

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

18/09/2019

Projekttitle: ICE CONTROL

Projektnummer: 853575

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	2. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/04/2016
Projektende	30/06/2019
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	39 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik - ZAMG
AnsprechpartnerIn	Dr. Alexander Beck
Postadresse	Hohe Warte 38, 1190 Wien
Telefon	01 36 0 26
Fax	01 369 12 33
E-mail	alexander.beck@zamg.ac.at
Website	www.zamg.ac.at

ICE CONTROL

AutorInnen:

Alexander Beck, Hildegard Kaufmann, Florian Meier, Viet Tran, Florian Weidle (ZAMG)

Manfred Dorninger, Stefano Serafin, Lukas Strauss (Universität Wien)

Thomas Burchhart, Simon Kloiber (VERBUND)

Saskia Bourgeois, René Cattin, Paul Froidevaux (Meteotest)

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	6
3	Inhaltliche Darstellung	8
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	16
5	Ausblick und Empfehlungen	23
6	Literaturverzeichnis	23
7	Anhang	24
7.1	eologix	24
7.2	Fallstudien	25
8	Abbildungsverzeichnis	27
9	Kontaktdaten	29

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

2 Einleitung

Die Vereisung ist ein zentraler Faktor bei Planung und Betrieb von Windenergieanlagen (WEA) in den Voralpen und Alpen. Sie verursacht hohe Ausgleichsenergiekosten sowie Produktionsverluste und stellt ein potentiell Sicherheitsrisiko (BOKU, 2012) für Passanten und Servicepersonal dar. Für die optimale Betriebsführung werden Messinstrumente benötigt, welche in der Lage sind, Vereisung an den Rotorblättern möglichst früh zu erkennen, und darüber hinaus in der Lage sind auch die Eisfreiheit des Rotorblattes zu messen, damit der normale Betrieb wieder aufgenommen werden kann (Cattin, 2014). Zur besseren Planung der Einsätze des Servicepersonals zum Betrieb der Rotorblattheizung und zur Wiederinbetriebnahme der WEA sind zuverlässige Vereisungsprognosen erforderlich. Des Weiteren werden präzise Vereisungsprognosen für die Erstellung der Fahrpläne benötigt und sind daher für die bestmögliche Integration von Windparks in das bestehende Stromnetz und den Stromhandel unbedingt erforderlich.

Bei Instrumenten zur Eiserkennung gibt es zwei Klassen von Systemen:

1. Punktmessungen auf der Gondel der WEA: Meteorologische Instrumente, welche auf der Gondel einer WEA installiert werden.
2. Messungen am Rotorblatt der WEA: Instrumente, welche im oder auf dem Rotorblatt installiert werden sowie indirekte Ansätze welche eine Aussage zu Eisansatz auf dem Rotorblatt machen können.

Es ist heute anerkannt, dass Messungen am Rotorblatt ausgeführt werden müssen, um einen leistungsoptimierten und sicheren Betrieb einer WEA gewähren zu können. Zusätzlich liefern Messungen am Rotorblatt eine zentrale Grundlage für die Entwicklung und die Validierung von verbesserten Vereisungsmodellen und damit einhergehend für eine verbesserte Simulation der Vereisung (Vereisungskarten und Vereisungsvorhersage).

Als Referenz für Vergleichsmessungen werden in der Regel automatische Kameras eingesetzt. Diese können entweder auf der Gondel oder am Spinner der WEA installiert werden. Die Aufnahme von der Sensorik auf der Gondel einer WEA zur Bestimmung der Vereisungsbedingungen erreicht heute eine sehr hohe Verfügbarkeit und Aussagekraft. Die Aufnahme vom Rotorblatt mit Kameras ist technisch stärker limitiert, insbesondere während der Nacht.

Windleistungsvorhersagen sind heute ein gängiges Instrument in der Energiewirtschaft geworden. Vorhersagen der Produktion für die nächsten Tage dienen fürs Netzmanagement, für den Energiehandel und für die Planung von Wartungseinsätzen. Vereisung kann dazu führen, dass ein Windpark trotz guter Windbedingungen nicht in der Lage ist, die prognostizierte Energie zu produzieren, wodurch ein Ausgleichsenergiebedarf entsteht der Auswirkungen auf die Netzstabilität haben kann. Präzisere Vereisungsvorhersagen können hier einen wichtigen Beitrag für eine verbesserte Integration der Windenergie leisten.

Eine Vereisungsvorhersage besteht in der Regel aus drei Elementen:

1. Numerisches Wettervorhersagemodell: Erzeugt Vorhersagen (Prognosen) der meteorologischen Parameter, welche zu Vereisung führen.
2. Vereisungsmodell: Berechnet basierend auf dem Input des Vorhersagemodells den Eisansatz.
3. Produktionsverlust-Modell: „Konvertiert“ die Vereisungsprognosen in einen Produktionsverlust des Windparks.

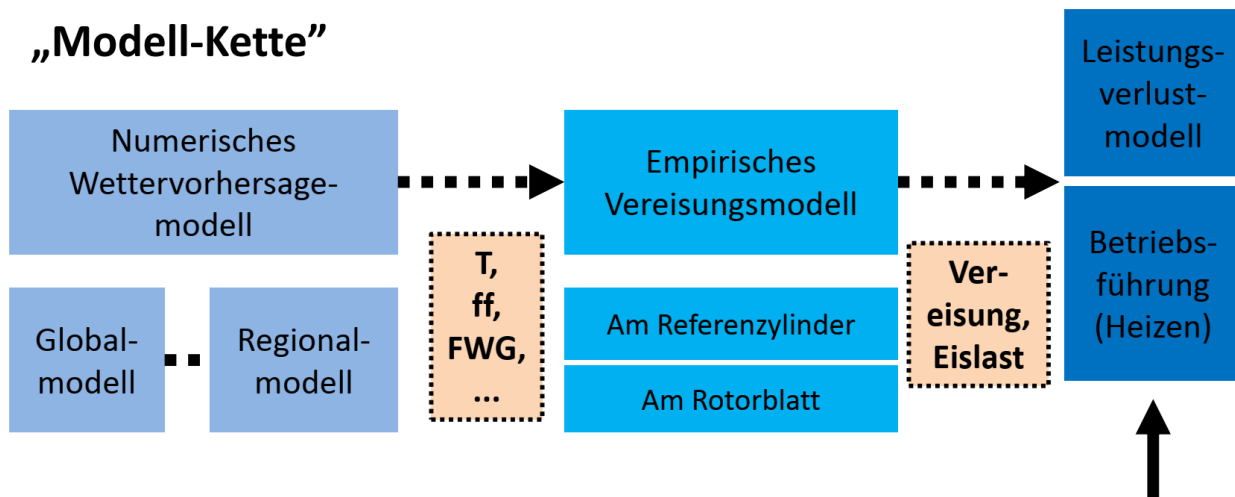


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Modell-Kette: Meteorologisches Modell, Vereisungsmodell sowie Leistungsverlustmodell zur Optimierung der Betriebsführung (=Steuerung der Rotorblattheizung).

Die Validierung der Modellresultate für Windgeschwindigkeit und Temperatur stellt kein Problem dar. Dagegen ist die Verifikation der eigentlich zentralen Größen von Wolkenwasser und Tröpfchenverteilung kaum möglich, da keine Instrumente existieren, welche diese Parameter unter vereisenden Bedingungen messen könnten und daher nur sehr wenige Beobachtungsdaten zur Vereisung vorliegen. Dies gilt einerseits für Wetterstationen aber andererseits und insbesondere auch für WEA, an welchen kaum Beobachtungsdaten vorliegen, welche sich auf das Rotorblatt beziehen.

Ein Vereisungsmodell berechnet aus dem zeitlichen Verlauf der meteorologischen Parameter den Eisansatz an einer Struktur. Das am häufigsten eingesetzte Vereisungsmodell simuliert die Vereisung an einem vertikalen Zylinder (Makkonen, et al., 2001) gemäß dem Standard ISO 12494, 2001. Diese Methodik wurde ursprünglich für die Simulation der Vereisung an Freileitungen entwickelt, um bei der Planung die zu erwartenden Eislasten besser abschätzen zu können. Der Nachteil dieses Ansatzes besteht darin, dass es sich um eine Simulation an der stillstehenden Struktur handelt, welche die Form eines Rotorblattes und die vorherrschenden Windgeschwindigkeiten nicht realistisch wiedergeben kann. Zudem ist die Ablation des Eises (Abschmelzen, Sublimation, mechanische Einwirkungen) nicht ausreichend genau parametrisiert. Während der Beginn eines Vereisungsereignisses und die Phase der Eisbildung bereits relativ gut simuliert werden können, führt die zu schwache Ablation zu einer zu langen Dauer der Vereisungsereignisse und damit zu deutlich überhöhten Eislasten.

Modelle zur Beschreibung des Produktionsverlusts eines Windparks sind heute die größte Unsicherheitskomponente in der Modellkette und es existieren nur wenige, schlecht validierte Modelle.

Einerseits ist schon die Modellierung der Vereisung an einem Rotorblatt mangels geeigneter Modelle mit einer großen Unsicherheit behaftet. Andererseits existieren sehr wenig zuverlässige Beobachtungsdaten von Eisansätzen am Rotorblatt und dem resultierenden Produktionsverlust. Schließlich ist der Produktionsverlust des Windparks sehr stark von der gewählten Betriebsstrategie in Zusammenhang mit der verfügbaren Eiserkennung und allenfalls beheizten Rotorblättern abhängig. Dazu gibt es auch bei den Herstellern von Windkraftanlagen kaum oder keine Angaben.

Vereisungsepisoden führen an WEA im Winterhalbjahr in mittelhohen und höheren Lagen (typischerweise 600-1500 m Seehöhe) zu ungeplanten Stillstandszeiten und in weiterer Folge zu massiven Kosten für die Ausgleichsenergie. Darüber hinaus führen ungenaue Vereisungsprognosen zu erhöhten Ertragsverlusten, Kosten durch den unnötigen Betrieb der Rotorblattheizung und zu zusätzlichen Personalkosten zum Start der Rotorblattheizung und Wiederinbetriebnahme der WEA, da diese nur nach positiver Sichtprüfung auf Eisfreiheit erfolgen darf.

Diese Problematik wird in Österreich durch den weiteren Ausbau von WEA an Standorten im erwähnten Höhenlagenbereich weiter zunehmen, wodurch es in Zukunft zu einer verstärkten Nachfrage nach präziseren Vereisungsprognosen kommen wird. Die Motivation des Projektes ICE CONTROL lag daher in der messbaren Verbesserung dieser Vereisungsprognosen.

3 Inhaltliche Darstellung

Der ausgewählte Windpark Ellern in Rheinland-Pfalz (Deutschland) liegt in hügeligem Gelände auf einer Seehöhe von rund 600m. Vereisungsbedingte Stillstände führen an den höchstgelegenen Windenergieanlagen (WEA) zu Leistungsentgängen von bis zu 10%.

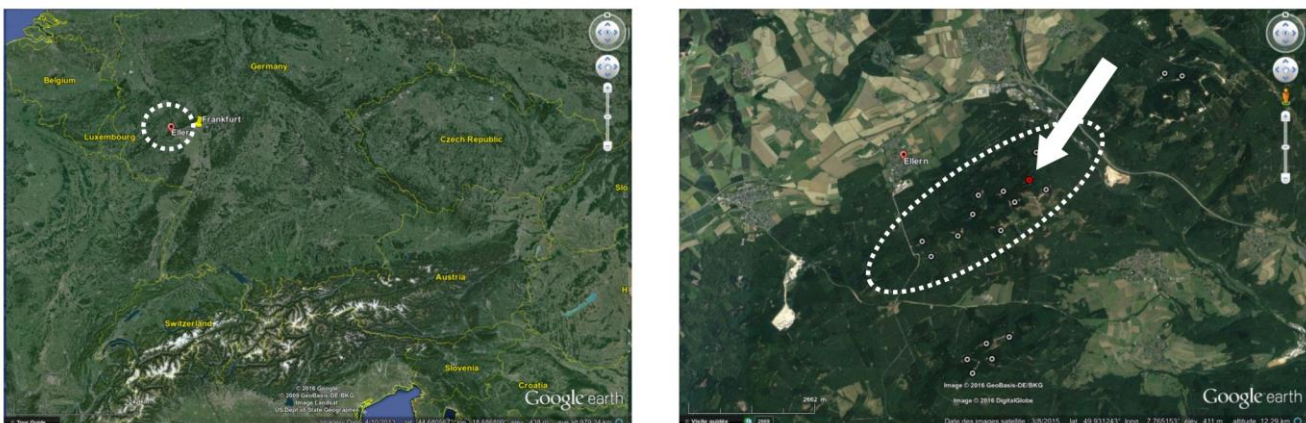


Abbildung 2: Windpark Ellern im Überblick (linkes Bild) sowie Standort der ausgewählten WEA (rechtes Bild, rot markiert).

Die ausgewählte WEA ist die höchstgelegene Anlage im Windpark und daher auch die Anlage mit der potentiell stärksten Vereisung. Eine der WEA wurde im Rahmen des Projektes mit umfangreicher Messsensorik ausgestattet. Diese dient einerseits zur Erfassung von meteorologischen Größen (z.B: Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind) und einerseits zur Abschätzung von Vereisung an der Anlage und insbesondere den Rotorblättern. Folgende meteorologische Parameter wurden auf der Gondel gemessen:

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- Windgeschwindigkeit und Windrichtung (werden in den Betriebsdaten abgespeichert)
- Temperatur/Feuchte (Messgerät: Rotronic)
- Vereisungsstärke (Combitech IceMonitor, nach Standard ISO 12494)
- Vereisungsstärke (Prototyp Sommer IDS-20)
- Vereisung optisch (drei Webcams) inkl. Trigger zur Auslösung der Webcam-Bilder für Ansicht des Rotorblatts
- Nebeltröpfchen (Fog Monitor)
- Vereisung mit zwei eologix-Sensoren (einer beheizt) sichtbar in den Webcam-Bildern als Referenz
- Spektrum der Niederschlagstropfen (Laser Niederschlagsmesser)
- Sichtweite (PWD Wettersensor)

Eine der Hauptkomponenten des Messkonzepts waren die drei Webcams, welche die Vereisungssituation auf der Gondel und auf den Rotorblättern aufzeigte. Alle zehn Minuten wurde ein Bild aufgezeichnet, um die zeitliche Entwicklung der Vereisungssituation zu erfassen. Um auch in der Nacht Bilder aufzuzeichnen zu können, wurden Infrarotscheinwerfer eingesetzt.



Abbildung 3: Blick Richtung Westen von der WEA die im Zuge des Projektes mit Messgeräten und Sensoren ausgerüstet wurde (Foto: VERBUND).

An den Rotorblättern der Anlage befinden sich Sensoren vom Typ eologix (<https://eologix.com>) zur Detektion von Vereisung am Rotorblatt. Dazu werden mehrere Sensoren an unterschiedlichen Stellen auf das Blatt geklebt. Abbildung 4 zeigt Teile des Messsensorik auf der Gondel. Der vertikale (vereiste) Stab in der Mitte entspricht dem Makkonnen-Zylinder.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

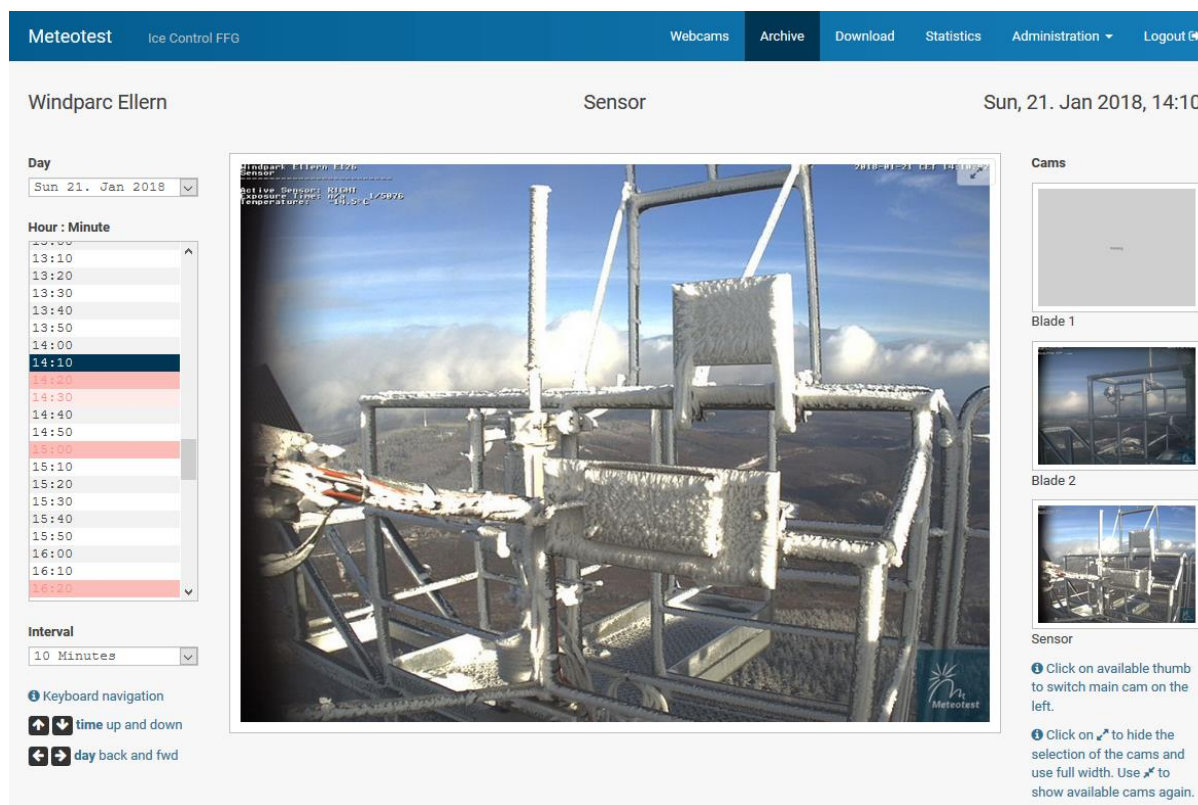
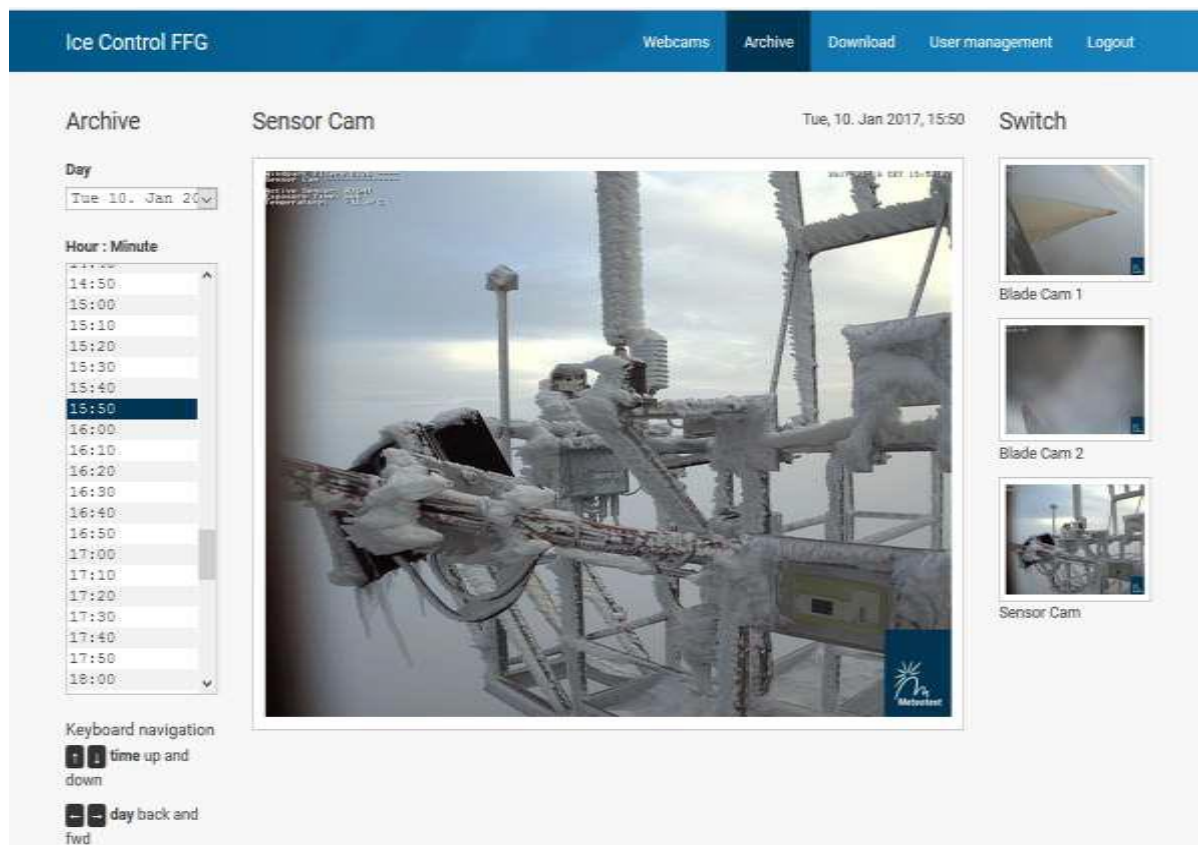


Abbildung 4: Webcam-Bilder der installierten Messsensorik für zwei Vereisungsereignisse.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausgehend von den Eingangsdaten der großskaligen ECMWF-Ensemblevorhersagen wird ein mesoskaliges Modell zum Zwecke der höherauflösenden Vorhersage der Vereisungsparameter Flüssigwassergehalt (Liquid Water Content, LWC), Temperatur und Windgeschwindigkeit verwendet. Im Rahmen des Projektes wurden mit zwei meteorologischen Regionalmodellen (AROME und WRF) Prognosen der Vereisungsparameter berechnet. Zur Erstellung der Modell-Ensembles wurden unterschiedliche Ansätze verfolgt.

Das Makkonen-Modell (Makkonen et al., 2001), das international am häufigsten eingesetzte Vereisungsmodell, wurde an der ZAMG und an der Universität Wien implementiert. Dieses Modell simuliert die Vereisung an einem vertikalen Zylinder (frei rotierbar, 3 cm Durchmesser, mindestens 50 cm Länge, vgl. Standard ISO 12494, 2001) und verwendet als Eingangsdaten im Wesentlichen die meteorologischen Parameter Temperatur, horizontale Windgeschwindigkeit und Wolken- und Regenwasserkonzentration.

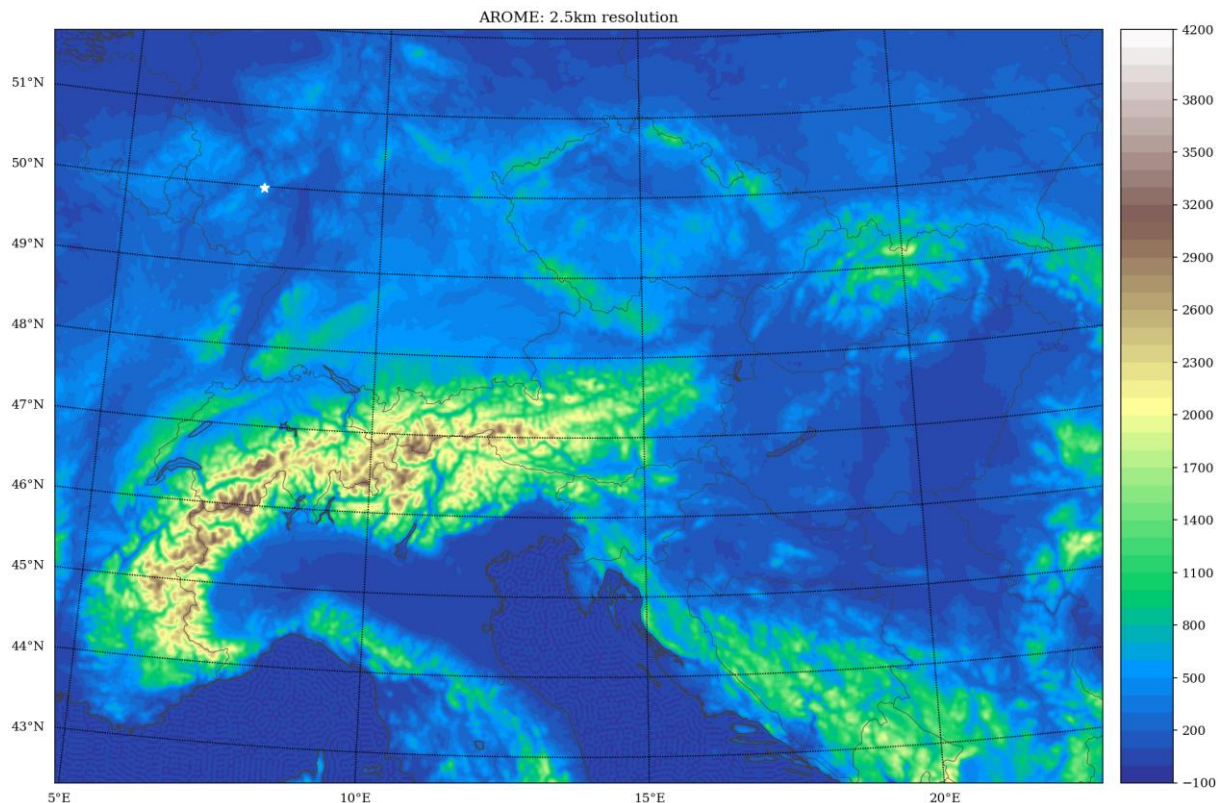


Abbildung 5: Modell-Domäne des AROME Modells der ZAMG (2,5km Auflösung). Der Standort Ellern ist als weißer Stern markiert, die Einfärbung zeigt die Orographie im Modell.

Von der ZAMG wurde das Modell AROME eingesetzt, das an der ZAMG in enger Kooperation mit anderen europäischen Wetterdiensten entwickelt und betrieben wird. Bei AROME handelt es sich um ein spektrales Ausschnittmodell das speziell für horizontale Gitterauflösungen unter 3 km entwickelt wurde. Die derzeit in Verwendung befindliche Modellversion läuft auf 2,5 km horizontaler Auflösung und mit 90 Schichten in der Vertikalen. Das AROME-Modell wird in Kombination mit einem variationellen 3D-Var Assimilationssystem (Brousseau et al., 2011) eingesetzt, um möglichst viele Beobachtungsdaten in den Ausgangszustand der Modellrechnung einbinden zu können. Durch die Auswahl unterschiedlicher

(zusätzlicher) Beobachtungsdaten sowie deren stochastische Störung können mehrere Ausgangszustände erstellt werden, die als Grundlage für das AROME-Ensemble eingesetzt wurden.

Ergänzend zu den bisher angeführten Vereisungsmodellen, wurde das sogenannte Icing-Potential nach Bernstein et al. (2005) ausgewählt. Zum einen ist diese Methode völlig unabhängig von der Makkonen-Methode, welche versucht die wichtigsten physikalischen Prozesse, die bei Vereisung von Strukturen auftritt, abzubilden. Zum anderen bietet das Icing-Potential bereits einen Zugang zur Verwendung von probabilistischen Vereisungsvorhersagen, da nur das Potential, also eine Art Wahrscheinlichkeit, vorhergesagt wird, mit der Vereisung an dem betreffenden Standort auftritt. Die Bernsteinmethode wurde für Flugzeugvereisung entwickelt, konnte an der ZAMG aber in einer Machbarkeitsstudie bereits erfolgreich mit dem hauseigenen Nowcasting System für Windenergieanlagen getestet werden.

Beim Icing-Potential wird der physikalische Zustand der Atmosphäre am zu untersuchenden Standort anhand verschiedener, vereisungsrelevanter meteorologischer Parameter geprüft, und durch Kombination ein Potential für die Vereisung errechnet.

Abbildung 6 zeigt das Vereisungspotential für den Winter 2016/2017 auf Grundlage der AROME Prognosen. Insgesamt hat sich diese Methode allerdings als nicht praktikabel erwiesen, da die Anzahl der unabhängigen Vereisungsfälle zu gering ist und damit die Ergebnisse (sehr) stark von der Wahl der Zugehörigkeitsfunktionen abhängen. Die guten Ergebnisse im ersten Messwinter (Abbildung 6) konnten im zweiten Winter auch nicht bestätigt werden.

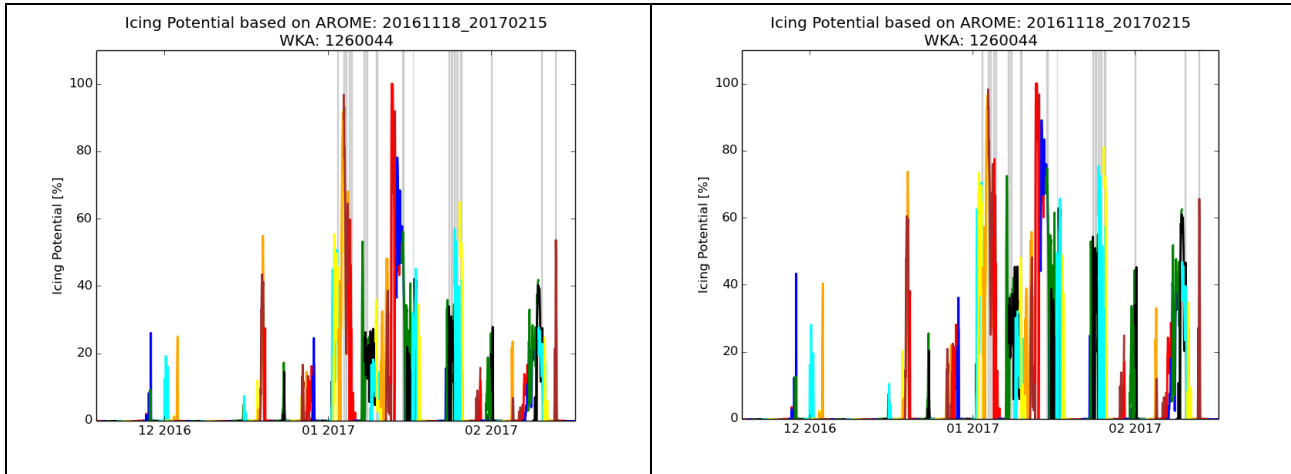


Abbildung 6: Vereisungspotential nach Bernstein et al. (2005) mit unterschiedlichen Zugehörigkeitsfunktionen. Links lineare Funktion, rechts logarithmische. Grau hinterlegt sind Vereisungsperioden aus den Daten (=Vereisungsbedingter Stillstand) der WEA.

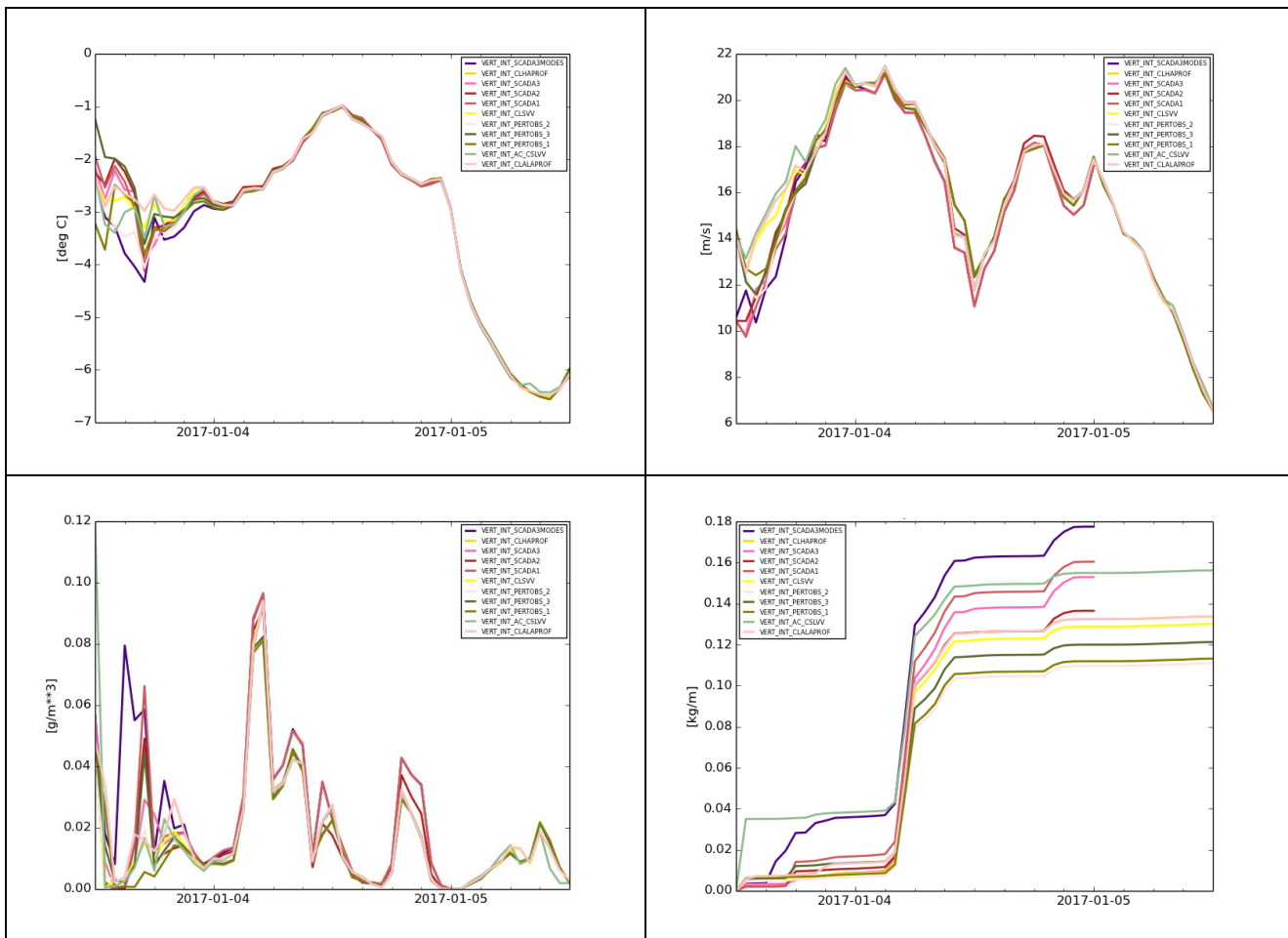


Abbildung 7: Prognosen des AROME- Ensembles für die Windenergieanlage Ellern. Vorhersage vom 3.1.2017 12 UTC für Temperatur (links oben), Windgeschwindigkeit (rechts oben), Wolkenwasser (links unten) und Vereisung aus dem Makkonen-Modell auf Nabenhöhe.

Das von der Universität Wien eingesetzte Modell ist das Weather Research and Forecasting (WRF) Model. WRF wird am National Center for Atmospheric Research (NCAR) der USA entwickelt und enthält die aktuellsten Parametrisierungen der atmosphärischen Grenzschichtphysik sowie der Wolkenphysik, welche für Vereisungsvorhersagen entscheidend sind. Die Konfiguration eines numerischen Wettervorhersagemodells erfordert die sorgfältige Auswahl der Physikparametrisierungen, welche es erlauben physikalische Prozesse, die auf Größenskalen unterhalb der Modellgitterauflösung stattfinden (z.B., die Wolkenphysik) richtig im Modell abzubilden. Die Auswahl dieser Parametrisierungen kann je nach Anwendungsgebiet und Jahreszeit (z.B. Gewittervorhersage im Sommer vs. Vereisungsvorhersage im Winter) unterschiedlich erfolgen. Die Universität Wien hat zur Erstellung des WRF-Ensembles unterschiedliche Parametrisierungen kombiniert.

Es wurden seitens der Universität Wien WRF-Ensembleprognosen für den gesamten ersten und zweiten Messwinter gerechnet. Insgesamt wurden für die Zeiträume 11/2016 bis 03/2017 und 11/2017 bis 03/2018 3300 Ensemblesimulationen auf einen Zeithorizont von 2.5 Tagen gerechnet. Der Modelloutput der Ensemblesimulation betrug in Summe knapp 50 Terabyte

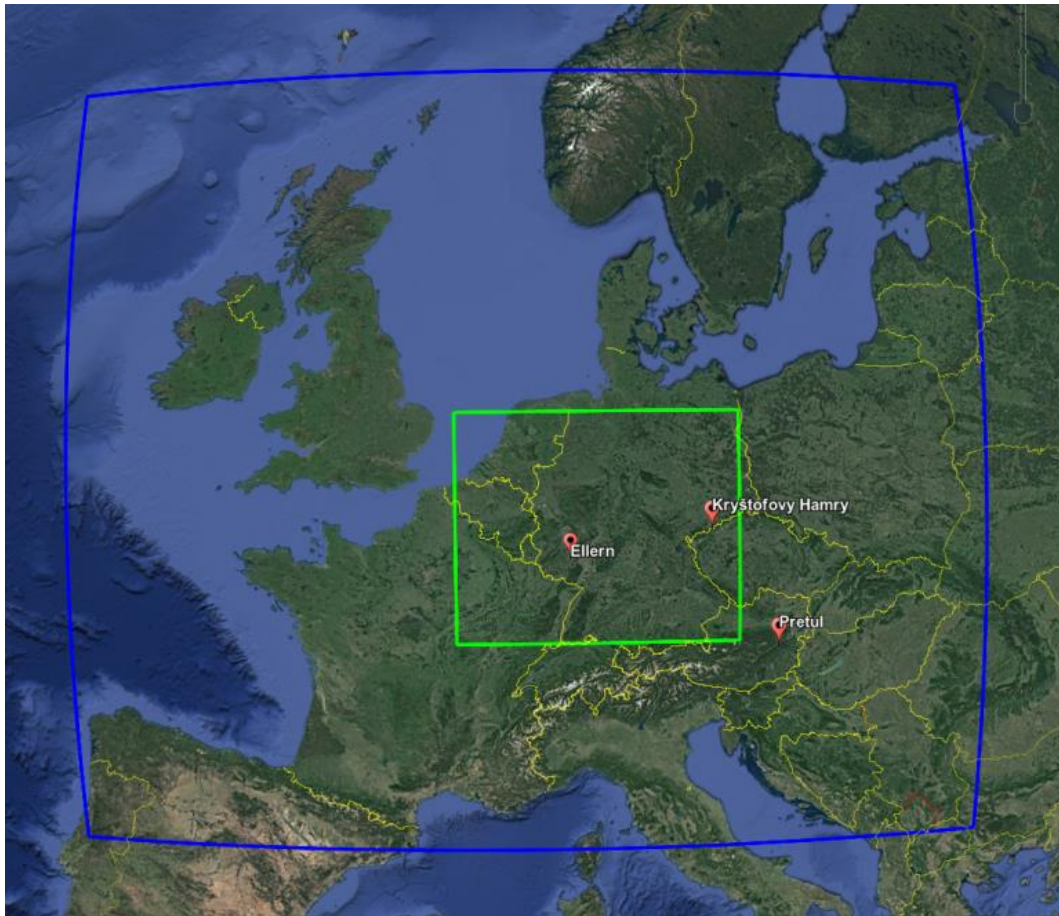


Abbildung 8: Modell-Domänen des WRF Modells der Universität Wien: Äußere Domäne mit 12,5km Auflösung (blau) und innere Domäne mit 2,5km Auflösung (grün). Der Standort Ellern sowie die weiteren untersuchten Standorte Pretul (Steiermark) und Kryštofov Hamry (Tschechien) sind markiert.

Abbildung 9 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer WRF-Vorhersage der Eiszuwachsrates: Wie viel Masse an Eis (kg) bildet sich an einem Meter Struktur (m) pro Stunde (h)? Der Bezug zur Länge der Struktur ergibt sich durch die dem Makkonen-Modell zugrunde liegenden Annahmen (Zylinder mit 3cm Durchmesser und einer Länge von 50cm).

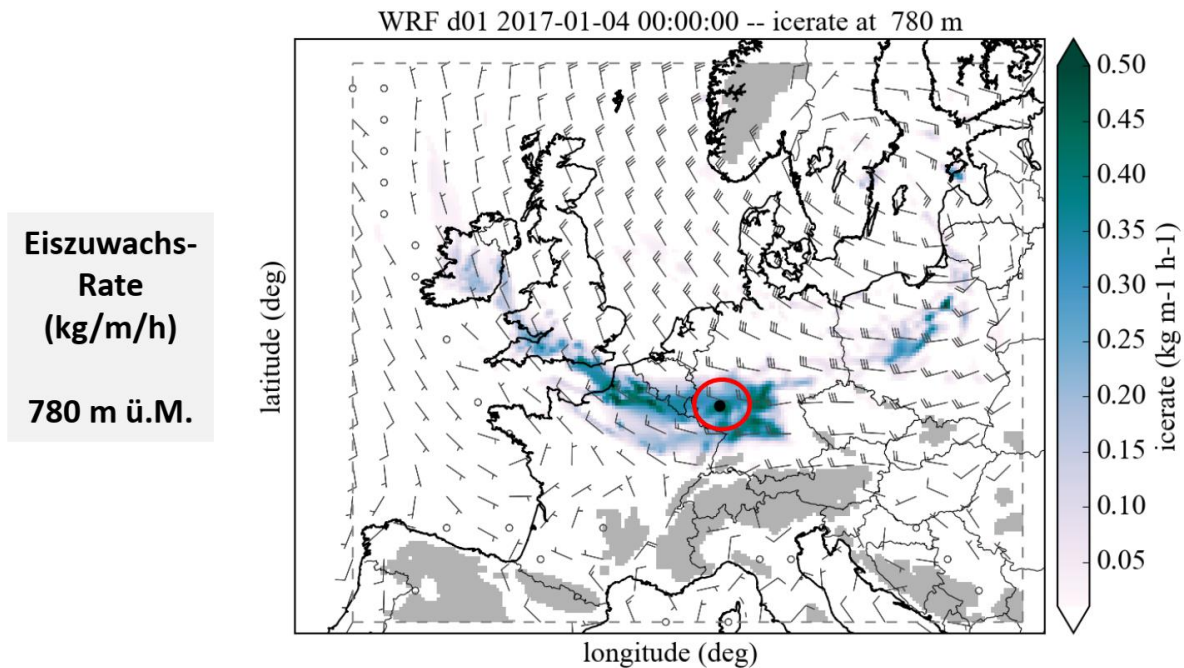


Abbildung 9: Beispiel einer WRF Modellvorhersage der Eiszuwachsrate an der WEA. Die Höhe 780 m ü. M. entspricht der Gondelhöhe an der betrachteten Windenergieanlage.

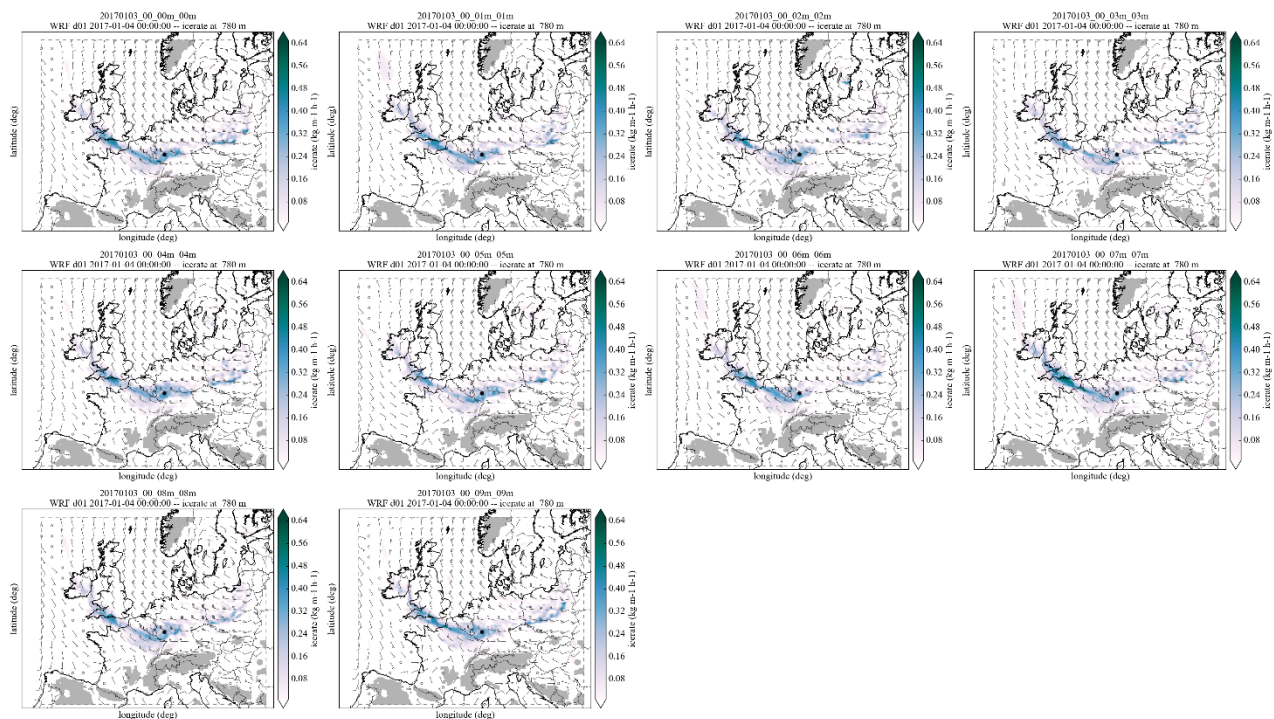
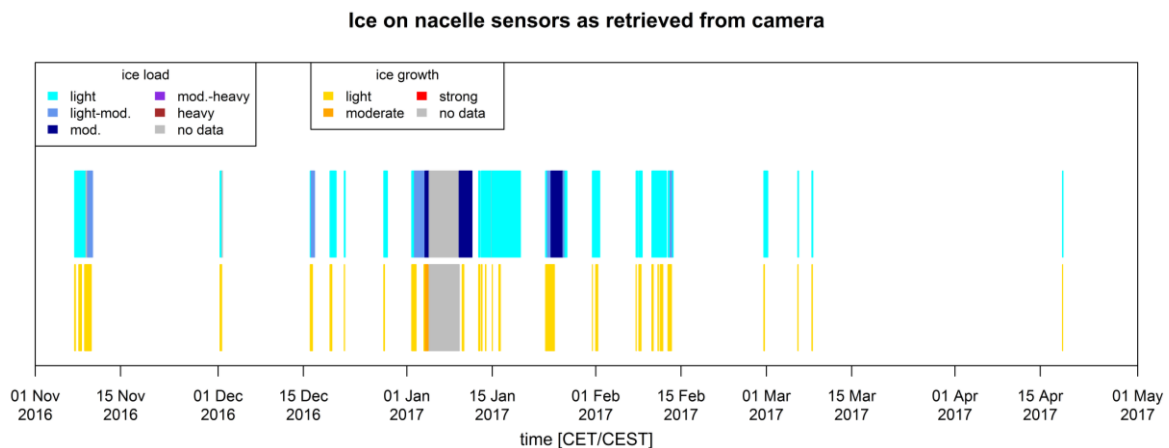


Abbildung 10: Karten der Vereisungsrate auf 780 m Höhe über Meer am 4. Jänner 2017, 00 Uhr UTC für 10 verschiedene Simulationen des WRF-Ensembles auf 12.5 km.

Ergänzend zum Makkonen-Modell wurde das Modell IceBlade (Davis et al., 2014) herangezogen. Es wurde für eine optimale Ankopplung an das WRF Modell entwickelt. Es stellt ein erweitertes Makkonen-Modell dar unter der Annahme, dass ein Rotorblatt als bewegter Zylinder modelliert werden kann, ferner enthält es auch ein Modell zur Ablation. IceBlade basiert auf den Annahmen, dass der Fluss von unterkühlten Wassertröpfchen auf das Blatt proportional ist zu dessen Tangentialgeschwindigkeit und dass der Eiszuwachs sich auf die Vorderkante des Rotorblattes konzentriert, dessen geometrische Form als Kreis mit einem bestimmten Radius beschrieben werden kann. Darüber hinaus simuliert die Standardversion von IceBlade wie in Davies (2014) beschrieben, die Vereisung auf einer spezifischen Stelle des Rotorblattes (85% ihrer Länge) für eine Referenzturbinen, welche beträchtlich kleiner ist, als jene von der betrachteten Turbinen in Ellern. Neben dem Modul zur Berechnung des Eiszuwachses enthält IceBlade auch Module zur Berücksichtigung von Sublimation, Schmelzen und Eisabwurf. IceBlade wurde an der Universität Wien in Python neu implementiert

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Webcam-Bilder wurden nach beiden Messwintern systematisch analysiert und klassiert. Dabei wurde der Schwerpunkt auf die Kamerabilder gelegt, welche die Sensoren auf der Gondel zeigte. Die Bilder wurden hinsichtlich Eislast und Eiszuwachs in fünf bzw. drei Klassen eingeordnet. Abbildung 11 zeigt grafisch die Resultate der Klassierung für beide Winter.



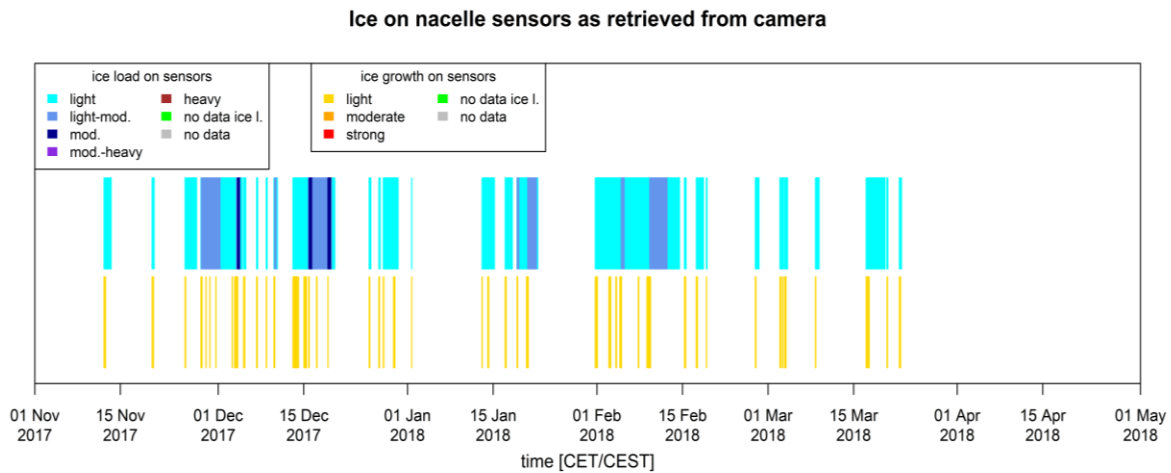


Abbildung 11: Klassierung der Webcam-Bilder für 2016/17 (oben) und 2017/18 (unten): Für jedes 10-Minutenintervall ist in hell- bis dunkelblau die beobachtete Eislast (5 Klassen), in gelb- bis rot das Eiswachstum (3 Klassen) ersichtlich.

Die Kopplung des WRF Modells mit dem Makkonen-Vereisungsalgorithmus wurde erfolgreich durchgeführt. Für ausgewählte Fallstudien vom Winter 2016/2017 wurden, ausgehend von den meteorologischen Ensemblevorhersagen, Ensembleprognosen der Vereisung zusammengestellt.

Um die Unsicherheiten im Modell abschätzen zu können, wurde die Sensitivität der Modellergebnisse auf zufällige Störungen relevanter Modellparameter getestet. Sämtliche IceBlade Ergebnisse basieren auf stochastische Störungen der Modellparameter. Jeder IceBlade Lauf besteht aus 50 Läufen unterschiedlicher Kombinationen der stochastischen Störungen.

Abbildung 12 zeigt die berechneten Zeitreihen der Eingangsgrößen des Makkonen-Modells (Wolkenwassergehalt, Regenwassergehalt, Temperatur und Windgeschwindigkeit) sowie die daraus resultierenden Vereisungsgrößen (Vereisungsrate und kumulierte Eislast) auf der Gondelhöhe einer Turbine im Windpark Ellern, Deutschland. Der vorhergesagte Eislastbereich für diesen Fall ist 1.5 bis 3.5 kg/m. Er stimmt größenordnungsmäßig mit der gemessenen Eislast für diesen Fall (bis 1.2 kg/m) überein. Aus Abbildung 12 ist außerdem ersichtlich, dass der Wolkenwassergehalt die für die Breite des Eislastbereichs hauptverantwortliche Komponente ist. Während sich die Ensemble-Members in Windgeschwindigkeit und Temperatur kaum unterscheiden, ist es besonders der Wolkenwassergehalt, der in seinem zeitlichen Auftreten und seiner Intensität variiert, und damit die Unterschiede in den Vereisungsvorhersagen maßgeblich bestimmt.

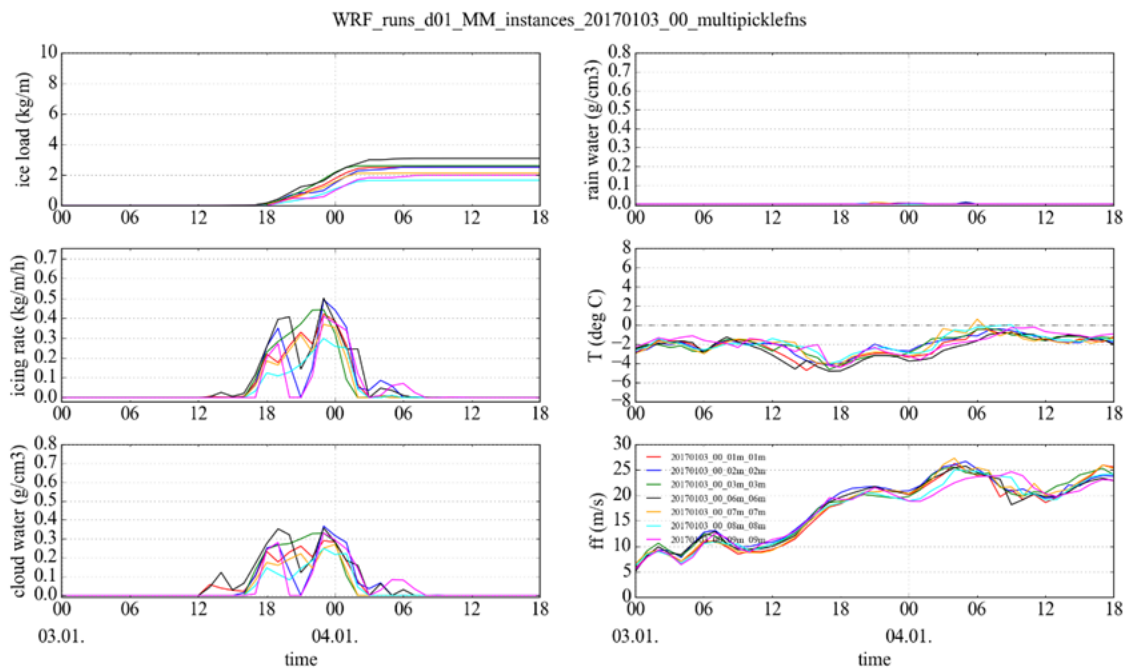


Abbildung 12: Eingangsparameter des Makkonen-Modells und daraus resultierende Vereisungsvorhersagen für eine Windenergieanlage im Windpark Ellern für den Vereisungsfall am 3.1. und 4.1.2017. Linke Spalte: Eislast, Vereisungsrate, atmosphärischer Wolkenwassergehalt; rechte Spalte: Regenwassergehalt, Temperatur, Windgeschwindigkeit.

Störungen des IceBlade-Modells (Unsicherheit des Vereisungsmodells) wurden durch den Antrieb von IceBlade mittels des 2.5 km Auflösung des WRFMP Ensembles (Unsicherheit des meteorologischen Modells) erzeugt.

Um die Vergleichbarkeit der IceBlade Modellergebnisse mit den Eologix Daten zu verbessern, wurde ein künstliches Eisentfernungskriterium eingeführt. Die modellierte Eislast wird sofort komplett abgeschmolzen, wenn das Blattheizungssystem aktiviert wird. Ein Vergleich von Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigt, dass eine Kombination von WRF-Ensemble und IceBlade relativ zuverlässig Vereisungsperioden des Rotorblattes prognostizieren kann. Jedoch tendiert IceBlade dazu die Eislast im äußeren Blattbereich ($x > 45$ m) zu überschätzen, andererseits im mittleren Bereich des Rotorblattes ($25 \text{ m} < x < 45 \text{ m}$) zu unterschätzen. Dies könnte in Zusammenhang mit der nicht bekannten exakten Blattgeometrie stehen. Darüber hinaus zeigt sich, dass die modellierte Eisakkretion sehr stark von den Vorhersagen des Flüssigwassergehalts abhängt unter der Voraussetzung, dass die Temperatur weniger als 0 Grad C beträgt. Hohe Eislasten werden nur bei hohen Werten des Flüssigwassergehalts prognostiziert. Im Gegensatz dazu erfolgt Eisablation praktisch nur wenn die Temperatur < 0 Grad C beträgt (Eisabwurf ausgenommen). In der Praxis impliziert das das Problem, dass bei Erstellung der Vereisungsprognosen natürlich keine Informationen über eine eventuelle Aktivierung der Blattheizung während des Vorhersagezeitraumes vorliegen und berücksichtigt werden können.

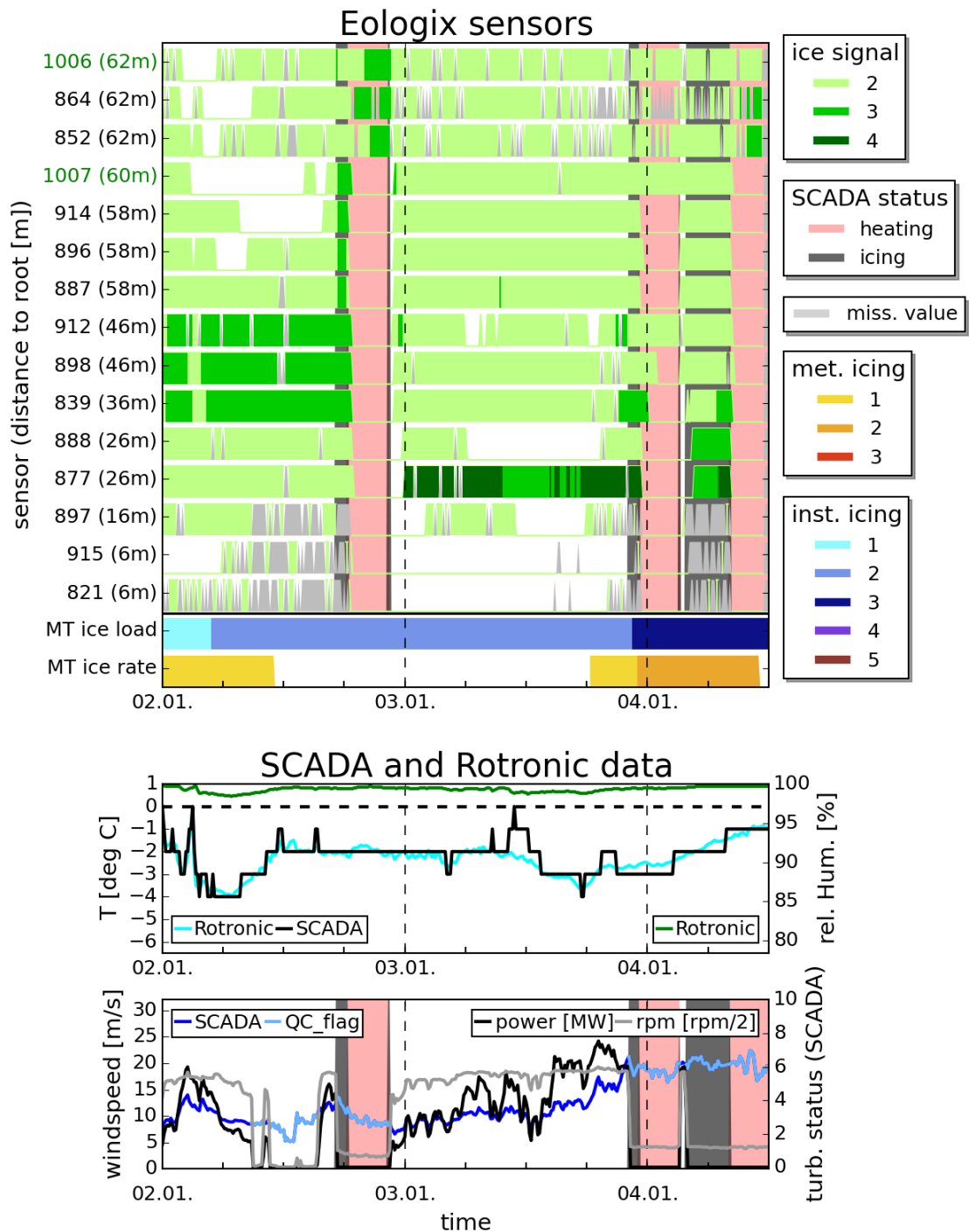


Abbildung 13: Vereisungsmessungen auf der WEA in Ellern zwischen 2. und 4. Jänner 2017. Farbcodes in den Legendes geben die Vereisungsstärke als Codezahl gegeben durch die eologix Sensoren, die Vereisungsstärke, die Vereisungsrate abgeleitet von den Webcam Bildern und dem Status der Blattheizung an („SCADA status“) an. Die unteren beiden Abbildungen zeigen Messungen unterschiedlicher meteorologischer Parameter an.

Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen einen Vergleich zwischen einem beobachteten mäßig starken Vereisungsevent und der IceBlade Wahrscheinlichkeitsprognose der Vereisung. Die stochastischen

Zum detaillierten Vergleich der Messsysteme wurden basierend auf der Vereisung der Rotorblätter alle Vereisungsereignisse des Leistungskurvenverfahrens mit den detektierten Vereisungsereignissen der eologix Sensoren betrachtet. Die Auswertung zeigte eine gute Übereinstimmung für starke Vereisungsereignisse während bei moderaten bis schwachen Vereisungsereignissen sehr unterschiedliche Messergebnisse vorlagen.

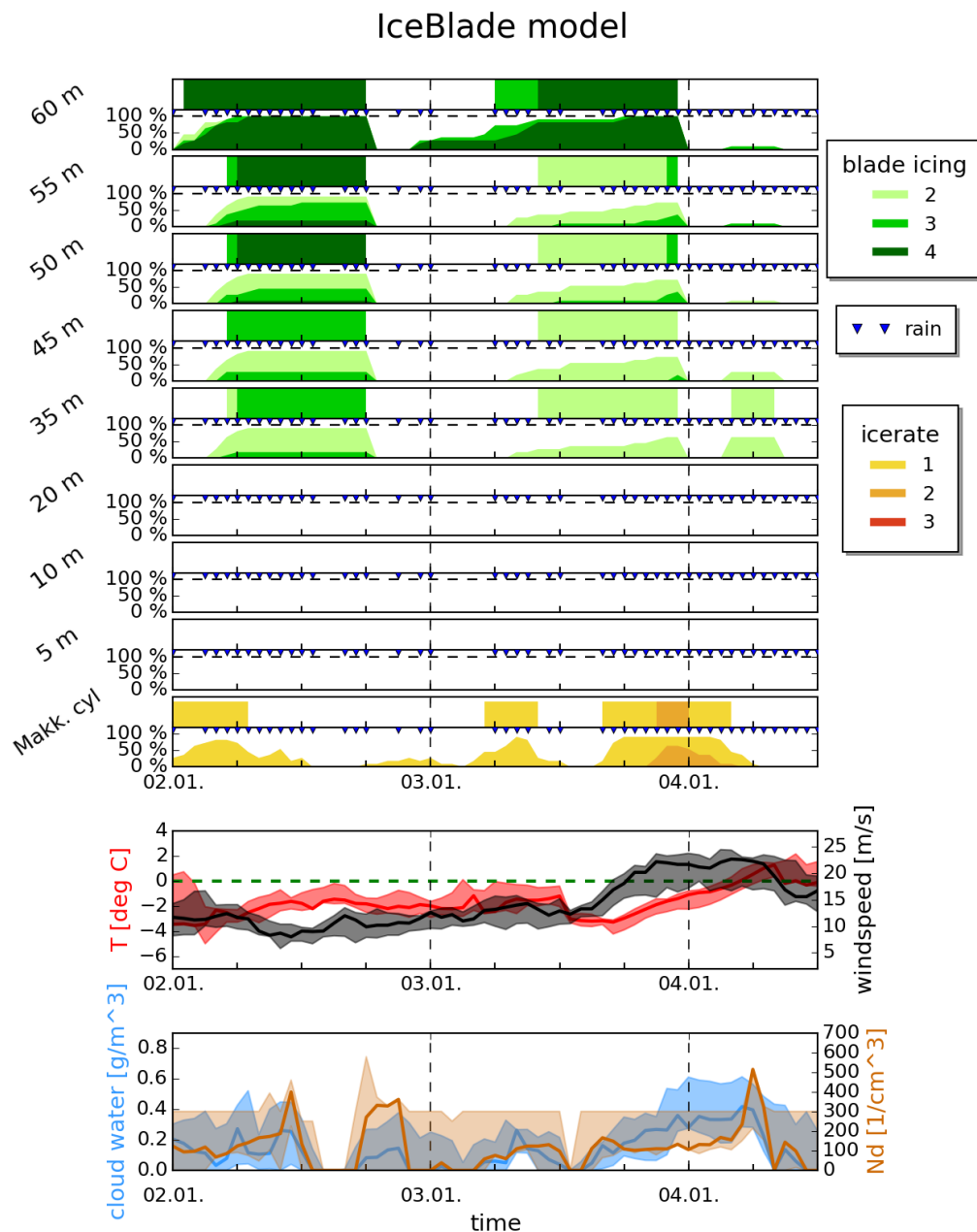


Abbildung 14: Vorhersagen von Vereisung (IceBlade-Modell, obere Abbildung) und (WRF-Ensemble, unten) berechnet für 2. bis 4. Jänner 2017. Obere Abb.: IceBlade Vereisungsprognosen für unterschiedliche Blattpositionen angegeben als auch für die Vereisungsprognosen des Makkonenmodells. Jedes Diagrammpaar für jede Höhe gibt die Vorhersage durch den Control Ensemble Member (oberes Diagramm) und die Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Eisklassen (unteres Diagramm) an. Die unteren Abbildungen zeigen probabilistische Vorhersagen relevanter meteorologischer Parameter.

Abbildung 15 zeigt exemplarisch ein Vereisungsereignis vom 10. Jänner 2017 um 00:50 Uhr bei dem sowohl das Leistungskurvenverfahren (orange) als auch das eologix Eisdetektionssystem (blau) Vereisung am Rotorblatt detektiert hat. Zusätzlich wurden sowohl das Eiswachstum als auch instrumentelle Vereisung auf Basis der Webcam Bilder bzw. auf Basis der Wetterstation festgestellt.

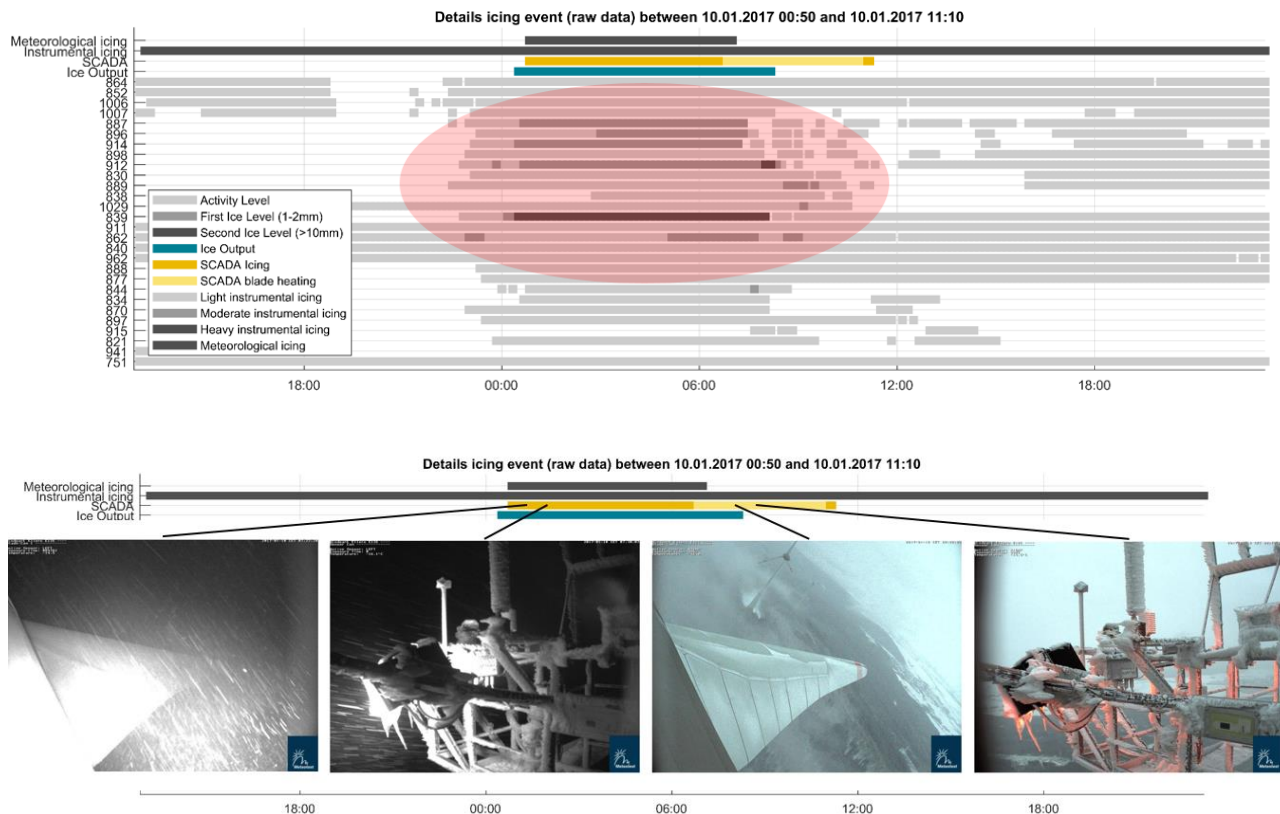


Abbildung 15: Details zum Vereisungsereignis am 10. Jänner 2017 um 00:50 Uhr. Der rot markierte Bereich zeigt Vereisung auf mehreren eologix Sensoren auf verschiedenen Positionen an den Rotorblättern.

Die Betriebsoptimierung der Rotorblattheizung ist ein wichtiger Bestandteil zur innovativen Betriebsführung. Derzeit erfolgt der Start der Rotorblattheizung manuell durch den Mühlenwart vor Ort in der Windenergieanlage, die Blattenteisung wird daher nur reaktiv betrieben. Die Dauer der Blattenteisung ist auf den Default Wert von vier Stunden eingestellt. Durch die Installation der eologix Sensoren verteilt auf den Rotorblattoberflächen besteht nun erstmals die Möglichkeit die Oberflächentemperaturen der Blätter an exakt definierten Positionen zu messen und daraus Rückschlüsse auf die Performance der Rotorblattheizung zu schließen. Abbildung 16 zeigt den Temperaturverlauf der Wetterstation (MET), der Umgebungstemperatur aufgezeichnet in der Windenergieanlage (WEA), den zwei eologix Sensoren auf der Gondel (751 und 941) sowie den restlichen 26 Stück eologix Sensoren verteilt auf die Rotorblätter nur für Zeiten während die Blattenteisung aktiv war. Aus den resultierenden Boxplots der Einzelsensoren kann qualitativ sehr schnell erkannt werden, welche Bereiche der Rotorblätter beheizt und welche unbeheizt sind.

Die Ziele des Projektes wurden erreicht. Insbesondere wurden die Optimierungspotentiale ausgezeigt, welche durch den Einsatz von Vereisungsprognosen für eine innovative Betriebsführung der

Windenergieanlage (WEA) möglich werden. Der (optimierte) Betrieb der Rotorblattheizung konnte als Schlüsselkriterium zur Effizienzsteigerung identifiziert werden.

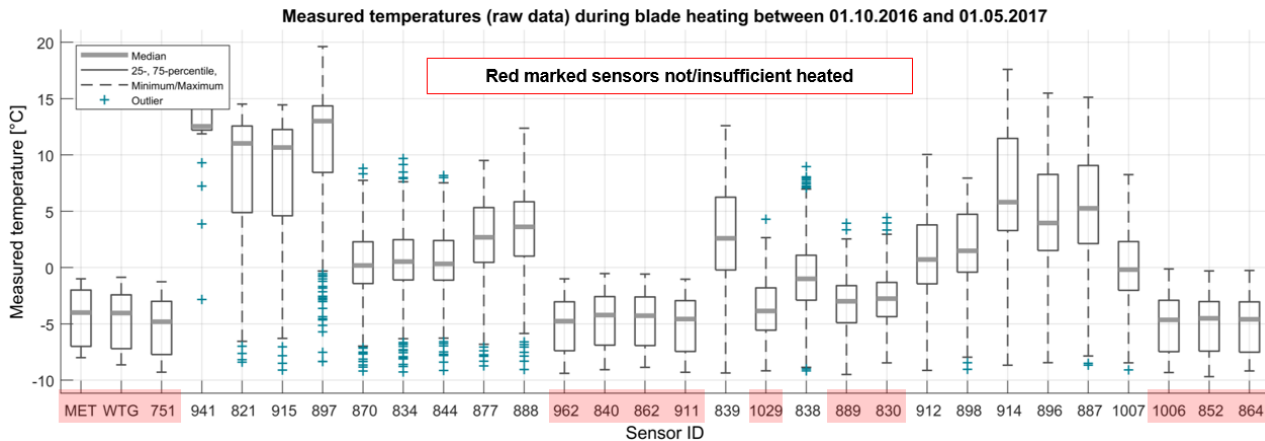


Abbildung 16: Verteilung (Boxplots) der Einzelsensortemperaturen während aktiver Blattheizung.

Als wesentliche Grundlage für den Erfolg des Projektes wurde innerhalb des Konsortiums ein Messkonzept entwickelt und erfolgreich umgesetzt. Die vereisungsrelevanten Messungen (Webcam-Bilder sowie Aufzeichnungen der unterschiedlichen Sensoren) wurden während der zwei Wintersaisons 2016/17 sowie 2017/18 erfolgreich durchgeführt. Die systematische Auswertung und Klassifizierung der Webcam-Bilder hat sich in weiterer Folge als zentrale Komponenten für die Verifikation der Modelle herausgestellt.

Die im Rahmen des Projektes entwickelten umfangreichen Software-Pakete zur Verifikation der deterministischen und probabilistischen Vorhersagen stellen auch nach Abschluss des Projektes eine wichtige Grundlage für die Weiterentwicklung der Vorhersagesysteme dar.

Die Kopplung der meteorologischen Modelle mit den Vereisungsmodellen hat sich als vergleichsweise einfach herausgestellt, sodass letztendlich zusätzliche Ressourcen für die Weiterentwicklung der meteorologische Prognosesysteme zur Verfügung stand. So konnten an der ZAMG zusätzliche Beobachtungsdaten für die Modellinitialisierung aufbereitet und verwertet werden. An der Universität Wien konnten letztendlich für beide Messwinter vollständige Ensemble-Prognosen mit unterschiedlichen Konfigurationen gerechnet werden, was für die Qualität der Auswertungen (Verifikation) einen wesentlichen Vorteil gebracht hat.

Die nicht unerwarteten Herausforderungen bei der Messung von Vereisung haben letztendlich dazu geführt, dass die Auswertungen der Webcam-Bilder als Grundlage für die Verifikation herangezogen wurden. Somit konnte allerdings die Eislast nur in Klassen bewertet werden. Aufgrund der Länge der Rotorblätter war es allerdings teilweise schwierig festzustellen, wie stark die Vereisung an der Rotorspitze war. Zudem zeigen Kamerabilder in der Regel die Hinterkante (Saugseite) des Rotorblatts, wobei die Vorderkante des Rotorblattes hinsichtlich Vereisung ebenfalls relevant ist. Des Weiteren war die Qualität der Bilder bei Nebel und/oder in der Nacht häufig nicht befriedigend. Die quantitative Bewertung der Vereisung am Rotorblatt ist (sehr) schwierig, da diese immer durch die Betriebsweise der Windenergieanlage beeinflusst wird. Dadurch ist die Festlegung der Schwellwerte speziell für die Eislast

und Eiszuwachsrates für die einzelnen meteorologischen Parameter am jeweiligen Standort schwierig. Letztendlich sind allerdings diese Schwellwerte eine wesentliche Komponente für eine innovative Betriebsführung.

Die Anzahl der Vereisungsereignisse in den beiden Wintern am Standort Ellern war vergleichsweise gering, was aus Sicht der objektiven Bewertung (Verifikation) zu Einschränkungen führt. Durch die Kooperation anderer Betreiber von Windparks konnten allerdings umfangreiche zusätzliche Daten gewonnen werden. Damit konnte die Anzahl der Vereisungsereignisse letztendlich mehr als Verdoppelt werden.

5 Ausblick und Empfehlungen

Die Erstellung von zuverlässigen Vereisungsprognosen ist und bleibt eine Herausforderung. Die damit verbundenen Unsicherheiten können nur den Einsatz von Ensembleansätzen abgebildet werden. Die Übertragung der Vereisungsprognosen auf die jeweilige Windenergieanlage stellt eine weitere Herausforderung dar, die letztlich für jeden Standort und Typ einzeln zu betrachten ist. So konnte beispielsweise im Rahmen des Projektes gezeigt werden, dass durch eine Änderung der Betriebsweise der Rotorblattheizung auf Basis der Vereisungsprognosen, vereisungsbedingte Produktionsverluste im erheblichen Umfang reduziert werden. Somit liegt das größte Optimierungspotential im intelligenten Betrieb der Rotorblattheizung.

Der Einsatz von Webcams auf der Gondel von WEA hat sich als sehr effizient erwiesen bei der Bestimmung der Eislasten und des Eiszwachstums auf der WEA. Die systematische Auswertung der Webcam-Bilder hat sich als essentielle Grundlage zur Bewertung der Qualität der Vereisungsprognosen herausgestellt.

6 Literaturverzeichnis

BOKU, 2012: Beobachtung von Eisabfall von Windkraftanlagen.

https://forschung.boku.ac.at/fis/suchen.projekt_uebersicht?sprache_in=de&menue_id_in=300&id_in=9056.

Brousseau P. and Coauthors, 2011: Background error covariances for a convective-scale data-assimilation system: AROME-France 3D-Var. Q. J. R. Meteorol. Soc. 137: 409–422.

Cattin, R., 2014: Operation of wind parks under icing conditions – a balancing act between production and safety. VGB Powertech 9/20.

Davis, N., Hahmann AN, Clausen NE, Žagar M., 2014: Forecast of icing events at a wind farm in Sweden. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 53, 262–281.

ISO 12494: 2001: Atmospheric icing of structures, International Standard

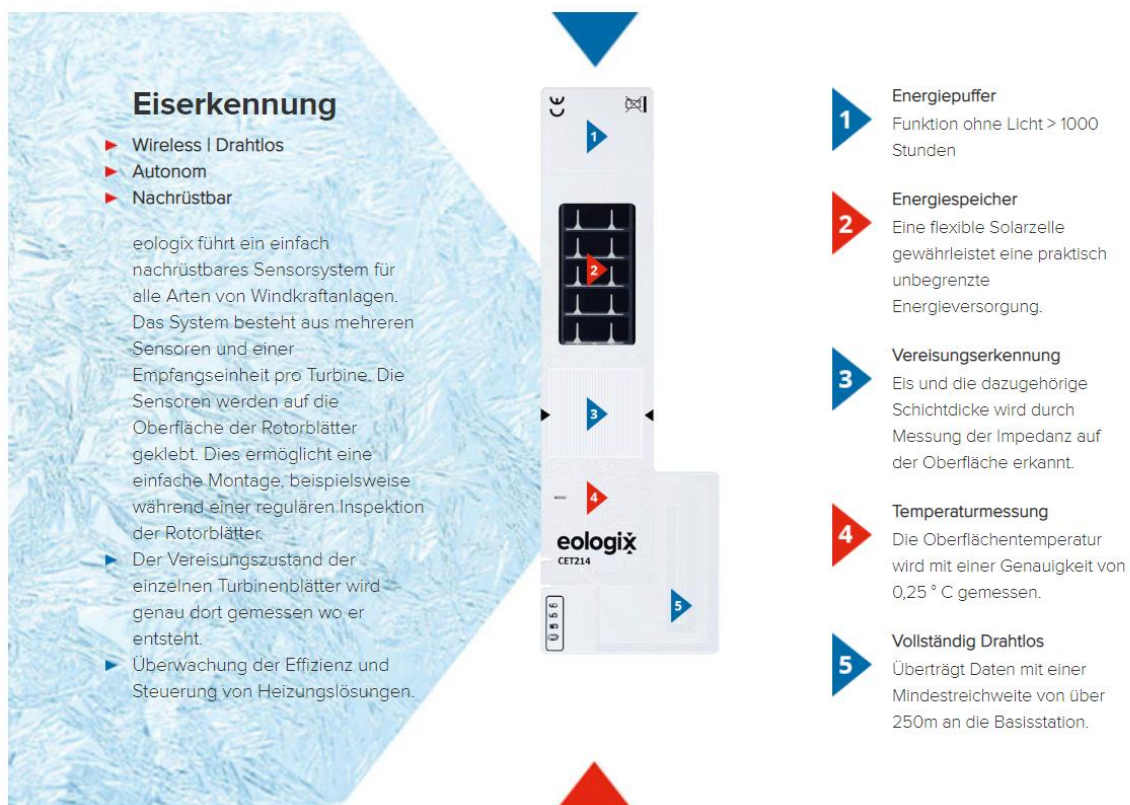
Makkonen, L., 2000: Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures. Philos. Trans. Roy. Soc., 358A, 2913–2939.

Makkonen, L. and Coauthors, 2001: Modelling and Prevention of Ice Accretion on Wind Turbines, Wind Engineering January 2001 vol. 25 no. 1 3-21, doi: 10.1260/0309524011495791

7 Anhang

7.1 eologix

Übersicht und Aufbau des eologix-Messsystems (Quelle: eologix.com).



Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Sensoreinheit

- ▶ drahtlose, flexible, intelligente Sensoren
- ▶ werden durch gespeicherte Sonnenenergie nahezu unbegrenzt mit Energie versorgt
- ▶ messen die Temperatur mit einer Auflösung von 0.25°C
- ▶ können Vereisungen mit einer Dicke von unter 1 mm erkennen*
- ▶ sind flexibel und dünn (unter 2 mm)
- ▶ können an jeder Stelle auf den Rotorblättern, aber auch auf der Gondel oder dem Turm angebracht werden
- ▶ werden als selbstklebender Patch mit einer Erosionsschutzfolie geliefert, und können innerhalb weniger Minuten montiert werden

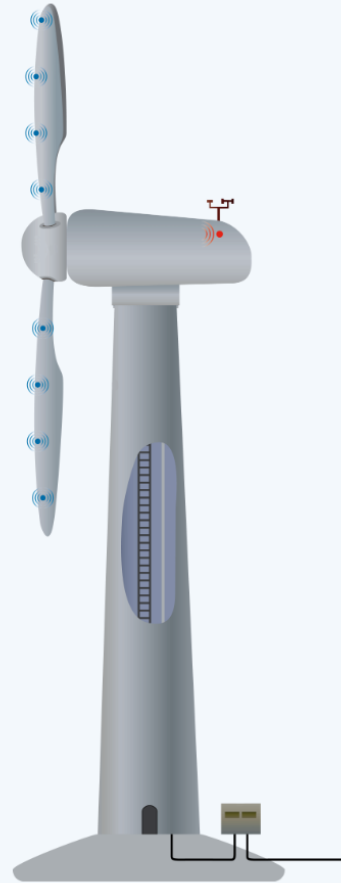
* Durch Tests in einem Vereisungswindkanal bestätigt

Empfangseinheit (Basisstation)

- ▶ empfängt die Daten der Sensoren
- ▶ kann am Boden, in der Gondel, in der Nabe, der Blattwurzel oder im Turm montiert werden (Es ist nur eine Basisstation pro Turbine erforderlich)
- ▶ kann in das bestehende CMS oder andere Kontrollsysteme integriert werden
- ▶ verfügt über eine Vielzahl von verfügbaren Schnittstellen (CAN, RS485, Modbus TCP/IP, Web Server, Ethernet, GSM)
- ▶ verfügt über eine Vielzahl an optionalen Schnittstellen (Modbus RTU, CANopen, EtherCAT, PowerLink, Profibus, etc.)

DNV-GL Zertifizierung

Das Komponentenzertifikat DNV-GL bescheinigt, dass das zertifizierte eologix-Sensorsystem vollständig den DNV GL Richtlinie GL-IV-1:2010 entspricht.



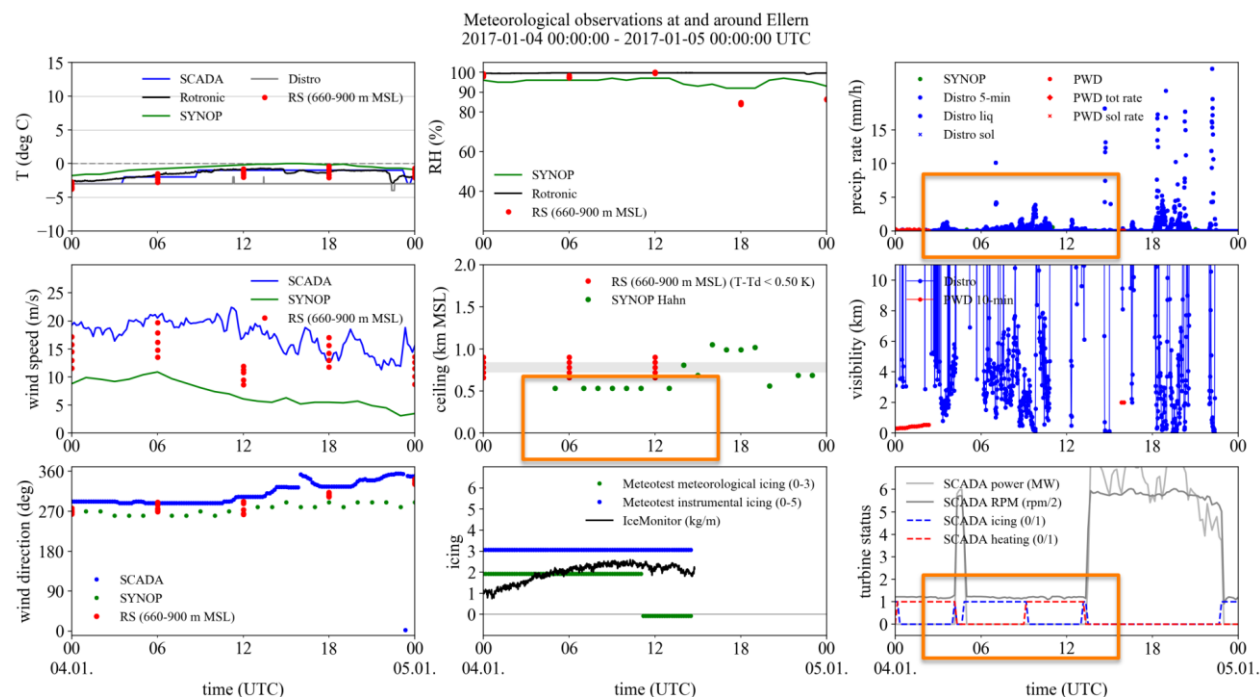
7.2 Fallstudien

Die beiden Fallstudien sind im Zuge der Bachelor Arbeit von Martin Schneider entstanden und zeigen eine Übersicht über alle vorhandenen Messdaten und abgeleiteten Größen sowie zugehörige Webcam-Bilder. Betrachtet werden zwei Fälle aus dem Jänner 2017. Die Abbildungen zeigen (von links oben nach rechts unten, zeilenweise): Temperaturmessungen unterschiedlicher Sensoren, relative Feuchte, Niederschlagsrate, Windgeschwindigkeit, Wolkenuntergrenze, Sichtweite, Windgeschwindigkeit, Vereisung, Betriebszustand der WEA (Vereisung, Heizung)

Schneider M., Case studies of wind turbine icing at a wind farm in Ellern, Germany during winter 2016/17, Bachelor Thesis 2017, University of Vienna, 42 pp

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

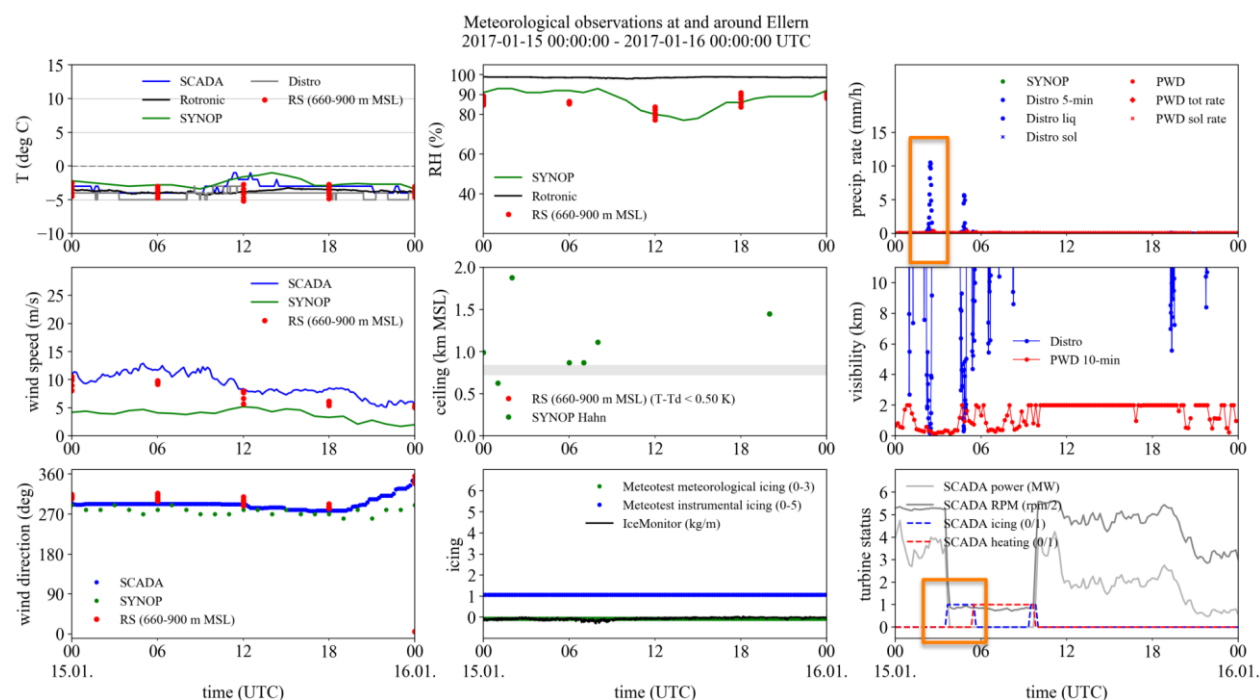


Rückblick - Vereisungsfälle Winter 2016/17 - Vereisungstyp-Kategorisierung - Fallstudien - Zusammenfassung

20



04.01.2017 – 1030 UTC



Rückblick - Vereisungsfälle Winter 2016/17 - Vereisungstyp-Kategorisierung - Fallstudien - Zusammenfassung

26



15.01.2017 – 0230 UTC

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Modell-Kette: Meteorologisches Modell, Vereisungsmodell sowie Leistungsverlustmodell zur Optimierung der Betriebsführung (=Steuerung der Rotorblatttheizung). 7
Abbildung 2: Windpark Ellern im Überblick (linkes Bild) sowie Standort der ausgewählten WEA (rechtes Bild, rot markiert).8

Abbildung 3: Blick Richtung Westen von der WEA die im Zuge des Projektes mit Messgeräten und Sensoren ausgerüstet wurde (Foto: VERBUND).	9
Abbildung 4: Webcam-Bilder der installierten Messsensorik für zwei Vereisungsereignisse.	10
Abbildung 5: Modell-Domäne des AROME Modells der ZAMG (2,5km Auflösung). Der Standort Ellern ist als weißer Stern markiert, die Einfärbung zeigt die Orographie im Modell.	11
Abbildung 6: Vereisungspotential nach Bernstein et al. (2005) mit unterschiedlichen Zugehörigkeitsfunktionen. Links lineare Funktion, rechts logarithmische. Grau hinterlegt sind Vereisungsperioden aus den Daten (=Vereisungsbedingter Stillstand) der WEA.....	12
Abbildung 7: Prognosen des AROME- Ensembles für die Windenergieanlage Ellern. Vorhersage vom 3.1.2017 12 UTC für Temperatur (links oben), Windgeschwindigkeit (rechts oben), Wolkenwasser (links unten) und Vereisung aus dem Makkonen-Modell auf Nabenhöhe.....	13
Abbildung 8: Modell-Domänen des WRF Modells der Universität Wien: Äußere Domäne mit 12,5km Auflösung (blau) und innere Domäne mit 2,5km Auflösung (grün). Der Standort Ellern sowie die weiteren untersuchten Standorte Pretul (Steiermark) und Kryštofovy Hamry (Tschechien) sind markiert.	14
Abbildung 9: Beispiel einer WRF Modellvorhersage der Eiszuwachsrates an der WEA. Die Höhe 780 m ü. M. entspricht der Gondelhöhe an der betrachteten Windenergieanlage.....	15
Abbildung 10: Karten der Vereisungsrate auf 780 m Höhe über Meer am 4. Jänner 2017, 00 Uhr UTC für 10 verschiedene Simulationen des WRF-Ensembles auf 12.5 km.	15
Abbildung 11: Klassierung der Webcam-Bilder für 2016/17 (oben) und 2017/18 (unten): Für jedes 10-Minutenintervall ist in hell- bis dunkelblau die beobachtete Eislast (5 Klassen), in gelb- bis rot das Eisz Wachstum (3 Klassen) ersichtlich.....	17
Abbildung 12: Eingangsparameter des Makkonen-Modells und daraus resultierende Vereisungsvorhersagen für eine Windenergieanlage im Windpark Ellern für den Vereisungsfall am 3.1. und 4.1.2017. Linke Spalte: Eislast, Vereisungsrate, atmosphärischer Wolkenwassergehalt; rechte Spalte: Regenwassergehalt, Temperatur, Windgeschwindigkeit.....	18
Abbildung 13: Vereisungsmessungen auf der WEA in Ellern zwischen 2. und 4. Jänner 2017. Farbcodes in den Legenden geben die Vereisungsstärke als Codezahl gegeben durch die eologix Sensoren, die Vereisungsstärke, die Vereisungsrate abgeleitet von den Webcam Bildern und dem Status der Blattheizung an („SCADA status“) an. Die unteren beiden Abbildungen zeigen Messungen unterschiedlicher meteorologischer Parameter an.	19
Abbildung 14: Vorhersagen von Vereisung (IceBlade-Modell, obere Abbildung) und (WRF-Ensemble, unten) berechnet für 2. bis 4. Jänner 2017. Obere Abb.: IceBlade Vereisungsprognosen für unterschiedliche Blattpositionen angegeben als auch für die Vereisungsprognosen des Makkonenmodells. Jedes Diagrammpaar für jede Höhe gibt die Vorhersage durch den Control Ensemble Member (oberes Diagramm) und die Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Eisklassen (unteres Diagramm) an. Die unteren Abbildungen zeigen probabilistische Vorhersagen relevanter meteorologischer Parameter.	20
Abbildung 15: Details zum Vereisungsereignis am 10. Jänner 2017 um 00:50 Uhr. Der rot markierte Bereich zeigt Vereisung auf mehreren eologix Sensoren auf verschiedenen Positionen an den Rotorblättern.....	21
Abbildung 16: Verteilung (Boxplots) der Einzelsensortemperaturen während aktiver Blattheizung.	22

9 Kontaktdaten

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik – ZAMG

Hohe Warte 38

1190 Wien

Tel: +43-1-36026, Fax: +43-1-369-12-33, E-Mail: dion@zamg.ac.at.

www.zamg.ac.at

Universität Wien

Institut für Meteorologie und Geophysik

Althanstraße 14

1090 Wien

Tel: +43-1-4277-537 01, Fax: +43-1-4277-95 37, E-Mail: img-wien@univie.ac.at

VERBUND Hydro Power GmbH

Europaplatz 2

1150 Wien

Tel: +43 (0)50313-0, Fax: +43 (0)50313-51099, E-Mail: hydropower@verbund.com

Meteotest

Fabrikstrasse 14

3012 Bern, Schweiz

Teil: +41-31-307-26-26, E-Mail: office@meteotest.ch