

Energimyndighetens titel på projektet – svenska NEWA – Ny Europeisk Vindatlas	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska NEWA – New European Wind Atlas	
Universitet/högskola/företag Uppsala Universitet	Avdelning/institution Geovetenskaper
Adress Cramergatan 3, 621 67 Visby	
Namn på projektledare Stefan Ivanell	
Namn på ev övriga projektdeltagare Johan Arnqvist, Hugo Olivares Espinosa, Stefan Söderberg (WeatherTech)	
Nyckelord: 5-7 st NEWA, Vindatlas, Hornamossen, Ryningsnäs, LES, vindkraft i skog	

Förord

Projektet NEWA finansierades av Energimyndigheten (2/3) och EU (1/3).

Projektets framgång var helt beroende på de deltagande partners som kom från nio europeiska länder. Ett stort ansvar har legat på projektledare Jakob Mann från Danmarks Tekniska Universitet.

De delar Sverige har lett och koncentrerat sig på (vindfält i skog) har framför allt involverat partners från Danmark, Tyskland och Spanien.

De svenska aktiviteterna har letts av Professor Stefan Ivanell, Uppsala universitet tillsammans med forskargrupp inom vindenergi, Campus Gotland.

Ett stor tack riktas till Energimyndigheten för dess engagemang under planering och genomförande av detta ERA-Net + projekt.

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	3
Summary	4
1. Inledning/Bakgrund.....	5
3.1 Projekttid och finansiering.....	5
3.2 Mätbel.....	8
3.3 Beräkningsdel	9
3.4 Bakgrund till vindatlasarbetet.....	9
3.5 Svenska teamet:.....	11
2. Genomförande	12
4.1 Vindatlas.....	12
4.1.1 Inledande test	12
4.1.2 Produktionskörningar	13
4.1.3 Mikroskalesimuleringar	13
4.1.4 Validering	14
4.2 Mätkampanj	14
4.2.1 Mastmätningar.....	16
4.2.2 Fjärranalysmätningar	16
4.2.3 Tryckgradientmätningar.....	17
4.3 Modellutveckling och modellvalideringsstudier (benchmarks)	18
4.3.1 Cabauw	18
4.3.2 Ryningsnäs.....	18
4.3.3 Rödeser-Berg.....	19
4.3.4 Ferry lidar.....	20
4.3.5 Hornamossen.....	20
4.3.6 Alaiz.....	21
5. Resultat	22
5.1 Vindatlas	22
5.2 Mätkampanj	23
5.3 Modellutveckling	25
5.4 Modellvalideringsstudier (benchmarks).....	27
5.4.1 Cabauw	27
5.4.2 Ryningsnäs modelltest för mikroskalem modeller.....	27
5.4.3 Rödeser-Berg.....	29
5.4.4 Ferry lidar.....	29
5.4.5 Hornamossen.....	29
5.4.6 Alaiz.....	29
6. Diskussion och Slutsatser	30
6.1 Vindatlas.....	30
6.2 Mätkampanj	30
6.3 Modellutveckling och valideringsstudier	30
Publikationslista.....	32
Referenser, källor.....	35

Sammanfattning

För att minimera kostnaden för vindkraft är placeringen av vindkraftverken av högsta vikt. Det huvudsakliga syftet med NEWA var att utveckla en ny europeisk vindatlas - ”New European Wind Atlas” – samt att förbättra dagens modeller för att minska osäkerheter.

Den nya vindatlasen innehåller fritt tillgänglig data för vindresursen i EU-länderna och 100km ut från kusterna samt Östersjön och Nordsjön.

Det svenska bidraget till projektet bestod av en fullskalig mätkampanj, modellutveckling och verifikation.

Den framtagna vindatlasen är den mest omfattande databas och vindatlas som finns över Europa. Den är framtagen inom ett omfattande internationellt samarbete som ligger som grund till de modelleringsval som ligger bakom resultatet.

Det största steget framåt jämfört med tidigare databaser är att NEWA innehåller tidsserier från ca 30 år med en tidsupplösning på 30 minuter samt data på högre höjd (upp till 500 meter).

Databasen innehåller förutom mesoskale-modellering (upplösning på 3km) även data från microskale-modellering med en högre upplösning (50m).

Mätkampanjer utförda inom NEWA-projektet har resulterat i ökad kunskap om vinden i olika miljöer. I Hornamossen, som var det huvudsakliga svenska bidraget inom mätdelen i NEWA, har unika data tagits fram som beskriver vindflödet över svensk skog. Detta kommer vara till stor nytta för forskning och utveckling av framtida modeller för vindkraft i skog lång tid framåt.

Utveckling inom NEWA har även resulterat i state-of-the-art modeller för simulering av typiskt svenska skogsområden.

Projektet har kommit att stärka och komplettera tidigare, pågående och kommande forskningsprojekt.

Summary

In order to minimize the cost of wind power, the location of the wind turbines is of high importance. The main purpose of NEWA was to develop a new European wind atlas and to improve today's models to reduce uncertainties.

The new wind atlas contains freely available wind resource data for EU countries and 100km off the coasts as well as the Baltic Sea and the North Sea.

The Swedish contribution to the project consisted of a full-scale experiment, model development and verification.

The developed wind atlas is the most comprehensive database and wind atlas of Europe. It has been developed within a comprehensive international collaboration that is the basis for the modeling choices behind the result.

The biggest step forward compared to previous databases is that NEWA contains time series from about 30 years with a time resolution of 30 minutes and a data at a higher altitude (up to 500 meters).

In addition to mesoscale modeling (resolution of 3km), the database also contains data from microscale modeling with a higher resolution (50m).

Measuring campaigns carried out within the NEWA project have resulted in increased knowledge of the wind in different environments. In Hornamossen, which was the main Swedish contribution within the measurement section of NEWA, unique data set have been produced that describe the flow over Swedish forested areas. This will be of great benefit to research and development of future models for wind power in the forest for a long time to come.

Development within NEWA has also resulted in state-of-the-art models for simulation of typical Swedish forest areas.

The project has come to strengthen and complement previous, ongoing and future research projects.

1. Inledning/Bakgrund

3.1 Projekttid och finansiering

Projektet New European Wind Atlas startades 2014-10-20 och avslutades våren 2020.

Projektet är ett ERA-Net + projekt vilket för detta projekt innebär att EU står för en tredjedel av finansieringen och att övrig finansiering erhålls från nationella finansiärer. I Sverige har detta resulterat i en budget på ca 14 miljoner där Energimyndigheten stått för två tredjedelar.



Figur 1, finansiärer av NEWA.

Projektet i sin helhet har letts av DTU via projektledare Professor Jakob Mann.



Figur 2, projektledare Jakob Mann ser ut över en fältkampanj i Portugal vid den svenska lidarn.

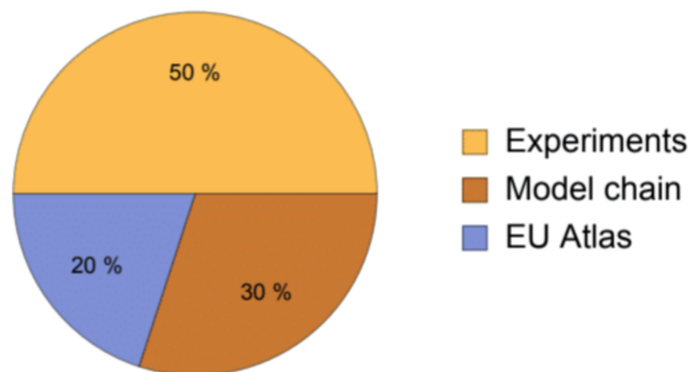
Två till tre partners inom respektive land har deltagit i projektet och bidragit med sitt respektive expertområde. I Sverige har Uppsala universitet och WeatherTech Scandinavia (WTS) deltagit. Dock avslutades WTS's aktiviteter 2018 då WTS

avslutade sin verksamhet. Uppsala universitet har projektlett den svenska delen av projektet.



Figur 3, finansörer av NEWA.

Projektets totala budget har varit 12 miljoner Euro och pågått i fyra år (med viss avvikelse mellan deltagande länder). Fördelningen av resurser mellan experiment, modellutveckling och skapande av vindatlas framgår i figur 4.

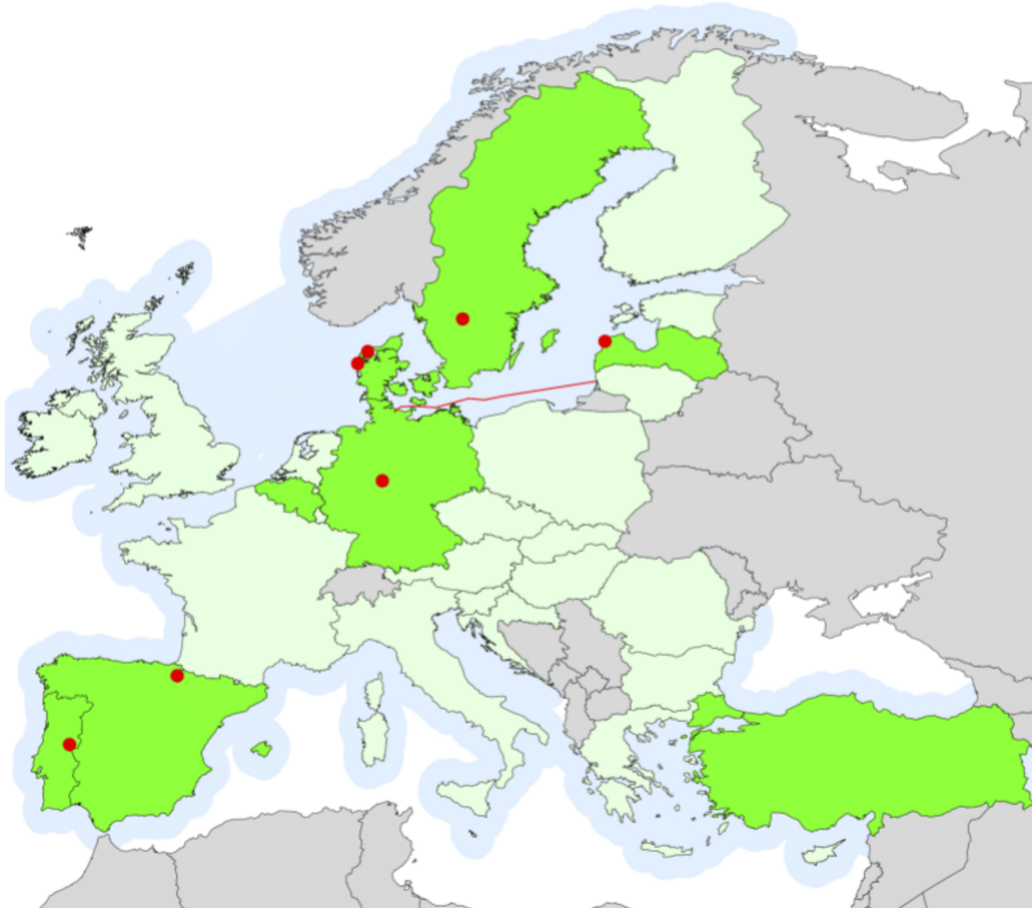


Figur 4, Fördelning av resurser mellan mätkampanjer, modellutveckling och skapande av vindatlas.

Från figur 4 framgår det att förutom att ta fram en ny europeisk vindatlas ligger stort fokus på att öka kunskapen om vindförhållanden och ökade möjligheter att modellera mer tillförlitligt.

Den viktigaste parametern för användande av vindenergi är vindresursen. Vindturbiner placerade i områden med vindresurser som inte är optimala producerar minde kostnadseffektiv elektricitet. För att minimera kostnaden för vindkraft är därför placeringen av vindkraftverken av högsta vikt. Det huvudsakliga syftet med NEWA var att utveckla en ny europeisk vindatlas - "New

European Wind Atlas” – samt att förbättra de avancerade modellerna mot att minska osäkerheterna till mindre än 3% i plan homogen terräng och till mindre än 10% i alla typer av terräng. Den nya vindatlasen innehåller fritt tillgänglig data för vindresursen för EU-länderna och 100km ut från kusterna samt Östersjön och Nordsjön. Det svenska bidraget till projektet bestod av ett fullskaligt experiment, modellutveckling och verifikation. Projektet har kommit att stärka och komplettera tidigare, pågående och kommande forskningsprojekt.



Figur 5, EU länder – ljusgrönt, NEWA partners – mörkgrönt, Mätkampanjer – röda punkter och linjer.

Det översiktliga målet med NEWA har varit att:

- **Med bästa möjliga teknik utföra en kartläggning av vindförhållandena för uppskattningar av resurser och laster.**

Denna del tar fram en ny vindatlas inom området markerat i figur 5. Utförligare beskrivning av detta ges i kapitel 4.1 och 5.1.

- **Utveckla och testa modellkedja**

Det finns av stor bredd i möjliga modeller för vindresurser som sträcker sig från ingenjörsmoeller till state-of-the-art forskningsmodeller. I denna utveckling utvecklas modellernas möjlighet att tillförlitligt beräkna vindfält i olika situationer. De testas med avseende på tillförlitlighet i olika situationer. En modellkedja utvecklas för att stegvis kunna koppla ihop modeller av olika komplexitet. Utförligare beskrivning av detta ges i kapitel 4.3, 5.3 och 5.4.

- **Genomföra en serie av atmosfäriskt fältexperiment för att validera modeller och atlas.**

Fältexperiment syftar till att validera modellutveckling och att ge bedömningar av hur tillförlitliga olika modeller är i olika sammanhang. Utförligare beskrivning av detta ges i kapitel 4.2 och 5.4.

Den svenska delen av projektet utgörs huvudsakligen av två delar; mätdel och beräkningsdel.

3.2 Mätdel

Mätdelen syftade till att få fram mätdata som kan verifiera beräkningsmodeller för komplicerade *siter* (platser), som inte är ovanliga i svenska landskapet, och därmed är en av de huvudsakliga framtida hinder då det gäller hög tillförlitlighet för beräkningsmodeller.

En 180 m hög mätmast har använts i samarbete med Energiforsk-projektet ”Vindkraft i skog” (Mohr, 2018) samt företaget OX2. Samverkan har gett en möjlighet till utökning av antal instrument och inte minst antal mätnivåer.

Så kallade ”remote sensing instruments”, fjärranalysinstrument, tex lidar, sodar har använts i en detaljerad kartläggning inom den svenska siten. Planering och utförande av den intensiva kampanjen har skett i samarbete med andra partner inom det europeiska projektet.

Utöver omfattande aktiviteter i den svenska mätkampanjen har den svenska delen av projektet finansierat en s.k. *scanning lidar* som med hjälp av remote sensing metodik kan ”scanna av” vinden i luftrummet ovanför dess placering. Denna har använts i flera av de europeiska mätkampanjerna.

3.3 Beräkningsdel

I beräkningsdelen används svenska erfarenheter från mikroskalsimuleringar och mesoskale-simuleringar i kombination med målet att ta fram en beräkningsmetod som kombinerar dessa modellfamiljer. Med ett sådant verktyg kan detaljer på en site beräknas samtidigt som de storskaliga effekterna, som t.ex. hur gränsskiktet påverkas av olika parametrar. Tillsammans ger detta en större tillförlitlighet samt möjligheter att få en mer komplett förståelse av vindresursen på en site.

I den svenska delen har stort fokus varit på svenska förhållanden och specifikt mikroskale-simuleringar av skog. Även kallt klimat har integrerats i mesoskale-delen av projektet. Det har här varit centralt med svenskt deltagande, eftersom nedisningsberäkningar annars troligtvis prioriterats ned. En internationell benchmark har letts av de svenska forskarna och har resulterat i state-of-the-art modellering av skog. Utförligare beskrivning av beräkningsdelen återfinns i kap. 4.3 och 5.3.

3.4 Bakgrund till vindatlasarbetet

Vid skapandet av en vindatlas kan man kortfattat utgå från två olika typer av huvudstrategier. Båda strategierna utnyttjar lokala vädermodeller för att simulera vädret (varav vinden är av störst intresse i detta fall). Den här typen av modeller kallas för mesoskale-modeller (Meso syftar till att modellen har en begränsad domänstorlek, typiskt mellan 100 och 1000 km) och är av den typ som SMHI använder för att till dagligdags prognosticera vädret.

Strategi 1, *tidsserier*. Strategin går ut på att använda en modell för att återskapa vädret under en lång period tillbaka i tiden. Anledningen till att man vill ha en lång period är att vinden varierar från år till år, och det behövs många år för att nå ett klimatologiskt stabilt medelvärde av vindhastigheten. Mesoskale-modellen drivs med historiska arkiv av vädret som har en betydligt lägre upplösning (ca 50-200 km). Den här strategin kallas för *nedskalning med tidsserier* och har använts för att t.ex. skapa den s.k. ”Global wind atlas”.

Strategi 2, *statistisk sammanvägning* eller *statistisk nedskalning*. Den här strategin går ut på att använda ett antal typfall av väderlägen som sedan viktas samman för att nå ett representativt värde på medelvinden. Sammanviktningen görs på varje plats genom att studera historiska arkiv av vädret på den specifika platsen. Denna metod har använts i den svenska MIUU-vindatlasen (Bergström och Söderberg, 2009).

Båda metoderna har fördelar och nackdelar. Genom att använda statistisk nedskalning kan man för samma beräkningskraft ha en högre upplösning i modellen eftersom färre fall behöver modelleras, men då förloras möjligheten att direkt jämföra modellering med uppmätta tidserier. Det blir även svårare att jämföra den (under begränsad tid) uppmätta medelvinden på grund av ovan nämnda variation från år till år. Eftersom det finns stora användningsområden för långa, relativt högupplösta, tidsserier allmänt i forskning, inte bara inom vindenergi, utan all forskning som kräver information om väderläget valdes strategin med *tidsserier* för NEWA. Denna strategi möjliggör även användandet av *statisk nedskalning* i ett senare läge.

På grund av den långa period som behöver simuleras begränsas modellupplösningen av den tillgängliga datorkraften. I och med önskan att få en atlas med högre upplösning än vad som finns möjlighet till genom simulering av tidsserier med en s.k. mesoskale-modell har resultaten använts tillsammans med en enklare modell för att beräkna vinden mellan de punkter där mesoskale-modellen beräknar den, så kallad nedskalning. Denna enklare modell kallas för Mikroskalemodell. I det här fallet använder mesoskale-modellen en upplösning på tre kilometer och mikroskale-modellen en upplösning på 50 meter. Mikroskalemodeller kan dock i sin tur delas upp i ett antal olika nivåer. I NEWA har modellen WAsP används för mikroskale-beräkningarna i databasen. I modellutvecklingen har mer avancerade modeller används, se kapitel 4.3.

Kort om olika modeller

Förenklat kan man säga att vindens utveckling beror på ett antal krafter som verkar på den. Om någon kraft blir mindre eller större förändras vinden. Dessa, för atmosfären relevanta krafter är:

- Tryckgradientkraft
- Corioliskraft
- Friktion (som bara verkar vid markkytan, byggnader och vegetation)
- Gravitation

Utöver dessa krafter kan vind också transporteras in i ett område genom att vinden så att säga transporterar sig självt (med vindens hastighet). Man delar upp denna transport i två delar

- Transport av medelvind, så kallad *advektion* (ordnad, långsamt varierande vind)
- Transport med hjälp av turbulens (byig vind och virvlar)

Krafterna förändras av olika förhållanden. T.ex. påverkas gravitationen av luftens densitet (som bland annat beror på temperaturen). Man kan säga att hur verklighetstrogen en modell är beror på hur bra den är på att representera de olika krafterna och transporter. Väldigt förenklat representerar en mesoskale-modell alla krafter och transporter så utförligt som möjligt, vilket möjliggör en god

representation av vindförhållandena, men på bekostnad av väldigt resurskrävande simuleringar. Detta får till följd att mesoskale-modeller oftast begränsas till en upplösning av ca 1-10 km. Mikroskalem modeller gör olika typer av förenklingar för att underlätta beräkningarna, och därmed möjliggöra en högre upplösning, och kan därför uppnå en upplösning på 10-100 m. Vilka förenklingar som gjorts i modellen dikterar i vilka förhållanden den är användbar. T.ex. försummas ofta advektion vilket fungerar bra i områden som inte varierar så mycket horisontellt, som över platta landområden med likartad vegetation eller över hav.

3.5 Svenska teamet:

Projektet har från svensk sida letts av Professor Stefan Ivanell. Utöver Stefan har Johan Arnqvist, Hugo Olivares, Hans Bergström m.fl. deltagit från Uppsala universitet där Johan huvudsakligen arbetat med mätdelen och Hugo med beräkningsdelen (mikroskala).

Från WeaterTech Scandinavia har Stefan Söderberg och Magnus Baltscheffsky deltagit fram till 2018-12-31 och huvudsakligen arbetat med beräkningsdelen (mesoskala).

2. Genomförande

4.1 Vindatlas

Produktionen av själva vindatlasen har mestadels fallit under arbetspaket 3, MESO-skalasimuleringar. Svenska deltagare här har framförallt varit Weathertech Scandinavia. Som beskrivits har NEWA skapats med hjälp av två olika typer av modeller, en enklare mikroskalemmodell (WAsP) för högre upplösning och en mer avancerad mesoskalemmodell (WRF) för att reproducera vindklimatet under 30 år. Det är den senare som är själva stommen till vindatlasen.

4.1.1 Inledande test

Eftersom ett av målen med NEWA projektet var att utarbeta en lämplig, öppet tillgänglig, modellkedja var det naturligt att valet av mesoskalemmodell föll på WRF (Weather Research and Forecast) som är en fritt tillgänglig modell med många olika val när det gäller modellinställningar. De främsta inställningarna som användare behöver ta ställning till är:

- Vilka data används på modellens ränder (alltså modellens yttre gränser)
- Hur sker utbyte mellan ränder och modellnivåer (gränsvillkor)
- Vilken typ av modell används för turbulens
- Vilken typ av modell används för de tre faserna av vatten i luften

Valet av dessa inställningar kan påverka resultatet till mycket hög grad och därför lades avsevärt arbete ned för att hitta inställningar som gav goda resultat gentemot de valideringsdata som fanns tillgängliga.

Processen med att designa vilka inställningar på WRF som var mest lämpliga och hur modellen skall köras finns beskrivna i Witha et al. (2019) samt Hahman et al (2020), och det går även att ladda ner en lista på inställningarna på map.neweuropeanwindatlas.eu.

För att hitta de bästa inställningarna gjordes en studie där först två olika typer av extern drivning testades. Det beslutades att den externa drivningen skulle tas från ERA5 som är en databas bestående av atmosfärens tillstånd med en rumslig upplösning på ca 50 km. ERA5 produceras av ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) och är det i nuläget mest tillförlitliga så kallade återanalysdata. Två alternativ som testades var dels att starta modellen och sedan endast driva den på ytterkanterna i domänen, och dels genom att köra modellen och även under körning driva den mot ERA5, så kallad nudging (detta gjordes endast för data högre upp i atmosfären). I båda fallen kördes modellen i en vecka varefter den återstartades och efterföljande vecka simulerades, osv. Efter jämförelse mot 9 tillgängliga höga mätmaster i domänen avgjordes att nudging gav resultat som bättre stämde överens med mätningarna. För att nå den slutgiltiga upplösningen på 3 km användes flera versioner av modellen där upplösningen förfinas succesivt. ERA5 driver en 27 km WRF via nudging, 27 km driver sedan 9

km, som i sin tur driver 3 km. Eftersom beräkningar på 3 km i hela Europa är praktiskt svåra användes 10 mindre domäner som sedan lades ihop.

För att bestämma vilka inställningar som var bäst i övrigt testades 25 kombinationer av inställningar som av de i projektet ingående experterna på förhand bedömdes som mest lämpliga. Dessa 25 versioner utvärderades sedan återigen mot tillgängliga data, varefter den som bäst kunde representera den verkliga fördelningen av vindhastigheter valdes ut till den slutgiltiga inställningen. För detaljer, se Hahman et al. (2020).

De viktigaste slutsatserna i studien om hur WRF lämpligast bör ställas in resulterade i:

- Inställningarna är mycket viktiga och gav skillnader på upp till 1 m/s i medelvind på 100 m höjd över hav och 1.5 m/s över land.
- De viktigaste valen är de av:
 - turbulensmodell
 - nedre gränsvillkor, markskrovlighet
 - modell för utbyte mellan nedre gräns och nedre modellnivån

Förutom listan på inställningar för de slutgiltiga simuleringarna skapades ytterligare en ensemble av modellinställningar för att ge en uppfattning om vilken modellosäkerhet som finns i olika områden. Denna ensemble finns beskriven i Witha et al. (2019).

4.1.2 Produktionskörningar

För att skapa underlag till själva vindatlasen kördes WRF på det europeiska superdatorklustret PRACE. Där nyttjades 480 kärnor för beräkningarna. Totalt simulerades ca 30 år fram t.o.m 2018 som täckte hela Europa samt Turkiet och 100 km hav från kusterna. Nedan följer kort info om produktionskörningarna.

WRF version: modified v3.8.1 med nedisningsberäkningar.

Upplösning: 27 km → 9 km → 3 km, där den grövre används till att driva den finare. 61 vertikala nivåer

10 mindre domäner som sedan flätas samman. Varje körning består av åtta dagars simulering, varav den första dagen förkastas som inkörningstid.

Mer om skapandet av meso-atlasen finns att läsa i Hahman et al. (2020), Dörenkämper et al. (2020) och Witha et al. (2019).

4.1.3 Mikroskalesimuleringar

För att nå en bättre upplösning än de 3 km som Mesoskalemodellen kördes på användes mikroskalemodellen WAsP (Troen och Petersen 1989). Metodiken finns beskriven i Dörenkämper et al. (2020). WAsP kördes med en horisontell upplösning på 50 m. WAsP är en mycket förenklad modell jämfört med WRF och även i jämförelse med de mikroskalem modeller som används i

modellutvecklingsdelen, see kaptitel 5.1. WASP är en så kallad linjär modell och den saknar därför advektion och beräknar endast vinden som ett tidsmedelvärde. Detta är framförallt en viktig nackdel i områden där landskapsbilden ändrar karaktär såsom stora höjdskillnader eller gränzoner mellan land och hav, eller mellan låg och hög vegetation. I flackare områden presterar WASP bättre. Mer information om detta återfinns i resultatavsnittet.

4.1.4 Validering

Eftersom det inte finns några mätserier som är tillräckligt långa för att validera hela den simulerade tidsperioden har validering genomförts med data från mätningar under kortare tidsperioder. Valideringsstrategin som användes var att utnyttja data från höga master i företagets Vestas databas. På grund av sekretess är det därför inte möjligt att visa exakt var varje valideringsmast finns, men däremot i vilket land den kommer ifrån och vilken karaktär området den står i har. Sammantaget användes 291 höga master, med mätdata mellan 40 och 150 m över mark. 13 av dessa master stod i Sverige, förutom det 10 i Finland och 4 Norge, som har liknande förutsättningar med avseende på vindklimat och geografi. Jämförelseperioden är mellan 2007 och 2015, men tidserier från varje enskild mätmast består typiskt av ett eller två år. Mer om valideringsmetodiken finns att läsa i González-Rouco et al. (2019) och Dörenkämper et al. (2020).

4.2 Mätkampanj

I NEWA företogs 6 mycket omfattande mätkampanjer, se Figur 5. Mer information finns i Mann et al. (2017). Sverige var värd för en av de stora mätkampanjerna. En lämplig mätplats identifierades genom diskussioner mellan de svenska deltagarna i NEWA, se Figur 6. Tanken var att hitta en plats som väl representerade typiska svenska förhållanden med ett lapptäcke av skog i ett kulligt landskap. Slutligen föll valet på Hornamossen, en plats som delades med Vindforsk IV projektet ForestWind (Mohr, 2018) samt företaget OX2. Det delade ansvaret innebar att mätplatsen fick en totalt sett större budget och fler mätningar möjliggjordes. Efter att en lämplig mätplats identifierats togs kontakt med de som centralt koordinerade mätkampanjerna i NEWA och det bestämdes att mars till oktober 2016 var en lämplig period för en intensivkampanj där instrument från NEWA konsortiet skulle lånas ut till den svenska kampanjen. Utöver det gjordes långtidsmätningar i två år med masten och ett mindre antal andra instrument.

Målet med mätkampanjen var dels att skapa en heltäckande databas för mätningar som möjliggör studier av vindens fysikaliska egenskaper på en typisk svensk vindkraftsplacering och dels att skapa en grund som möjliggör detaljerade valideringsstudier av modeller som används inom vindkraftsbranschen. Mätkampanjen har designats med dessa två mål i sikte. Mätinstrumenten och deras placering valdes mycket noga ut för att på bästa sätt möjliggöra modellvalidering i typiskt svenska förhållanden, och det var ett tydligt syfte att mäta så många som möjligt av de gränsvillkor som behövs för att driva en vindmodell. Detta var viktigt eftersom det innebär att alla modeller kan drivas på

samma sätt och man därmed kan härleda skillnader i modellresultat (och modeller mot mätningar) till modellernas utformning och inte deras drivning. Denna önskan innebär samtidigt utmanande mätningar, och tryckgradientssystemet som beskrivs nedan är ett pilotprojekt i sammanhanget.

De mätningar som togs inom projektet kan kortfattat beskrivas som mastmätningar, fjärranalysmätningar och tryckgradientmätningar. Nedan följer en kortare beskrivning av genomförandet av varje mätkategori. Mer information om mätningarna finns i Mann et al. (2017), Mohr et al. (2018) och Arnqvist (2017).



Figur 6 Karta över placeringen av den svenska mätplatsen

4.2.1 Mastmätningar

En 180 m hög mätmast utrustades med 8 ultrasonic anemometrar, 10 skålkorsanemometrar, 3 vindfanor, två strålningsgivare, ett profilsystem för temperaturmätningar på 10 nivåer samt en nivå med tryck och temperatur.

De mesta av dessa mätningar finansierades av OX2 eller ForestWind. De mätningar som finansierades av NEWA utgjordes av fyra av sonicarna samt strålningsmätningarna

Syftet med mastmätningarna var framförallt att få bättre insikt i vindens fysikaliska egenskaper, vilket främst täcks av projektet ForestWind, och beskrivs därför inte i detalj i denna rapport. Strålningsgivarna installerades för att mäta strålningens fyra komponenter (inkommande kortvågig strålning (solstrålning), inkommande långvågig strålning, utgående kortvågig strålning samt utgående långvågig strålning). Orsaken bakom strålningsmätningarna är strålningens viktiga roll för turbulensens beskaffenhet och den är därför en viktig komponent för modelljämförelser.

Masten var operationell mellan 2015 och 2017. En detaljerad studie av resultaten från mastmätningarna hittas i Mohr et al. (2018).

4.2.2 Fjärranalysmätningar

Tanken bakom att mäta med fjärranalysinstrument var dels att utveckla metodiken bakom fjärranalys för vindenergi och dels att ge bästa möjliga valideringsstudie som rymdes inom mätbudgeten.

Ett fjärranalysinstrument inom vindenergi mäter typiskt vindens hastighet och turbulensens storlek inom ett vertikalskikt som täcker större delen av vindturbiners rotor.

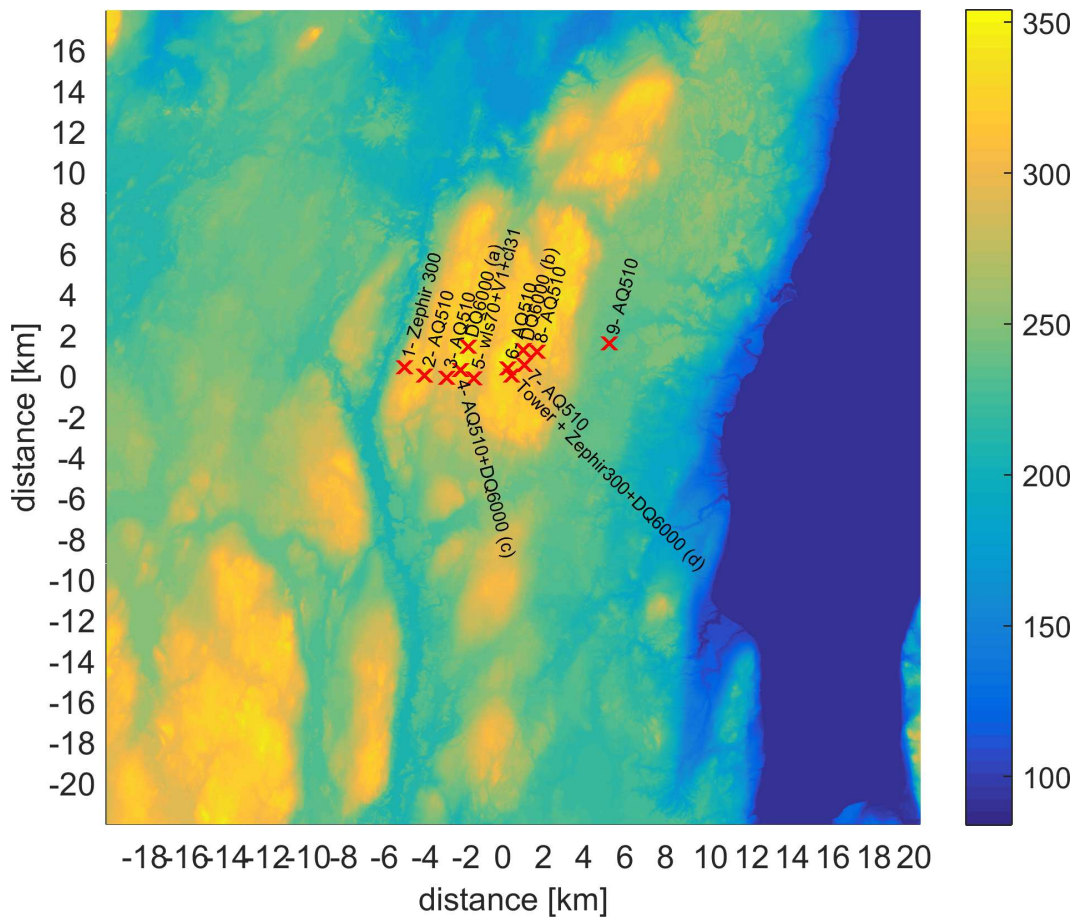
Inom projektet användes 7 sodarer (AQ system, modell 510), 4 lidars (2 stycken Zephir300 från ZX Lidars, 1 Leosphere Windcube V1 och en Leosphere WLS70 samt en cielometer (Vaisala, cl31)

Den svenska budgeten finansierade framförallt sodarerna, av vilka 6 hyrdes och en, som skänkts till ForestWind, upprustades och uppgraderades. Att använda sodar beslutades efter att en förstudie vid masten, se Mohr et al. (2018), visat på mycket gott resultat. Användandet av sodar möjliggjorde fler mätpunkter eftersom det generellt sett är en billigare teknik än lidar. För det syfte som mätningarna skulle nyttjas, dvs modellvalideringsstudie kunde inga nackdelar med sodar påvisas vid jämförelse med lidar. Insamling av rådata från sodar kunde ske genom ett samarbete med tillverkaren vilket också inneburit möjligheter till förbättrad mätmetodik och detaljstudier av strömningsförhållanden. Övrig fjärranalysutrustning lånades från NEWA konsortiet, förutom en lidar, vilken redan ägdes av Uppsala universitet och renoverats inom NEWA.

Fjärranalysinstrumenten placerades utmed en sträcka från väst till öst som för att täcka in strömningen över Hökensås och därmed möjliggöra utvärdering av hur modeller simulerar olika aspekter av vindens strömning över en kulle, samt att studera strömningen som funktion av de atmosfäriska förhållandena.

4.2.3 Tryckgradientmätningar

Ett viktigt randvillkor för simuleringar av vind är den bakomliggande drivkraften, tryckgradienten. I ett försök att mäta denna placerades fyra stycken extremt känsliga mikrobarometrar ut över Hökensås. Mätplatsernas höjd mättes med en noggrannhet av ca 1 cm med hjälp av en totalstations-GPS. Tryckmätningarna användes senare i modellvalideringssyfte (se Resultat).



Figur 7 en topografisk karta över mätplatsen med instrumentplaceringarna inritade.

Mätningarna utvärderades löpande och har inom NEWA framförallt nyttjats till modellvalidering, se punkt nedan samt www.thewindvaneblog.com. I övrigt har mätningarna varit mycket värdefulla för att förbättra förståelsen för strömningen över skogslandskap och mycket resultat finns redan beskrivna i Mann et al. (2017) samt Mohr et al. (2018). Mätningarna kommer att publiceras fritt tillgängliga efter att modellvalideringsstudien publicerats och kommer att vara till stor nytta för den svenska forskningen under årtionden framöver.

4.3 Modellutveckling och modellvalideringsstudier (benchmarks)

4.3.1 Cabauw

Tillsammans med testet för Ryningsnäs (se nedan) var detta det första modelltestet i NEWA och undersökte state of the art i att koppla mesoskalemodeller med mikroskalemodeller. Ingen av de svenska deltagarna deltog i det här testet. Precis som med fallet i Ryningsnäs utfördes testet med redan befintliga mätdata, alltså inte data som hämtats in under själva NEWA projektet. Mer om testet finns att läsa i Rodrigo-Sanz et al. (2018).

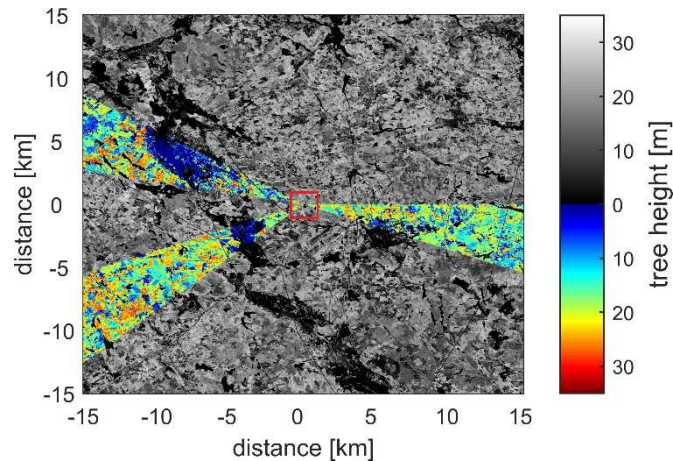
4.3.2 Ryningsnäs

Detta modelltest var ett av sex större modelltest inom NEWA projektet. Det leddes av forskare vid Uppsala universitet och resultaten har publicerats i en öppet tillgänglig vetenskaplig tidskrift (Ivanell et al. 2018). Se även resultatavsnittet för en sammanfattning av de viktigaste resultaten.

Som ett inledande modellvalideringstest ombads forskare att simulera vinden vid Ryningsnäs i Småland. Den mätplatsen har tidigare använts inom svensk vindkraftsforskning (Bergström et al. 2013) och mätningarna finns noggrant beskrivna i Arnqvist et al. (2015). Fokus på studien var att ta reda på state of the art i förmåga att simulera vinden över skogsområden. För detta passar platsen utmärkt eftersom den är förhållandevis platt och täckt med ett lapptäcke av skog av olika täthet och höjd.

Modellerarna ombeds att simulera vinden i tre olika riktningar, med olika grad av uppströms skogstäcke. Förutom det erbjöds de att simulera vinden i två olika atmosfäriska förhållanden, neutralt (liknande mulet och blåsigt) och stabil skiktning (liknande klara nattförhållanden). Ingen av deltagarna klarade att simulera stabil skiktning, vilket var en av de viktigaste slutsatserna i studien, eftersom det är ett viktigt förhållande för att kunna bedöma en plats vindprofil. Detta föranledde också designen av nästkommande testfall, se Hornamossen.

Ett av de verkliga forskningsframstegen i Ryningsnästestet var att en ny teknik för att bestämma skogs- och markytan hade nyttjats. Metoden är nu publicerad i en vetenskaplig tidskrift och håller för närvarande på att granskas (Arnqvist et al. 2020). Denna metod medför att skogshöjd och skogstäthet kan bestämmas över vida områden och med stor noggrannhet genom att utnyttja laserskanningar från flygplan. Kartor av terränghöjd, skogshöjd och skogstäthet i ett område över 50x50 km gavs ut till alla testdeltagare och det stod dem fritt att utnyttja dessa enligt bästa förmåga.



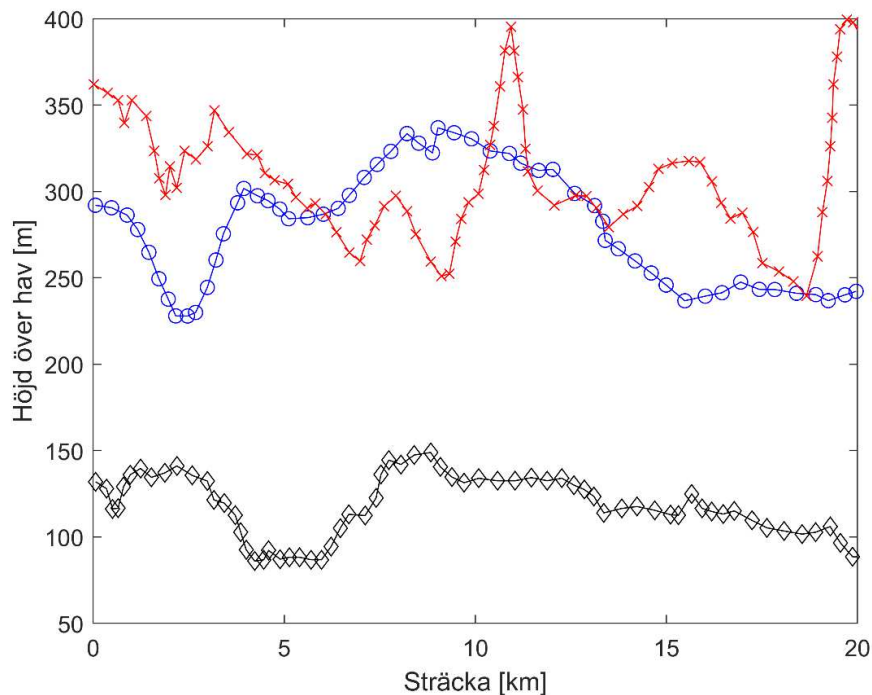
Figur 8. Karta över skogshöjden i Ryningsnästestet. Färgade sektorer är de tre vinklar som simulerades.

Modellerna som deltog i testet var av varierande komplexitet, men den enklaste av modellerna var ändå en i industriellt sammanhang relativt avancerad kod, och de övriga var rena forskningsmodeller, och därför kan antas representera en större färdighet än de som innehas av modeller som nyttjas av industrin. Av de deltagande modellerna var merparten så kallade RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) vilka är den i industrin vanligast förekommande typen, och några LES (Large Eddy Simulation), vilka främst utnyttjas inom forskning på grund av dess mycket datorresurskrävande beräkningar. Den svenska modellen som deltog var av typen LES (se avsnitt om modellutveckling).

För att diskutera angreppsvinklar på modelltestet bjöds deltagare in till en workshop över två dagar. Denna placerades i Mullsjö vilket möjliggjorde ett fältbesök vid Hornamossen, den svenska mätplatsen inom NEWA. Detta var viktigt eftersom även ett modelltest i Hornamossen planerades. Detta test är för närvarande öppet och beräknas kunna sammanställas och publiceras under slutet av 2020.

4.3.3 Rödeser-Berg

Detta test koordinerades av de tyska deltagarna i NEWA och var ett test för mikroskalemodeller att simulera vinden över en skogsbeväxt kulle. På det viset liknar testet det svenska i Hornamossen, men skiljer sig genom att kullen är mer isolerad med branta sidor och ligger i ett omgivande slättlandskap med jordbruk (se Figur 9). Sverige deltog i testet genom LES simuleringar (Se avsnitt om modellutveckling) och genom mätutrustning till valideringsdata i form av en scanning lidar. Mer finns att läsa i Dörenkämper (2017) och Dörenkämper (2018).



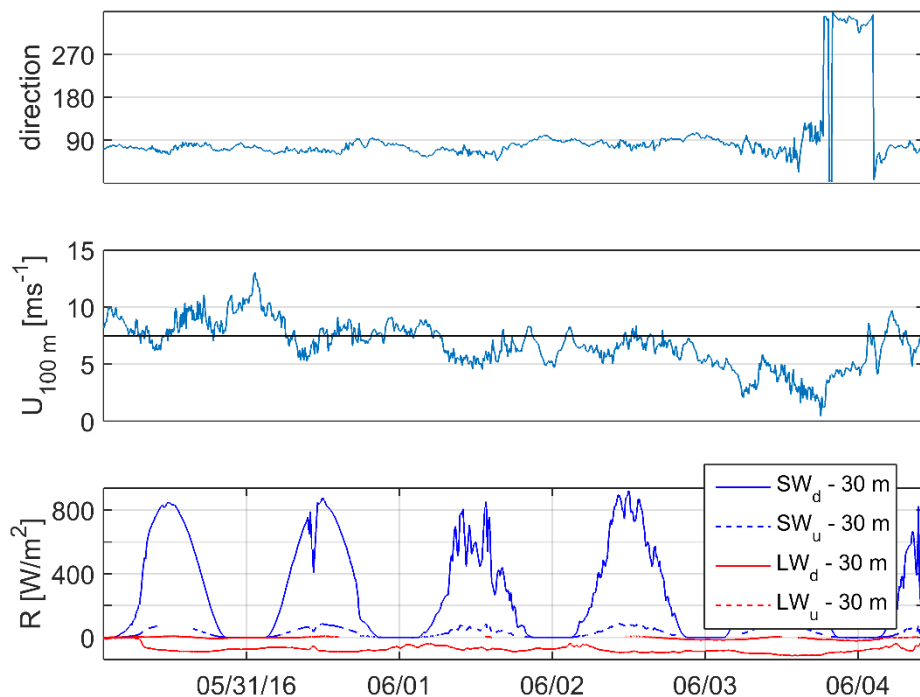
Figur 9. Tvärsnitt över marknivå i Ryningsnästestet (svart), Rödesebergstestet (röd) och Hornamossen (blå). Mätmasterna var placerade vid ca 10 km i figurens x-axel.

4.3.4 Ferry lidar

Detta test utmanade modellerna att simulera vindar som mätts med lidar längs en färjerutt. Meningen med detta var att testa modellkapaciteten till havs. Färjelinjen kan ses i Figur 4. Svenskt deltagande skedde genom Uppsala universitet och WRF, där WRF kördes med något andra inställningar än de som användes i NEWA produktionskörningarna. Mer om testet finns att läsa i Witha (2018)

4.3.5 Hornamossen

Med tanke på att en av de viktigaste slutsatserna i Ryningsnästestet var att modellerna saknade förmåga att modellera något annat än neutral skiktning skapades ett nytt test med ökad komplexitet. Testet finns beskrivet Arnqvist (2018b) där det även går att titta på en film där testet och dess syfte beskrivs. I det nya testet ombads modellerarna simulera två hela dygnsyklar i klart väder. En med vind från öst och en med vind från väst. Tack vara upplägget på mätkampanjen i Hornamossen kunde nu fullständiga yttre randvillkor ges till deltagarna, vilket innebär att skillnad i resultat lättare kan härledas till modelldesign. För att underlätta analys av resultaten valdes två vädersituationer ut, en från väst och en från öst, där väderläget var sådant att vindhastighet och vindriktning var relativt konstanta under en längre period, och det mestadels klart väder. Denna teknik för att skapa modelltest blev sedan vägledande för andra tester inom NEWA.



Figur 10. Väderläget under Hornamossen testfall öst. Vindriktning, Vindhastighet och strålningskomponenter visar ett stationärt väderläge. SW_d (SW_u) står för nedåtriktad (uppåtriktad) kortvågig strålning och LW_d (LW_u) står för nedåtriktad (uppåtriktad) långvågig strålning.

Eftersom testet skall utvärdera hela modellkedjan i NEWA användes inte randvillkor från mätningarna direkt i det material som skickades ut till deltagarna, utan istället användes mesoskale-simuleringarna från WRF. Dessa testades dock mot mätningarna innan, så att det felet mellan mätning och mesoskale-simuleringar inte skulle vara för stort. Se Figur 13 för jämförelse mellan mätningar och mesoskale-simuleringar i det aktuella fallet.

Testet öppnades i september 2018 och är fortfarande öppet. Det har varit utmanande för deltagarna att utveckla modeller som klarar att simulera hela dygns-cykler (se avsnitt om modellutveckling), men den utvecklingen ses samtidigt också som mycket viktig, och det har därför bedömts vara värt att vänta på resultaten.

4.3.6 Alaiz

Alaiz är det mest komplexa testet med avseende på terrängskillnader och utmanar modellerna i bergig terräng. Alaiz var det sista stora mätexperimentet i NEWA och testet har inte hunnit med att öppna för deltagare ännu.

5. Resultat

5.1 Vindatlas

Resultaten från valideringen av vindatlasen finns att läsa i den officiella rapporten om osäkerhetskvantifiering (González-Rouco et al. 2019) samt den vetenskapliga publikationen Dörenkämper et al. (2020). Nedan följer en sammanfattning av de viktigaste resultaten av dessa två publikationer.

Osäkerheten hos vindatlasen totalt sett bedöms vara 0.02 ± 0.78 m/s. Det innebär att vinden i jämförelse med valideringsdata i medel överskattas 0.02 m/s och att på enskilda platser är det 68 % sannolikhet att avvikelsen mellan atlas och riktig vind är mindre än ± 0.78 m/s och 95 % sannolikhet att avvikelsen är mindre än ± 1.56 m/s. För plattare landskap är osäkerheten mindre och för bergiga områden är osäkerheten lite större. Detta gäller mesoskaleresultaten. För mikroskalan är osäkerheten totalt sett 0.28 ± 0.76 m/s. Överskattningen om 0.28 m/s kommer företrädevis för områden med större topografisk komplexitet (alltså områden med berg och större kullar), där förenklingarna som görs i mikroskalemodellen inte är lämpliga.

De ovan nämnda siffrorna gäller totalt över hela vindatlasens område. Mycket av de större osäkerheterna finns dock i områden i södra Europa, och för Sverige (där det fanns med 13 st. höga master i valideringsstudien) är osäkerheten mindre, omkring -0.1 ± 0.3 m/s för mesoskalan (liknande för Finland) och -0.1 ± 0.5 m/s för mikroskalan. Sett till Finland och Sverige visade mikroskalan ett större fel än mesoskalan och även en större spridning.

Det är viktigt att påpeka att felet gentemot valideringsdata gäller för de perioder då mastmätningar skedde, vilket i normalfallet är ett till två år, och att en bättre överensstämmelse förväntas för längre perioder. Eftersom det är ett klimatologiskt medelvärde (30 år) som presenteras i vindatlasen är alltså det verkliga förväntade felet mindre än det som presenterats ovan, men det är inte möjligt att exakt bestämma hur stort eftersom det saknas valideringsdata för så långa tidsperioder.

Resultaten från valideringsstudien visar att det är något bättre att använda mikroskaleatlasen för områden med mycket låg komplex topografi, såsom slättland, men att det i övrigt är bättre att använda resultaten från mesoskalemodellen. Detta kan tyckas kontraintuitivt eftersom den horisontella upplösningen på mesoskalan endast är 3 km, medan den är 50 m på mikroskalan och det ju medger en större möjlighet för mikroskalan att representera just den lokala topografin. *Det tåls dock att understrykas att trots detta faktum stämmer mesoskaleresultaten bättre mot mastmätningar som står i topografiskt komplexa områden och anledningen till det är alltså att förenklingarna i mikroskalemodellen inte är lämpliga i sådana områden. Ur ett svenskt perspektiv är det alltså framförallt resultaten från mesoskalan som bör användas, förutom möjligen i södra Sveriges slättlandskap.*

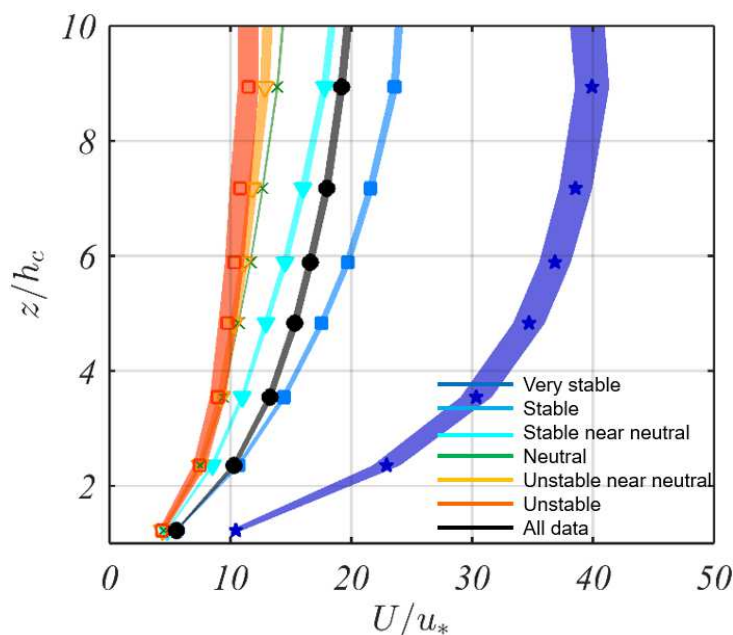
För att även ge en uppskattning om osäkerheten i producerad effekt användes en generisk 5 MW vindkraftsturbin som drevs med data både från vindatlasen och

mastmätningarna och resultaten från den studien visar att det förväntade felet med 68 % säkerhet är mindre $\pm 25.2\%$, med 95 % sannolikhet mindre än $\pm 50.4\%$ och att det i snitt har en förväntad överskattning om 6.2 %. Dessa osäkerheter kan tyckas stora, men det är återigen värt att påpeka att det handlar om avvikelser under den period där valideringsmätningar funnits tillgängliga och att fel varierar upp och ned med tiden så att en längre valideringsperiod i normalfallet minskar avvikelserna.

5.2 Mätkampanj

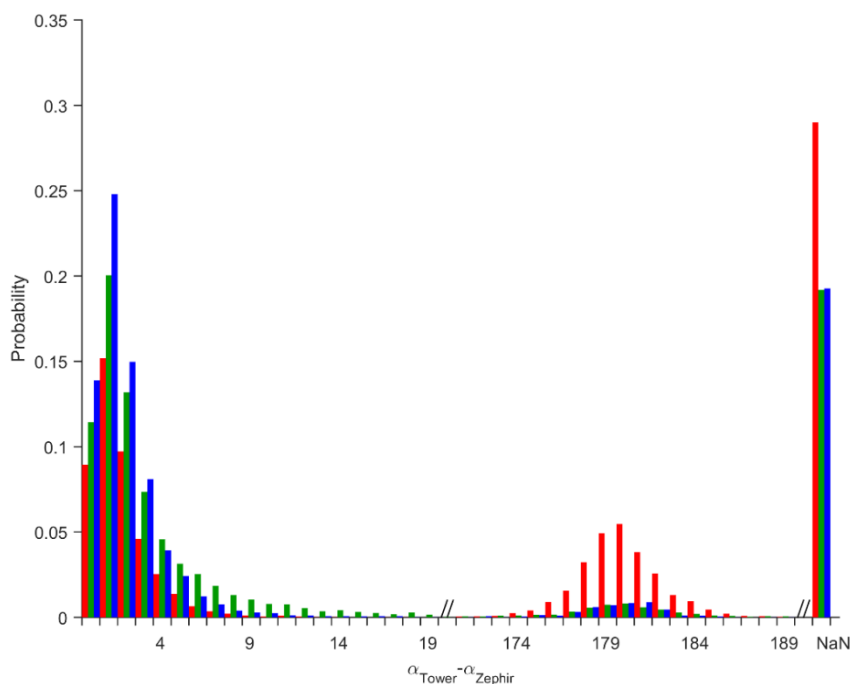
Den svenska mätkampanjen i Hornamossen har använts för att konstruera ett modelltest (Arnqvist 2018b). Se Modellvalideringsstudier för mer information. Resultat från mätkampanjen när det kommer till vindens fysikaliska egenskaper finns kort beskrivna i Mann et al. (2017) och mer detaljerat i Mohr et al. (2018).

Ett resultat som bör lyftas fram, eftersom det är till grund för både modellvalidering och modellutveckling, är det faktum att neutrala förhållanden inte väl representerar medelvärdet för vindprofilen. Se Figur 11, som visar just detta. Eftersom flertalet modeller som används inom vindkraftsindustrin endast tar hänsyn till neutrala förhållanden har detta resultat påvisat vikten av att utveckla och testa modeller som även klarar andra atmosfäriska förhållanden. Det faktum att neutrala förhållanden är otillräckligt är sedan tidigare känt, men resultaten från den svenska mätkampanjen belyser detta tydligt.



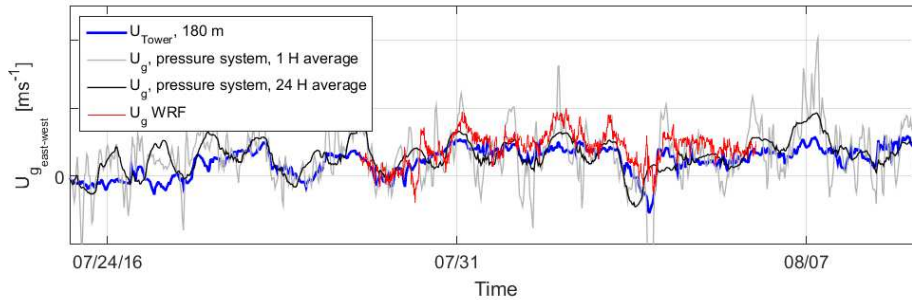
Figur 11. Vindens variation (x-axeln) med höjden (y-axeln) från Hornamossen i olika atmosfäriska förhållanden. U/u_* är vind delat med turbulensnivå och z/h_c är höjd delat med skogshöjd.

En delvis ny mätmetodik från lidar som utvecklats inom projektet användes senare i Svensson et al. (2019) för att få mätningar av den turbulenta rörelsemängdstransporten. Både mätningarna från sodar, lidar och trycksystem har använts för att utveckla mätmetodiken och dessa resultat kommer att beskrivas vetenskapligt under 2020. Rådatamätningarna från lidar har använts för att vidareutveckla en teknik för att ge fler mått på turbulens från mätningarna samt att förbättra vindriktningsbestämningen. I Figur 12 visas fördelningar av skillnaden mellan vindriktningen från lidar och mast. De nyutvecklade teknikerna är klart bättre än den ursprungliga, som ofta bestämmer riktningen 180 grader fel. Rådata från sodarmätningarna har använts för att minska mätvolymen och förbättra beräkningen av turbulensmått.



Figur 12. Fördelning av skillnaden mellan vindriktning från lidar och mast. Den röda fördelningen visar de ursprungliga lidarmätningarna medans de blå och gröna fördelningarna visar nya metoder utvecklade i projektet.

Att genomföra beräkningar av tryckgradienten genom att använda tryckmätningar inom ett så pass begränsat område som inom mätkampanjen har inte tidigare gjorts enligt författarnas kännedom. I arbetet med att beräkna tryckgradienten framkom det att avståndet mellan tryckmätarna varit något kort varför temperaturkorrektionen på mätarna inte varit tillräckligt noggrann för att ge tillfredställande noggrannhet på tryckgradienten på korta tidsskalor. På längre tidsskalor har systemet dock fungerat och kunnat användas för att validera mesoskalesimuleringar av vindfältet (Arnqvist 2018b), se Figur 13.



Figur 13. Beräkning av den geostrofiska vinden med hjälp av tryckgradienten.

5.3 Modellutveckling

Modellutvecklingen inom NEWA har för den svenska delen huvudsakligen fokuserats på att förbättra färdigheten i att modellera atmosfäriska gränsskiktet (ABL, Atmospheric Boundary Layer) över skog. Denna utveckling har validerats med mätkampanj och en internationell jämförelse, en s.k. benchmark (se kapitel 5.4.)

Det finns ett ökat intresse för utveckling av vindprojekt i skog i Sverige och övriga världen. De svenska områdena kännetecknas för det mesta av en icke-homogen fördelning av träd, d.v.s., skogens höjd och rumsliga täckning varierar i det typiskt svenska lapptäcket. Trädens täthet (grenar, blad och barr) varierar också, både vertikalt och horisontellt. Utöver detta varierar topografi, därför behöver även markytans höjd beaktas i beräkningar. Inom NEWA har en CFD (Computational Fluid Dynamics) modell vidareutvecklats för att representera flödet av det atmosfäriska gränsskiktet över dessa regioner.

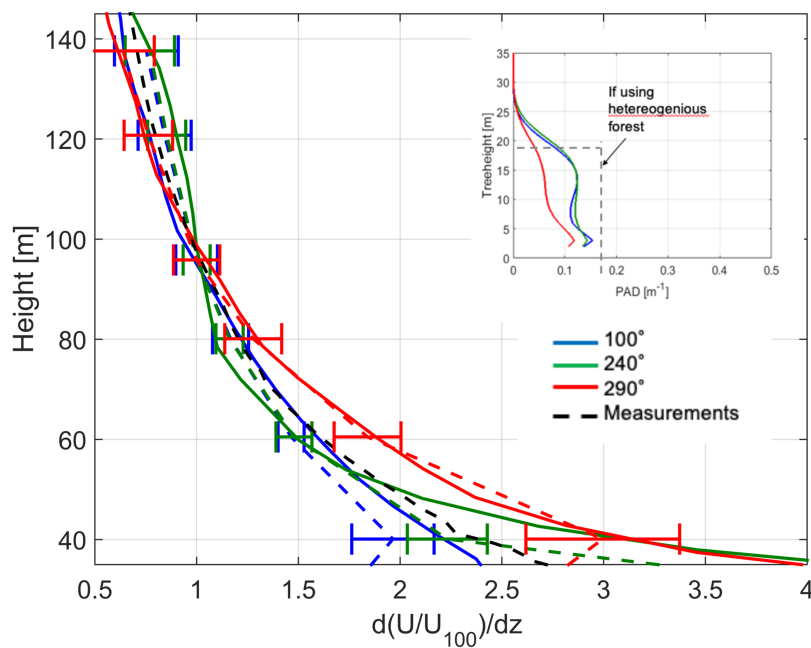
En kritisk aspekt för att få modellen att beakta de kortvariga variationer som uppstår genom interaktionen av ABL-flödet med skogen och marken. Därför krävs en CFD modell som kan hantera dessa variationer. Om simuleringar av vindens medelvärden skulle räcka för att representera dessa fenomen så skulle s.k. RANS (Reynold Average Navier-Stokes) beräkningar vara tillräckliga. I det här fallet krävs dock en metod som bättre hanterar tidsvariationer. Därför baseras den utvecklade modellen på s.k. Large-Eddy Simulations (LES). Modellen baseras på tidigare utvecklingsarbete och plattformen OpenFOAM (v3.0.1), som förutom att vara öppen källkod (med alla fördelar som detta medför) inkluderar en samling ekvationslösare och verktyg i sin basdistribution som vi kan använda för att utveckla och implementera de önskade modelleringsfunktionerna.

Baserat på de befintliga tekniker för skogsparametrisering (Nebenführ, 2015; Boudreault, 2015) består modellen utvecklad inom NEWA av en inkompressibel strömningsberäknare där skogen representeras som en porös volym som utövar en dragkraft på flödet. På detta sätt utgör skogen en uppbromsning som är proportionell mot den lokala skogstätheten, vilken erhålls via användning av s.k.

ALS (luftburen laserskanning) från Lantmäteriet, se även 5.4.2 och Arnqvist et al. (2020). Detta resulterar i stora fördelar jämfört med tidigare tekniker som finns i litteraturen för representation av skogen där skogstätheten antas ha en rumslig konstant vertikal form.

I LES modellering används s.k. subgridscale (SGS) modeller för att hantera den del av den turbulenta kinetiska energin (TKE) som på grund av modellens begränsade upplösning inte direkt simuleras. För att få med skogens påverkan på TKE har befintliga SGS-modeller utvecklats för att även ta med skogen påverkan på ett korrekt sätt. Detta uppnås genom modifiering av transportekvationen för TKE, särskilt den i SGS-modellen från Yoshikawa (Yoshizawa och Horiuti, 1985; Yoshizawa, 1986).

Utöver förmågan att representera heterogena skogar utvecklades modellen även med förmåga att modellera effekten av olika typer av markråheter. Därigenom kan modellen representera olika markförhållande, men även mark i kombination med vattendrag, som även det är typiskt för det svenska landskapet. För detta användes en s.k. surface-stress modell från Schumann (1975) via import av motsvarande moduler i SOWFA-biblioteket (Churchfield et al. 2014).



Figur 14, Vindskjuvning beroende på vindriktning och terräng.

Simuleringarna genomfördes i områden med terrängvariationer. Dess erhöles från ALS-kartorna. För att på ett korrekt sätt representera dessa ytor i modellen används nätgeneratorm WindMesh från CENER-institutet (Gancarski och Chávez-Arroyo, 2017).

Figur 14 visar ett exempel på hur stor betydelse terrängens variation kan ha på vindens egenskaper. Figuren visar resultat av beräkningar på vindens skjuvning från de tre vindriktningar som illustreras i figur 8. PAD i figur 14 står för medelvärde av trädens täthet inom ett visst område. Om beräkningen inte skulle ta hänsyn till den varierande terrängen från dessa tre riktningar skulle de tre kurvorna överlappa varandra. Resultaten visar även mycket god överensstämmelse med mätningar (streckade kurvor i respektive riktning).

5.4 Modellvalideringsstudier (benchmarks)

5.4.1 Cabauw

Resultaten finns att läsa i Sanz-Rodrigo et al. (2018) och berör kopplingsmetodik mellan mikroskale (RANS) modeller och mesoskalem modeller genom så kallad U-RANS, där man låter RANS-modellen, som i vanliga fall är stationär, drivas av långsamma tidsförändringar från mesoskalem modellen. Detta test fungerade som en pilotstudie för arbetet med modellkedjan (se avsnitt om Modellutveckling samt Rodrigo et al. 2020).

5.4.2 Ryningsnäs modelltest för mikroskalem modeller

Beskrivning av studien och syftet finns presenterat under kapitel 4.2. Studien finns att läsa i sin helhet i Ivanell et al. (2018).

De viktigaste resultaten från studien är:

Användning av laserdata för markbeskaffenhet:

En ny metod (Arnqvist et al. 2020) användes för att beräkna skogshöjd och skogstäthet över ett stort område. Dessa data användes sedan av modellerna genom att direkt i ekvationen för vindhastighet bromsa vinden, istället för att, som traditionellt, bromsa vinden endast vid marken. Slutsatsen av detta var att alla modellerna lyckades fånga styrkan på vind och turbulens relativt väl och med förhållandevis liten spridning. Detta är ett mycket viktigt och användbart resultat eftersom det banar väg för att undvika osäkerheten som är behäftad med att uppskatta de parametrar, nollplansförskjutning och råhetslängd, som annars används för detta ändamål. I förlängningen innebär det bland annat att osäkerheten vid vindresursbedömning i skog har minskats avsevärt. I en annan studie (Floors et al. 2018) beskrivs hur en förenklad version av tekniken kan utnyttjas för den typen av enklare modeller som är vanliga inom vindenergiindustrin. Även detta är ett mycket viktigt framsteg för att minska osäkerheten i vindresursbedömning i svenska förhållanden.

Storleken på det område som påverkar vinden på en viss höjd

En av frågeställningarna i början av studien var om någon av modellerna skulle reproducera de skillnader i vindprofil (vindens variation med höjden) som observerats i mätningarna. När alla resultat var analyserade visade det sig att endast en av modellerna lyckades med detta på ett tillfredställande sätt (den

svenska modellen, se under modellutveckling). Det var också den mest resurskrävande modellen. Av detta resultat kunde två slutsatser dras.

- Det område uppströms som påverkar vinden är mycket stort, i storleksordningen 100 gånger höjden som är av intresse
- Den typ av modell som ofta nyttjas av industrin (RANS) har för mycket omblandning för att i detalj kunna modellera effekten av skillnader i uppströms skogsbeskaffenhet.

Konstanter i turbulensbeskrivningen i RANS-modeller

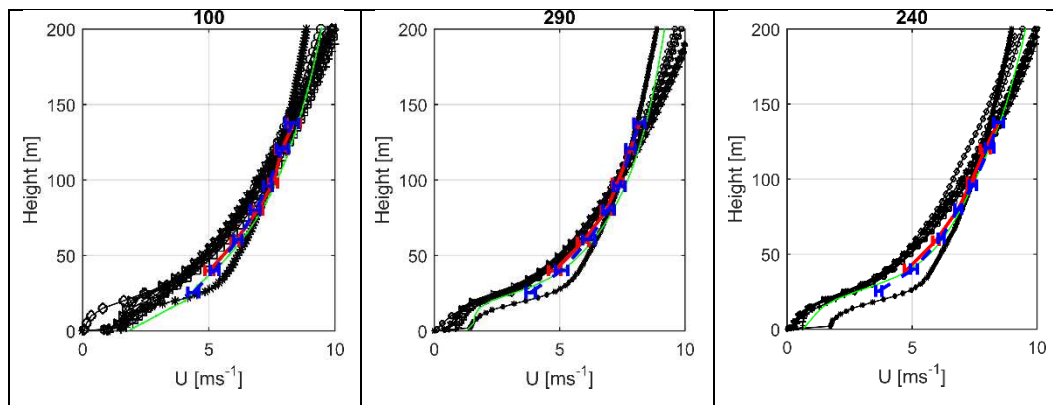
I modeller av typen RANS används en typ av modell för att simulera effekten av turbulens. I den vanligaste typen av denna modell finns fem konstanter. Det visade sig att värdet på dessa konstanter var mycket avgörande för hur väl modellen kunde simulera förhållandet mellan medelvind och turbulens. I Ivanell et al. (2018) finns rekommenderade värden på konstanterna.

Modellupplösning och storlek på modelldomän

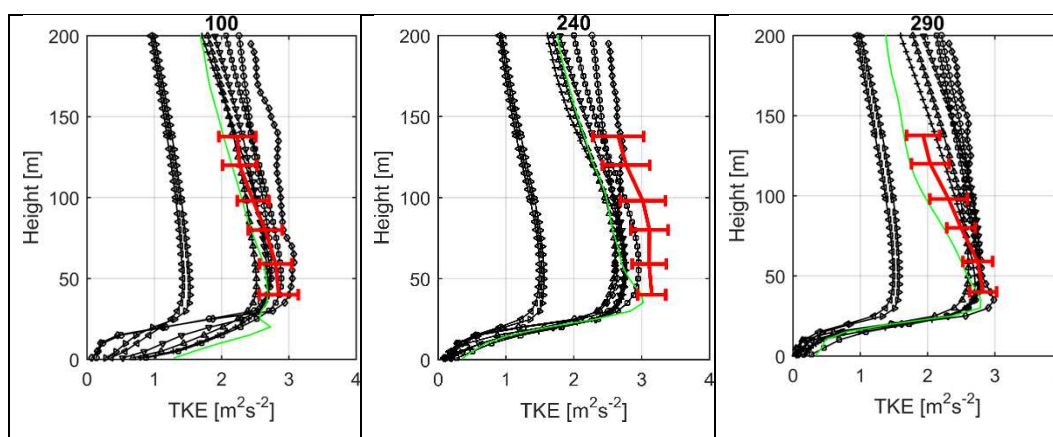
I resultaten kunde ingen avgörande försämring ses med samma modell som körts både med en horisontell upplösning på 10 m och med 40 m. Den modell som lyckades bäst var dessutom relativt grovupplöst med 25 m upplösning. En viktig slutsats är att det därför bör vara bäst att utvidga domänen snarare än att öka den horisontella upplösningen.

Rekommendationer för framtida studier

Alla deltagare upplevde att det var krångligt att ha ett fast mål för vinden på 100 m, eftersom det innebar att de hela tiden fick justera den tryckgradientkraft som driver vinden för att få rätt vindhastighet och vindriktning. Därmed rekommenderas att framtida experiment istället beskriver vilken tryckgradientkraft och riktning som skall användas för att driva modellen. Vidare rekommenderas att testa modellernas förmåga att simulera en större variation av atmosfäriska förhållanden eftersom de deltagande modellerna inte lyckades med detta.



Figur 15 Vindprofiler från Ryningsnästestet. Svarta kurvor - olika deltagande modeller, gröna kurvor - den svenska modellen, blå och röda markeringar – mätningar $\pm 95\%$ konfidensintervall.



Figur 16. Turbulensprofiler från Ryningsnästestet. Svarta kurvor - olika deltagande modeller, gröna kurvor - den svenska modellen, röda markeringar – mätningar $\pm 95\%$ konfidensintervall.

5.4.3 Rödeser-Berg

Testresultaten analyseras och en vetenskaplig artikel beräknas publiceras under 2020

5.4.4 Ferry lidar

Testresultaten analyseras och en vetenskaplig artikel beräknas publiceras under 2020

5.4.5 Hornamossen

Testet pågår fortfarande, så inga resultat kan ännu rapporteras.

5.4.6 Alaiz

Testet har ännu inte öppnats, så inga resultat kan ännu rapporteras.

6. Diskussion och Slutsatser

6.1 Vindatlas

Den framtagna vindatlasen är den hittills mest omfattande databas och vindatlas som finns över Europa. Den är framtagen inom ett omfattande internationellt samarbete som ligger som grund till de modelleringsval som ligger bakom resultatet.

Det största steget framåt jämfört med tidigare databaser är att NEWA innehåller tidsserier av 29 år med en tidsupplösning på 30 minuter samt data på högre höjd (upp till 500 meter).

Databasen innehåller förutom mesoskale-modellering (upplösning på 3km) även data från mikroskale-modellering med en högre upplösning (50m). Dock är det viktigt att inse att högre upplösning inte automatisk innebär att resultaten är mer tillförlitliga. Beräkningar som använder sig av mesoskale-metoden innehåller mer fysikalisk modellering. Därför är det av stor vikt att användare av databasen har kunskap att avgöra när vilken metod är tillämplig och dess begränsningar. På samma sätt är det av stor vikt att användare av databasen använder sig av nollplansförskjutning då resultaten tolkas eftersom nollplansförskjutningen är betydande över skogsområden.

6.2 Mätkampanj

Mätkampanjen som utfördes inom NEWA-projektet har resulterat i ökad kunskap om vinden i olika miljöer. Data som är framtaget kommer ligga till grund för många framtida studier. I Hornamossen, som var det huvudsakliga svenska bidraget inom mät delen i NEWA har unika data tagits fram som beskriver strömningen över svensk skog. Detta kommer vara till stor nytta för forskning och utveckling av framtida modeller för vindkraft i skog och typiska svenska miljöer utöver att de redan har haft stor betydelse i internationella modelljämförelser.

6.3 Modellutveckling och valideringsstudier

Detaljer för de numeriska beräkningarna finns i Ivanell et al. (2018). En huvudsaklig slutsats är fotavtrycket (d.v.s. det område som uppströms påverkar) från skogsområden är mycket stort och att det är avgörande att få med detta stora område i simuleringsområdet. För att modelleringen ska kunna representera vindegenskaper på höjder som är relevanta för vindenergi konstaterades det att det krävs att simuleringsområdet sträcker sig många kilometer (~ 20 km) uppströms det intressanta området.

I numeriska beräkningar är det alltid en avvägning av upplösning av beräkningsnät, område som ska beräknas och beräkningsresultatets tillförlitlighet. Det tillvägagångssätt som här användes där områdets storlek prioriterades mot upplösning (inom rimlig nivå) visade sig vara mest lämpligt i jämförelse med

andra tekniker som är vanliga vid vindutvärdering, där domäner sträcker sig ett mer begränsat område uppströms. Detta tillsammans med den inom projektet utvecklade metod att inkludera skogens täthet från ALS mätningar som redovisas i Ivanell et al. (2018) resulterade i att den av Uppsala universitet utvecklade modell, i jämförelse med simuleringar från andra forskningsgrupper och mätningar, gav den bästa matchningen med mätningarna (hastighetsprofiler, vindskjuvning, TKE, etc.). Denna modellering är idag state-of-the-art inom modellering av skogsområden.

Utöver detta visar modellering av de viktigaste vindegenskaperna, turbulensfältet, som presenteras i Arnqvist et al. (2019) och Olivares-Espinosa et al. (2019) att modellen kan reproducera de skalor som är mest relevanta (och därmed har störst påverkan) på vindkraftverk och därmed skogens påverkan på energiuttag och laster.

Publikationslista

2020

Arnqvist, J., Freier, J., and Dellwik, E.: Robust processing of airborne laser scans to plant area density profiles, *Biogeosciences Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/bg-2020-121>, in review, 2020.

Publikationen beskriver en ny metod för att beräkna skogstäthet med hjälp av laserskanningar. Artikeln ackompanjeras av fritt tillgänglig programvara för att göra beräkningarna.

Rodrigo, JS, Chávez Arroyo, RA, Witha, B, Dörenkämper, M, Gottschall, J, Avila, M, **Arnqvist, J.**, Hahmann, AN & Sile, T 2020, 'The New European Wind Atlas Model Chain', *Journal of Physics: Conference Series (Online)*, vol. 1452, no. 1, 012087. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1452/1/012087>

Denna publikation beskriver arbetet med att ta fram en modellkedja för vindresursbesämning. Den sammanfattar den viktigaste modellutvecklingen inom NEWA projektet. Det största svenska bidraget handlar om strategier för simuleringar av dygnszykler med mikroskalem modeller.

Hahmann, A. N., Sile, T., Witha, B., Davis, N. N., Dörenkämper, M., Ezber, Y., García-Bustamante, E., González Rouco, J. F., Navarro, J., Olsen, B. T., and **Söderberg, S.**: The Making of the New European Wind Atlas, Part 1: Model Sensitivity, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-349>, in review, 2020.

Artikeln beskriver utveckling och validering av de modellinställningar som blev slutgiltiga för genomförandet av beräkningarna som ligger till grund för NEWA. Man kan i artikeln läsa om vilka inställningar som är mest känsliga och generellt få en god idé om vilka modellval som är lämpliga för vindresursberäkningar.

2019

Avila, M., Chávez-Arroyo, R. A., **Arnqvist, J.**, Olivares-Espinosa, H., & Dellwik, E. (2019). Daily cycle simulations of thermally stratified flows over forests. *Journal of Physics: Conference Series*, 1256(1), 12003.

Publikationen beskriver metodik och resultat av implementering av explicit skogsmodellering i en mikroskalemmodell för beräkning av vind och temperaturprofiler. Resultaten är vägledande för liknande implementationer i andra modeller för vindresursberäkning.

Olivares-Espinosa, H., Arnqvist, J., & Ivanell, S. (2019). Assessment of wind fields over forested sites with LES and a nacelle lidar. *Journal of Physics: Conference Series*, 1256(1), 12002.

Studien presenterar jämförelser mellan LES beräkningar och lidarmätningar som gjorts från ett vindturbinnav. Resultaten visar att simuleringsmetoden ger liknande resultat som mätningarna. Analysmetoder för lidar och identifikation av neutrala förhållanden presenteras också.

Svensson, N., **Arnqvist, J.**, Bergström, H., Rutgersson, A., & Sahlée, E. (2019). Measurements and Modelling of Offshore Wind Profiles in a Semi-Enclosed Sea. *Atmosphere*, 10(4), 194.

Artikeln beskriver jämförelser mellan lidar och WRF-simuleringar till havs. Mätmetodik som utvecklats inom NEWA används och resultaten visar på vissa skillnader mellan uppmätta och simulerade resultat. Bland annat visar det sig att modellen har svårigheter att bestämma höjden på de för hav typiska vindmaxima på låg höjd.

2018

Arnqvist, J., Olivares-Espinosa, H., & Ivanell, S. (2018). Investigation of Turbulence Accuracy When Modeling Wind in Realistic Forests Using LES. *iTi Conference on Turbulence*, 291–296.

Publikationen beskriver i detalj hur väl en LES modell med skogsparameterisering kan beskriva vinden med avseende på vindenergirelevanta mått. Resultaten visar att det i balansen mellan domänstorlek och horisontell upplösning är det i regel viktigare att öka domänstorleken än den horisontella upplösningen.

Floors, R. R., Enevoldsen, P., Davis, N., **Arnqvist, J.**, & Dellwik, E. (2018). From lidar scans to roughness maps for wind resource modelling in forested areas. *Wind Energy Science*, 3(1), 353-370. <https://doi.org/10.5194/wes-3-353-2018>

Publikationen beskriver laserskanningar kan utnyttjas för den typ av enklare modeller som är vanliga inom vindenergibranschen för att bestämma markytans råhet då den täcks av skog. Detta är ett mycket viktigt framsteg för att minska osäkerheten i vindresursbedömning i svenska förhållanden

Ivanell, S., Arnqvist, J., Avila, M., Cavar, D., Aurelio Chavez-Arroyo, R., **Olivares-Espinosa, H.,** Peralta, C., Adib, J., & Witha, B. (2018). Micro-scale model comparison (benchmark) at the moderately complex forested site Ryningsnäs. *Wind Energy Science*, 3(2), 929–946.

Studien beskriver ett blindtest mellan state-of-the-art modeller för vindberäkningar. Resultaten visade på framgång med att använda skogsdensitet från laserdata i simuleringarna och att LES modeller kan återge detaljer i vindprofilen som beror på uppströms förhållanden.

Arnqvist, J., Ivanell, S., The Hornamossen wind resource experiment. URL <https://thewindvaneblog.com/the-hornamossen-wind-resource-experiment-77fab2ae4af2> Senast besökt 2020-04-23, 2018a.

Texten beskriver de omfattande mätningarna i det svenska fältexperimentet och beskriver även mätplatsens topografi och vegetation.

Arnqvist, J., Ivanell, S., The Hornamossen diurnal cycle benchmark. URL <https://thewindvaneblog.com/the-hornamossen-diurnal-cycle-benchmark-for-abl-models-in-forested-and-moderately-complex-terrain-747b60401254>. Senast besökt 2020-04-23, 2018b.

Texten beskriver och ger instruktioner till det internationella modelltest som skapades med hjälp av det svenska fältexperimentet. Det finns även länkar till de data som behövs för att delta, samt en film där testet förklaras.

2017

Mann, J., Angelou, N., **Arnqvist, J.,** Callies, D., Cantero, E., Chávez Arroyo, R., Courtney, M., Cuxart, J., Dellwik, E., Gottschall, J., **Ivanell, S.,** Kühn, P., Lea, G., Matos, J. C., Palma, J. M. L. M., Pauscher, L., Peña, A., Sanz Rodrigo, J., **Söderberg, S.,** ... Veiga Rodrigues, C. (2017). Complex terrain experiments in the New European Wind Atlas. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 375(2091). <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0101>

Artikeln beskriver de stora experiment som genomförts i NEWA. Där bland Hornamossen i Sverige, och även hur svensk utrustning använts i de andra experimenten.

Referenser, källor

- Arnqvist, J., Dellwik, E., Segalini, A. & Bergström, H. (2015). Wind statistics from a forested landscape. *Boundary-layer Meteorology*, 156(1), 53-71.
- Bergström, H., and Söderberg, S., 2009: Wind mapping of Sweden – Summary of results and methods used. *Elforsk Report 09:04*, 84 pp.
- Bergström, H., Alfredsson, H., Arnqvist, J., Carlén, I., Dellwik, E., Fransson, J., Ganander, H., Mohr, M., Segalini, A & Söderberg, S 2013, *Wind power in forests: Winds and effects on loads*. *Elforsk rapport*, no. 13:09, Elforsk.
- Boudreault, L. É., Bechmann, A., Tarvainen, L., Klemmedts-son, L., Shendryk, I., and Dellwik, E.: A LiDAR method of canopy structure retrieval for wind modeling of heterogeneous forests, *Agr. Forest Meteorol.*, 201, 86–97, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.10.014>, 2015
- Churchfield, M. J., Lee, S., and Moriarty, P. J.: Adding complex terrain and stable atmospheric condition capability to the OpenFOAM-based flow solver of the simulator for on/offshore wind farm applications (SOWFA), in: *ITM Web of Conferences*, vol. 2, EDP Sciences, 2014.
- Dörenkämper, M., Olsen, B. T., Witha, B., Hahmann, A. N., Davis, N. N., Barcons, J., Ezber, Y., García-Bustamante, E., González-Rouco, J. F., Navarro, J., Sastre-Marugán, M., Sīle, T., Trei, W., Žagar, M., Badger, J., Gottschall, J., Sanz Rodrigo, J., and Mann, J.: The Making of the New European Wind Atlas – Part 2: Production and Evaluation, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/gmd-2020-23>, in review, 2020.
- Dörenkämper, M. The Rödeser-berg forested hill benchmark. URL <https://thewindvaneblog.com/newa-meso-micro-challenge-phase-2-r%C3%B6deser-berg-5404eafbe7dc> Senast besökt 2020-04-23, 2018.
- Dörenkämper, M. The Rödeser-berg forested hill benchmark blind test. URL <https://windbench.net/newa-r-deser-berg-2017-blind-test> Senast besökt 2020-04-23, 2017.
- Gancarski, P. and Chávez-Arroyo, R.: Meshing procedure for the atmospheric wind flow modelling, *Zenodo*, <https://doi.org/10.5281/zenodo.1000490>, 2017.
- González-Rouco, J. F., Bustamante, E. G., Hahmann, A. N., Karagili, I., Navarro, J., Olsen, B. T., ... Witha, B. (2019). *NEWA Report on uncertainty quantification Deliverable D4.4*. NEWA - New European Wind Atlas. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3382572>
- Nebenführ, B. Turbulence-resolving simulations for engineering applications. Ph.D. thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden (2015)

Mohr, M.; Arnqvist, J.; Abedi, H.; Alfredsson, H.; Baltscheffsky, M.; Bergström, H.; Carlen, I.; Davidson, L.; Segalini, A.; Söderberg, S. Wind Power in Forests II; Technical Report 2018:499; Energiforsk AB, Stockholm, Sweden, 2018.

Rodrigo, JS, Arroyo, RC, Gancarski, P, Guillén, FB, Avila, M, Barcons, J, Folch, A, Cavar, D, Allaerts, D, Meyers, J & Dutrieux, A 2018, 'Comparing Meso-Micro Methodologies for Annual Wind Resource Assessment and Turbine Siting at Cabauw', *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1037, no. 7, 072030. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1037/7/072030>

Svensson, N.; Arnqvist, J.; Bergström, H.; Rutgersson, A.; Sahlée, E. Measurements and Modelling of Offshore Wind Profiles in a Semi-Enclosed Sea. *Atmosphere* **2019**, *10*, 194.

Troen, I. and Petersen, E. L.: European Wind Atlas, Published for the Commission of the European Communities, Directorate-General for Science, Research, and Development, Brussels, Belgium by Risø National Laboratory, https://orbit.dtu.dk/files/112135732/european_wind_atlas.pdf, last accessed 2020-04-23, 1989.

Witha, B., A. N. Hahmann, T. Sile, M. Dörenkämper, Y. Ezber, E. G. Bustamante, J. F. González-Rouco, G. Leroy, et al., 2019: Report on WRF model sensitivity studies and specifications for the mesoscale wind atlas production runs: NEWA Deliverable D4.3. Tech. rep. URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.2682604>

Witha, B. The NEWA Ferry Lidar Benchmark. URL <https://thewindvaneblog.com/the-newa-ferry-lidar-benchmark-bd79009afb26> Senast besökt 2020-04-23, 2018.

Yoshizawa, A.: Statistical theory for compressible turbulent shear flows, with the application to subgrid modelling, *Phys. Fluids*, **29**, 2152, <https://doi.org/10.1063/1.865552>, 1986.

Yoshizawa, A. and Horiuti, K.: A statistically-derived subgrid-scale kinetic energy model for the large-eddy simulation of turbulent flows, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **54**, 2834–2839, 1985.