200 processorer. De långa beräkningstiderna gör det opraktiskt att använda dessa metoder för tex. parameterstudier. Dessutom är det än så länge ej hanterbart att studera instationära förlopp till följd av tex. vindriktningsvariationer eller effekt-reglering. Dessa begränsningar gör det därför ganska svårt att med högupplösta CFD-beräkningar som grund försöka utveckla snabbare modeller användbara för kompletta vindparkssimuleringar.

UPM utvecklade under 1990-talet programmet UPMwake, som senare utvecklades vidare till UPMpark. Genom att med effektiva algoritmer och en för problemet lämplig turbulensmodell så kan förenklade strömnings-ekvationer för en hel vindpark lösas på några timmar upp till någon dag (1 processor). Inom TOPFARM arbetar UPM med en version av UPMpark som kan hantera instationärt inflöde i form av fluktuerande vindriktning (se Figur 11).

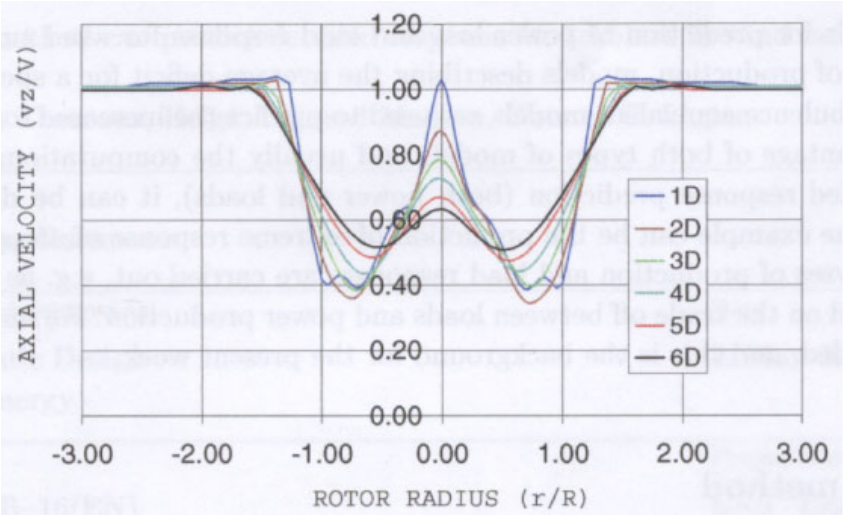


Figur 11: Inledande instationära beräkningar med UPMpark (parabolisk lösning med k-ε modell).

En ytterligare förenkling av strömningsekvationerna som beskriver en ensam stationär vak fås med en sk. TLNS-approximation (*Thin-Layer Navier-Stoke*). Denna innebär att man försummar trycktermer, samt antar att radiella gradienter är mycket större än axiella. Resultatet blir ett mycket kompakt uttryck för lokala hastigheter på formen:

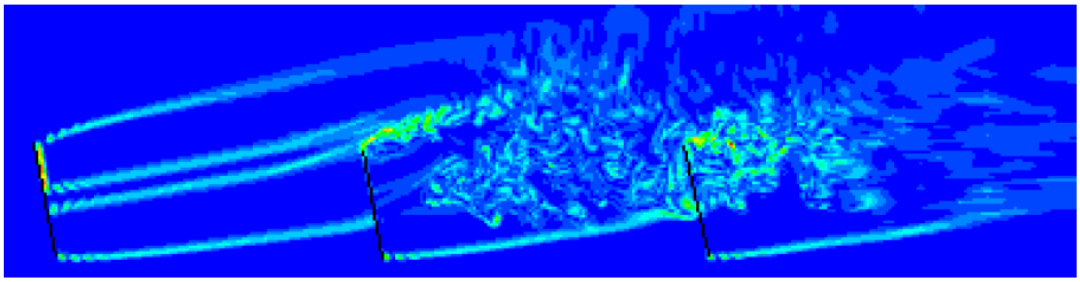
$$U(r,x)\frac{\partial U(r,x)}{\partial x}+V(r,x)\frac{\partial U(r,x)}{\partial r}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\overline{uv}\right)$$

Denna ekvation hanteras ganska enkelt med någon finit-differens metod, och ganska komplicerade formuleringar av högerledet är möjliga utan att lös-barheten påverkas nämnvärt. I TOPFARM arbetar Teknikgruppen tillsammans med Risø DTU och GarradHassan med att generalisera TLNS-lösningar så att de kan kopplas samman för att beskriva uppbromsningen bakom vindkraftverk placerade efter varandra.



Figur 12: Exempel på lösning av TLNS-modell för olika avstånd nedströms ett vindkraftverk.

Detta arbete baseras till stor del på resultat från beräkningar för 3-5 turbiner modellerade med mycket hög upplösning (se tex. Figur 13)

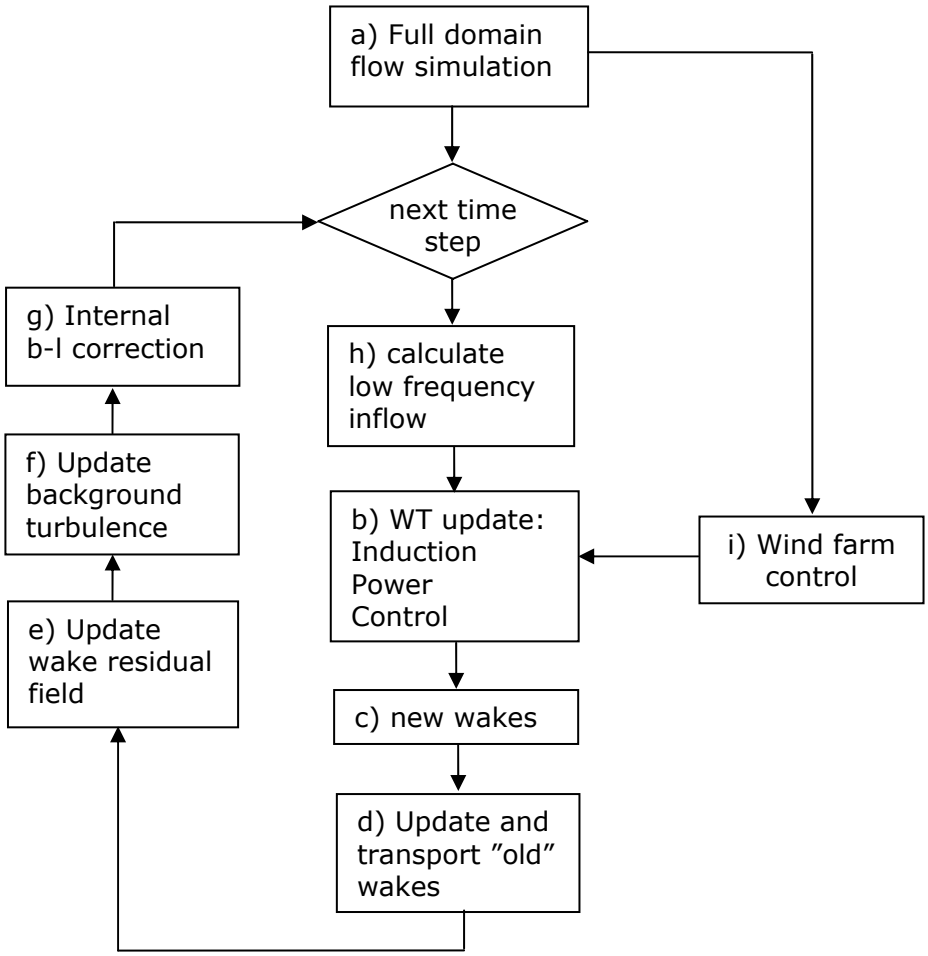


Figur 13: Exempel på mycket högupplöst CFD-modell lämplig för att verifiera metoder som bygger på sammanvägda TLNS-lösningar

Arbetet med att utveckla förenklade modeller innebär principiellt att man generaliserar resultat framtagna mha *Computational Fluid Dynamics* så att de kan beskrivas med *Statistical Fluid Mechanics* (SFM). SFM används i mycket stor utsträckning inom de meteorologiska diciplinerna, varför steget känns naturligt. Inom SFM beskrivs turbulensen i strömningen med vind-hastighetsspektra och korrelationsfuntioner, storheter som man framgångsrikt kan studera även i de tidigare beskrivna experimentella aktiviteterna.

4 Utveckling av en dynamisk vindparksmodell

I inledningen beskrevs bakgrunden till ett nytt sätt att betrakta vaken bakom ett vindkraftverk. Inom vissa grenar av strömningsmekaniken kallas det för *"passive tracer"*, något som följer med strömningen endast med mindre inverkan av massströghet eller visköst motstånd. Man kan då tänka sig att en modell av ett vindturbin *"släpper"* vakar med ett visst intervall, och att dessa successivt bryts ner samtidigt som de transporteras nedströms. Om man utvecklar ett system som samtidigt administrerar ett antal enkla aeroelastiska lösningar (reglering, effekt och uppbromsning), samt de vakar som dessa *"släppt"* sedan t=0, så har man grunden till en procedur som kan simulera den instationära strömningen i en vindpark. En schematisk bild som i grova drag beskriver detta förfarande visas i Figur 14.



Figur 14: Schematisk beskrivning av en procedur med vilken man kan simulera den instationära strömningen i en vindpark.

Här nedan beskrivs översiktligt de olika byggstenarna i en enkel vindparkssimulering enligt proceduren beskriven i Figur 14.

a) För att simulera strömningen i en vindpark med den här beskrivna metoden måste man först kan modellera den ostörda vinden, dvs. fallet att vindparken ännu ej finns på plats (alternativt är tagen ur drift). Detta åstadkoms lämpligtvis med någon av metoderna [13] eller [14].

b) För att kunna beräkna hur vindkraftverken i en vindpark påverkar den globala strömningen, och därmed även interaktionen mellan verken, så behöver man i varje ögonblick kunna bestämma den momentana uppbromsningen. Eftersom uppbromsningen i hög grad beror av varvtal och bladvinkel så måste effektregleringen av varje verk inkluderas på ett tillfredställande sätt. En beräkning av prestanda erhålls då som ett naturligt mellanresultat, vilket medför att uppskattad elproduktion för en studerad park alltid kan lagras som utdata från en parkströmningsanalys. Denna uppgift löses lämpligen med kraftigt förenklad aeroelastisk model med endast ett fåtal frihetsgrader.

c) d) Gemensamt för alla vakmodeller som behandlas i denna rapport är att de utgår från någon form av beskrivning av hur vinden påverkats av rotorn omedelbart bakom rotorplanet. Genom att göra olika jämförelser med CFD-beräkningar så har man på Risø DTU funnit att en god approximation för tillståndet 1-2 diametrar bakom rotorn kan uppnås med traditionell bladelement-momentumteori (BEM) följt av en tryckexpansion. Härifrån beskrivs vakens förvandling nedströms med en *Thin-Layer Navier-Stokes* modell [8]. Vakens rörelser i den omgivande strömningen bestäms sedan av modellen a), med korrektioner för tröghetseffekter, viskositet, samt reflektion mot marken (vattnet).

e) f) Av praktiska skäl så vill man inte gärna låta de *"släppta"* vakarna finnas kvar då de transporterats mer än 10-15 turbindiametrar, och därmed nästan helt brutits ner. Om man önskar ta bort dem ur modellen så måste de på något sätt ersättas någon liten vindreduktion samt en ökning av bakgrundsturbulensen. Om detta inte görs så kommer modellen sannolikt att överskatta energiproduktionen i stora vindparker.

g) En *djup* vindpark (>3 rader) har liknande påverkan på vinden som en skogskant (kraftig förändring av ytfriktionen). Detta innebär att ett sk internt gränsskikt byggs upp ovanför parken/skogen som reducerar energin i vinden alltmer ju längre in i parken man kommer. Inom TOPFARM så kommer befintliga modeller för denna reduktion att utvärderas, och de som bedöms lämpliga för uppgiften kommer att implementeras.

h) I varje tidssteg måste man sedan dra i från de olika reduktionerna d), e), och g), innan man updaterar den aeroelastiska beräkningen av effekt och uppbromsning.

5 Laster och deformationer

Som berördes i inledningen så har man de senaste 20 åren sett en stark utveckling av beräkningsprogram för tidssimulering av vindkraftverk som ett system. Simulering som analysmetod har blivit mycket populär därför att det i tidsplanet är relativt enkelt att bygga samman olika typer av del-system genom att koppla deras respektive differentialekvationer. I ett vindkraftverk måste man således kunna modellera, a) elasticitet i torn, rotor och maskinhus, b) mekaniska egenskaper i girmotorer, växellåda, och bladvridsystem, c) aerodynamiska krafter, samt d) reglering av bladvinkel, generatormoment, och girvinkel. De beräkningsprogram för aeroelstiska simuleringar som idag används aktivt hos tillverkare, konsulter och olika forskargrupper, kan grovt indelas i tre kategorier:

I. Direkt lösning av partiella differentialekvationer (Phatas)
II. Linjära/ickelinjära Finita Element , Multi-body (BHawC, HAWC-2 , ADAMS-WT, Gast)
III. Deformationsfunktioner och stela kroppar (Flex5, BLADED, FAST, DHAT, Vidyn)

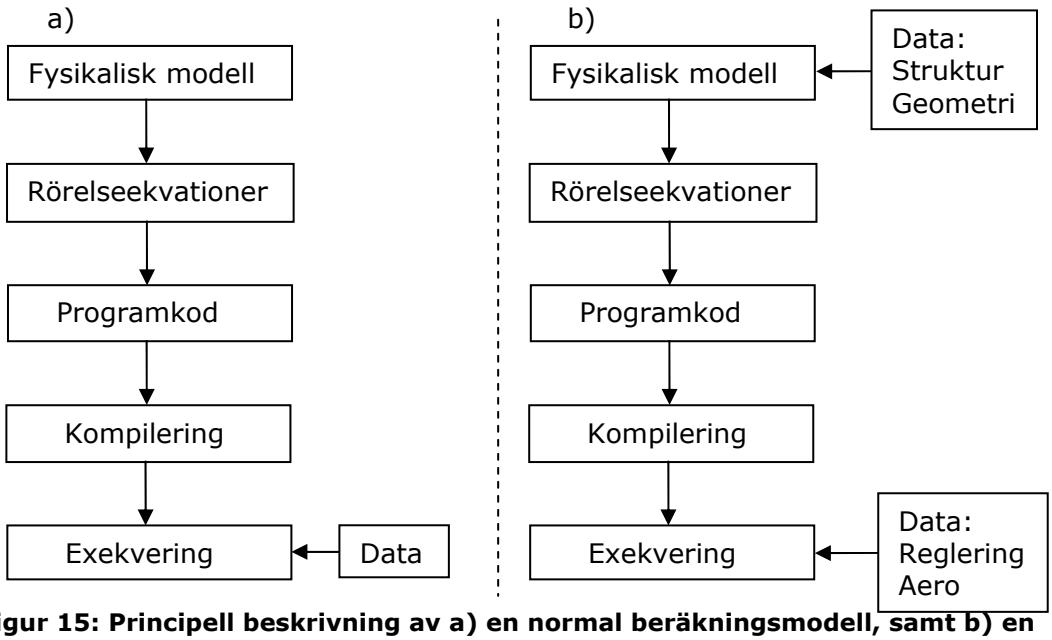
Kravet på allt kortare beräkningstider för tex. optimeringsstudier, eller certifieringsberäkningar, gör det attraktivt att titta närmare på kategori III, eftersom de övriga två inte har lika hög potential för effektiva approximationer.

Inom kategori III. utgår man ifrån någon vedertagen energiprincip (vanligen *Lagrange*, *Hamilton,* eller *Kane*) och har mycket stor nytta av programvara för symboliska beräkningar (tex Mathematica® Maple® eller Maxima) för att formulera systemets rörelseekvationer. Före utveklingen av dessa hjälpmedel så var man tvungen att utföra alla härledningar med papper och penna, samt skriva all programkod för hand. Idag kan man med någon av ovan nämnda programvaror inte bara utföra uppgiften snabbt och exakt, utan även effektivisera de erhållna rörelseekvationerna, samt automatiskt generera programkod i tex Fortran77, Fortran90, eller Ansi-C.

Teknikgruppen har sedan länge utnyttjat dessa möjligheter genom att använda Mathematica® i utvecklingen av det egna aeroelastiska simuleringsprogrammet Vidyn [1]. Med den kraftigt ökade beräkningstyngd det innebär att övergå från att studera ett vindkraftverk, till att simulera hela vindparker, har dock ytterligare effektivisering av aeroelstiska beräkningar fått hög prioritet. Inom TOPFARM så har Teknikruppen därför återupptagit arbetet med att utveckla metodiken för automatisk generering av programkod för de mest tidskrävande beräkningsmomenten.

Ett sätt att angripa problemet är att utföra så många beräkningsoperationer som möjligt före själva kompileringen av programmet. Detta kan ske genom att man inkluderar numeriska data för struktur och geometri redan under härledningen av rörelseekvationerna (se

Figur 15). Detta kan liknas vid sk *JIT-kompilering (Just In Time)* som är en vanligt metod att öka hastigheten för program skrivna i interpreterande programspråk (scriptspråk).



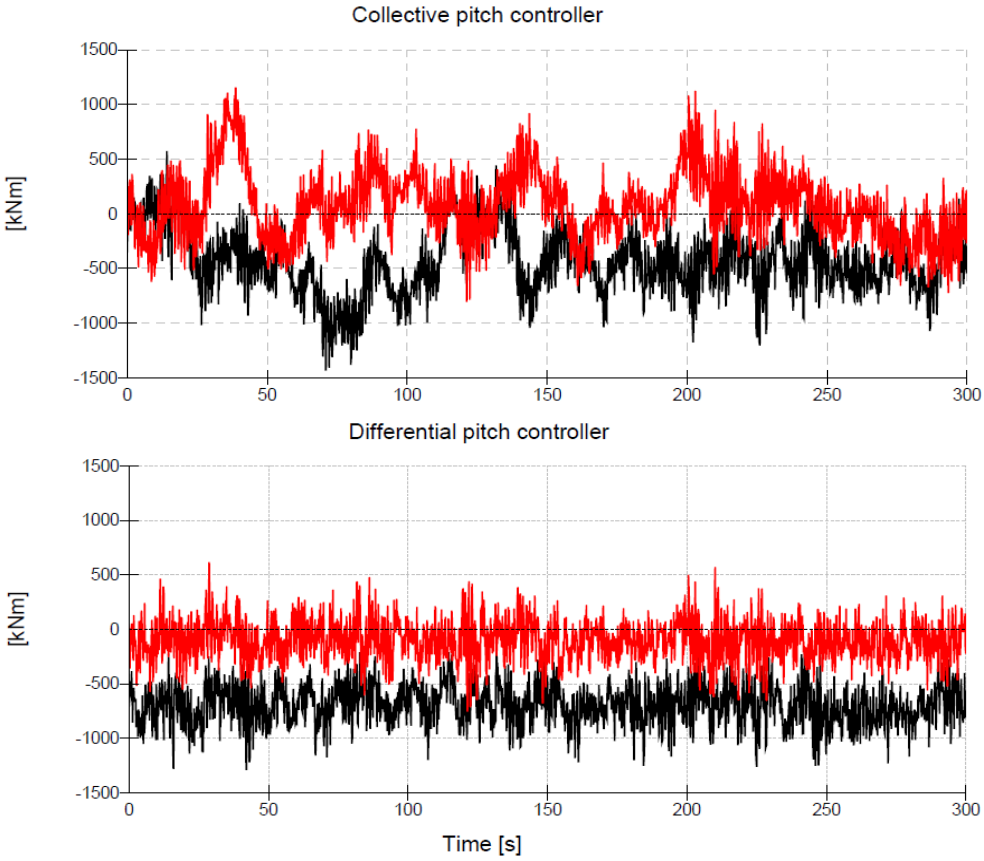
Figur 15: Principell beskrivning av a) en normal beräkningsmodell, samt b) en modell där nummeriska data introducerats redan i härledningen av rörelse-ekvationerna. Här måste varje ändring av data beskrivande struktur eller geometri följas av en kompilering.

Förutom att simulering av hela vindparker innebär en naturlig ökning av beräkningstyngden med antalet verk, så medför en önskan att använda verktygen även för optimeringsstudier att nya avvägningar måste göras (se kapitel 7). Vissa optimeringsalgoritmer kan utnyttja resultat med olika nivå av noggranhet för att söka i parameterrymden med varierande upplösning. Detta medför att även mycket snabba simuleringar med betydligt lägre krav på noggrannhet plötsligt får ett stort värde. Snabbhet på bekostnad av noggrannhet kan nås genom att tex linjärisera rörelseekvationer, minska antalet strukturella och aerodynamiska element, eller administrera olika tidssteg för tex struktur och reglering.

6 Reglering

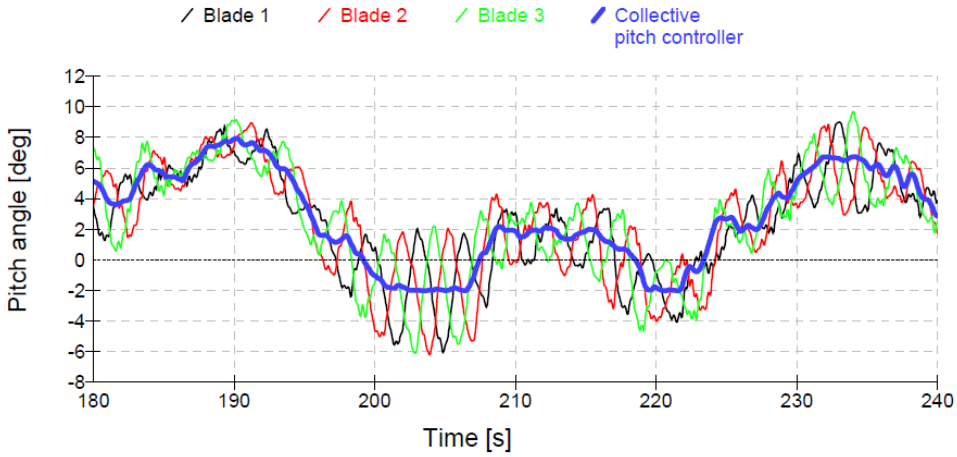
Det viktigaste reglersystemet i ett vindkraftverk styr moment och varvtal i drivlinan, vanligen genom att med pitch-servon vrida bladen, samt med kraftelektronik påverka generatormomentet på kort tidsskala. Reglersystemet skall arbeta för att uppnå höga prestanda, tillfredställande elkvalitet, samt låga utmattningslaster i vitala komponenter och tvärsnitt.

Ett vindkraftverk som står centralt i en vindpark utsätts för högre nivåer av turbulens samt högre frekvens av assymetriska vindlaster, vilket leder speciella krav på kraftverkets reglersystem. GarradHassan mfl har i tidigare studier visat att man med individuell reglering av varje enskilt blad, effektivt kan minska de utmattningslaster som uppkommer av en assymmetrisk vindbelastning över rotorn [15]. Principen kallas *IPC* (individual pitch control) och kan arbeta med information från olika typer av sensorer som kan indikera en assymetrisk vindlast, tex. bladrotsmoment, girmoment eller information från pitot-rör.



Figur 16: Böjoment i torntopen av ett vindkraftverk, utan IPC (över), resp med IPC (under) (från[15]).

Priset för denna lastreduktion är att de servosystem som vrider bladen får arbeta med högre intensitet, men däremot inte under högre belastning. Antalet utmattningscykler som olika delar av pitch-systemet utsätts för, förväntas dock öka med en faktor 2-3, till följd av tex ett ökat antal kugg-ingrepp.



Figur 17: Exempel på ökad arbetsintensitet för ett pitch-servo under inverkan av IPC (från [15])

Förutom reglersystem för enskilda vindkraftverk, så finns även möjligheter att reglera hela vindfarmer (*Wind Farm Control*). Detta kan göras på olika sätt beroende på vad man vill åstadkomma. De flesta tillämpningar av park-styrning som beskrivs i litteraturen berör antingen a) frekvensstyrning av kraftelektroniska komponeneter, eller b) anpassning till förhållanden i elnätet (tex. pga. för lågt elpris eller kapacitetsbrist i ledningssytemet).

Inom TOPFARM så har man valt att fokusera på en tillämpning av vindparks-styrning som brukar kallas *Wind Sector Management.* Med *Wind Sector Management* menas en strävan att balansera effektutag och utmattnings-laster mellan olika vindkraftverk, på ett sätt som är gynnsamt för hela parkens totalekonomi. Den enklaste tillämpningen av *Wind Sector Management* användes i Californien redan i slutet av 1980-talet. Här byggdes vindparker i dalgångar där vindkraftverk placerades tätt i rader tvärs dalens utbredning. I de sällsynta fall då det blåste längs med raderna så valde man helt enkelt att parkera vart annat verk för att undvika höga utmattningslaster. Härigenom sparade man livslängd till priset av obetydligt reducerad energi-produktion. I det generella fallet innebär *Wind Sector Management* att man med ett övergripande styrsystem låter enskilda verk ”spilla” vind, dvs. bladen vrids mera än vad som är optimalt ur energiproduktionssynpunkt. Följden blir att utmattningslasterna överlag minskar i såväl de verk som spiller, som de som står i vaken nedströms. Detta måste dock göras på ett sätt så att man inte förlorar alltför mycket i energiproduktion.

7 Optimering

Ett vindkraftverk utgör i sin natur ett system av byggklossar med ursprung i olika dicipliner, varför systemanalyser som inkluderar vindkraftverk eller vindparker ofta blir komplexa och svåröverskådliga. För att skapa en förståelse för hur olika systemvariabler påverkar slutresultatet så måste problemet studeras med något systematiskt angreppssätt. Om man inte kan formulera sitt problem analytiskt så är man i praktiken hänvisad till någon av metoderna parametersudier, eller numerisk optimering. Vid parameterstudier varierar man de ingående designvariablerna i valda intervall, för att sedan visualisera intressanta områden grafiskt på lämpligt sätt. Om man måste beakta fler än 3 variabler samtidigt, samt om man måste ta hänsyn till ett eller flera begränsningsvillkor, så blir uppgiften ofta för svår att greppa, och resultatet troligen oöverskådligt. För problem med många designvariabler samt ett antal begränsningvilkor, så är därför numeriska optimeringsmetoder att föredra.

Gemensamt för alla optimeringproblem är att man utgår från en målfunktion vars värde man vill minimera eller maximera. Målfunktionen beror av ett antal fria variabler som önskar finna optimala värden för, och kan principellt skrivas

$$G(\mathbf{x}) = K + f_1(\mathbf{x}) + f_2(\mathbf{x}) + ... + f_N(\mathbf{x})$$

där **x** är en vektor av valda designvariabler, och där varje term f_j (**x**) representerar bidrag av olika typ. Oavsett om man med sitt optimerings-problem studerar ett enskilt vindkrafteverk eller en hel vindpark, så är det ändå till sist endast *avkastning på investerat kapital* som räknas när slut-resultatet värderas. Den enhet som målfunktionen då föjaktligen måste ha är euro, dollar eller kronor. Vidare inser man att *K* motsvarar kostnader som inte påverkas av designvariablerna **x**, samt att f_1(**x**) måste beskriva den enda direkta intäkten, dvs. den förväntade vinsten från försäljningen av producerad elenergi. Övriga termer kan vara av olika slag, men fletalet kommer sannolikt att bero av belastningen i strukturen eller kapaciteten hos viktiga komponeneter.

Förutsättningarna att lyckas med en optimeringsstudie beror i mycket stor utsträckning på hur väl man kan beskriva *vinsten* eller *kostnaden* som uppstår då man förändrar en designvariabel. Olika kostnadsmodeller speciellt framtagna för vindkraftetableringar har tidigare föreslagits, men då man ökar kraven på upplösning så inser man att varje projekt måste utveckla en unik modell, baserad på de speciella föutsättningar och begränsningar som råder. Ett av delprojekten inom TOPFARM (se appendix A) syftar till att identifiera och anpassa befintliga kostnadsmodeller så att de blir användbara för vindparksoptimering. Den största svårigheten ligger här i att lyckas kvantifiera vinsten av att minska utmattningslaster i viktiga komponenter och tvärsnitt, till följd av minskat behov av underhåll samt lägre risk för haveri.

Det sedan länge pågått en intensiv utveckling av optimeringsalgoritmer för olika ändamål, och de senaste årens trender mot öppen mjukvara har gjort ett flertal programpaket för generella optimeringproblem fritt till gängliga under *GPL* (General Public Licence). Om man nu har utvecklat verktyg för att utföra dynamiska simuleringar av hela vindparker, samt har fri tillgång till kraftfulla optimeringspaket, varför behövs då särkilda forskningsinsatser under rubriken *vindparksoptimering*? Frågan besvaras bäst med följande exempel:

En stor vindpark består av 100 vindkraftverk. För att med god nogrannhet beskriva alla olika situationer som varje verk kommer att uppleva under normala produktionsförhållanden, så vill man använda exempelvis vindriktningssektorer om ca 5 grader (dvs 72 st), 20 vindhastigheter (5-25 m/s), samt kanske 10 kombinationer av atmosfärsika förhållande och/eller vågtillstånd. För var och en av ovanstående kombinationer genomförs minst en aeroelastisk simulering mostvarande 10 minuter realtid. Med de mest använda simuleringsprogrammen, Flex5 [ref] eller Bladed [ref], tar en sådan beräkning ca 5 minuter på en ordinär kontorsdator. Om man vill studera ca 10 designvariabler så behöver en robust optimeringsalgoitm kanske i storleksordningen 500 iterationer för att konvergera. Den totala beräkningstiden för en sådan studie skulle då bli:

$$100*72*20*10*5*500 \sim 10^9 \text{ minuter}$$

Slutsatsen blir således att utan några speciella ansatser att effektivisera optimeringsproblemet ovan, så skulle beräkningstiden uppgå till fera tusen år.

Resultatet av exemplet ovan kan vid en första anblick verka ganska nedslående när det gäller möjligheterna att överhuvudtaget komma fram till något användbart. Inom TOPFARM har därför ett speciellt delprojekt till uppgift att söka framkomliga vägar att genomföra meningsfulla optimeringsstudier av vindparker. De huvuspår som identifierats kan kort sammanfattas:

A. Minimera sökintervallen för ingående designvariabler med hjälp av snabba approximativa uppskattningar.
B. Genomföra simuleringar för flera noggranhetsnivåer.
C. Effektivisera aeroelastiska beräkningar vid varje noggrannhetsnivå.
D. Kategorisera olika placeringar i parken.
E. Möjliggöra parallellisering (flera datorer eller processorer).

A) Ett enkelt sätt att begränsa problemet är exempelvis att först genomföra en optimeringsstudie där endast energiproduktionen ingår i målfunktionen. På så sätt kan man udvika intervall för vissa av designvariablerna som indikerar alltför låga prestanda.

B) Inom bilindustrin och flygindustrin används ofta sk *variable fidelity analysis* eller *multifidelity analysis*, för att studera komplexa problem med många parametrar. Detta innebär att man börjar analysen med en relativt grov

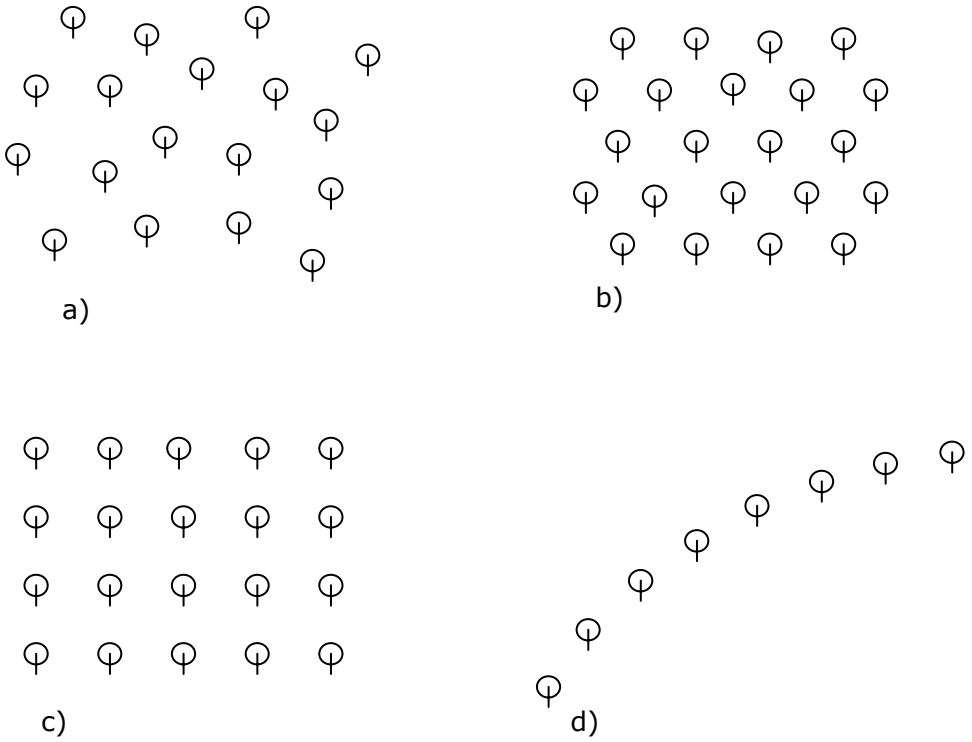
modell, som sedan gradvis förfinas på vägen mot en optimal design. Det senaste decenniet har speciella optimeringsmetoder utveklats som kan utnyttja resultat från olika noggrannhetsnivåer, och härigenom konvergera snabbare än traditionella algoritmer. I exemplet ovan skulle detta kunna betyda att problemet med en lägre noggrannhet indelas i 20 sektorer, 8 vindhastigheter, en karraktäristisk atmosfärisk situation (väljs genom separat studie). Vidare nöjer man sig med att simulera 3 minuter istället för 10. En analys med denna upplösning innebär en reducering av beräkningstiden med 300 gånger.

C) Se avsnitt 5 ”Laster och deformationer”.

D) För stora vindparker kan man tänka sig att kategorisera vindkraftverk som förväntas uppleva liknande vindförhållanden (tex. 1:a rad, 2:a rad, centralt). För varje kombination av sektor, vindhastighet osv., genomför man lastberäkningar endast för ett begränsat antal verk inom samma kategori, och låter resultatet gälla även för övriga. Lämpligtvis väljes dessa ut slumpmässigt för varje simulering.

E) Om man vill minska tidsåtgången för optimeringsberäkningar, så kan man antingen använda datorer med flera processorer, eller sprida analyserna på flera datorer i ett nätverk. De optimeringsalgoritmer som endast kan hantera ett resultat åt gången (dvs en evaluering av målfunktionen) kräver då att analysverktygen byggs upp av särskild programkod som kan fördela operationerna på flera processorer (eller datorer i ett cluster). Om man önskar undvika allt för avancerad programmering, så finns det även optimeringsprogram som kan hantera flera resultat samtidigt, men som istället kräver att en av datorerna administrerar kommunikationen med optimeringsalgoritmen genom någon typ av kö-system (i allmänhet betydligt enklare än paralell programmering).

En speciell typ av optimering som kan vara av intresse vid studier av vindparker är sk *topologioptimering*. Här låter man optimeringsalgoritmen helt föreslå verkens placering, utan att styras av någon förutbestämd formel. Resultatet av en sådan studie skulle förmodligen inte kunna användas för att bestämma någon verklig vinparksgeometri, eftersom acceptansen för ostrukturerad layout av vindparker troligen är ganska låg. Däremot kan resultat från *topologioptimering* vara till hjälp när man skall välja en lämplig parametrisering av en strukturerad geometri.



Figur 18: Exempel på olika typer av geometrier för layout av vindparker (a) ostrukturerad topologi, b)-d) parametrisk topologi).

8 Slutsatser - Visioner

Vindkrafttekniken har under det senaste decenniet på allvar tagit steget från ett experimentstadium till mogen teknik som saluförs på en allt tuffare marknad. Forskningen inom området har pågått under lång tid och har i Europa tilldelats betydande resurser. För att nu kunna skörda frukterna av dessa forskningsinsatser krävs därför projekt som lyckas bygga broar mellan erfarna forskargrupper och ambitiösa tillverkare/projektutvecklare. Vägen går via forskningsprojekt där forskare, tillverkare, och projektutvecklare gemensamt formulerar och bedriver FoU-aktiviteter på ett sätt som säkerställer att resultaten blir direkt användbara i verkliga vindparksprojekt.

Dessa visioner har varit vägledande då EU-projektet TOPFARM formulerats och startats upp. De inledande erfarenheterna efter att en tredjedel av projektet genomförts, är att den intima kopplingen till tillverkare och klass-sällskap har bidragit till att lyfta fram frågan om resultatens konkreta använbarhet vid tex. projektutveckling och certifiering. Tillverkare brottas redan idag med stora krav på tidskrävande beräkningar för att ta fram olika underlag för klass-sällskap och komponentleverantörer, och ytterligare analyser av specifika vindparksapplikationer måste därför kunna utföras med rimliga insatser.

De nya koncept för dynamisk simulering av vindparker som förväntas bli resultatet av TOPFARM kommer förhoppningsvis att betyda ett lika stort steg för vindkraftstekniken som utvecklingen av aeroelastiska beräkningsprogram gjorde i början av 1990-talet.

Referenser

[1] Ganander H.,"The Use of a Code-generating System for the Derivation of the Equations for Wind Turbine Dynamics" , Wind Energy , vol 6 , No 4 , pp 333-345 ,2003

[2] Fragoulis A. m.fl., "Investigation of Design Aspects and Design Options for Wind Turbines Operating in Complex Terrain Environments COMTERID - Final Report" JOR3-CT95-003, 1998

[3] Adams B.M., "Dynamic loads in wind farms II", Joule Project JOU2-CT92-0094 Final Report, Garrad Hassan and Partners Ltd., England, 1996

[4] Barthelmie R. m.fl, "Efficient Development of Offshore Windfarms (ENDOW) – Final Report" , Risø-R-1407(EN) , Risø National Laboratory , Roskilde , 1999

[5] Poppen M., Dahlberg J. , "Fatigue loads on wind turbine blades in a wind farm" , FFA TN 1992-21 , Flygtekniska Försöksanstalten , 1992

[6] Larsen G. m.fl. "Wake Meandering: A Pragmatic Approach" , Wind Energy , vol 11 , No 4 , pp 377-395 ,2008

[7] Larsen G. m.fl. "Dynamic Wake Meandering Modeling" , Risø-R-1607(EN) , Risø National Laboratory , Roskilde , 2007

[8] Madsen H. m.fl "Wake deficit and turbulence simulated with two models compared with inflow measurements on a 2 MW turbine in wake conditions" , Scientific Proceedings , European Wind Energy Conference and Exhibition , Brussels , 2008

[9] Smith D. m.fl., "Wind lidar evaluation at the Danish wind test site in Høvsøre" , Wind Energy, vol. 9, Issue 1, pp.87-93

[10] Bingöl F., Mann J., and Larsen C.G. "Laser Measurements of Wake Dynamics" Scientific proceedings , European Wind Energy Conference and Exhibition , Milan , 2007

[11] Madsen H. A, Fisher A., "Wind shear and turbulence characteristics from inflow measurements on the rotating blade of a wind turbine rotor" , paper to be presented at European Wind Energy Conference and Exhibition 2009

[12] Ivanell S., "Numerical Computations of Wind Turbine Wakes", PhD thesis, ISBN 978-91-7415-216-6, ISRN KTH/MEK/TR--09/01--SE , Royal Institute of Technology , Stockholm , 2009

[13] Mann J., "The spatial structure of neutral atmospheric surface-layer turbulence" , J. Fluid Mech., 273, 141–168 , 1994

[14] Veers P. S., Three-dimensional wind simulation. Technical Report SAND88-0152, Sandia National Laboratories , USA , 1988

[15] Bossanyi E., "Developments in individual blade pitch control" , EWEA Special Topic Conference 'The Science of Making Torque from Wind', Delft, 486–497 ,2004

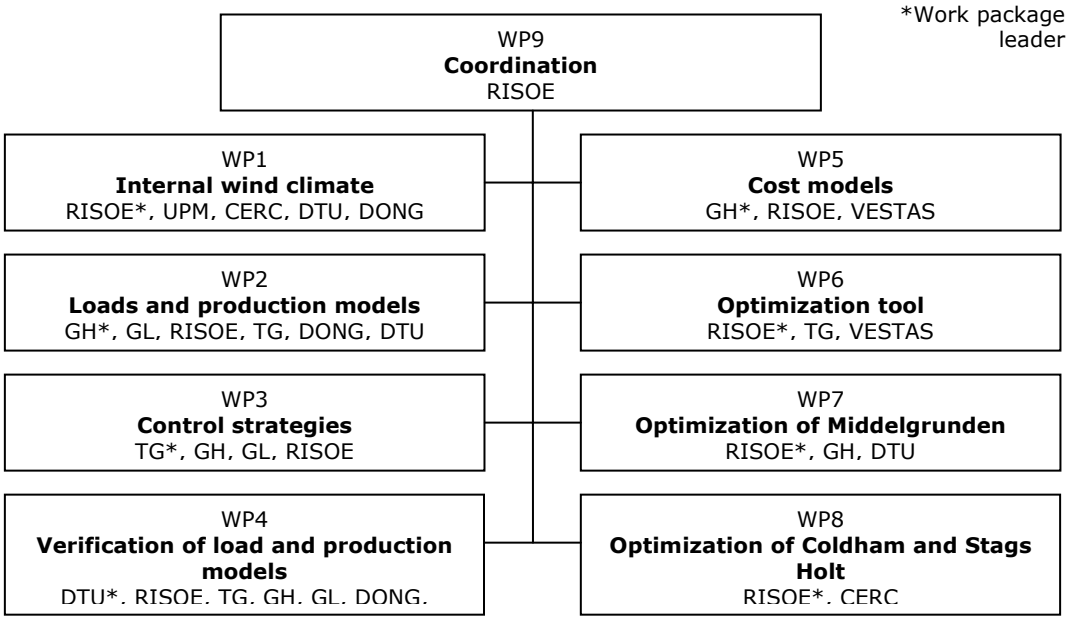
Appendix A: TOPFARM – fakta

Ansökan: 2002-12-15
Projektstart: 2007-12-01
Projektledning: Risø DTU
Kick-off: 2008-02-07
Projektslut: 2010-11-30
Budget: 3.28 milj € (1.7 milj € från FP6) ⇔ 272 manmånader

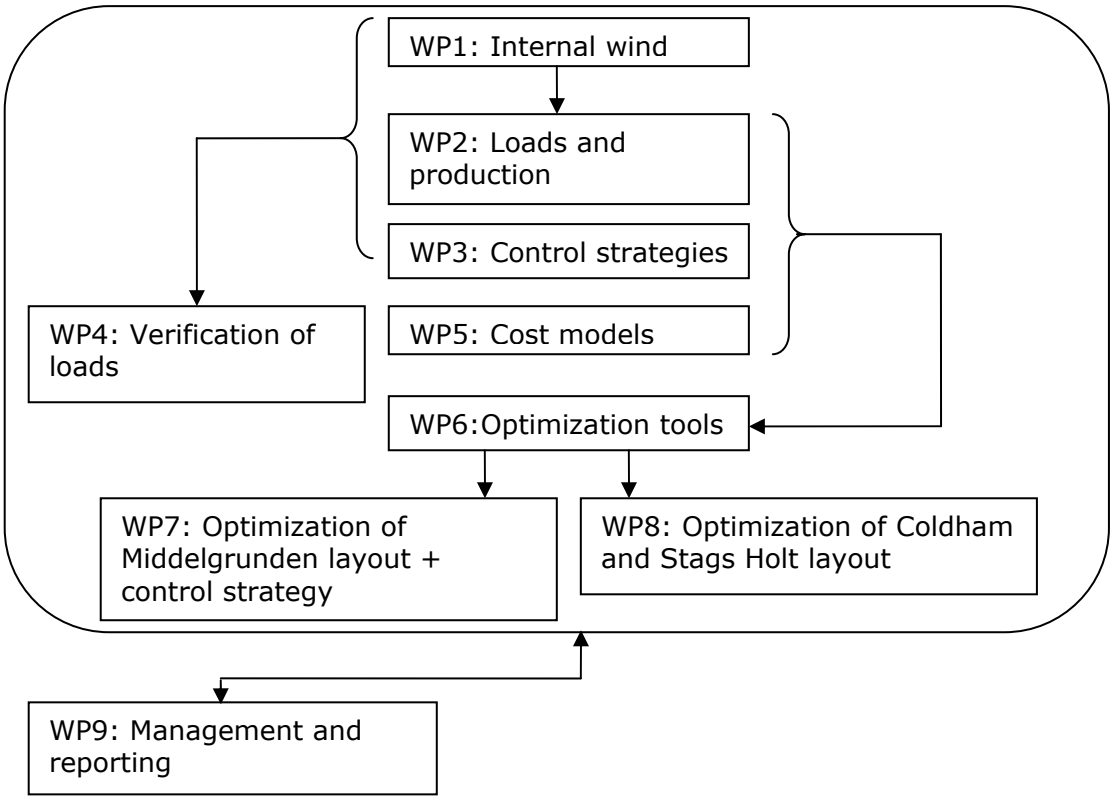
Teknikgruppens deltagande (20 manmånader.)
~ 40% FP6 , ~40% VindForsk II, 20 % Egen

Participant name	Participant short name	Country	Type
Risoe National laboratory	RISOE DTU	DK	Research institute
CERC ltd.	CERC	UK	Consultant
The Technical University of Denmark	DTU Mek	DK	University
Dong Energy A/S	DONG	DK	Utility/Developer
Vestas Wind Systems A/S	VESTAS	DK	Manufacturer
Garrad Hassan and Partners ltd.	GH	UK	Consultant
Germanischer Lloyd	GL	DE	Certification society
Teknikgruppen AB	TG	SW	Consultant
Universidad Politécnica de Madrid	UPM	ES	University

Figur 19: TOPFARM - Översikt över projektdeltagare



Figur 20: TOPFARM – Delaktiviteter



Figur 21: TOPFARM - Arbetsplan