

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

29/11/2019

R.Ice: Risikoanalysen für Folgen der Eisbildung an Windkraftanlagen

Projektnummer: 853629

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

Ausschreibung	02. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/04/2016
Projektende	31/06/2019
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	39 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Energiewerkstatt Verein
AnsprechpartnerIn	Andreas Krenn
Postadresse	Heiligenstatt 24, A-5211 Friedburg
Telefon	+43 7746 28212-0
Fax	
E-mail	andreas.krenn@energiewerkstatt.org
Website	www.eisatlas.at

R.Ice: Risikoanalysen für Folgen der Eisbildung an Windkraftanlagen

AutorInnen:

Andreas Krenn, Energiewerkstatt e.V.

Alexander Stökl, Energiewerkstatt e.V.

Heimo Truhetz, Karl-Franzens-Universität Graz, Wegener Center

Armin Leuprecht, Karl-Franzens-Universität Graz, Wegener Center

Clemens Wienerroither, Karl-Franzens-Universität Graz, Wegener Center

Helmut Paulitsch, Technische Universität Graz

Jürgen Biber, AIT Austrian Institute of Technology

Paula Resch, IGW Interessengemeinschaft Windkraft Österreich

Christian Schmelz, Schönherr Rechtsanwälte GmbH

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
3	Inhaltliche Darstellung	6
3.1	Modellbasierte Vereisungsklimatologie Österreich	6
3.2	Regionsweise Vereisung an Windkraftanlagen.....	8
3.3	Beobachtungen von Eisabfallereignissen	9
3.4	Ausweisung von Kennzeichnungsbereichen.....	11
3.5	Maßnahmen und Richtlinien	14
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	15
4.1	Modellbasierte Vereisungsklimatologie Österreich	15
4.2	Regionsweise Vereisung an Windkraftanlagen.....	17
4.3	Beobachtungen von Eisabfallereignissen	23
4.4	Ausweisung von Kennzeichnungsbereichen.....	28
4.4.1	Auftreffverteilungen der Eisfragmente	28
4.4.2	Gefährdung von Personen im Umfeld der Windkraftanlagen	31
4.5	Maßnahmen und Richtlinien	34
4.5.1	Verwaltungspraxis in Verfahren.....	34
4.5.2	Gesetzliche Vorgaben – Auflagen	36
4.5.3	Vorschläge für Maßnahmen und Auflagen	37
5	Ausblick und Empfehlungen.....	39
6	Literaturverzeichnis	41

2 Einleitung

Unter meteorologischen Bedingungen wie gefrierendem Nebel oder Eisregen kann es zu einer Bildung von Eisanlagerungen an den Rotorblättern von Windkraftanlagen (WKA) kommen. Wenn sich dieses Eis von der Rotorblattoberfläche ablöst, können die so herabfallenden oder weggeschleuderten Eisfragmente ein Sicherheitsrisiko für die Umgebung darstellen. Die Vereisung von WKA ist aufgrund der klimatischen und geographischen Gegebenheiten an Österreichischen Windenergiestandorten und der hohen Besiedlungsdichte gerade in Österreich eine große Herausforderung, umso mehr, wenn man den für die Zukunft angestrebten Ausbau erneuerbarer Energie mitbedenkt.

Obwohl durch die Forschungsanstrengungen in den letzten Jahren, insbesondere im Rahmen der internationalen Forschungskooperation IEA Wind Task 19, das Verständnis und Wissen über die Vereisung von WKA große Fortschritte gemacht hat, ist die verfügbare Datenlage zu Häufigkeit, Anzahl, und Eigenschaften der abfallenden Eisstücke nach wie vor unzufriedenstellend. Ein Teil dieses Problem ist, dass die Anlagenvereisung immer eine Funktion der lokalen Standortbedingungen (Meteorologie, Anlagenbetriebsmodus) ist. Für die Bewertung des Eisfallrisikos im Rahmen von behördlichen Genehmigungsverfahren von Windkraftprojekten ist man daher vielfach auf vereinfachende Abschätzungen angewiesen.

Das Projekt R.Ice, hat es sich daher zum Ziel gesetzt, die im Zusammenhang mit der Vereisung von WKA bestehenden Fragestellungen unter besonderer Berücksichtigung der spezifisch Österreichischen Anforderungen und Bedingungen zu beantworten.

Dazu zählen:

- Die Modellierung einer Österreichweiten Karte der Vereisungsmeteorologie und deren Abgleich mit Messdaten und WKA-Betriebserfahrungen.
- Die Beobachtung von Eisabfall-Ereignissen an WKA mittels eines Stereo-Kamerasystems um auf diese Weise eine Datenbasis für Anzahl, Größe und Flugtrajektorien der herabfallenden Eisfragmente zu gewinnen.
- Die Regionsweise Ausweisung von Eisfall-Kennzeichnungsbereichen durch Modellierung der Auftreffwahrscheinlichkeiten der Eisstücke und Annahmen über die Aufenthaltsszenarien von Personen im Umfeld der WKA.
- Die Erarbeitung von technisch und juristisch fundierten Maßnahmen und Richtlinien zum Umgang mit Eisfallrisiken.

Der gegenständliche Bericht ist folgendermaßen strukturiert: Im Kapitel 3 sind zunächst die methodischen Grundlagen der Arbeit erläutert. Die Inhalte sind dabei Abschnittsweise nach den einzelnen Arbeitspaketen gegliedert. Darauf folgt in Kapitel 4, getrennt nach den einzelnen Themen, eine Beschreibung der erzielten Resultate und Schlussfolgerungen. Eine zusammenfassende Betrachtung und ein Ausblick auf zukünftigen Entwicklung schließen dann in Kapitel 5 das Dokument ab.

3 Inhaltliche Darstellung

3.1 Modellbasierte Vereisungsklimatologie Österreich

Im Gegensatz zu anderen Ländern Europas, sind für Österreich bisher keine flächendeckenden Untersuchungen zum meteorologischen Vereisungsgeschehen publiziert worden. Für die Bewertung der Eisfallgefahr an einem spezifischen Standort müssen daher Vereisungsstatistiken aus mehr oder weniger weit entfernt gemessenen meteorologischen Zeitreihen abgeleitet oder vereinfacht anhand von Erfahrungswerten abgeschätzt werden. Die Ableitung des Vereisungsgeschehens aus herkömmlichen meteorologischen Daten funktioniert nur bedingt. Für die Eisbildung sind vor allem die mittlere Tröpfchengröße („Medium Volumetric Diameter“; MVD) und der Flüssigwasseranteil in Wolken bzw. im Nebel („Liquid Water Content“, LWC) entscheidend. Diese beiden Größen sind jedoch nur schwer zu messen und werden bei den üblichen meteorologischen Messungen nicht mit erfasst.

Dank zunehmender Rechnerkapazitäten und Verbesserungen in der Modellierung der Wolkenphysik wurde es in den letzten Jahren hingegen möglich, hochaufgelöste Vereisungskarten für ganze Länder auf numerischen Weg zu erstellen. Die Vorgehensweise ist dabei meist ähnlich: mit Hilfe eines physikalisch basierten, numerischen Modells, wie es auch in der täglichen Wettervorhersage zum Einsatz kommt, werden die Antriebsdaten für ein Vereisungsmodell generiert (Temperatur, Flüssigwasseranteil und Windgeschwindigkeit). Damit wird dann die Eisaggregation an einem frei rotierenden Standardzylinder (3 cm Durchmesser) simuliert, die wiederum als Hinweis für eine mögliche Vereisung an Windkraftanlagen interpretiert wird. Dieses Verfahren wurde beispielsweise für Finnland (www.tuuliatlas.fi) auf Basis des meteorologischen Modells AROME (Seity, et al. 2011) und des Vereisungsmodells nach ISO 12394:2001 (Makkonen 2000) eingesetzt. Auf ähnliche Weise sind Vereisungskarten auch in Norwegen, Schweden (www.vindteknikk.no) und der Schweiz (www.wind-data.ch) entstanden.

Auch in R.Ice wurde dieser Ansatz verfolgt. Für die Periode 1989 bis 2015 wurden zunächst Wetterrekonstruktionen mit Hilfe der numerischen meteorologischen Modelle CCLM (Böhm, et al. 2006) und WRF (Skamarock, et al. 2005) im Zusammenarbeit mit dem FWF-Projekt NHCM-2 (nhcm-2.uni-graz.at) erstellt. Diese Rekonstruktionen decken den gesamten Alpenraum ab und weisen eine sehr hohe räumliche (horizontale Gitterweite von 3 km) und zeitliche (1 h Intervalle) Auflösung auf. Diese hohen Auflösungen werden durch ein zweifaches Verfahren erreicht: der globale Reanalysedatensatz ERA-Interim (Dee, et al. 2011) mit einer Auflösung von ~80 km wird zunächst Europaweit mit CCLM und WRF auf eine höhere Auflösung gebracht (12,5 km Gitterweite) und im zweiten Schritt wird die gewünschte Zielauflösung (3 km Gitterweite) durch nochmalige Anwendung von CCLM und WRF im Alpenraum erzielt (Abbildung 1). Diese Vorgehensweise hat sich in namhaften Klimamodellierungsinitiativen des World Climate Research Programme (WCRP) wie EURO-CORDEX (Jacob, et al. 2014) und in CORDEX-FPS (Coppola, et al. 2018) international durchgesetzt.

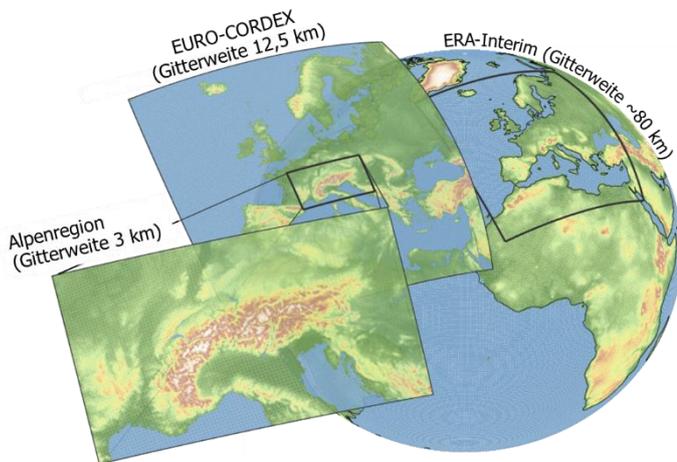


Abbildung 1: Simulationsgebiete der Modelle CCLM und WRF. Im äußeren, Europa umfassenden Gebiet wird eine Horizontalauflösung von 12,5 km, im Gebiet der Alpen wird eine Auflösung von 3 km erreicht. Adaptiert aus (Prein, Langhans, et al. 2015).

Im nächsten Schritt wurde eine modifizierte Version (siehe Abschnitt 3.2) des Vereisungsmodells nach ISO 12394:2001 (Makkonen 2000) mit Hilfe der hochaufgelösten (3 km Gitterweite) Wetterrekonstruktionen angetrieben. Dazu wurden die atmosphärischen Größen Druck, Temperatur, Spezifische Feuchte, Flüssigwasseranteil in Wolken, Flüssigwasser in Regen, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung aus den CCLM und WRF Daten auf festgelegten Höhen über Grund (80 m, 100 m, 130 m, 150 m), wie sie für die Windkraftnutzung relevant sind, extrahiert und an das Vereisungsmodell übergeben. Auf diese Weise wurde der zeitliche Verlauf der Eismasse über die Zeitspanne von 1989 bis 2015 an einem 3 cm Standardzylinder in stündlicher Auflösung flächendeckend im 3 km Raster für Österreich in den vier Höhen über Grund simuliert. Die Simulationen wurden am Vienna Scientific Cluster (VSC; www.vsc.ac.at) und am Jülich Supercomputing Centre (JSC; www.fz-juelich.de) durchgeführt und hinsichtlich der Anzahl an Vereisungsereignissen pro Jahr und der Vereisungsdauer pro Event statistisch (Berechnung der 10%-, 50%- und 90%-Perzentile) analysiert. Diese Ergebnisse zum langjährigen Vereisungsgeschehen wurden dann in den nachgelagerten R.Ice Arbeitspaketen weiter verarbeitet.

Aufgrund von Vereinfachungen in den numerischen Wettermodellen, aber auch aufgrund der limitierten Auflösung, muss mit Abweichungen der berechneten atmosphärischen Größen zu den beobachteten Daten gerechnet werden. Üblicherweise werden Abweichungen dieser Art mit Hilfe von sogenannten „Bias-Korrektur-Verfahren“ in der Klimamodellierung oder „Model-Output-Statistics“ in der Wettervorhersage korrigiert (z.B. (Maraun, et al. 2017), (Themeßl, Gobiet und Leuprecht 2011)). Obwohl diese Bias-Korrektur-Verfahren für unterschiedliche atmosphärische Größen separat angewendet werden, konnten (Wilcke, Mendlik und Gobiet 2013) zeigen, dass die physikalische Konsistenz zwischen den Größen auf Basis von Monatsmittelwerten erhalten bleibt. Um das Vereisungsmodell mit Daten von größtmöglicher Qualität zu betreiben, wurde in R.Ice erstmals versucht, das Bias-Korrektur-Verfahren „Quantile Mapping“ (Themeßl, Gobiet und Leuprecht 2011) auf Basis von Stundenwerten anzuwenden.

Eine erste Evaluierung der CCLM und WRF Rekonstruktionen wurde zeitgleich im FWF Projekt NHCM-2 durchgeführt. Aktuelle Ergebnisse dieses Projektes sind ebenfalls in R.Ice eingeflossen und haben eine differenzierende Bewertung der beiden Berechnungsmodelle WRF und CCLM unterstützt.

3.2 Regionsweise Vereisung an Windkraftanlagen

Das Klima in Österreich ist aufgrund der komplexen Orographie sehr vielfältig und durch die Lage zum Atlantik und dem Mittelmeer sowie zum Eurasischen Kontinent von unterschiedlichen Einflüssen geprägt. Um dieser Regionalität gerecht zu werden, wurde zunächst versucht, das Vereisungsmodell auf diese Verhältnisse zu kalibrieren. Dazu wurde das Vereisungsmodell nach ISO 12394:2001 (Makkonen 2000) zunächst zur verbesserten Darstellung von Ablation, Sublimation und Schmelzvorgänge nach (Srivastava und Coen 1992) und nach den Empfehlungen von Oyvind Byrkjedal und Rolv Bredesen (Firma Kjeller Vindteknikk, Norwegen; www.vindteknikk.com) sowie von Neil Davis (Technische Universität Dänemark) adaptiert. Das modifizierte Vereisungsmodell wurde anschließend mit operationellen Analysefeldern des Europäischen Zentrums für Mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF) (Bechtold, et al. 2008) betrieben und das Ergebnis mit beobachteter instrumenteller Vereisung an mehrjährigen Windmessungen (Masthöhen zwischen 50 m und 85 m) verglichen. Dabei wurde der Einfluss von Tröpfchenkonzentrationen und der Übergang vom 3 cm Standardzylinder zum rotierenden Rotorblatt auf die modellierte Anzahl von Vereisungsevents, deren Dauer und die sich ergebende Eismasse untersucht.

Weiters wurde die Möglichkeit des Einbezugs von Radarreflektivitäten aus dem System der österreichischen Wetterradarstationen zur Bestimmung des Flüssigwasseranteils in Nebel und bodennahen Wolken zur Kalibrierung des Vereisungsmodells untersucht.

Aufgrund von Vereinfachungen in den Modellierungsansätzen (sowohl in den Wettermodellen als auch im Vereisungsmodell) kommt der Evaluierung der Vereisungskarte große Bedeutung zu. Nicht zuletzt auch wegen des Umstandes, dass man in anderen Ländern eine Einschätzung der Unsicherheiten in den Vereisungskarten nur auf Basis kurzer Simulationszeiträume (etwa ein paar Tage in Finnland) oder nur weniger Windkraftanlagen durchgeführt hat. Systematische Eismassenmessungen existieren bisher für Österreich nicht. Die ZAMG ist derzeit erst dabei Eismassenmessungen an wenigen Stationen in Österreich durchzuführen (Hildegard Kaufmann, ZAMG, 2017, persönliche Kommunikation). In R.Ice erfolgte daher die Evaluierung der Vereisungskarte mit Hilfe von langjährigen WKA-Betriebsdaten und beobachteter instrumenteller Vereisung an zahlreichen, mehrjährigen Windmessstationen. Daraus konnten die Unsicherheiten in der österreichischen Vereisungskarte abgeschätzt werden.

Um, wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, unabhängig von einzelnen Standorten eine regionsweise Berechnung und Bewertung der Eisfall-Kennzeichnungsbereiche zu ermöglichen, wurden fünf geographisch und meteorologisch relativ einheitliche Regionen im Osten Österreichs betrachtet (siehe Abbildung 5). Für diese Regionen wurden dann flächengemittelte Statistiken der jährlichen Vereisungsdauer und Vereisungsanzahl erstellt. Zusätzlich wurden für jede Region auch regionale gemittelte Windverteilungen ausgewertet und anhand von Messergebnissen evaluiert und bias-korrigiert.

3.3 Beobachtungen von Eisabfallereignissen

Um direkte Daten über die Anzahl, Größe und Flugbahn der herabfallenden Eisfragmente zu gewinnen, war es als Teil des Projekts R.Ice vorgesehen, Vereisungsereignisse vor Ort an einer WKA zu beobachten und auszuwerten. Für diesen Zweck wurde ein kamerabasiertes 3D-Messsystem entwickelt und bei der Versuchsanlage am Steinriegel in der Steiermark (auf 1450 m Seehöhe) in Betrieb genommen. Beim Eintreten von Vereisungsereignissen wurde die automatische Datenaufzeichnung für mehrere Stunden gestartet. Die Auswertung erfolgte im Nachhinein auf Basis der aufgezeichneten Bildpaare. Zu diesem Zweck entwickelten Algorithmen ermöglichten eine überwiegend automatische Auswertung der Daten.

Beschreibung des Messsystems

Nach der Analyse und Bewertung mehrerer möglicher Varianten der Kameraanordnung am Turm und im Umfeld der WKA, und unter Berücksichtigung der Eigenschaften des auf Stereo-Kamerabildern basierenden Messsystems, wurde ein Messkonzept umgesetzt, bei dem die Kameras auf einem Messturm in 120 m Entfernung zur WKA angebracht sind (siehe Abbildung 2). Diese Anordnung war hinsichtlich Messbedingungen, überwachtem Bereich und Auflösung am besten geeignet um den relevanten Bereich des Rotorblattüberstrichs in Hauptwindrichtung zu überwachen.

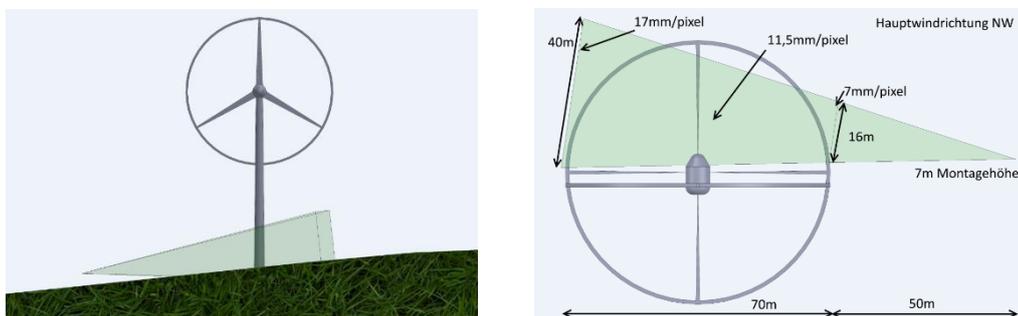


Abbildung 2: Aufnahmegeometrie mit 3D-Messsystem auf einem Messturm montiert: Seitenansicht (links) und Ansicht von oben (rechts). Überwachte Bereiche sind in grün dargestellt.

Für das Messsystem wurden hochauflösende Kameras und spezielle Optiken ausgewählt. Eine besondere Herausforderung waren dabei die klimatischen Bedingungen wie Regen, Schnee und Wind denen das Messsystem ausgesetzt ist. Um das Vereisen der Kameras zu verhindern, war die Installation eines gesonderten Heizsystems notwendig. Die Übertragung der Daten erfolgte über eine Internetverbindung bei der WKA. Für die automatische Datenaufzeichnung wurde eine geeignete Software erstellt. Fotos des Stereo-Kamerasystems sowie des errichteten Messturms in winterlichen Bedingungen finden sich in Abbildung 3.



Abbildung 3: Kamerabasiertes 3D-Messsystem: Montage des Messsystems auf umgelegtem Messturm (links), Messturm mit Messsystem bei winterlichen Bedingungen (rechts)

Für die Messung und Datenaufzeichnung wurde der Betriebsmodus der WKA so abgeändert, dass die WKA zu bestimmten Tageszeiten bei Vereisung automatisch abschaltet. Gleichzeitig mit der Aktivierung der Rotorblattheizung wurde die Datenaufzeichnung automatisch gestartet und mit Beendigung des Abtauvorgangs, der einige Stunden dauert, wieder beendet. Die Datenaufzeichnungs-kampagnen wurden für die Zeit von drei aufeinanderfolgenden Winterperioden durchgeführt.

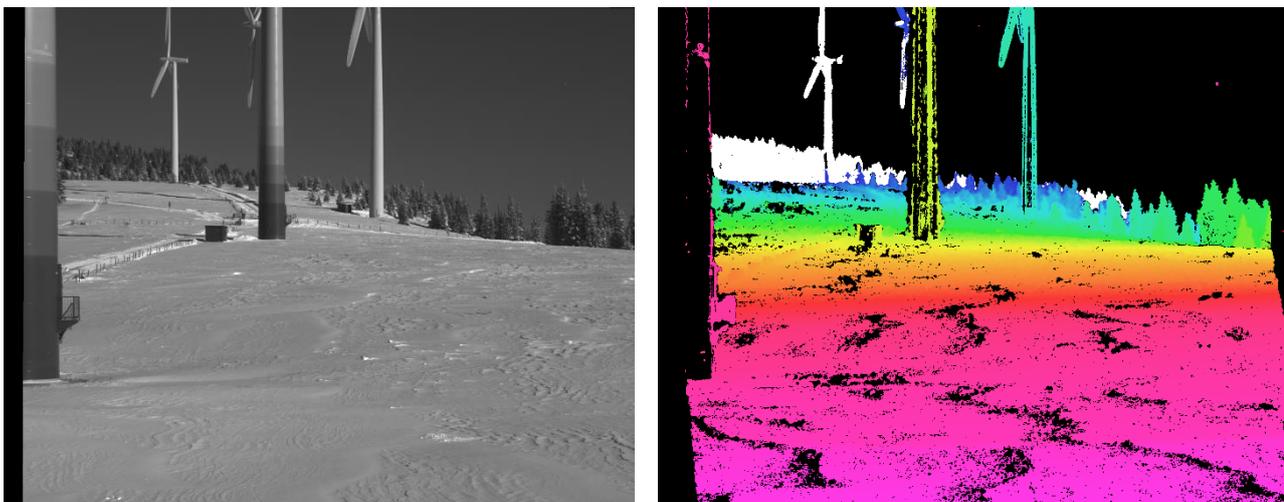


Abbildung 4: Linkes Kamerabild des 3D-Messsystems bei der Beobachtung eines Eisfallevents (links) und das dazugehörige errechnete Tiefenbild mit farblich kodierten Tiefenwerten (rechts). Herabfallende Eisstücke werden vom Messsystem erfasst.

Zur Auswertung der aufgenommenen Testserien wurden Algorithmen zur Detektion der herabfallenden Eisstücke entwickelt. Das linke Bild in Abbildung 4 zeigt beispielhaft ein von der Messkamera aufgenommenes Foto. Auf der rechten Seite von Abbildung 4 ist der aus den Stereoaufnahmen berechnete Objektabstand farblich kodiert dargestellt. Aus Objektabstand und Richtung ist somit die räumliche Position eines von dem Messsystem erfassten Eisstücks klar bestimmt. Aus Abstand und scheinbarer Größe kann dann auf die projizierte Fläche des Eisstückes geschlossen werden. Bei guten Sichtbedingungen können von dem Messsystem auch sehr kleine Eisstücke, ab etwa 3 bis 4 cm Größe, erfasst und deren dreidimensionale Position und Größe vermessen werden. Die Auswertung der großen

Datenmengen wurde mithilfe der erstellten Algorithmen teilautomatisiert durchgeführt. Anschließend wurden die beobachteten Eisfallereignisse statistisch aufbereitet und dargestellt.

3.4 Ausweisung von Kennzeichnungsbereichen

Der Begriff „Kennzeichnungsbereich“ bezeichnet in diesem Bericht jenen Bereich um die WKA, in dem durch Warntafeln und/oder Warnleuchten vor einer Eisfallgefahr gewarnt wird (siehe dazu auch Abschnitte 4.5.1 und 4.5.3).

Die Ermittlung und Bewertung des Eisfallrisikos für Personen im Umfeld von WKA ist Gegenstand einer internationalen Empfehlung die von der IEA Wind Forschungskoooperation Task 19 im Jahr 2018 herausgegeben wurde (IEA Wind 2018). Mit dem Ziel eine Basis für international einheitliche Anforderungen und Vorgehensweisen zu etablieren, sind in diesem Dokument das aktuelle Wissen und die vorhandenen empirischen Daten zu diesem Thema zusammengefasst. So weit anwendbar, wurde bei der Umsetzung des Arbeitspakets zur Ausweisung der Kennzeichnungsbereiche nach diesen IEA-Empfehlungen vorgegangen. An dieser Stelle kann sich daher die Beschreibung der Methode auf die wesentlichen und projektspezifischen Punkte beschränken, darüber hinaus gehende Details können direkt den IEA-Empfehlungen (IEA Wind 2018) entnommen werden.

Der erste Schritt in der Ermittlung des Eisfallrisikos ist die Berechnung der Auftreffverteilung der von der WKA herabfallenden Eisstücke. Das verwendete Eisfallmodell der Energiewerkstatt berechnet dazu die Trajektorie eines Eisfragments vom Zeitpunkt des Ablösens vom Rotorblatt bis zum Aufprall am Boden durch Lösen der Bewegungsgleichungen, durch die Erdanziehung, Rotation des Eisstückes, Luftwiderstand und der Einfluss des Windes beschrieben sind. Der Parameterraum aller möglichen Eingangsgrößen (Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Rotorstellung, Ort der Ablösung am Blatt, Eigenschaften des Eisfragments) muss durch eine statistische Kombination einer sehr großen Anzahl einzelner Eisfallsimulationen abgedeckt werden. Aus der resultierenden Trefferdichte kann dann die statistische Wahrscheinlichkeit berechnet werden, mit welcher ein bestimmter Ort im Umfeld der Windkraftanlage von einem Eisstück einer bestimmten Größe getroffen wird. Das verwendete Eisfallmodell der Energiewerkstatt wurde im Rahmen der internationalen Kooperation Task 19 der IEA Wind evaluiert. Die Abweichungen zwischen Simulation und Beobachtungen lagen dabei im Bereich der Datenunsicherheit der Beobachtungsergebnisse.

Für die Berechnungen wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die aerodynamische Kraft auf die Eisfragmente ergibt sich aus dem dynamischen Druck und einem Widerstandsbeiwert von $c_w = 1,0$. Für die Luftdichte wird der Wert der Standardatmosphäre mit $1,225 \text{ kg/m}^3$ verwendet.
- Der Rotor der Windkraftanlage ist immer in den Wind gedreht (Nachführung ist aktiv).
- Störungen an der Anlage (z.B. Netzausfall, Ausfall der Nachführung, gebremster Rotor, etc.) gleichzeitig mit Vereisungsbedingungen werden nicht betrachtet, da einerseits davon keine wesentlich erhöhte Eisfallgefahr zu erwartet ist, andererseits solche seltenen Ereignisse in der statistischen Betrachtung nur sehr wenig Gewicht haben.

- Die Simulationen werden für eine horizontale Fläche durchgeführt, d.h. es wird angenommen, dass die WKA in ebenem Gelände steht.
- Die Höhenzunahme der Windgeschwindigkeit wird über ein logarithmisches Windprofil mit einer Rauigkeitslänge von $z_0 = 0,25$ m berücksichtigt.

Die Eigenschaften der Eisfragmente (d.h. deren Abmessungen, Masse und Eisdichte) wurden anhand der A/m Verteilung aus (IEA Wind 2018) festgelegt. Die Schwere der Verletzungen, die ein herabfallendes Eisstück verursachen kann, skaliert im Wesentlichen mit der kinetischen Energie beim Aufprall. Für die Eisfallrisikobewertung ist alleine der Todesfall das relevante Schadensausmaß, da durch die strengen Grenzwerte für das Todesfallrisiko auch alle geringeren Schäden wie Verletzungen mit abgedeckt sind. Obwohl also beispielsweise das Verletzungsrisiko durch Eisfall größer ist als das Todesfallrisiko, wird das durch den höheren gesellschaftlich akzeptierten Grenzwert für Verletzungen mehr als ausgeglichen. Ein Tötungsrisiko durch Eisfall besteht erst ab einem gewissen Schwellenwert der Aufprallenergie, welcher sich in eine Mindestmasse der Eisstücke umrechnen lässt. Für kompakte Eisstücke und sehr große Fallhöhen erhält man auf diese Weise eine Grenzmasse von 80 g. Das bedeutet keineswegs, dass von schwereren Eisstücken automatisch ein Todesfallrisiko ausgeht, da hierbei noch viele weitere Einflussfaktoren eine Rolle spielen. Umgekehrt kann aber mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit gesagt werden, dass von Eisstücken kleiner als 80 g kein Todesfallrisiko für Personen ausgeht. Als konservative Annahme wurde daher davon ausgegangen, dass das Auftreffen eines Eisstücks mit mehr als 80 g – in der relevanten Trefferfläche des Kopfes der Person (IEA Wind 2018) – in jedem Fall für die betreffende Person tödlich ist.

Gute Referenzdaten für die zu erwartende Anzahl von Eisstücken an Standorten mit unterschiedlichen IEA-Vereisungsklassen bzw. Vereisungsdauern finden sich ebenfalls in (IEA Wind 2018). Die Daten in (IEA Wind 2018) basieren auf einer sehr breiten Datenbasis, jedoch ist zu berücksichtigen, dass darin auch Beobachtungen von skandinavischen Anlagen enthalten sind, die auch unter Vereisungsverhältnissen weiterbetrieben werden (d.h. keine Eisabschaltung).

Als Eingangsdaten für die Eisfallsimulationen dienten die Windverteilungen und die Vereisungsmeteorologie aus den in Abschnitt 3.1 und 3.2 beschriebenen langjährigen meteorologischen Modellen. Um Standortübergreifende Aussagen zu ermöglichen, wurden fünf Regionen im Osten Österreichs festgelegt, die einerseits jeweils relativ homogene Verhältnisse bieten, andererseits insgesamt einen großen Teil der Österreichischen Windenergiestandorte abdecken. In Abbildung 5 sind die Umrisse der fünf betrachteten Regionen sowie die Positionen bestehender Windkraftanlagen dargestellt. Man beachte, dass regionsweise Aussagen nur dann möglich sind, wenn innerhalb der Regionen im Wesentlichen einheitliche Bedingungen vorliegen. Aus diesem Grund wäre daher eine solche regionsweise Vorgangsweise bspw. im alpinen Raum, mit sehr großer Variabilität in den Wind- und Vereisungsverhältnissen (vergleiche Abbildung 6 und Abbildung 7), nicht möglich. Um eine möglichst uneingeschränkte Gültigkeit unabhängig von einem konkreten Anlagentyp sicherzustellen, wurden die Eisfallsimulationen für eine Reihe unterschiedliche WKA-Konfigurationen durchgeführt die ein breites Spektrum an Nabenhöhen und Rotordurchmessern abzudecken.

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

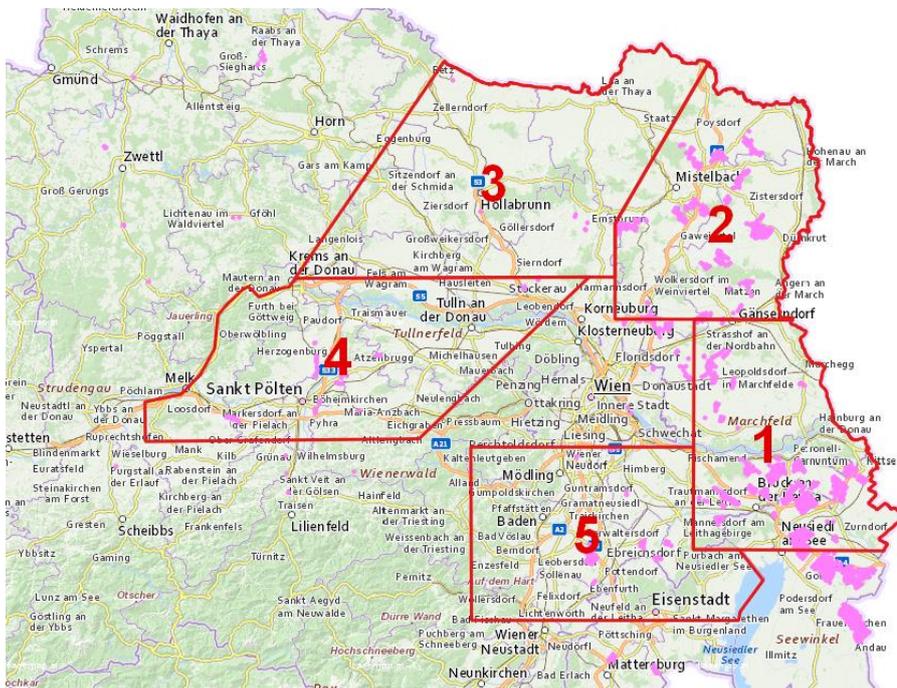


Abbildung 5: Umriss der fünf betrachteten Regionen im Nordosten Österreichs (in rot) und die Positionen derzeit bestehenden WKA (pink) [Kartenquelle: basemap.at].

Der zweite Schritt in der Risikoanalyse ist die Verschneidung der ermittelten Auftreffwahrscheinlichkeiten der Eisteile mit den Aufenthaltswahrscheinlichkeiten von Personen im Umfeld der WKA. Zum einen können das Personen sein, die sich ungeschützt im Freien aufhalten, beispielsweise ein Spaziergänger von dem man annimmt, dass er einmal pro Woche einen Weg frequentiert der neben der WKA verläuft. Zum anderen aber auch Personen in Fahrzeugen, wobei man davon ausgeht, dass ein Eisfragment das auf die Windschutzscheibe trifft mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit einen Unfall auslöst. Art und Umfang der Frequentierung im Umfeld der Anlagen können natürlich von einem Standort zum anderen sehr unterschiedlich ausfallen. Zielsetzung im gegenständlichen Projekt war eine standortunabhängige Aussage zur Eisfallgefahr und dem Eisfall-Kennzeichnungsbereich, weshalb als Grundvoraussetzung typische Infrastrukturen und Frequentierungen im Umfeld der Anlage angenommen werden. Also insbesondere keine sensiblen Schutzobjekte und keine höherrangigen Verkehrswege. Eine konservative Betrachtungsweise stellt dann sicher, dass an solchen „typischen“ Standorten alle tatsächlich eintretenden Gefährdungsszenarien durch die Risikobetrachtung abgedeckt sind. Standorte die von diesen typischen Standard-Bedingungen abweichen, sind klarer Weise nicht abgedeckt und müssen auf jedem Fall einer spezifischen Betrachtung der Eisfall Gefährdung unterzogen werden.

Nach (IEA Wind 2018) beträgt die relevante Trefferfläche am Kopf einer Person 0,04 m². Als Trefferfläche für Fahrzeuge wird die Windschutzscheibe angenommen, deren Größe laut (IEA Wind 2018) mit einer Fläche von 2 m² abzuschätzen ist. Der Umstand, dass das Auftreffen eines Eisstücks auf der Windschutzscheibe im Regelfall nicht mit Todesfolgen für die Fahrzeuginsassen gleichzusetzen ist, wird durch einen zusätzlichen Faktor 10 in der Risikobewertung berücksichtigt, d.h. es wird angenommen, dass nur einer von zehn Treffern Todesfolgen nach sich zieht.

Für die Bewertung der Eisfallrisiken wurden die Grenzwerte für das Todesfallrisiko aus den IEA-Empfehlungen (10^{-6} pro Jahr individuell und 10^{-4} pro Jahr kollektiv) herangezogen (IEA Wind 2018). Diese Grenzwerte stellen sicher, dass die zusätzliche Gefährdung durch Eisfall von den WKA, sowohl für jede einzelne Person als auch kollektiv für die Gesellschaft, im Vergleich zu dem unveränderlichen Risiko des täglichen Lebens, vernachlässigbar gering ist.

3.5 Maßnahmen und Richtlinien

Als erster Schritt in diesem Arbeitspaket wurde die bisherige Genehmigungspraxis erhoben. Vorgehend ist dabei zu sagen, dass im österreichischen öffentlichen Genehmigungsrecht zwischen zwei Verfahrensarten zu unterscheiden ist: (1) dem vollkonzentrierten Genehmigungsverfahren nach dem Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz 2000 (UVP-G) und (2) den materienrechtlichen Einzelverfahren nach der jeweiligen Landesgesetzgebung. Dazu zählen insbesondere die Elektrizitäts(wirtschafts)gesetze, die Naturschutzgesetze und die Bauordnungen der Länder.

Die Bescheide aus UVP-Verfahren werden auf der Webseite des Umweltbundesamts offiziell veröffentlicht. Für einen statistischen Überblick über die in Österreich bestehenden Auflagen zum Thema Eisabfall wurden daher 92 über das Umweltbundesamt verfügbare erstinstanzliche UVP-Bescheide sowie die dazugehörigen Änderungs- und Instanzenbescheide ausgewertet. Es handelt sich dabei um 20 burgenländische, 69 niederösterreichische und 3 steirische Windparkprojekte. Zusätzlich wurde eine kleiner Anzahl materienrechtlicher Bescheide stichprobenartig ausgewertet, die von größeren Windkraftunternehmen unter Berücksichtigung einer möglichst großen Streuung zur Verfügung gestellt wurden. Da die Bescheide aus den Jahren 1998 bis 2017 stammen, war dabei insbesondere auf den zeitlichen Aspekt zu achten. Zudem wurden auch besonders abweichende Auflagen hervorgehoben. Eine statistische Auswertung der materienrechtlichen Bescheide wurde aber – aufgrund der selektiven Auswahl, wie auch der kleinen und unvollständigen Verfügbarkeit der Bescheide – nicht durchgeführt. Dennoch geben diese einen detaillierteren Einblick in die Diversität der Auflagen in österreichischen Bescheiden.

Neben dieser Bestandsaufnahme wurden die für die Bewertung des Eisabfallrisikos relevanten Gesetzesstellen in der Landes- als auch Bundesgesetzgebung sowie die einschlägige Rechtsprechung des Verwaltungsgerichtshofes recherchiert. Diese gesammelten Informationen wurden schließlich im Lichte des zunehmenden Wissensstands zum Thema Eisfallrisiko, darunter insbesondere die Empfehlungen aus (IEA Wind 2018) und die Ergebnisse aus den anderen Arbeitspaketen des gegenständlichen Projekts, neu interpretiert. Die Schlussfolgerungen aus dieser Betrachtung waren dann Aussagen zu der Notwendigkeit und der Formulierung von Bescheidauflagen sowie eine Vorschau auf zukünftige Möglichkeiten und Entwicklungen.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4.1 Modellbasierte Vereisungsklimatologie Österreich

Mit den numerischen Wettermodellen CCLM und WRF und dem Vereisungsmodell nach ISO 12394:2001 (Makkonen 2000) wurde für den Zeitraum 1989 bis 2015 das Vereisungsgeschehen (Anzahl und Dauer an Vereisungsereignisse) in Österreich in einer Horizontalauflösung von 3 km und in Höhen von 80 m, 100 m, 130 m, und 150 m über Grund simuliert und statistisch ausgewertet.

Parallel zu R.Ice wurde im Projekt NHCM-2 eine grundlegende Evaluation der Wetterrekonstruktionen von CCLM und WRF durchgeführt. Diese Validierung hat ergeben, dass WRF in der vorliegenden Konfiguration (spezifische Wahl von Parametrisierungen für Konvektion, Turbulenz, Mikrophysik, Aerosole, Strahlung, Wolken, und Boden-Vegetation-Atmosphäre Transmissionsmodellierung) zu hohe Häufigkeiten und Intensitäten bei Niederschlägen, vor allem im Winter, aufweist. Winterniederschläge werden von WRF in den Alpenvorländern im Mittel systematisch um bis zu 50 % überschätzt, während die Abweichungen bei CCLM im Bereich zwischen +/- 10 % liegen (siehe (Piazza, et al. 2019)). Es zeigt sich also, dass in der vorliegenden Konfiguration WRF nicht in der Lage ist für eine physikalisch basierte Vereisungsmodellierung im Alpenraum bedeutende meteorologische Prozesse im Winter in ausreichender Qualität wiederzugeben. Es wurde daher entschieden, die Vereisungsmodellierung basierend auf WRF nicht weiter zu verfolgen und für die aufbauenden Projektteile in R.Ice die Ergebnisse der CCLM Simulation zu verwenden. Die großen Unterschiede zwischen WRF und CCLM sind vermutlich vor allem auf die relativ geringen Erfahrungswerte mit WRF im Alpenraum zurück zu führen. CCLM hingegen wird seit vielen Jahren von der Meteoschweiz und dem Deutschen Wetterdienst operativ in der Wettervorhersage im Alpenraum eingesetzt. Auch in der Klimamodellierung wurde CCLM in dieser hohen Auflösung im Alpenraum bereits vielfach vor allem an der ETH Zürich und am WEGC verwendet, z.B. (Prein, Langhans, et al. 2015), (Ban, Egloff, et al. 2011), (Ban, Schmidli und Schaer 2014), (Prein, Gobiet, et al. 2013). Simulationen über lange Zeiträume (27 Jahre im Fall von R.Ice) und in hohen Auflösung (3 km) stellen auch für moderne Hochleistungsrechner eine große Herausforderung dar. Die Anzahl an ähnlichen Simulationen – und damit an Erfahrungswerten – ist daher entsprechend gering. Zum Startzeitpunkt der in R.Ice verwendeten WRF-Simulation im Jahre 2014 war an vergleichbaren WRF-Rechnungen nur die Arbeit von Sebastian Knist, damals Doktoratsstudent am Jülich Supercomputing Centre (JSC), bekannt (Knist, Goergen und Simmer 2018). In NHCM-2 wurde zur Untersuchung der Modellrobustheit eine von (Knist, Goergen und Simmer 2018) abweichende Konfiguration gewählt. Details zur WRF Konfiguration sind in (Piazza, et al. 2019) zu finden.

Die Österreichweiten langjährigen Ergebnisse für die Anzahl der Vereisungsereignisse pro Jahr und die jährliche Gesamtvereisungsdauer sind in Abbildung 6 und Abbildung 7, exemplarisch für eine Höhe von 100 m über Grund, dargestellt. Die Vereisungskarten sowie die Detailergebnisse in den vier betrachteten Höhen über Grund (80 m, 100 m, 130 m, 150 m) sind auf der R.Ice Projektwebseite www.eisatlas.at abrufbar.

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

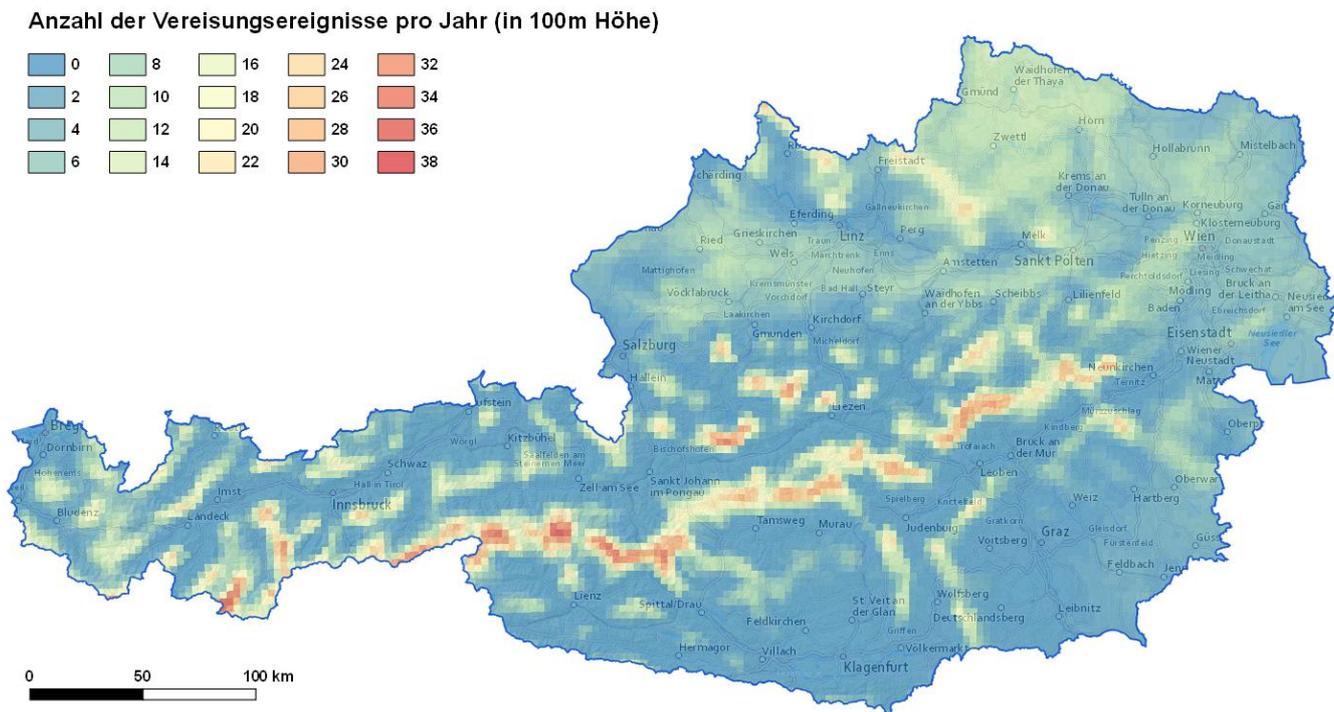


Abbildung 6: Berechnungsergebnisse für die durchschnittliche jährliche Anzahl der Vereisungsereignisse pro Jahr in einer Höhe von 100 m über Grund [Hintergrundkarte: basemap.at].

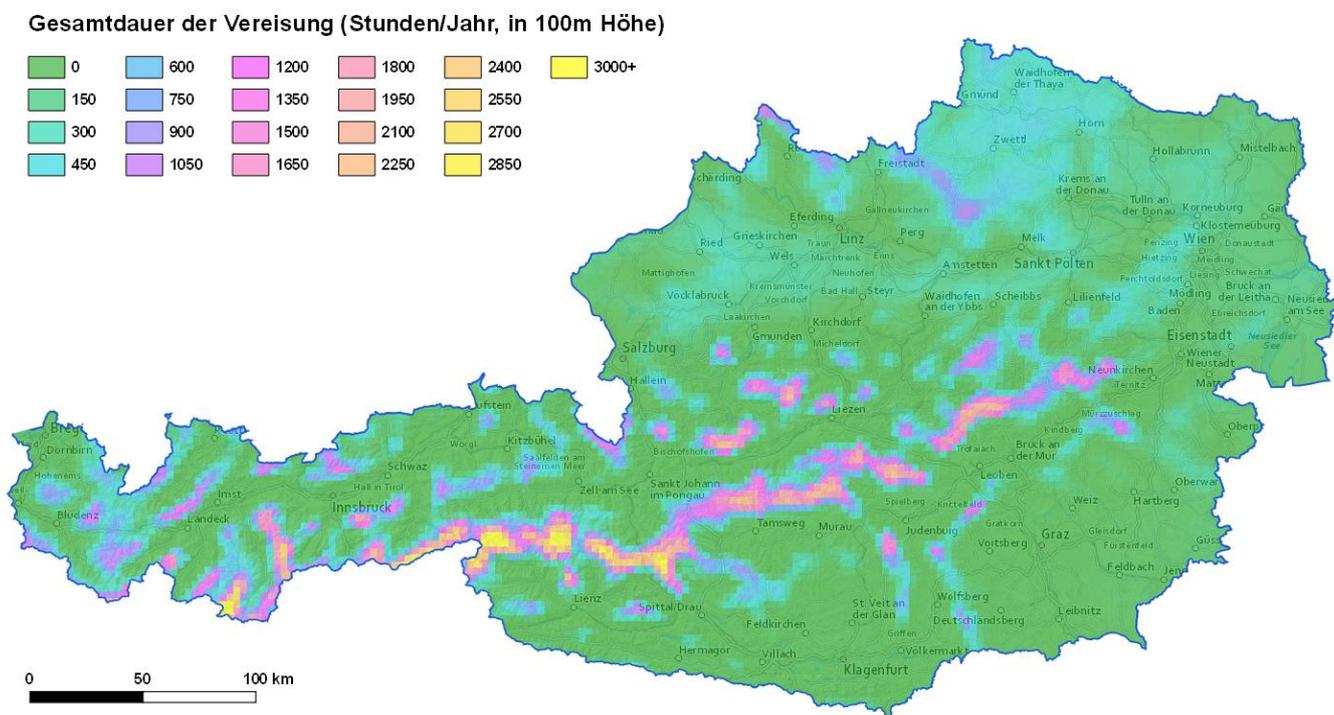


Abbildung 7: Berechnungsergebnisse für die durchschnittliche jährliche Gesamtdauer der Vereisung in einer Höhe von 100 m über Grund [Hintergrundkarte: basemap.at].

Aufgrund der durchgeführten Arbeiten und auf Basis der dargestellten Vereisungskarten kann generell gesagt werden, dass das Vereisungsgeschehen in Österreich stark von der Orographie beeinflusst ist.

Vor allem in höheren Regionen nimmt die Vereisungsdauer und die Vereisungsanzahl drastisch zu. So beträgt beispielsweise im Bereich des Hochschwabgebietes, auf einer Seehöhe von etwa 1800 m bis 2000 m, der Median (50%-Perzentil über die Jahre 1989 bis 2015) der Vereisungsanzahl (bei einer Granulierung von 1 h) ca. 25 Ereignisse pro Jahr und der Median der Vereisungsdauer beträgt etwa 1600 h pro Jahr. Vergleichsweise niedrig fallen die Werte in den Niederungen mit beispielsweise 1 Ereignis pro Jahr und einer Dauer von 25 h in Radkersburg (Seehöhe etwa 200 m) aus (In beiden Fällen beziehen sich die Angaben auf eine Höhe von 100 m über Grund). Es muss hier jedoch berücksichtigt werden, dass CCLM allgemeinen Schwierigkeiten hat, bodennahe Temperaturinversionen, wie sie häufig im Grazer und Klagenfurter Becken sowie in den inneralpinen Tälern auftreten, abzubilden (NHCM-2, (Födermayr 2017)). In diesen Gebieten wird die Vereisung daher systematisch unterschätzt. Zusätzlich zu den Bergregionen werden aber auch in weiten Teilen Ober- und Niederösterreichs sowie im Mittelburgenland (Ausläufer des Hochwechsels) häufig Vereisungsereignisse angezeigt. Beispielsweise ergeben sich für den Raum Wels eine Vereisungsanzahl von ca. 6 Ereignisse pro Jahr und eine Dauer von insgesamt ca. 160 h pro Jahr. Nach Einschätzung der Modellierungskette, handelt es sich bei diesen Werten um vertrauenswürdige Ergebnisse. Die Zunahme der Vereisung mit der Höhe zeigt sich auch in den Ergebnissen für die vier betrachteten Höhen über Grund. In dem Höhenbereich von 80 m auf 150 m über Grund nimmt so die Vereisungsdauer um ca. 10 % bis 15 % und die Vereisungsanzahl um etwa 50 % zu.

Beim Versuch die atmosphärischen Größen an der Schnittstelle zwischen numerischem Wettermodell und Vereisungsmodell mit Hilfe des Bias-Korrektur-Verfahrens „Quantile Mapping“ zu korrigieren, wurde festgestellt, dass das Vereisungsmodell sehr empfindlich auf physikalische Inkonsistenzen zwischen diesen atmosphärischen Größen reagiert. Geringste Inkonsistenzen können bereits unrealistische Eismassen generieren oder eine Berechnung verunmöglichen. Das beruht vor allem auf die exponentiellen Abhängigkeiten zwischen Feuchtemaßen und Temperatur, die bei Phasenübergängen von gasförmig auf fest, bzw. flüssig auf fest, vorherrschen. Da Quantile Mapping grundsätzlich zur klimatologischen (statistischen) Korrektur von Modellbias auf längeren Zeitskalen (Monats- oder Tagesbasis) verwendet wird und dabei auf physikalische Konsistenz nicht explizit Rücksicht genommen wird, ist eine Vermeidung physikalischer Inkonsistenzen nicht garantiert und eine Verwendung zur Korrektur im Zuge des Projektes R.Ice war daher nicht möglich. Um physikalische Konsistenz bei zeitlich hochaufgelösten Größen zu erreichen, müssten weitere physikalische Gesetzmäßigkeiten (Clausius-Clapeyron'sche Beziehung, hydrostatisches Gleichgewicht) implementiert werden, was umfangreiche Neuentwicklungen notwendig machen würde.

4.2 Regionsweise Vereisung an Windkraftanlagen

Das Vereisungsmodell nach ISO 12394:2001 (Makkonen 2000) wurde in der Programmiersprache *python* implementiert. Optional können die Modifizierungen zur verbesserten Darstellung von Ablation, Sublimation und Schmelzvorgängen (siehe Abschnitt 3.2) hinzugeschaltet werden. Der Code ist beim Wegener Center (Kontaktpersonen: Armin Leuprecht und Heimo Truhetz) verfügbar. Durch das Testen des Vereisungsmodells mit Hilfe operationeller Analysefelder des ECMWF und dem Vergleich der auf diese Weise simulierten Vereisung mit Vereisungsdaten aus mehreren mehrjährigen Windmessungen

aus den Jahren 2011 bis 2015, konnte eine gute Kalibrierung des Vereisungsmodells belegt werden. Dennoch weist das Vereisungsmodell aufgrund der skalen-übergreifenden Komplexität der physikalisch-meteorologischen Prozesse, die entlang der Modellierungskette nur vereinfacht abgebildet werden können, starke Variabilitäten bei einzelnen Vereisungsevents sowie bei der räumlichen Verteilung von Vereisung auf. Als Skalierungsfaktor N_c der Tröpfchengrößenverteilung hat sich ein Wert von 250 Tröpfchen pro cm^3 als brauchbar erwiesen. Eine Betrachtung am rotierenden Rotorblatt führt teilweise zu einer verbesserten Übereinstimmung. Dieses Verhalten ist exemplarisch für eine Windmessung im alpinen Raum in Abbildung 8 dargestellt.

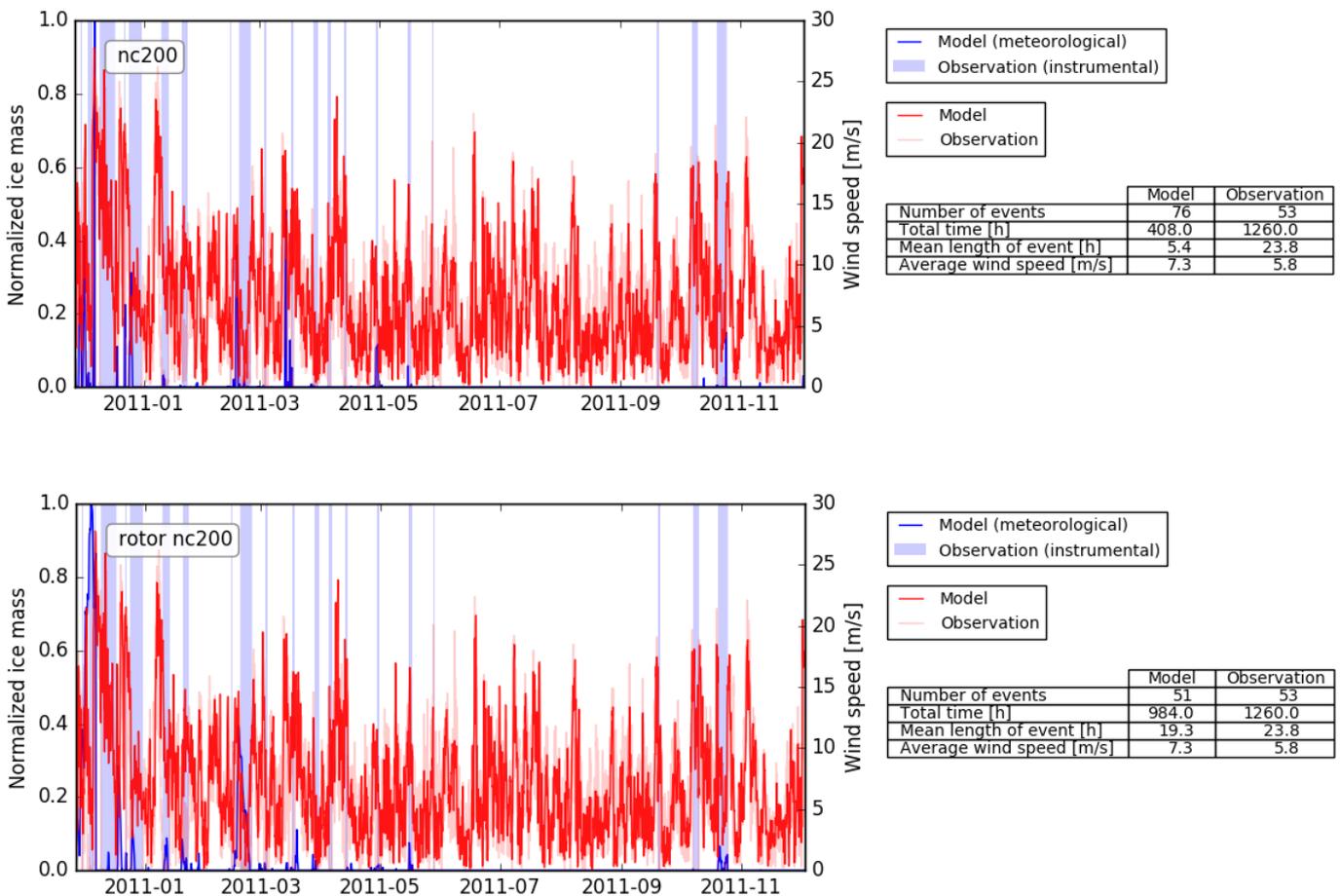


Abbildung 8: Beobachtete (instrumentelle) und modellierte Vereisung an einer Windmessung im alpinen Raum vom 26. Nov. 2010 bis zum 3. Dez. 2011. Oben: am 3 cm Standardzylinder; unten: am rotierenden Rotorblatt. Durch den Übergang zum Rotor wurde eine Überschätzung der Anzahl der Vereisungsevents von 43 % (oben) auf eine geringe Unterschätzung von -4 % (unten) sowie eine Unterschätzung der durchschnittlichen Vereisungsdauer von -77 % (oben) auf -19 % (unten) gesenkt werden.

Beim Versuch Radarreflektivitäten für die Optimierung des Vereisungsmodells einzubeziehen, wurde eine prinzipielle Problematik betreffend der Vergleichbarkeit von beobachteten und durch CCLM und WRF modellierten Flüssigwasseranteilen festgestellt: Der Flüssigwasseranteil (LWC) kann aus Radardaten nur unter der Annahme einer Tropfengrößedichte verteilt berechnet werden. Dazu fließt der Median der Tropfendurchmesser (MVD) als konstanter Wert ein. Bei den Modellen CCLM und WRF

variiert hingegen der MVD unter Annahme einer konstanten Tröpfchenkonzentration (N_c) (Thompson, et al. 2008). LWC Werte aus den Modellen und LWC Werte aus dem Radar sind daher nicht direkt vergleichbar. Eine weitere Optimierung des Vereisungsmodells unter Einbezug von Radardaten würde daher Anstrengungen im Grundlagenbereich erfordern, die über das Projekt R.Ice hinausgehen. Durch die Untersuchung der Verwendbarkeit von Radarreflektivitäten im Rahmen dieses Projektes wurde dennoch ein Grundstein für ebensolche vertiefende Aktivitäten sowie generell zur Evaluation und Weiterentwicklung von physikalisch basierten Klima- und Wettermodellen gelegt.

Da eine direkte Evaluation der Vereisungskarte (siehe Abschnitt 4.1) aufgrund mangelnder Beobachtungsdaten nicht möglich war, wurden Vergleiche sowohl mit langjährigen Vereisungsstatistiken von über 40 österreichischen Windparks (ermittelt mit Hilfe einer Umfrage unter Windmühlenwarte), als auch mit der beobachteten instrumentellen Vereisung an 20 mehrjährigen Windmessungen mit Anemometerhöhen zwischen 50 m und 100 m und Seehöhen zwischen 160 m und 2100 m durchgeführt (siehe Abbildung 9).

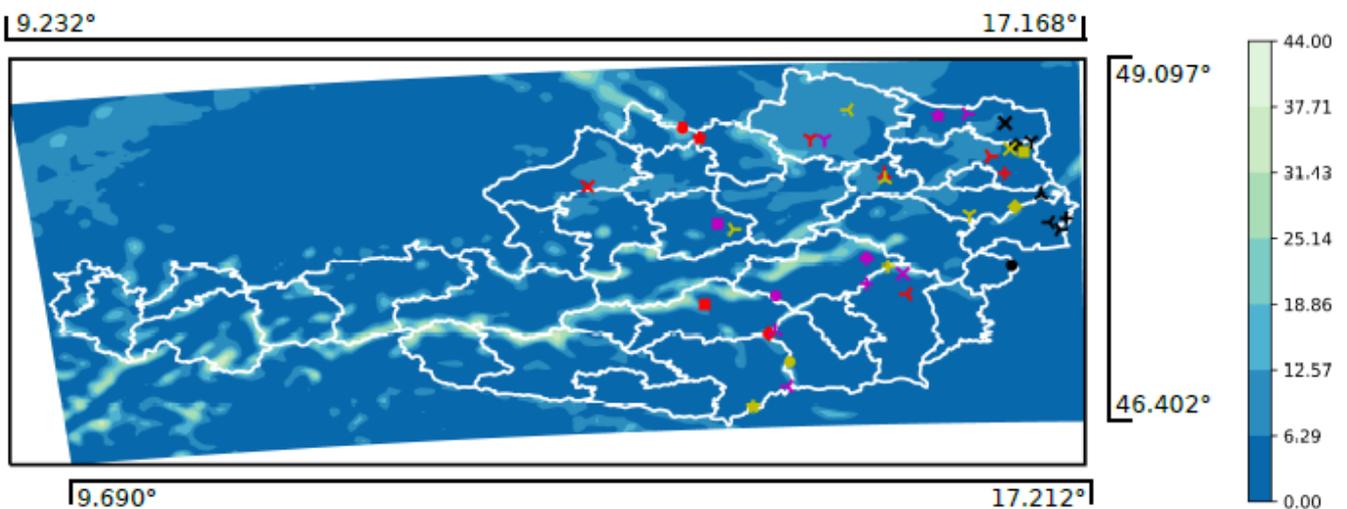


Abbildung 9: Mittlere Anzahl von Vereisungsereignisse 100 m ü. G. aus der Vereisungskarte und Standorte der zur Evaluation verwendeten Windparks und Windmessstationen. Aus (Wienerroither, et al. 2019).

Der Vergleich mit den Umfrageergebnissen hat im Mittel über die untersuchten Windparks eine leichte systematische Unterschätzung der Anzahl der Vereisungen um etwa -0,3 Ereignisse pro Jahr ergeben. Das entspricht einer relativen Abweichung von der mittleren Anzahl an Vereisungsereignissen aus der Umfrage von -5 %. Die mittlere Vereisungsdauer wird mit 25 h pro Jahr überschätzt, was einer relativen Abweichung von 21 % entspricht. Da jedoch die Umfrageergebnisse zumindest teilweise auf subjektiven Einschätzungen beruhen und unterschiedliche WKA-Typen betreffen, müssen dafür hohe Unsicherheiten angesetzt werden. Die beschriebenen Abweichungen sind somit statistisch nicht signifikant.

Die Ergebnisse aus der Simulationen decken sich größtenteils mit der beobachteten instrumentellen Vereisung an den 20 Windmessungen: hier stimmt die modellierte Anzahl an Vereisungsevents an 7 Windmessmasten sehr gut mit den Beobachtungen überein (leichte Überschätzungen von 1 bis 2

Ereignisse pro Jahr). Diese 7 Windmessmasten befinden sich auf Seehöhen von unter 800 m. An den übrigen 13 Windmessmasten (10 davon befinden sich oberhalb von 800 m Seehöhe) wird die Anzahl der Vereisungen systematisch unterschätzt (etwa um einen Faktor 2 und mehr). Diese systematische Unterschätzung steht in Verbindung mit der Auflösung von CCLM, die mit 3 km noch immer zu grob ist, um Orographie-bedingte Expositionen realistisch abzubilden. Das Relief im Modell erscheint zu glatt und daher liegen Berggipfel zu tief, was durch den vertikalen Temperaturgradienten zu einer systematischen Überschätzung der Temperatur und damit zu einer Unterschätzung der Vereisung an diesen Standorten führt. Ähnliche Probleme treten auch bei der Simulation von Windgeschwindigkeiten auf (Schlager, et al. 2018), (Truhetz, Gobiet und Kirchengast 2007)).

Nachdem CCLM Schwächen bei der Simulation von bodennahen Temperaturinversionen aufweist (Födermayr 2017), wird geschlossen, dass die Vereisungskarte in jenen Regionen, die von Temperaturinversionen dominiert sind, ebenfalls deutliche Unsicherheiten aufweist. Das betrifft insbesondere die inneralpine Täler und die großen Becken südlich des Alpenhauptkammes (Klagenfurter und Grazer Becken). Da solche Tal- und Beckenlagen gleichzeitig nur wenig Windenergiepotential bieten, ergibt sich daraus keine wesentliche Einschränkung der Vereisungskarte für die Windenergienutzung.

Zusammenfassend kann aus den vorliegenden Evaluierungsergebnissen geschlossen werden, dass die Vereisungskarte in den für Windkraftnutzung wichtigen Gebieten (insbesondere Oberösterreich, Niederösterreich, nördliches Burgenland, unterhalb von 800 m Seehöhe) zuverlässige Resultate liefert.

Statistische Auswertungen für die fünf Regionen

Für Berechnung der Auftreffverteilungen der Eisstücke für die fünf Regionen in Abschnitt 4.4 wurden flächengemittelte Statistiken der jährlichen Vereisungsdauer und Vereisungsanzahl erstellt. Als weitere Eingangsgröße für die Eisfallberechnungen wurden zusätzlich für jede Region mittlere richtungsabhängige Windverteilungen erstellt.

Abbildung 10 zeigt eine statistische Auswertung des Vereisungsgeschehens (exemplarisch in 100 Meter über Grund) in den betrachteten 27 Jahren über jeweils über alle numerischen Zellen in den fünf definierten Regionen in Ostösterreich (siehe Abbildung 5). Die farbig gefüllten Boxen geben den Bereich zwischen dem 25% und 75% Quantil der Verteilung an. Der horizontale Strich in der Box ist der Median. Die Antennen oberhalb und unterhalb zeigen die Breite des gesamten Wertebereichs an. Die maximale Länge der Antennen ist mit der 1,5-fache Höhe der Boxen begrenzt. Weiter außerhalb liegende Werte (Ausreißer) sind als Punkte dargestellt. Die regionsweisen Vereisungen wurden in allen vier definierten Höhen über Grund (80 m, 100 m, 130 m und 150 m) ausgewertet.

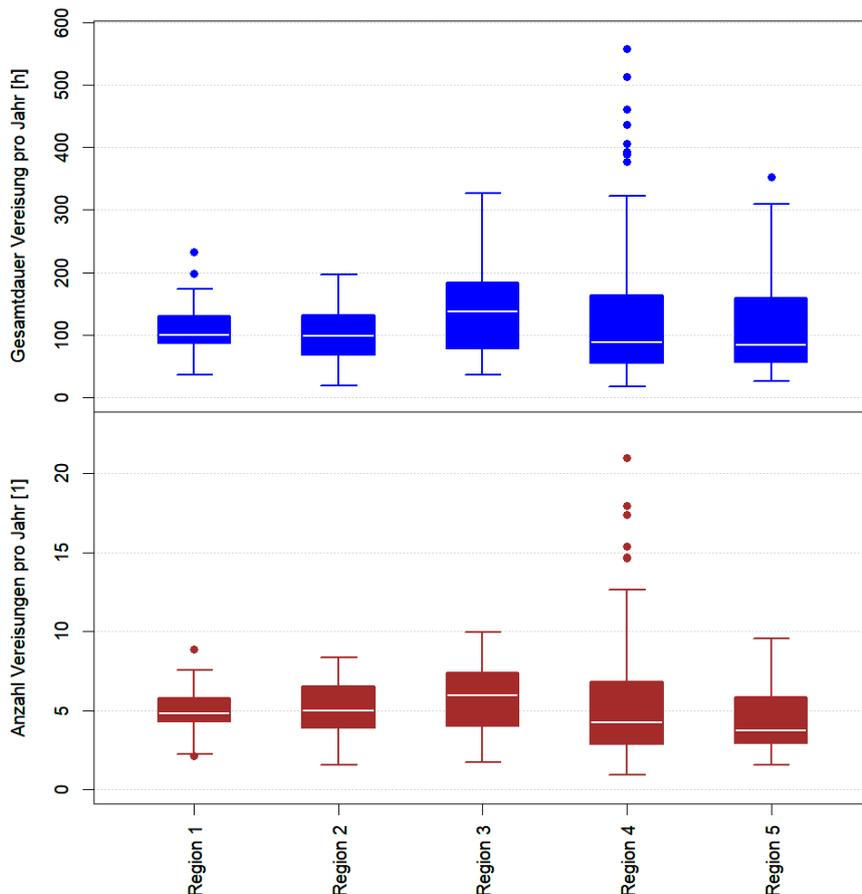


Abbildung 10: Boxplot für die Anzahl der Vereisungsereignisse und die Gesamtdauer der Vereisung in 100 m über Grund in den fünf betrachteten Regionen.

Die Ausreißer-Datenpunkte mit mehr Vereisung in der Region 4 stammen aus dem nordwestlichen Teil der Region die in den Dunkelsteiner Wald ragt. Der restliche Teil der Region 4 weist ein Vereisungsgeschehen auf, das sich gut zu den anderen Regionen fügt. Die einzige Region die sich systematisch abhebt, ist die Region 3 die im Vergleich etwa um 15% mehr Vereisung aufweist. Im Vergleich zu der Bandbreite an Vereisungsverhältnissen an Österreichischen Windenergiestandorten (siehe Abbildung 6 und Abbildung 7), sind die Bedingungen in den fünf Regionen also relativ einheitlich.

Zur Erstellung der windrichtungsabhängigen Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit wurden die Daten aus den Wetterrekonstruktionen zunächst regionsweise statistisch ausgewertet. In einem zweiten Schritt wurden für die fünf Regionen anhand von Daten aus Windmessungen Korrekturfaktoren berechnet. Dafür wurden in jeder Region eine Reihe von Windmessungen herangezogen. Vertikale Extrapolation dieser Daten auf Referenzhöhen und Mittelwertbildung erlaubt dann einen Vergleich mit den mittleren Jahreswindgeschwindigkeiten aus den Wetterrekonstruktionen. Die so erhaltenen Korrekturfaktoren wurden anschließend auf die den richtungsabhängigen Häufigkeitsverteilungen angewandt. Eine Darstellung der Windverteilungen in den fünf Regionen in der Form von Windrosen findet sich in Abbildung 11, wieder beispielhaft für eine Höhe von 100 m über Grund.

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

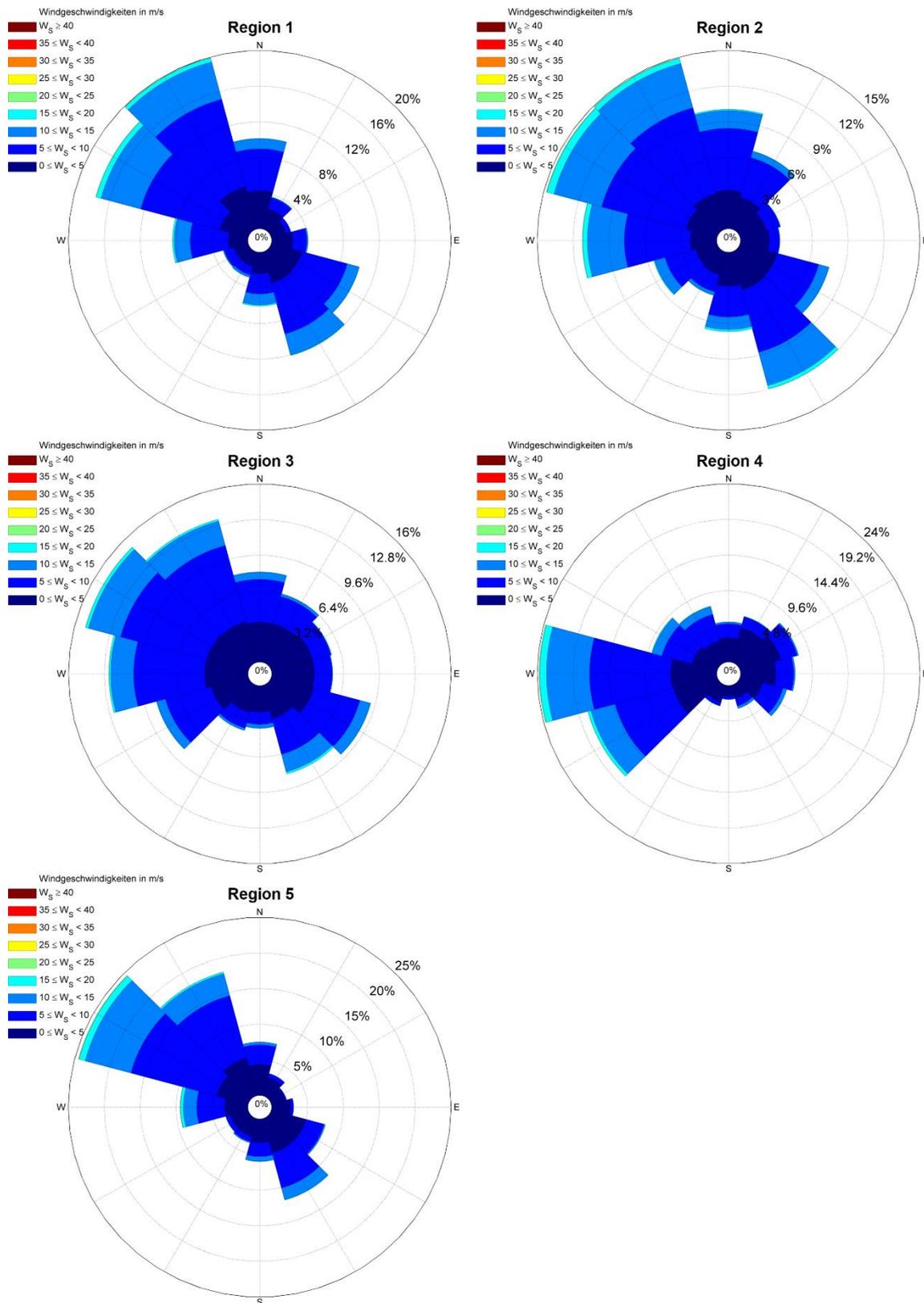


Abbildung 11: Windrosen für die 5 untersuchten Regionen in einer Höhe von 100 m über Grund. Die Mittleren Windgeschwindigkeiten für die Region 1 bis 5 betragen 6,84 m/s, 7,11 m/s, 6,12 m/s, 5,95 m/s und 6,50 m/s.

4.3 Beobachtungen von Eisabfallereignissen

Während der festgelegten täglichen Zeitfenster mit deaktivierter Rotorblattheizung kam es im Beobachtungszeitraum relativ selten zu Vereisungsevents und infolge zu einer automatischen Abschaltung der WKA. Trotzdem konnte eine Reihe von Testserien zur späteren Analyse aufgezeichnet werden. Meist fanden die Eisfallereignisse allerdings bei schlechten Wetterbedingungen wie Nebel und Schneefall statt. Die Abbildung 12 zeigt Bilder des Messsystems bei guter Sicht (Sonnenschein) und bei schlechter Sicht (Nebel/Schneefall). Das optische Messprinzip basiert auf hochauflösenden Bildern zweier Kameras, die jedoch bei Nebel praktisch blind und bei Schneefall durch die Schneeflocken so gestört sind, dass keine Erfassung der herabfallenden Eisstücke mehr möglich ist. Bei schlechten Sichtbedingungen wurde die Datenaufzeichnung daher entweder vom Mühlenwart abgebrochen oder die Bilder stellten sich später bei der Analyse als nicht verwertbar heraus.



Abbildung 12: Kamerabilder der Messsystems bei verschiedenen Witterungsbedingungen: Sonne (links) und Schneefall/Nebel (rechts)

Abbildung 13 zeigt eine aufgezeichnete Testserie mit Eisfall bei guten Sichtbedingungen mit mehr als 100.000 Bildpaaren über einen Beobachtungszeitraum von fast 6 Stunden die analysiert und ausgewertet werden konnte. Die in der Abbildung erkennbaren herabfallenden Eisstücke (rot markiert) können vom Messsystem automatisch erfasst und ausgewertet werden.



Abbildung 13: Beobachtung von Eisfall. Herabfallende Eisstücke sind im Kamerabild sichtbar (zur besseren Erkennbarkeit rot markiert).

Die aufgezeichneten Bilder wurden mit Algorithmen zur automatischen Detektion von Eisstücken ausgewertet. Aus den zeitsynchronen Bildpaaren der Stereokamera können Tiefenbilder berechnet werden (siehe Abbildung 4). Die Segmentierung der Eisstücke vor dem Hintergrund erfolgt durch Berechnung eines Hintergrundmodells. Als Ergebnis wird neben dem Zeitpunkt die Größe im Bild und die dreidimensionale Position der Eisstücke berechnet. Die Auswertung der enormen Menge aufgezeichneter Daten konnte mithilfe der erstellten Algorithmen teilautomatisiert durchgeführt werden. Abbildung 14 zeigt die Auswertung eines Eisfallevents bei guten Sichtbedingungen. Die Positionen der detektierten Eisstücke sind in den drei Dimensionen des Turmkoordinatensystems dargestellt. Die Größe der Eisstücke ist durch die Größe der Kreise visualisiert.

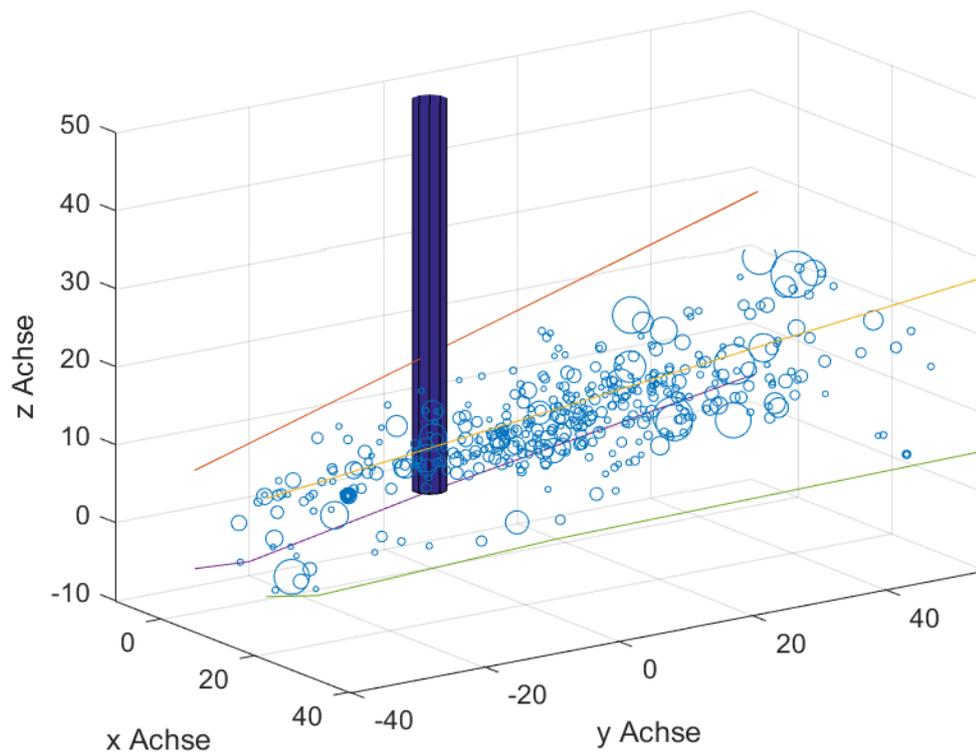


Abbildung 14: Datenauswertung und Aufbereitung eines Eisfallevents. 3D-Plot aller detektierten Eisabfälle in Bodennähe mit Visualisierung der Eisgröße. Mehrfachdetektionen wurden aus den Daten automatisch eliminiert. Der dunkelblaue vertikale Zylinder symbolisiert den Turm der WKA.

Die geschätzte Massenverteilung der detektierten Eisfragmente ist in Abbildung 15 dargestellt. Da von dem Beobachtungssystem nur die scheinbare (d.h. in Kamerablickrichtung projizierte) Fläche gemessen wird, wurde das Volumen und die Masse der Fragmente über einen statistischen Ansatz und einer typischen Eisdichte berechnet. Man erkennt, dass kleine Eisfragmente den größten Anteil der beobachteten Eisstücke ausmachen. So sind 77% der Fragmente leichter als die Grenzmasse von etwa 100 g, ab der Eisfall von WKA potentiell tödliche Folgen haben kann. Betrachtet man hingegen die Eismasse, so liefern die größeren Eisfragmente den größten Teil. Etwa drei Viertel der gesamten Eismasse steckt in den Eisstücken mit Massen von mehr als 100 g.

Letzteres ist ein wesentliches Ergebnis dieses Arbeitspakets: Bisherige Untersuchungen zur Anzahl von Eisfragmenten (siehe dazu (IEA Wind 2018): z.B. (Müller und Bourgeois 2017), (Lundén 2017)) basierten auf dem Aufsammeln der herabgefallenen Eisstücke, was bei kleinen Eisstücken unter winterlichen Bedingungen zunehmend schwierig ist. Daher sind in den Ergebnissen solcher Studien die kleineren Fraktionen der Eisstücke systematisch unterrepräsentiert. Aus dem obigen Ergebnis lässt sich aber nun schließen, dass dadurch dennoch kein großer Fehler in der Bestimmung der Gesamtmasse der Eisstücke entsteht. Damit ist es also auch zulässig, die Masse der an den Rotorblättern beobachteten Eislagerungen mit der Gesamtmasse der aufgesammelten Eisstücke in Beziehung zu setzen

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

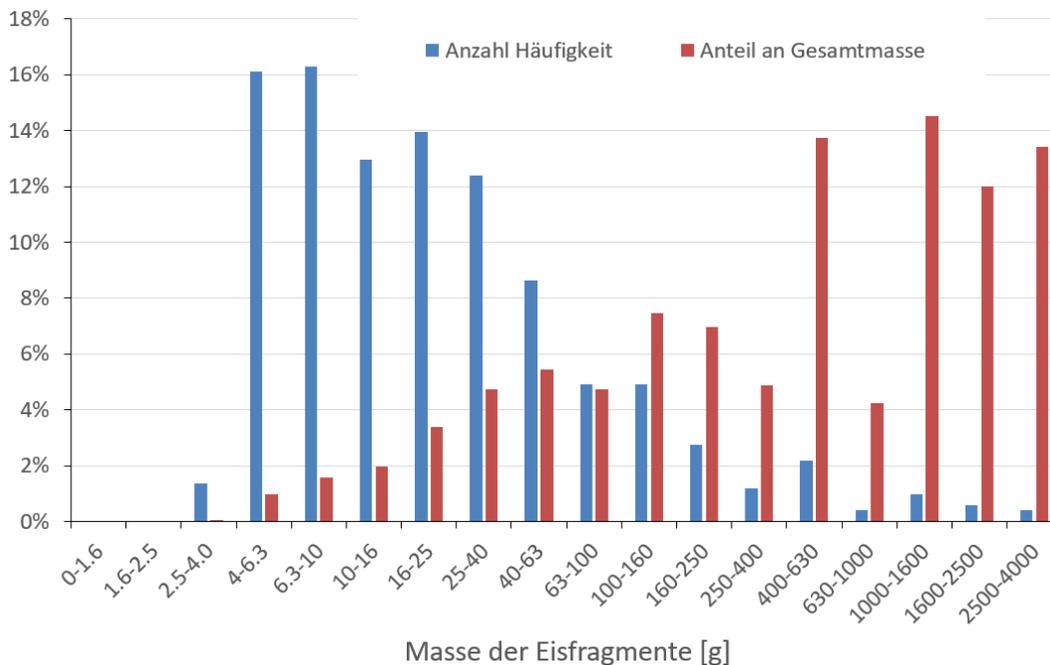


Abbildung 15: Massenverteilung der detektierten Eisfragmente in relativer Anzahl und dem Anteil an der Gesamtmasse.

In Abbildung 16 wird die am Standort Steinriegel beobachtete Massenverteilung der Eisfragmente auf einer logarithmischen Skala mit den Ergebnisse aus (Müller und Bourgeois 2017) und (Lundén 2017) verglichen. Trotz der stufigen Darstellung aufgrund der unterschiedlicher Bin-Größen und der teilweise kleinen Probenanzahl, ergibt sich ein insgesamt konsistentes Bild, in dem über einen Bereich von über zwei Größenordnungen, die Häufigkeit mit der Masse der Eisstücke exponentiell abnimmt. Die in Abbildung 16 zusätzlich eingezeichnete Fit-Gerade hat eine Steigung von -1,5.

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

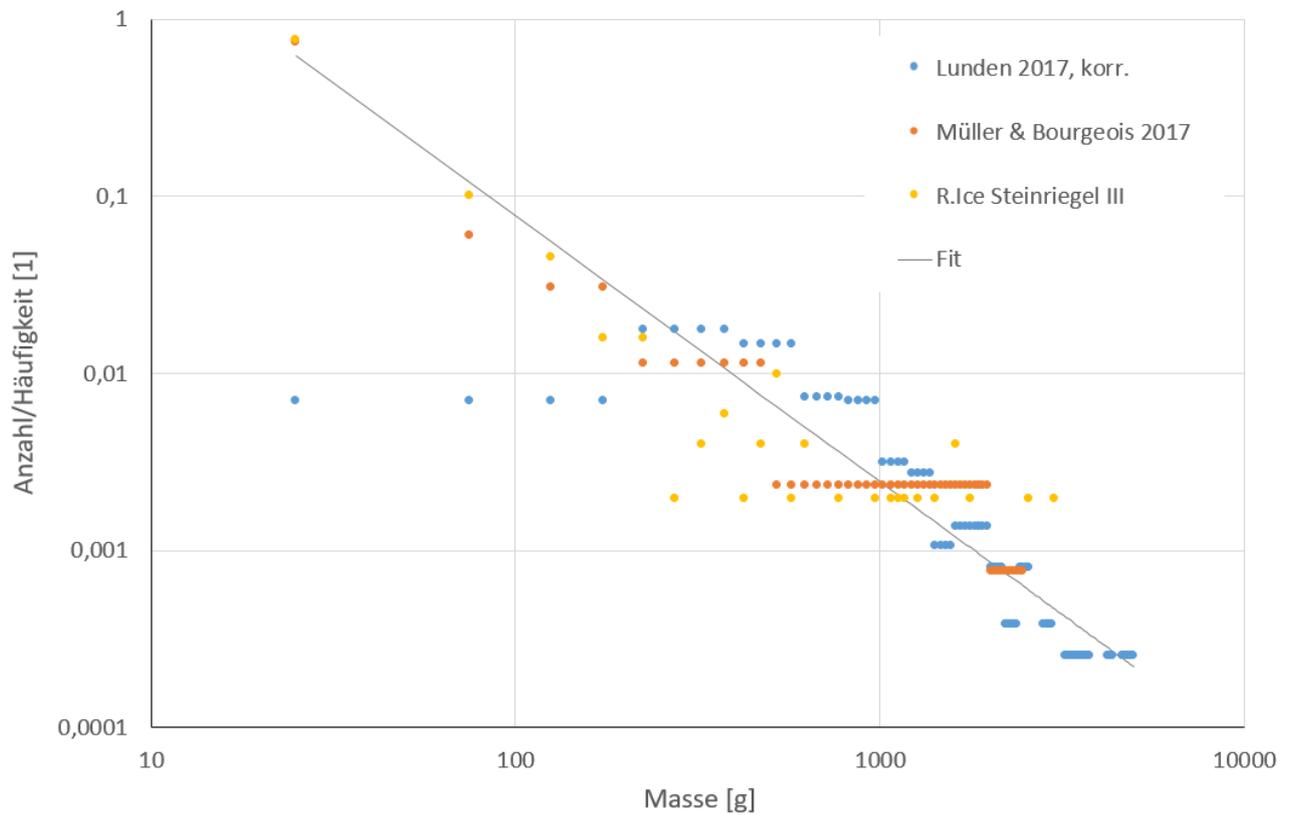


Abbildung 16: Vergleich der in diesem Projekt beobachteten Eisfragmenten mit Ergebnissen aus der Literatur. Werte aus (Lundén 2017) wurden renormiert um unterrepräsentierte Eisstücke in den kleinsten Bins auszugleichen.

4.4 Ausweisung von Kennzeichnungsbereichen

Die Bestimmung und Bewertung des Eisfallrisikos besteht aus zwei Teilen. Der Berechnung der Auftreffwahrscheinlichkeiten der Eisteile und dann darauf basierend die Ermittlung der Risiken für Personen im Umfeld der WKA.

4.4.1 Auftreffverteilungen der Eisfragmente

Die Berechnung der Auftreffverteilungen für die fünf betrachteten Regionen erfolgte auf Basis der regionsweisen Mittelwerten für die Vereisungsklimatologie (Abbildung 10) und die Richtungsabhängigen Windverteilungen (Abbildung 11). Die Anzahl der Eisstücke die pro Jahr durchschnittlich von der WKA abfallen hängt, (1) von den lokalen Vereisungsbedingungen, (2) von der Betriebsführung (bspw. Eisabschaltung oder nicht) und (3) von den Abmessungen der Rotorblätter ab.

In diesem Projekt wurden diese Einflussfaktoren wie folgt behandelt:

- (1) Die Vereisungsbedingungen in den fünf Regionen wie in Abbildung 10 dargestellt, geben eine etwas schwerere Vereisung für Region 3. Da aber ein Unterschied von etwa 15% für die Auftreffverteilungen der Eisteile einen nur sehr geringen Effekt hat, wurden für alle fünf untersuchten Regionen die selbe Vereisungsintensität angenommen.
- (2) Es wird davon ausgegangen, dass die Anlage mit einem zuverlässig funktionierenden Eiserkennungssystem ausgerüstet ist, welches die WKA beim Auftreten von Rotorblattvereisung abschaltet und in den Trudelbetrieb überführt.
- (3) Es wurde angenommen, dass die Anzahl der Eisfragmente linear mit der Rotorblattlänge skaliert, was mit dem theoretischen Modell für das Anwachsen von Eis aus atmosphärischen Wassertröpfchen (Makkonen, Marianiemi und Laakso 2001), (Finstead, Lozowski und Gates 1988) übereinstimmt.

Um allgemein anwendbare Ergebnisse zu bekommen, also unabhängig von einem spezifischen WKA-Typ, wurden 30 unterschiedliche Kombination von Anlagenabmessungen betrachtet. Rotordurchmesser und Nabenhöhen variieren dabei zwischen 40 m und 200 m, unter Beschränkung auf sinnvolle Kombinationen. Damit sind die Abmessungen aller derzeit geplanten, und in der absehbaren Zukunft möglichen, WKA abgedeckt. Eine Liste der untersuchten Anlagenkonfigurationen findet sich in Tabelle 1.

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

Dia [m]	NH [m]	BspH [m]	Eisteile/Jahr
40	40	60	160
60	60	90	240
60	90	120	240
60	120	150	240
80	80	120	320
80	110	150	320
80	140	180	320
100	70	120	400
100	100	150	400
100	130	180	400
100	160	210	400
120	90	150	480
120	120	180	480
120	150	210	480
120	180	240	480

Fortsetzung von links

Dia [m]	NH [m]	BspH [m]	Eisteile/Jahr
140	110	180	560
140	140	210	560
140	170	240	560
140	200	270	560
160	130	210	640
160	160	240	640
160	190	270	640
160	220	300	640
180	120	210	720
180	150	240	720
180	180	270	720
180	210	300	720
200	140	240	800
200	170	270	800
200	200	300	800

Tabelle 1: Liste der untersuchten Anlagekonfigurationen und die jeweils verwendete Anzahl von Eisteilen pro Jahr. (Dia...Durchmesser, NH...Nabenhöhe, BspH...Blattspitzenhöhe)

Als Beispiel für die Form von Auftreffwahrscheinlichkeiten der Eisteilchen ist in Abbildung 17 die Auftreffwahrscheinlichkeit für eine WKA mit einem Rotordurchmesser von 100 m und einer Nabenhöhe von 100 m an einem Standort in der Region 1 dargestellt. Die Legende zur Bedeutung der farbigen Flächen findet sich in Abbildung 18. Die Form der Auftreffverteilung ergibt sich aus der Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen am jeweiligen Standort. In der Auftreffverteilung spiegelt sich also in gewisser Weise die Windrose (vergleiche Abbildung 11) wieder, wenn auch eine eins-zu-eins Korrelation nicht möglich ist.

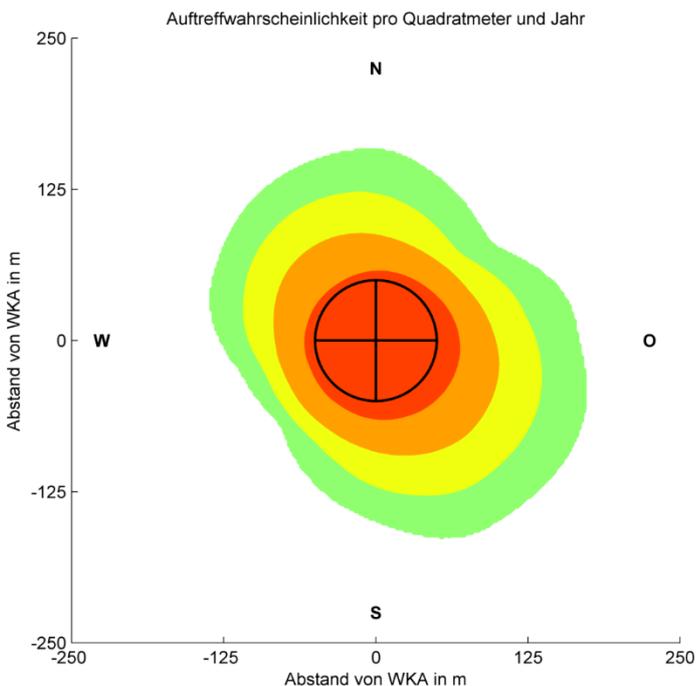


Abbildung 17: Auftreffwahrscheinlichkeit von Eisstücken im Umfeld einer WKA mit einem Rotordurchmesser von 100 m und einer Nabenhöhe von 100 m an einem Standort in der Region 1.

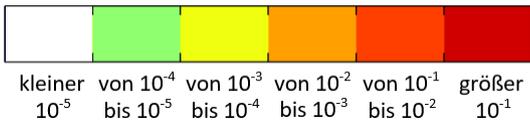


Abbildung 18: Legende zur Auftreffwahrscheinlichkeit von Eisteilchen.
Diese Farbzusammenhang wird gleichermaßen für alle Darstellungen von Auftreffwahrscheinlichkeiten in diesem Dokument genutzt.

Um eine weitreichende und nachhaltige Wirkung in der Praxis zu erzielen, wurde eine möglichst einfache und anschauliche Form der Ergebnisdarstellung angestrebt. Daher wurden für die Festlegung der Kennzeichnungsbereiche nicht mit den flächigen Auftreffverteilungen, wie in Abbildung 17 dargestellt, gearbeitet sondern ausschließlich das Maximum der Auftreffwahrscheinlichkeit über alle Richtungen betrachtet. Abbildung 19 zeigt beispielhaft für die Region 1 die entsprechenden Kurven für das gesamte Ensemble untersuchten Anlagen.

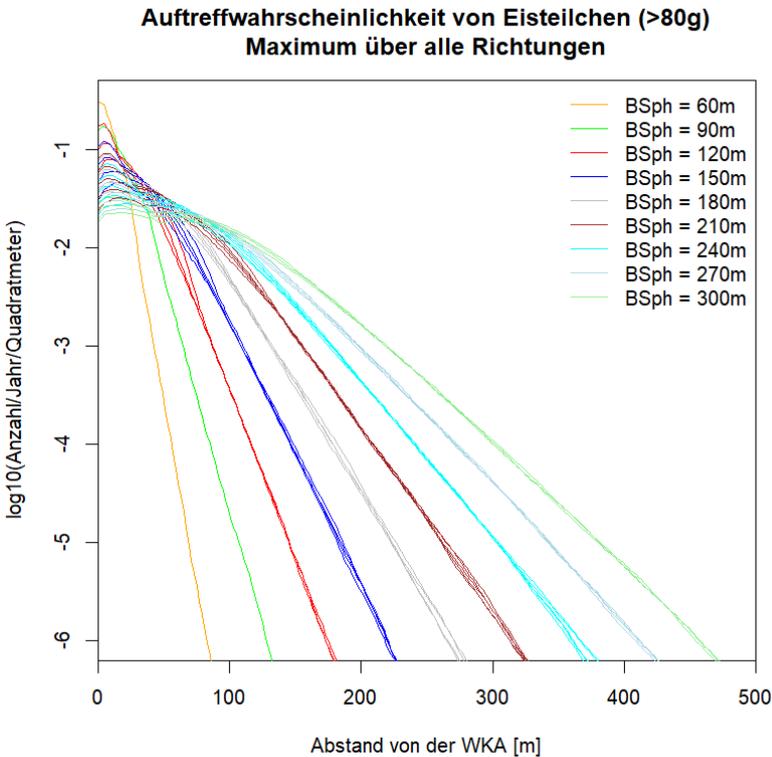


Abbildung 19: Auftreffwahrscheinlichkeit von Eisfragmenten in Abhängigkeit des Abstands von der WKA für alle 30 untersuchten WKA in der Region 1.

In dieser Darstellung wird das Maximum der Auftreffwahrscheinlichkeit über alle Richtungen als Funktion des Abstandes von der WKA aufgetragen. Es fällt auf, dass die einzelnen Kurven der Auftreffwahrscheinlichkeit klar getrennte Gruppen bilden. Die Kurven für Anlagen mit den selben Blattspitzenhöhen (siehe Tabelle 1) sind jeweils in der selben Linienfarbe eingezeichnet. Wie durch diese farbliche Darstellung hervorgehoben, ergeben sich für Anlagen mit den selben Blattspitzenhöhen – mit Ausnahme des unmittelbaren Nahbereichs um die Anlagen – nahezu idente Auftreffverteilungen. Dieses Resultat legt eine Normierung des Abstands vom Turmfuß in Einheiten der Blattspitzenhöhe

nahe, wie in Abbildung 20 gezeigt. In Abbildung 20 sind ebenfalls die Maxima über alle Richtungen der Auftreffwahrscheinlichkeiten für alle 30 untersuchten Anlagenkonfigurationen in der Region 1 dargestellt. Die entsprechenden Abbildungen für die anderen Regionen 2 bis 5 sehen, bis auf leicht unterschiedliche Steigungen der Kurvenbündel, sehr ähnlich aus. In dieser Form und im Maximum über alle Richtungen, lassen sich also die Ergebnisse der Eisfallsimulationen auf eine in weiten Teilen lineare Abhängigkeit von logarithmischer Auftreffwahrscheinlichkeit und dem normierten Abstand von der WKA zusammenfassen.

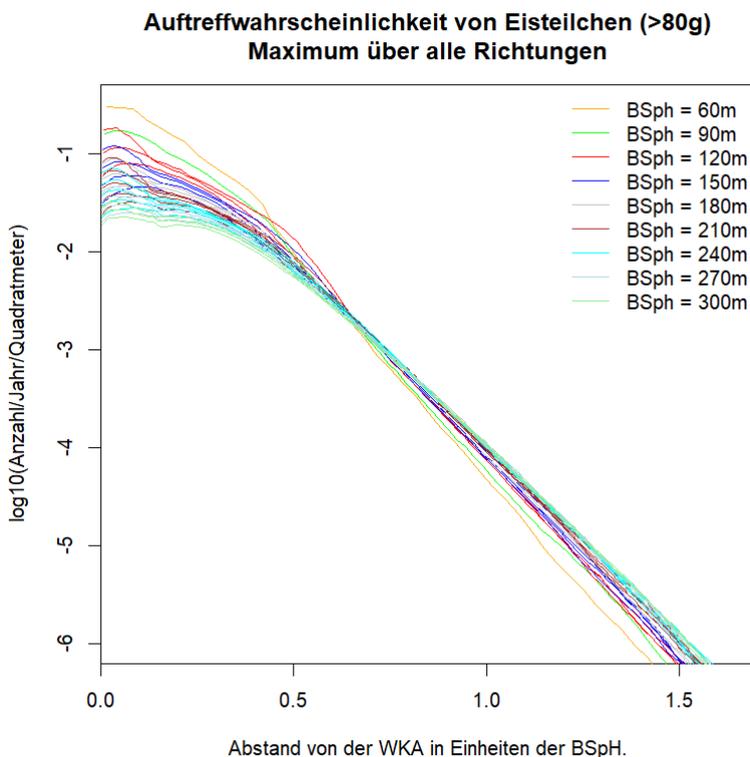


Abbildung 20: Auftreffwahrscheinlichkeit von Eisteilen in Abhängigkeit des Abstands von der WKA (in Einheiten der Blattspitzenhöhe) für alle 30 untersuchten WKA in der Region 1.

4.4.2 Gefährdung von Personen im Umfeld der Windkraftanlagen

Der zweite bestimmende Einflussfaktor für die Eisfall-Gefährdung ist die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Personen die sich ungeschützt im Freien im Umfeld der WKA aufhalten. Für die pauschale, standortunabhängige Betrachtung des Eisfallrisikos, wird dabei von einem typischen Anlagenstandort (ohne besondere Infrastruktur oder höherrangigen Verkehrswegen) ausgegangen, für den die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Personen unter Annahme einer Reihe von Standardszenarien bestimmt wird. Tabelle 2 enthält eine Zusammenstellung der betrachteten Szenarios zusammen mit der angenommenen individuellen Frequentierung durch die meistexponierte Person sowie der kollektiven Frequentierung durch alle Personen. Man beachte, dass es sich bei diesen Frequentierungen um Durchschnittswerte handelt. Beispielsweise kann also die Anzahl der Wanderer an einem Sonntag mit gutem Wetter auch einmal deutlich höher liegen als die durchschnittliche Frequentierung.

	Schutzobjekt	Gefährdungsszenario	Durchschnittliche Frequentierung durch die meistexponierte Person im Winter	Durchschnittliche kollektive Frequentierung im Winter
Auftrittswahrscheinlichkeit kleiner als 10^{-3}	Unspezifiziert	Aufenthalt im Freien, bspw. für landwirtschaftliche Tätigkeiten, bei einer Auftreffwahrscheinlichkeit von kleiner-gleich 10^{-3}	0,5 Stunden pro Tag	
	Wirtschaftsweg verläuft außerhalb von Auftreffwahrscheinlichkeiten von 10^{-3} .	Passanten, Spaziergeher, Jogger, Fahrradfahrer durchqueren den Eisfallbereich auf dem Wirtschaftsweg.	2 mal pro Tag	
	Wirtschaftsweg verläuft außerhalb von Auftreffwahrscheinlichkeiten von 10^{-3} .	Personen in Fahrzeug, z.B. Landwirt oder Jäger, durchqueren den Eisfallbereich auf dem Wirtschaftsweg.	4 mal pro Tag	400 KFZ pro Tag
	Wanderweg verläuft außerhalb von Auftreffwahrscheinlichkeiten von 10^{-3} .	Wanderer durchqueren den Eisfallbereich auf dem Wanderweg.		400 Wanderer pro Tag
	Radweg verläuft außerhalb von Auftreffwahrscheinlichkeiten von 10^{-3} .	Fahrradfahrer durchqueren den Eisfallbereich auf dem Fahrradweg.		1000 Radfahrer pro Tag
Außerhalb des Rotorüberstrichs	Wirtschaftsweg verläuft außerhalb des Rotorüberstrichs.	Passanten, Spaziergeher, Jogger, Fahrradfahrer durchqueren den Eisfallbereich auf dem Wirtschaftsweg unter Missachtung der aktiven Eiswarnlampen.	1 mal in 2 Wochen	10 Personen pro Tag
	Wirtschaftsweg verläuft außerhalb des Rotorüberstrichs.	Personen in Fahrzeug, z.B. Landwirt oder Jäger, durchqueren den Eisfallbereich auf dem Wirtschaftsweg unter Missachtung der aktiven Eiswarnlampen.	1 mal pro Woche	20 KFZ pro Tag
Im Rotorüberstrich	Zuwegung zur WKA im Rotorüberstrich.	Passanten, Spaziergeher, Jogger, Fahrradfahrer benutzen die Zuwegung zur WKA (Stichstraße) unter Missachtung der aktiven Eiswarnlampen.	1 mal pro Monat	3 Personen pro Tag
	Zuwegung zur WKA im Rotorüberstrich.	Personen in Fahrzeug, z.B. Landwirt oder Jäger, benutzen die Zuwegung zur WKA (Stichstraße) unter Missachtung der aktiven Eiswarnlampen.	1 mal pro Monat	3 KFZ pro Tag

Tabelle 2: Zusammenstellung der betrachteten Gefährdungsszenarien. Die Auftreffwahrscheinlichkeiten haben immer die Einheiten von Eisstücke/Jahr/m².

Für alle Szenarien wie in Tabelle 2 dargelegt, eignet sich eine Auftreffwahrscheinlichkeit von 10^{-3} Eisstücken pro Jahr und Quadratmeter als Festlegung für den Bereich um die WKA der durch ein Eiswarnsystem (typischerweise Eiswarnlampen und -Tafeln) gesichert ist („Kennzeichnungsbereich“). Mit dieser Festlegung wird die Gefährdung durch Eisfall in drei abgestuften Zonen betrachtet: (1) im ungesicherten Bereich mit Auftreffwahrscheinlichkeiten kleiner als 10^{-3} Eisstücke/Jahr/m², (2) dem weiter innen liegenden durch das Eiswarnsystem gesicherten Bereich und (3) dem Bereich des Rotorüberstrichs. Alle in Tabelle 2 angeführten Szenarien resultieren für alle gerechnete Anlagenkonfigurationen und in allen Regionen in Todesfallwahrscheinlichkeiten unterhalb der gesellschaftlich akzeptierten Grenzwerte nach (IEA Wind 2018) von 10^{-6} pro Jahr individuell und 10^{-4} pro Jahr kollektiv. Für den Bereich mit Auftreffwahrscheinlichkeiten größer als 10^{-3} Eisstücke/Jahr/m², aber außerhalb des Rotorüberstrichs, wurde im 90% Quantil eine Auftreffwahrscheinlichkeit von 0,031 Eisstücke/Jahr/m² bestimmt (Maximum über alle gerechnete WKA). Für den Bereich des

Rotorüberstrichs ergibt sich im 90% Quantil eine Auftreffwahrscheinlichkeit von 0,2 Eisstücke/Jahr/m² (Maximum über alle gerechnete WKA).

In Tabelle 2 wurde die Gefährdung des Betriebspersonals (Mühlenwart, Wartungsteams) nicht in eigenen Szenarien abgebildet. Da solche Personen zur Eisfallgefahr geschult sind, im Regelfall die Benutzung einer persönlichen Schutzausrüstung vorgeschrieben ist und zudem für Berufsrisiken höhere Akzeptanzwerte gelten, wird die Gefährdung des Betriebspersonals in der Gesamtbetrachtung nie relevant.

Die oben getroffenen Festlegung in der Auftreffwahrscheinlichkeit von 10⁻³ Eisstücke/Jahr/m² lässt sich mit der in Abbildung 20 illustrierten, weitgehend linearen Relation von Abstand und logarithmischen Auftreffwahrscheinlichkeit in einen Mindestradius für den Kennzeichnungsbereich umlegen. Konservativerweise wurde dabei die obere Einhüllende des Kurvenbündels herangezogen. Aus den leicht unterschiedlichen Steigungen in den fünf Regionen ergeben sich etwas unterschiedliche Kennzeichnungsradien wie in Tabelle 3 angeführt

Region	Radius zu einer der Auftreffwahrscheinlichkeit von 10 ⁻³ Eisstücke/Jahr/m ²
Region 1: Südliches Weinviertel und Nordburgenland	0,74·BSpH
Region 2: Nordöstliches Weinviertel	0,74·BSpH
Region 3: Westliches Weinviertel	0,69·BSpH
Region 4: St. Pölten	0,78·BSpH
Region 5: Südlich von Wien	0,78·BSpH

Tabelle 3: Radien für den Kennzeichnungsbereich in den fünf Regionen.

Da diese Ergebnisse recht nahe beieinander liegen, bietet sich eine weitere vereinfachende Zusammenfassung an, womit sich folgender Vorschlag ergibt:

Vorschlag für den Kennzeichnungsbereich in den 5 Regionen: 0,8 mal Blattspitzenhöhe.

Eine Verwendung dieses Radius für die Größe des Kennzeichnungsbereichs, fußt auf in mehrerlei Hinsicht auf konservativen Abschätzungen:

- Maximum der Werte für die einzelnen Regionen (Tabelle 3), aufgerundet auf 0,8·BSpH.
- Maximum über alle Richtungen (Abbildung 20).
- Maximum über alle gerechneten Anlagenkonfigurationen (obere Einhüllende aller Linien in Abbildung 20).

Die tatsächlich berechneten Gefährdungen in einem Szenario aus Tabelle 2 für eine spezifische WKA werden daher im Regelfall mindestens eine Größenordnung unter den relevanten Risikogrenzwerten (10⁻⁶ individuell und 10⁻⁴ kollektiv) liegen.

4.5 Maßnahmen und Richtlinien

In den gesetzlichen Bestimmungen des Bundes und der Länder sind keine dezidierten Regelungen zu Eisabfall zu finden. Relevant für das Thema Eisabfall sind jene Genehmigungsbestimmungen, die darauf abzielen, Gefährdungen, Belastung und unzumutbare Belästigungen von Menschen (insbesondere Nachbarn) zu vermeiden.

Eine Betrachtung des Eisabfallrisikos muss folglich mit den gleichen Maßstäben wie andere Gefährdungen oder Immissionen erfolgen. Die Bestimmungen des UVP-G und der Elektrizitätsgesetze der Länder haben die Bestimmungen der Gewerbeordnung und der dazu ergangenen Rechtsprechung zum Vorbild. Die Judikatur zur Gefährdung von Leben und Gesundheit sowie zur unzumutbaren Belästigung von Nachbarn war auf diese Weise Grundlage für den heutigen Gesetzeswortlaut. Zur Beurteilung der Gesundheitsgefährdung oder unzumutbaren Belästigung sind zuverlässige wissenschaftliche Erkenntnisse sowie die anerkannten Ergebnisse internationaler wissenschaftlicher Forschung zugrunde zu legen. Rein hypothetische Gefahren sind nicht zu berücksichtigen. Es gilt auch keine Beweislastumkehr zu Lasten des Projektwerbers. Ebenso ist es nicht notwendig, dass eine absolute Unbedenklichkeit eines Vorhabens abgeleitet werden kann.¹ Dingliche Rechte (insbesondere Eigentum) werden nur geschützt, wenn die Substanz gefährdet ist, d.h. dass eine ordnungsgemäße Nutzung nicht mehr möglich ist oder die Substanz nicht mehr verwertbar ist. Insbesondere fällt eine Minderung des Verkehrswertes nicht unter den Schutz der einschlägigen Genehmigungsvorschriften. Eine Abwägung der Gesundheit und des Lebens als absolute Schutzgüter gegen ein öffentliches Interesse ist nicht möglich.

4.5.1 Verwaltungspraxis in Verfahren

In der österreichischen Genehmigungspraxis ist die Untersuchung des Eisfallrisikos Teil des Genehmigungsverfahrens. Im Genehmigungsverfahren wird das Augenmerk auf die Auswirkung von Eisabfall auf Personen gelegt. Eine Bewertung des Risikos wird meist zusammen mit sonstigen Projektunterlagen der Behörde vorgelegt, welche gegebenenfalls möglichen Gefährdungen durch Vorschreibung von Auflagen Rechnung trägt. Eine Auswertung der online verfügbaren UVP-Genehmigungsbescheide zeigt eine Vielzahl unterschiedlicher Auflagen.

Einige Maßnahmen sind in allen Bescheiden – wenn auch leicht abgewandelt – zu finden. So sind **Tafeln/Schilder**, die vor der Gefahr des Eisfalles warnen, standardmäßig für alle Windkraftprojekte vorgeschrieben (in 92/92 Bescheiden, ebenso in 8/9 materienrechtlichen Bescheiden). Deren exakte Platzierung sowie Häufigkeit und Ausgestaltung dieser Tafeln/Schilder ist aber in unterschiedlichen Varianten geregelt. Oft wird ein sogenannter Gefährdungsbereich als ausschlaggebendes Merkmal zur Platzierung der Schilder herangezogen. Dieser wird meist als Gesamthöhe der WKA +20 % angegeben. Dennoch ist der Begriff „Gefährdungsbereich“ nicht in den gesetzlichen Vorschriften zu finden und daher auch nicht definiert. Bei einem Teil (38/92) der Bescheide wird die Platzierung der Warntafeln außerhalb des Gefährdungsbereiches festgelegt. Ähnlich wird in einem zweiten Teil (40/92) der Bescheide die Platzierung an Zufahrtswegen zusätzlich mit einer Distanzangabe ergänzt, die zwischen 160 m und

¹ US 8.3.2007, 9B/2005/8-431 Stmk-Bgld 380 kV-Leitung II, Teil Stmk

260 m, abhängig von der Anlagengesamthöhe, variiert. Vereinzelt ist auch die Umfallhöhe das ausschlaggebende Kriterium, und der Gefährdungsbereich wird durch den „Überwachungsbereich“ ersetzt. Es handelt sich dabei jedoch nur um unterschiedliche Termini für Sachverhalte gleicher Bedeutung (Umfallhöhe = Gesamthöhe). Zudem sind vereinzelt Sonderbestimmungen zu finden. So schreibt ein materienrechtlicher Bescheid unter anderem vor, dass auf Nachbargrundstücken in regelmäßigen Abständen Warnschilder aufzustellen sind, unabhängig von den Zufahrtswegen.² In einem steiermärkischen Bescheid sind neben den Zufahrtswegen noch Warntafeln auf „neuralgischen Punkten“ aufzustellen.³ In einem Teil der Bescheiden (10/92) sind keine Distanzen angegeben.

Die **Gestaltung der Warnschilder** ist grob in zwei Arten aufzuteilen: Einerseits ist in etwa der Hälfte der Bescheide gefordert, dass Hinweisschilder vor Eisfall warnen (54/92), andererseits wird mitunter (insbesondere in älteren Bescheiden) gefordert, dass auf den Schildern auf ein "Betretungsverbot" hingewiesen wird. Hierbei handelt es sich meist insofern um eine unmögliche Auflage, als die Wege nicht im Eigentum oder in der Verfügungsgewalt der Windkraftanlagenbetreiber stehen. Ein allfälliges Sperren der Wege ist somit von Dritten (vom Wegehalter oder der Straßen- bzw. Verkehrsbehörde) abhängig und die Durchsetzung dieser Auflage liegt daher nicht in der Macht des Bescheidadressaten. In der Praxis wird dieser Auflage durch Vereinbarungen mit den relevanten Grundstückseigentümern sowie durch Straßensperren durch die Bezirkshauptmannschaft im Verordnungsweg entsprochen. Rechtlich stellt sich hier aber die Frage, ob diese Auflagen den derzeitigen gesetzlichen Vorgaben entsprechen. In jüngerer Zeit ist eine Tendenz festzustellen, dass dem in den Bescheiden dadurch Rechnung getragen wird, dass lediglich auf die Gefahr hinzuweisen ist; ältere Bescheide werden auf Antrag in diese Richtung abgeändert.

Zusätzliche Auflagen in Zusammenhang mit Warnschildern sind **Blinklichter** (90/92 Bescheiden), die zusammen montiert werden müssen. Zwei Bescheide sehen zusätzlich vor, dass Blinklichter an den Windkraftanlagen selbst angebracht werden müssen. Diese sind im beim Abschalten der Anlage aufgrund von Anlagenvereisung automatisch zu aktivieren. Gekoppelt an die Abschaltung der Anlage, sind die Blinklichter nur nach visueller Kontrolle der Anlage zu deaktivieren. Eine automatische Deaktivierung ist meist nicht erlaubt.

Auch hinsichtlich der Frage der **Eiserkennungssysteme** der Anlagen ist eine Vielzahl unterschiedlicher Auflagen in den Bescheiden zu erkennen. In etwa der Hälfte der Bescheide (41/92 Bescheiden) wird vonseiten der Behörde ein „redundantes“ Eiserkennungssystem verlangt. Einige Projekte hingegen bedürfen nur eines Eiserkennungssystems. Großteils – aber eben nicht in allen Bescheiden – wird verlangt, dass zumindest eines dieser Systeme auch bei Stillstand in Betrieb ist.

Zusätzlich dazu ist in vielen Bescheiden die Auflage zur **Dokumentation der Stillstände** und Eisereignisse vorgeschrieben (24/92 Bescheiden). In 14/92 Bescheiden ist zusätzlich noch eine Pflicht zur **Überwachung des Abtauprozesses** vorgeschrieben.

² Genehmigungsbescheid eines NÖ Windparks aus dem Jahr 2014 nach materiengesetzlichen Verfahren.

³ Genehmigungsbescheid eines Stmk Windparks aus dem Jahr 2014 nach dem UVP-G.

Eine weitere Thematik ist das manuelle bzw. **automatische Einschalten** der Windkraftanlagen nach einer Abschaltung aufgrund von Anlagenvereisung. Grundsätzlich dürfen Windkraftanlagen nur manuell wieder in Betrieb gesetzt werden. Einige Bescheide schreiben zusätzlich vor, dass eine Inbetriebnahme bei schlechten Sichtverhältnissen sowie bei Nacht nicht erlaubt ist. Für einige Projekte wurde in jüngerer Zeit die automatische Wiederinbetriebnahme ermöglicht.

4.5.2 Gesetzliche Vorgaben – Auflagen

„Eine Auflage ist eine pflichtenbegründende Nebenbestimmung eines begünstigenden Verwaltungsaktes [...] wobei die Pflicht auf ein Tun, Dulden oder Unterlassen gerichtet sein kann.“⁴ Auflagen stehen in bedingendem Zusammenhang mit dem dazugehörigen Bescheid. Die Bewilligung kann nicht isoliert von den mit ihr verknüpften Auflagen bestehen⁵ und kann auch nicht getrennt werden⁶. Sollte eine Auflage nicht erfüllt werden, kann sie selbständig vollstreckt sowie von Betroffenen eingemahnt werden. Auflagen und Bewilligungen sind daher rechtlich nicht trennbar. Bei Nichterfüllung einer Auflage wird dennoch nicht „ohne Bewilligung“ vorgegangen, sondern bloß die Auflage verletzt. Die Verpflichtung zur Erfüllung der Auflage wird bei Inanspruchnahme des bescheidmäßig verliehenen Rechts verbindlich.⁷

Da Auflagen einen Eingriffscharakter haben, ist die Prüfung, ob eine Maßnahme angemessen und geeignet ist, im Zusammenhang mit dem Verhältnismäßigkeitsprinzip durchzuführen. Manche Materienetze sehen die Möglichkeit vor, dass die Behörde auch nachträglich (nach Rechtskraft der Genehmigung) ergänzende Auflagen vorschreiben kann, wenn dies erforderlich ist, um die Ziele des Gesetzes (z.B. Vermeidung einer Gesundheitsgefährdung) zu erreichen. Bei nachträglichen Auflagen ist der Verwaltungsgerichtshof – wegen des damit verbundenen Eingriffs in die Rechtskraft – in seiner stRsp besonders streng und verlangt, dass einerseits die gesetzlichen Voraussetzungen für das Vorschreiben nachträglicher Auflagen genau zu beachten sind (diese Voraussetzungen sind vielfach strenger als bei der Genehmigung) und andererseits die Einschränkung von erworbenen Rechten unter möglicher Schonung dieser Rechte erfolgen muss.⁸ An Auflagen gelten hohe Anforderungen hinsichtlich "Bestimmtheit". Einerseits soll der Bescheidadressat klar wissen, was zu tun oder zu unterlassen ist. Andererseits muss klar sein, welches (Fehl-)Verhalten unter Strafe steht. Vor allem aber muss die Formulierung der Auflagen für eine allfällige Vollstreckung ausreichend bestimmt sein. Eine weitere Anforderung an Auflagen ist, dass sie das Wesen des Projektes nicht verändern dürfen.

Das UVP-G führt durch den § 17 Abs 2 zusätzliche Genehmigungsvoraussetzungen ein und erlaubt durch seine allgemeine Bestimmung des § 17 Abs 4 umfassendere Auflagen als es in den einzelnen Materienetzen möglich wäre.⁹ Zudem können in der UVP-Genehmigung auch Auflagen nach den Materienetzen vorgeschrieben werden. Daher ist es bei UVP-Genehmigungen wichtig, dass ersichtlich ist, aus welchem Materienetz eine Auflage entspringt. Daraus folgt auch, welche Behörde später (nach dem Abnahmebescheid) für deren Einhaltung zuständig ist.

⁴ vgl VwGH 16.12.2002, 2002/06/0169; B. Raschauer, Allgemeines Verwaltungsrecht³ Rz 921; VwGH 5.9.2001, 99/04/0123.

⁵ vgl das hg. Erkenntnis vom 26. September 2002, Zl. 2001/06/0033.

⁶ VwGH 14.9.1995, 92/06/0006; VwSlg 16.640 A/2005.

⁷ Raschauer in Ennöckl/Raschauer/Bergthaler (Hrsg), UVP-G: Kommentar Aufl. 3 (2013) zu § 17. 36.

⁸ AVG Fister Praktisches Verwaltungsverfahrensrecht.

⁹ Vgl Wimmer in Bergthaler u.a. Kap IX Rz 37.

4.5.3 Vorschläge für Maßnahmen und Auflagen

Aus Gründen der Rechtssicherheit sowie zur Steigerung der Effizienz in Genehmigungsverfahren, ist ein einheitliches Vorgehen der Behörden im Zusammenhang mit Auflagen wünschenswert. Insbesondere für Windparkprojekte, die ähnliche natürliche, geographische und demographische Umgebung aufweisen, sollten einheitliche Auflagen vorgeschrieben werden.

Gemäß den Ergebnissen aus Abschnitt 4.4, kann der Kennzeichnungsbereich in den fünf betrachteten Regionen (Abbildung 5) mit einem Radius von 0,8 mal Blattspitzenhöhe (BspH) um die WKA festgelegt werden. Insbesondere kann diese Formel zur Bestimmung der Betroffenheit von Personen (Liste von betroffenen Parzellen) und der Festlegung der Positionen der Warntafeln und Warnlampen dienen. Um einer missverständlichen Interpretation in der Öffentlichkeit vorzubeugen, sollte für diesen durch das Eiswarnsystem gesicherten Bereich der neutrale Begriff "Kennzeichnungsbereichs" verwendet werden. Der bislang oft gebrachte Begriff "Gefährdungsbereichs" suggeriert eine Gefährdung die in den allermeisten Fällen tatsächlich nicht vorliegt.

Abgehend von der derzeitigen Bescheidpraxis ist an Standorten in den fünf untersuchten Regionen (Abbildung 5), sofern keine sensiblen Schutzobjekte oder besonders hohe Frequentierungen durch Personen vorliegen, eine pauschalierte Beurteilung der Gefährdung möglich:

- Außerhalb von 0,8·BSpH. ist das Risiko auf Güterwegen, aber auch Rad- und Wanderwegen, ohne Eiswarnsystem unterhalb der Risikogrenzwerte.
- Im Bereich innerhalb von 0,8·BspH., aber außerhalb des Rotorüberstrichs, sind Güterwege zulässig, sofern sie durch ein Eiswarnsystem (Tafeln und Leuchten) gesichert sind.
- Im Rotorüberstrich sind keine Verkehrswege (außer der Zuwegung zur WKA) pauschal möglich.
- Sofern im Umfeld der WKA (1,2·BSpH) keine weiteren Schutzobjekte vorhanden sind, ist kein gesondertes Risikogutachten notwendig

Diese Aussagen basieren auf konservativen Annahmen und beinhalten Sicherheitsfaktoren, welche die Gültigkeit für Standorte mit typischen Bedingungen sicherstellen. Das Ergebnis gilt für eine kollektive und eine individuelle Risikobetrachtung. Der auch schon bislang oft verwendete Radius von 1,2·BSpH als Richtwert für den Abstand zu höherrangigen Straßen und anderer Infrastruktur hat sich in den R.Ice Rechnungen im Wesentlichen bestätigt, wurde aber keiner so umfangreichen und rigorosen Prüfung unterzogen wie die 0,8·BspH für den Kennzeichnungsradius.

Um Personen vor dem Betreten des Kennzeichnungsbereichs zu hindern, sollten Warntafeln und Blinklichter außerhalb der Grenzen der Kennzeichnungsbereiche platziert werden. Dabei sollte insbesondere auf die Gegebenheiten der Umgebung (Wege, Eigentümereigenschaft, Sichtbarkeit) eingegangen werden. Die Anzahl der Warnanlagen ist durch die Anordnung des Windparks und die vorhandenen Wegverbindungen vorgegeben, wobei die Sichtbarkeitsbedingungen zu den Warnlampen berücksichtigt werden müssen. Eine gesonderte Kennzeichnung für jede WKA ist nicht notwendig. Bei der Positionierung der Eiswarneinrichtungen ist darauf zu achten, dass auch in Gegenden mit vielen WKA die Zuordnung von Anlagen und der dazugehörigen Beschilderung für die Wegbenutzer klar erkennbar ist. Die Formulierung der Auflagen sollte das temporäre Entfernen der Eiswarntafeln im Sommer erlauben um eine unnötige Behinderung des landwirtschaftlichen Verkehrs und der

Bewirtschaftung zu verhindern. Eine mögliche Formulierung zur Festlegung der oben beschriebenen Anforderungen wäre bspw. folgender Text:

„Auf allen Zuwegungen in das Windparkareal sind in einem Abstand von ca. [0,8xBSpH] (Kennzeichnungsbereich) zu den nächstgelegenen WEAs Hinweisschilder „Achtung, möglicher Eisabfall“ aufzustellen. Der Stillstand der Anlage infolge Vereisung ist beim Hinweisschild mittels Blinkleuchte kundzutun. Diese Hinweisschilder dürfen im Zeitraum vom 15. April bis 15. Oktober jeden Jahres entfernt werden.

Die Blinkleuchten müssen auch bei schlechten Sichtverhältnissen (z.B. Nebel) außerhalb des Kennzeichnungsbereichs erkennbar sein.“

„Die Warntafeln und Blinkleuchten sind in regelmäßigen Abständen – zumindest einmal jährlich vor Beginn der Wintersaison – sowie nach entsprechenden Hinweisen zu kontrollieren. Die Funktionsweise ist sicherzustellen. Darüber sind Aufzeichnungen zu führen und zur Einsichtnahme durch die Behörde bereitzustellen. Ersatzblinkleuchten (für den Fall von Ausfällen) sind vor Ort bereitzuhalten.“

Das automatische Abschalten der Blinklichtanlagen nach Ende der Anlagenvereisung (durch natürliches Abtauen oder mittels Blatt-Enteisungsanlage) sollte standardmäßig – dem Stand der Technik entsprechend – erlaubt sein. Insbesondere dann, wenn die automatische Wiedereinschaltung erlaubt ist.

Wie oben schon festgehalten, sollten keine Betretungsverbote in die Bescheide aufgenommen werden, da es sich hierbei um eine Auflage handelt, die außerhalb der Dispositionsfreiheit des Projektwerbers liegt.

Zur Sicherstellung einer zuverlässigen und ausfallsicheren Funktion der Eiswarnlampen, ist es ausreichend ein einzelnes Eiserkennungssystem mit einer „fail safe“ Funktion vorzuschreiben. D.h. ein System, das so ausgelegt ist, dass im Falle einer Störung auf jeden Fall ein sicherer Status, in diesem Fall also „Vereisung vorhanden“, zurückgemeldet wird. Das Vorsehen redundanter Eiserkennungssysteme ist somit aus Gründen der Ausfallsicherheit nicht erforderlich. Die Verwendung von zwei Eiserkennungssystemen ist daher nur dann notwendig, wenn mit einem System nicht alle Betriebsmodi abdeckt werden können. Ebenso ist das Anbringen von Systemen an mehreren Anlagen innerhalb eines Windparks nur dann geboten, wenn anzunehmen ist, dass innerhalb des Windparks unterschiedliche klimatische Bedingungen herrschen.

„Der Windpark ist mit einem Eiserkennungssystem (im fail-safe-modus) auszustatten, das Eisansatz sowohl bei Betrieb als auch bei Stillstand der Windkraftanlage erkennt.“

Darüber hinaus gehende Vorschriften wie Dokumentationsnachweise oder Schulungen können beispielsweise folgendermaßen festgelegt werden:

„Es sind Dokumentationsnachweise hinsichtlich der Kontrolle, Überprüfung und Verbesserung der Prozesse zu führen. Insbesondere sind Aufzeichnungen über die Abschaltungen infolge

Eisansatz und das Wiederanfahren, jeweils mit Datum, Uhrzeit und Namen der mit der Durchführung betrauten Person zu führen.“

„Die Mühlenwarte sind zumindest alle ... Jahre [Anm.: nicht jährlich] in Bezug auf den risikorelevanten Eisansatz zu schulen und fortzubilden.“

Bislang durften WKA nach einer Abschaltung aufgrund von Anlagenvereisung meist nur manuell wieder in Betrieb gesetzt werden. Unter Verweis auf die oben festgelegten „fail safe“ Anforderungen an das Eiserkennungssystem in allen Betriebsmodi der Anlage, also auch dem Stillstand der WKA, spricht jedoch nichts gegen das automatische Wiederanlaufen der WKA nach einer Eisabschaltung. Als verbleibende Anforderungen an die Eisabschaltung lässt sich also folgender einfacher Text formulieren:

„Bei erkanntem Eisansatz ist die Anlage automatisch abzuschalten und sind die Blinkleuchten automatisch zu aktivieren.“

Eine wegen Eisansatz stillgelegte WEA darf erst wieder in Betrieb genommen – und die Blinkleuchten erst dann deaktiviert – werden, wenn die Eisfreiheit durch eine visuelle Überprüfung durch geschultes Personal vor Ort oder durch ein dafür zertifiziertes Eiserkennungssystem nachgewiesen ist.

Sofern es die Bedingungen vor Ort erlauben, bspw. an sehr abgelegenen Standorten, könnte die Abschaltung prinzipiell auch entfallen, also ein Weiterbetrieb unter Vereisungsbedingungen zulässig sein. Voraussetzung dafür ist der Nachweis in Form eines Eisfallrisikogutachtens, dass die damit verbundenen Gefährdungen unterhalb der entsprechenden Risikogrenzwerte liegen. Der Umfang des Kennzeichnungsbereichs muss dabei entsprechend den Ergebnissen des Risikogutachtens angepasst werden.

Eine Überwachung des Abtauvorganges von vereisten Rotorblättern durch Mühlenwarte (bzw. unterwiesenen Personen) zur Vermeidung einer Gefährdung von Personen innerhalb des Kennzeichnungsbereiches ist nicht erforderlich, da die damit verbundenen Gefährdungen durch die Eisfallrisikobewertung bereits berücksichtigt sind.

Abschließend wäre noch festzuhalten, dass, im Sinne einer möglichst einfachen und eindeutigen Dokumentation, nur solche Punkte in der Form von Bescheidaufgaben festgeschrieben werden sollten, die nicht ohnehin schon Teil der genehmigten Vorhabensbeschreibung oder der Betriebsvorschriften sind. Sofern also das Eiswarnkonzept, das Eiserkennungssystem und das Verfahren bei Anlagenvereisung in der Projektdokumentation eindeutig enthalten sind, besteht keine Notwendigkeit zur Formulierung diesbezüglicher Auflagen.

5 Ausblick und Empfehlungen

Die Modellierung von Vereisung an Windkraftanlagen und Windmessgeräten, bzw. allgemein an Infrastruktur, hat zu einem tieferen Verständnis für mikrophysikalische Prozesse in der Atmosphäre und deren Mess- und Modellierbarkeit geführt. Darauf aufbauend sowie durch weitere Untersuchungen unter Einbezug von Radarreflektivitäten aus dem österreichischen Wetterradarsystem können nun weitere

Forschungsaktivitäten etwa zur Modellevaluation und zur Modellverbesserung in Angriff genommen werden. Durch das Ausprogrammieren des Vereisungsmodells und der Schaffung einer operationellen Ankopplung zu den Klimamodellen (bzw. numerischen Wettermodellen) CCLM und WRF wurde ein erster wichtiger Schritt für weitere Aktivitäten in Richtung Klimafolgenforschung gesetzt. In Folgeprojekten könnten nun beispielsweise die Auswirkungen des Klimawandels auf Vereisung an Infrastruktur abgeschätzt werden. In R.Ice ist es auch gelungen, unmittelbare Ergebnisse aus der Grundlagenforschung (z.B. die im Rahmen von NHCM-2 durchgeführten Wetterrekonstruktionen mit CCLM und WRF) für praktische Anwendungen zu nutzen und gleichzeitig neue Impulse für weiterführende Forschungsaktivitäten aufzuzeigen.

Die Beobachtung und Erfassung von Eisfall mit dem entwickelten kamerabasierten 3D-Messsystem liefert bei guten Sichtbedingungen aufschlussreiche Daten über Zeitpunkt, Größe und Position der herabfallenden Eisstücke. Insbesondere die Erfassung von auch sehr kleinen Eisstücken ist dabei eine wertvolle Ergänzung der bislang existierenden Datensätze. In der Praxis hat jedoch die häufige Koinzidenz von Eisfallereignissen und schlechten Sichtbedingungen durch Nebel oder Schneefall die Limitierungen eines rein optischen Erfassungssystems deutlich aufgezeigt. Eine abschließend zufriedenstellende Lösung für die messtechnische Erfassung von herabfallenden WKA ist daher mit dem optischen System noch nicht gefunden.

Mit der flächendeckenden Vereisungskarte für Österreich ist eine wesentliche Datenbasis zur Beurteilung der Vereisungsproblematik geschaffen und durch die Veröffentlichung auf der Projektseite www.eisatlas.at der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt worden. In dem für die Windenergienutzung wichtigen Nordosten Österreichs, ist zudem in fünf relativ homogenen Regionen eine systematische und umfassende Betrachtung des Eisfall von WKA durchgeführt worden. Die in weiten Teilen lineare Beziehung von Abstand und logarithmischen Auftreffwahrscheinlichkeit erlaubt eine einfache Korrelation der Eisfallergebnisse mit Gefährdungsszenarien von Personen im Umfeld der WKA. Standard-Szenarien für typische Windenergie Standorte in den betrachteten Regionen führen so zu einer gut abgesicherten Empfehlung von einem Radius von 0,8 mal Blattspitzenhöhe als Festlegung für den Kennzeichnungsbereich.

Die pauschale Behandlung der Gefährdung durch Eisfall anhand von Standardszenarien ist eine potentielle Möglichkeit die Behandlung von Eisabfall im Genehmigungsfahren zu vereinfachen. Eine solche Vorgangsweise wäre auch ein Fortschritt in dem Bestreben, dass für Windparkprojekte mit ähnlichen meteorologischen, geographischen und demographischen Bedingungen auch gleichartige Maßnahmen und Bescheidaufgaben formuliert werden sollten.

6 Literaturverzeichnis

- Ban, N., J. Schmidli, und Ch. Schaer. „Evaluation of the convection-resolving regional climate modeling approach in decade-long simulations.“ *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, Vol. 119, Nr. 13, 2014: 7889-7907.
- Ban, N., L. Egloff, J. Schmidli, und C. Schär. „Preliminary results of the cloud-resolving simulations for the greater Alpine region (Poster).“ *6th CLM Community Assembly 2011*. 2011.
- Bechtold, P., et al. „Advances in simulating atmospheric variability with the ECMWF model: From synoptic to decadal time-scales.“ *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 134, Nr. 634, 2008: 1337-1351.
- Böhm, U., et al. „CLM - The Climate Version of LM: Brief Description and Long-Term Applications.“ *COSMO Newsletter*, Vol. 6, 2006: 225-235.
- Coppola, E., et al. „A first-of-its-kind multi-model convection permitting ensemble for investigating convective phenomena over Europe and the Mediterranean.“ *Climate Dynamics*, 2018.
- Dee, D. P., et al. „The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system.“ *Q.J.R.Meteorol.Soc.*, Vol. 137, Nr. 656, 2011: 553-597.
- Finstead, Karen J., Edward P. Lozowski, und Edward M. Gates. „A Computational Investigation of Water Droplet Trajectories.“ *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 5, 1988.
- Födermayr, M. *Temperaturinversionen und ihre Darstellung in regionalen Klimamodellen in den Ostalpen*. Master Thesis, University of Graz, 2017.
- IEA Wind, Task 19. „International Recommendations for Ice Fall and Ice Throw Risk Assessments.“ 2018.
- Jacob, D., et al. „EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research.“ *Regional Environmental Change*, Vol. 14, Nr. 2, 2014: 563-578.
- Knist, S., K. Goergen, und C. Simmer. „Evaluation and projected changes of precipitation statistics in convection-permitting WRF climate simulations over Central Europe.“ *Climate Dynamics*, 2018.
- Lundén, Jenny. „ICETHROWER Mapping and tool for risk analysis.“ *Winterwind*. Skellefteå, 2017.
- Makkonen, L. „Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures.“ *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. -Math. Phys. Eng. Sci.*, Vol. 358, 2000: 2913-2939.
- Makkonen, L., M. Marianiemi, und T. Laakso. „Modeling and prevention of ice accretion on wind turbines.“ *Wind Engineering*, 2001: 3-21.
- Maraun, D., et al. „Towards process-informed bias correction of climate change simulations.“ *Nature Climate Change*, Vol. 7, Nr. 11, 2017: 664-773.
- Müller, Stefan C., und Saskia Bourgeois. „Unique data set of ice pieces fallen or thrown from wind turbines.“ Amsterdam, 2017.
- Piazza, M., A. F. Prein, H. Truhetz, und A. Csaki. „On the sensitivity of precipitation in convection-permitting climate simulations in the Eastern Alpine region.“ *Meteorol. Z.*, 2019.
- Prein, A. F., et al. „Added value of convection permitting seasonal simulations.“ *Clim.Dyn.*, Vol. 41, Nr. 9-10, 2013: 2655-2677.
- . „A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges.“ *Rev. Geophys.*, Vol. 53, Nr. 2, 2015: 323-361.

- Schlager, Ch., G. Kirchengast, J. Fuchsberger, A. Kann, und H. Truhetz. „A spatial evaluation of high-resolution wind fields from empirical and dynamical modeling in hilly and mountainous terrain.“ *Geoscientific Model Development Discussions*, 2018.
- Seity, Y., et al. „The AROME-France Convective-Scale Operational Model.“ *Mon. Weather Rev.*, Vol. 139, Nr. 3, 2011: 976-991.
- Skamarock, W. C., et al. *A description of the advanced research WRF version 2*. Report, Mesoscale and Microscale Meteorology Division at NCAR, 2005.
- Srivastava, R. C., und J. L. Coen. „New Explicit Equations for the Accurate Calculation of the Growth and Evaporation of Hydrometeors by the Diffusion of Water Vapor.“ *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 49, Nr. 17, 1992: 1643-1651.
- Themeßl, M. J., A. Gobiet, und A. Leuprecht. „Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models.“ *Int.J.Climatol.*, Vol. 31, Nr. 10, 2011: 1530-1544.
- Thompson, G., P. R. Field, R. M. Rasmussen, und W. D. Hall. „Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization.“ *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 136, Nr. 12, 2008: 5095-5115.
- Truhetz, H., A. Gobiet, und G. Kirchengast. „Evaluation of a dynamic-diagnostic modelling approach to generate highly resolved wind fields in the Alpine region.“ *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 16, Nr. 2, 2007: 191-201.
- Wienerroither, C., A. Leuprecht, H. Truhetz, und A. Krenn. „On the Formation of an icing atlas in Austria (Poster).“ *Winterwind 2019*. Umea, Sweden, 2019.
- Wilcke, R., T. Mendlik, und A. Gobiet. „Multi-variable error correction of regional climate models.“ *Climatic Change*, Vol. 120, Nr. 4, 2013: 871-887.