

IEA Windenergie Task 19: Windenergie in kalten Klimazonen

Arbeitsperiode 2019 - 2021

A. Krenn, A. Stökl, C. Rittinghaus

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

52/2023

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter nachhaltigwirtschaften.at

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist.

Nutzungsbestimmungen: nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/

IEA Windenergie Task 19: Windenergie in kalten Klimazonen

Arbeitsperiode 2019 - 2021

DI Andreas Krenn, Dr. Alexander Stökl, Dipl.-Phys. Claas Rittinghaus
Energiewerkstatt

Friedburg, März 2023

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Programm FORSCHUNGSKOOPERATION INTERNATIONALE ENERGIEAGENTUR. Es wurde vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) initiiert, um Österreichische Forschungsbeiträge zu den Projekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu finanzieren.

Seit dem Beitritt Österreichs zur IEA im Jahre 1975 beteiligt sich Österreich aktiv mit Forschungsbeiträgen zu verschiedenen Themen in den Bereichen erneuerbare Energieträger, Endverbrauchstechnologien und fossile Energieträger. Für die Österreichische Energieforschung ergeben sich durch die Beteiligung an den Forschungsaktivitäten der IEA viele Vorteile: Viele Entwicklungen können durch internationale Kooperationen effizienter bearbeitet werden, neue Arbeitsbereiche können mit internationaler Unterstützung aufgebaut sowie internationale Entwicklungen rascher und besser wahrgenommen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch viele IEA Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und auch in der Marktumsetzung konnten bereits richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Publikationsreihe und die entsprechende Homepage www.nachhaltigwirtschaften.at gewährleistet wird.

DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	7
2	Abstract	8
3	Ausgangslage	9
4	Projekthalt	11
	4.1. Beschreibung des IEA Wind Task 19	11
	4.2. Forschungsschwerpunkt: „Ergänzende Aspekte bei der Bewertung des Eisfallrisikos“	13
	4.3. Forschungsschwerpunkt „Bewertungsempfehlung für das Risiko durch Eiswurf“	14
5	Ergebnisse	15
	5.1. Allgemeine Ergebnisse aus dem Task 19	15
	5.2. Forschungsschwerpunkt „Ergänzende Aspekte bei der Bewertung des Eisfallrisikos“	16
	5.2.1. Vereisungsdaten	16
	5.2.2. Risikoanalyse	20
	5.2.3. Vorlage eines allgemeingültigen Warnschilds für Eisfall	22
	5.3. Forschungsschwerpunkt „Bewertungsempfehlung für das Risiko durch Eiswurf“	23
	5.3.1. Modellierung von Eisfall und -wurf	24
	5.3.2. Risikoakzeptanzkriterien und Frequentierungsannahmen	27
	5.3.3. Faustformeln für Sicherheitsabstände bei Eisfall und -wurf	30
	5.3.4. Anwendungsbeispiel.....	34
6	Vernetzung und Ergebnistransfer	37
7	Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen	39

1 Kurzfassung

Im Jahresverlauf treten an einer vom Klima des Standortes abhängigen Anzahl von Tagen Wetterbedingungen auf, welche zu Vereisung führen. Etwa 15 % der derzeitigen Windenergieanlagenstandorte in Österreich können als sogenannte „*Cold Climate*“-Standorte mit häufiger Vereisung eingestuft werden. Hier stellt die Vereisung eine große Herausforderung sowohl während der Projektierung als auch während des Betriebes der Anlagen dar. Aber selbst bei den Standorten in jenen Regionen Ost-Österreichs, wo ein Großteil der österreichischen Windenergieanlagen in Betrieb ist, treten mehrmals pro Jahr Vereisungsereignisse auf, welche insbesondere in Hinblick auf Sicherheits- und Risikoaspekte zu berücksichtigen sind.

Der Task 19 der IEA Wind setzt sich seit mehr als 20 Jahren mit den vielfältigen Herausforderungen von Windenergie unter Vereisungsbedingungen auseinander. Das primäre Ziel dieser internationalen Forschungskoooperation ist die Sammlung und das Generieren neuer Erkenntnisse durch wechselseitigen Erfahrungsaustausch sowie globale Vernetzung. Die Energiewerkstatt fungierte hierbei als nationale Schnittstelle zu den IEA-Aktivitäten im Task 19, um für einen reibungslosen Knowhow-Transfer der internationalen Expertise nach Österreich zu sorgen. Dieser Bericht behandelt die Ergebnisse und die Teilnahme der Energiewerkstatt in der sechsten Periode des Task 19. Im Zuge dessen wurden von der Energiewerkstatt die folgenden zwei Forschungsschwerpunkte bearbeitet und in die Kooperation eingebracht:

(1) Die Energiewerkstatt setzte die Leitung eines Subtasks fort, der sich mit der Bewertung des Risikos durch Eisfall und Eiswurf auseinandersetzt. Als Ergebnis wurde eine um wesentliche Aspekte ergänzte und aktualisierte Empfehlung des Task 19 hinsichtlich der Selektion und Festlegung der maßgeblichen Inputgrößen für die Bewertung des Risikos durch Eiswurf/Eisfall erarbeitet. Die wichtigsten Bausteine hierfür sind geeignete numerische Verfahren, Beobachtungsdaten (insbesondere zur Anzahl und Beschaffenheit von Eisfragmenten), konzeptionelle Ansätze zur Definition akzeptabler Risikoniveaus und mögliche Maßnahmen zur Risikominderung. Die nun veröffentlichte zweite Auflage verfeinert diese Methodik nach den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen sowie Erfahrungen aus der Praxis und bietet neue und überarbeitete Leitlinien für eine eingehende Risikoanalyse und -bewertung der Vereisung von Windenergieanlagen.

(2) Die Energiewerkstatt erarbeitete des Weiteren pauschale Bewertungsempfehlungen für das Risiko durch Eiswurf von Windenergieanlagen. Dafür wurden auf Basis von errechneten Auftreffwahrscheinlichkeiten und konservativen Annahmen für die Frequentierung einzelner Schutzobjektkategorien Faustformeln zur Errechnung der entsprechend einzuhaltenden Abstände zu den Schutzobjekten ermittelt. Ziel war es, eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für einen Weiterbetrieb von Windenergieanlagen auch bei Vereisung zu schaffen, vorausgesetzt die entsprechenden Mindestabstände in Bezug auf die jeweiligen Schutzobjektkategorien werden eingehalten. Für einen Beispielstandort der IEA Vereisungsklasse 2 mit 9,7 m/s mittlerer Windgeschwindigkeit in Hauptwindrichtung in Nabenhöhe 150 m ergibt sich ein einzuhaltender Abstand in Höhe der 2,7-fachen Blattspitzenhöhe für die Schutzobjektkategorie höherrangiger Straßen und Eisenbahntrassen. Bei einer inzwischen gängigen Blattspitzenhöhe von 225 m ergibt sich daraus ein für den Weiterbetrieb bei Vereisung einzuhaltender Abstand von 611 m.

2 Abstract

During the course of the year, weather conditions that lead to icing occur on a number of days depending on the climate of the site. About 15 % of the current wind turbine sites in Austria can be classified as so-called “cold climate” sites with frequent icing. Here, icing is a major challenge both during project planning and during operation of the turbines. But even at the sites in those regions of Eastern Austria, where a large part of the Austrian wind turbines are in operation, icing events occur several times a year, which have to be considered especially with regard to safety and risk aspects.

IEA Wind's Task 19 has been addressing the many challenges of wind energy under icing conditions for more than 20 years. The primary goal of this international research cooperation is the collection and generation of new knowledge through mutual exchange of experience and global networking. In this context, Energiewerkstatt acted as a national interface to the IEA activities in Task 19 in order to ensure a smooth transfer of knowledge of the international expertise to Austria. This report deals with the results and the participation of Energiewerkstatt in the sixth period of Task 19. In the course of this, the Energiewerkstatt worked on the following two main research areas and contributed to the cooperation:

(1) Energiewerkstatt continued to lead a subtask dealing with the assessment of the risk due to ice fall and ice throw. As a result, a Task 19 recommendation with regard to the selection and definition of the relevant input variables for the assessment of the risk due to ice throw/ice fall, supplemented and updated by essential aspects, was developed. The main building blocks for this are appropriate numerical methods, observational data (especially on the number and nature of ice fragments), conceptual approaches to define acceptable levels of risk, and possible mitigation measures. The second edition now published refines this methodology according to the latest scientific knowledge as well as practical experience and provides new and revised guidelines for in-depth risk analysis and assessment of wind turbine icing.

(2) Furthermore, Energiewerkstatt developed blanket assessment recommendations for the risk from ice throw of wind turbines. Based on calculated impact probabilities and conservative assumptions for the frequency of individual protected object categories, rules of thumb were determined for calculating the distances to be maintained to the protected objects. The aim was to create a scientifically sound basis for the continued operation of wind turbines even in the event of icing, if the corresponding minimum distances in relation to the respective protected object categories are maintained. For an example site of IEA icing class 2 with a mean wind speed of 9.7 m/s in the main wind direction at a hub height of 150 m, the distance to be maintained is 2.7 times the blade tip height for the protected object category of higher-ranking roads and railroad lines. With a common blade tip height of 225 m, this results in a distance of 611 m to be maintained for continued operation in the event of icing as a conservative estimate.

3 Ausgangslage

Das Technologiekollaborationsprogramm (TCP) der IEA Wind wurde im Jahr 1977 mit dem Ziel gegründet, die internationale Zusammenarbeit im Bereich der Windenergieforschung zu stimulieren sowie den Mitgliedsstaaten und der Industrie hochwertige Informationen und Analysen zur Verfügung zu stellen. Dahingehend werden unter den Partnern des IEA Wind TCP wechselseitig Informationen zur Planung und Durchführung von nationalen Windenergieprojekten ausgetauscht sowie kooperative Forschungs- und Entwicklungsprojekte (sog. Tasks) durchgeführt. Jeder dieser Tasks wird von einer Operating-Agent-Organisation aus den Mitgliedsstaaten gemanagt. Nur die Vertragspartner jener Länder, die an den Ergebnissen der Tasks interessiert sind, entscheiden sich zu einer Teilnahme, indem sie den Annex unterzeichnen und inhaltlich zur Arbeit beitragen. Die technischen Ergebnisse der Tasks werden unter diesen Mitgliedsstaaten verbreitet. Aktuell sind im IEA Wind TCP 26 Partner aus 21 Nationen, dem Chinesischen Windenergieverband, dem europäischen Windenergieverband und der Europäischen Kommission vertreten. Diese Partner bilden ein globales Netzwerk aus Forscher:innen und Policy-Expert:innen, die sich auf den Knowhow-Transfer aus der aktuellen Technologieforschung und der praktischen Anwendung fokussieren, um die Hemmnisse des Windenergieausbaues zu überwinden. (IEA Wind TCP, 2023)

Weltweit wird eine wachsende Anzahl von Windenergieanlagen an Standorten installiert, bei denen aufgrund der meteorologischen Voraussetzungen Vereisungsereignisse und sehr niedrige Temperaturen auftreten. Diese Einflüsse stellen große Herausforderungen sowohl während der Erhebung der Standortqualität als auch während des Betriebs der Anlagen dar. Dennoch ist das Interesse an Windenergie in diesen Klimazonen über die letzten Jahre stark angestiegen und Marktrecherchen zufolge wird sich dieser Trend in den kommenden Jahren fortsetzen: Entsprechend der jüngsten Marktstudie, die der Task 19 in dieser Berichtsperiode auf der Winterwind-Konferenz 2021 präsentiert hat (Karlsson, 2021), waren im Jahr 2015 bereits 127 GW an Windkraftleistung an Standorten mit „*Cold Climate*“-Bedingungen installiert. Zwischen 2016 und 2020 wurden weitere 30 GW an entsprechenden Standorten zugebaut. Der Forecast für das Jahr 2025 geht von einer gesamt installierten Leistung von 224 GW an diesen Standorten aus, was einem jährlichen Zubau von mehr als 13 GW entspricht. Schon heute stellt der „*Cold Climate*“-Markt damit den größten Teilmarkt mit spezifischen technischen Anforderungen innerhalb des Windkraftmarkts dar, im Onshore-Bereich betreffen die Anforderungen 20% der installierten Windkraftleistung.

Der Task 19 des IEA Wind TCP (mit dem englischen Titel „*Wind Energy in Cold Climates*“) wurde im Jahr 2002 mit dem Ziel gegründet, sich mit den oben erwähnten Herausforderungen der Windenergienutzung unter Vereisungsbedingungen und sehr niedrigen Temperaturen zu befassen, Best-Practice Beispiele zu sammeln und darauf aufbauend Empfehlungen für die Industrie zu erarbeiten. Die Aktivitäten fokussieren sich auf Fragestellungen in Zusammenhang mit der Anwendung von speziellen „*Cold Climate*“-Technologien und Dienstleistungen, die für diese Standorte entwickelt wurden. Deren Entwicklung schreitet in den einzelnen Ländern stetig voran und hat in vielerlei Hinsicht eine Wettbewerbssituation erreicht. Allerdings fehlen in vielen Bereichen internationale Richtlinien und Standards hinsichtlich ihrer Anwendung. Ein Schwerpunkt der diesmaligen Arbeitsperiode lag daher auf der Erarbeitung von Empfehlungen zur Standardisierung einzelner Technologien und Verfahren sowie deren Anwendung.

In der letzten Arbeitsperiode wurden für den Bereich der Risikobewertung zu Eiswurf und Eisfall bereits Empfehlungen erarbeitet, die eine standardisierte Betrachtung anhand mathematischer Modellierung von Fall- und Wurftrajektorien sowie der Berechnung lokaler Auftreffwahrscheinlichkeiten und der fundierten Abschätzung der Frequentierung der Umgebung bzw. umliegenden Einrichtungen beschreiben. Als Fortführung dazu sollte in dieser Berichtsperiode die Vertiefung von Aspekten u.a. zum projektspezifischen Vereisungsgeschehen in Verbindung mit Blattheizungssystemen sowie zum Einbezug von lokalen und übergreifenden Hintergrund-Risiken in die vereisungsspezifische Betrachtung stattfinden.

Ein weiterer Fokus der spezifisch österreichischen Projektarbeit lag auf der hierzulande vorgeschriebenen vereisungsbedingten Abschaltung von Windenergieanlagen, die in den meisten anderen Teilnehmerländern des Task 19 gänzlich unüblich ist. Österreichische Anlagen an Standorten mit einem nicht vernachlässigbaren Vereisungsrisiko müssen auf Eisansatz überwacht werden und im Erkennungsfall bis zur Feststellung der Eisfreiheit durch geeignete Sensorik oder visuelle Inspektion durch den Betreiber abgeschaltet bzw. in den Trudelbetrieb überführt werden und verbleiben. Zurückgeführt wird diese Praxis auf das vermeintlich höher einzuschätzende Risiko durch vom sich drehenden Rotor weggeschleuderte Eisstücke – Eiswurf – im Gegensatz zu vom ruhenden Rotor herunterfallenden und lediglich durch den momentanen Wind verfrachteten Eisstücken – Eisfall. Um für den österreichischen Dialog zu einem möglichen – wie in anderen Ländern üblichen – Weiterbetrieb eine wissenschaftlich fundierte Grundlage zu schaffen, sollte in dieser Berichtsperiode eine vereinfachte, konservative Berechnungsformel für standortspezifische Eiswurf-Sicherheitsabstände erarbeitet werden.

Beide Schwerpunkte stützen sich jeweils auf die Vorarbeiten der vergangenen Arbeitsperiode des Tasks sowie auf die Ergebnisse des nationalen Forschungsprojekts R.Ice (FFG-Nr. 853629), welches sich u. a. mit der regionsweisen Ausweisung von Eisfall-Kennzeichnungsbereichen anhand der Modellierung von Auftreffwahrscheinlichkeiten von Eisstücken sowie Annahmen über die Aufenthaltsszenarien von Personen im Umfeld von Windenergieanlagen beschäftigt hat.

4 Projektinhalt

4.1. Beschreibung des IEA Wind Task 19

Der IEA Wind Task 19 „Windenergie in kalten Klimazonen“ wurde 2002 eingerichtet und hat seitdem sechs erfolgreiche Perioden mit jeweils 3 Jahren durchlaufen. In der letzten, sechsten Periode haben sich acht Nationen am Task 19 beteiligt, der Operating Agent wurde von Finnland gestellt. Eine Zusammenstellung der teilnehmenden Nationen sowie deren Vertretungen im Task 19 findet sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Teilnehmende Nationen in der sechsten Periode des Task 19.

Nation	Vertreten durch	Beschreibung
Dänemark	DTU, Technical University of Denmark	Technische Universität und weltweit eines der größten Institute in dem Bereich der Windenergie
Deutschland	Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung	Eine der größten Europäischen Forschungseinrichtungen im Bereich der Materialforschung, u. a. bzgl. Oberflächenbearbeitung und -beschichtungen
Finnland (Operating Agent)	VTT Technical Research Centre of Finland Ltd.	Großes Forschungsinstitut das an einem breiten Spektrum angewandter technischer Forschungsthemen arbeitet
Kanada	Nergica	Zentrum für angewandte Forschung im Bereich der erneuerbaren Energien
Norwegen	Kjeller Vindteknikk	Unternehmen für Windmessung und -auswertung
Österreich	Energiewerksatt Verein	Technisches Büro für erneuerbare Energie
Schweden	WindREN Vattenfall	Windenergie Beratungsunternehmen Großes internationales Energieversorgungsunternehmen
Schweiz	Meteotest	Anbieter von Dienstleistungen zu Wetter, Klima, Umwelt und Informatik

Der Schwerpunkt der Tätigkeiten im Task 19 während der sechsten Periode lag auf einer Fortführung der Anstrengungen hin zu einer Standardisierung von „Cold Climate“-Themen. Dieser Schwerpunkt

geht dabei ursprünglich auf eine Umfrage bei der Winterwind Konferenz 2015 zurück, die den Mangel an Empfehlungen, Richtlinien und Normen als eine der größten Herausforderungen und Hindernisse bei der Umsetzung von Windenergieprojekten an Standorten in kalten Klimazonen identifizierte. Bereits die letzte Arbeitsperiode des Task 19 widmete sich daher verstärkt diesem Themenfeld.

Aufgrund des Umfangs und der Komplexität der damit verbundenen Aufgaben war eine Überprüfung und Weiterentwicklung der bisher erarbeiteten Ergebnisse die logische und gebotene Zielsetzung für diese Arbeitsperiode. Die Überprüfung bezog sich dabei vor allem auf zwei der in der letzten Arbeitsperiode erarbeiteten Publikationen: Zum einen die *Performance Warranty Guidelines for Wind Turbines in Icing Climates*, die u.a. Empfehlungen für die Vereinbarung und Validierung von Ertragszuwächsen durch den Einsatz von sog. „Ice Protection Systems“ (z. B. ein Blattheizungssystem) geben, und zum anderen die *International Recommendations on Ice Fall and Ice Throw Risk Assessment*, die wiederum Empfehlungen für die Risikobewertung bzgl. vereister Turbinen geben. Für beide Dokumente sollte anhand von Rückmeldungen aus Wissenschaft und Industrie eine Überarbeitung stattfinden.

Eine Weiterentwicklung auf Basis des bisher zusammengetragenen Knowhows sollte in Form weiterer Empfehlungen und Richtlinien stattfinden, allen voran den *Ice Detection Guidelines for Wind Energy Applications*, die einen Überblick zu gängigen Eisdetektionsmethoden geben sowie standardisierte Anforderungen an deren Einsatz und Funktion zusammenstellen. Des Weiteren sollte mit dem technischen Bericht *Definition of Best Practice for Testing Icephobic Surfaces* eine Grundlage geschaffen werden, um Untersuchungsmethoden im noch relativ neuen Feld von Oberflächenbearbeitungen und -beschichtungen zur Unterbindung bzw. Verminderung von Eisansatz zu standardisieren.

Abschließend sollte eine aktualisierte Marktstudie den Ausbau von Windenergie in kalten Klimazonen über die vergangenen Jahre erfassen und einen Ausblick für den Zeitraum bis einschließlich 2025 geben.

4.2. Forschungsschwerpunkt: „Ergänzende Aspekte bei der Bewertung des Eisfallrisikos“

Eisfall und Eiswurf von Windenergieanlagen sind ein wichtiger Aspekt an zahlreichen Standorten mit Vereisungsbedingungen, die in kalten Klimazonen auf der ganzen Welt ein großes Windenergiepotenzial bieten. Die installierte kumulative Windkapazität an Standorten mit Vereisungsbedingungen in Europa, Nordamerika und Asien belief sich Ende 2020 auf etwa 119 GW, mit einer erwarteten Wachstumsrate von etwa 9 GW pro Jahr bis 2025 (Karlsson, 2021). Das Vereisungsrisiko und die Energieverluste aufgrund von Vereisung sind zwei Aspekte desselben Phänomens. Während Energieverluste aufgrund von Vereisung vor allem an Standorten mit mäßiger bis starker Vereisung eine Herausforderung darstellen, muss das Risiko von Eisfall oder Eiswurf auch an Standorten mit nur wenigen Vereisungsereignissen pro Jahr bewertet werden, insbesondere wenn die Windenergieanlage an Standorten mit hoher Aufenthaltswahrscheinlichkeit installiert ist.

Das Risiko durch herabfallende Eisfragmente muss bereits in der Entwurfsphase eines Windparkprojekts berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang verlangen die Behörden in einer zunehmenden Zahl von Ländern während des Genehmigungsverfahrens detaillierte Risikobewertungen zu Eiswurf und Eisfall. In diesen Bewertungen kann das Risiko für Personen durch Eisfragmente, die sich von einer Windturbine lösen, mit den Risiken anderer Technologien oder allgemein anerkannten Risikoniveaus verglichen werden. Auf diese Weise kann das Risiko von einem Eisfragment getroffen zu werden auf ein objektives und standortspezifisches Niveau gebracht werden im Vergleich zur Verwendung von allgemeinen Sicherheitsabständen über Faustformeln. (Lehtomäki et al., 2018)

Die im Zuge der letzten Arbeitsperiode des Task 19 veröffentlichte erste Ausgabe der *International Recommendations on Ice Fall and Ice Throw Risk Assessment* war das Ergebnis eines zweijährigen Erstellungsprozesses und sollte Antworten auf die Auswahl und Definition der wesentlichen Methodik und Eingabeparameter für Eiswurf-/Eisfallrisikobewertungen geben. Die wichtigsten Bausteine hierfür sind geeignete numerische Verfahren, Beobachtungsdaten (insbesondere zur Anzahl und Beschaffenheit von Eisfragmenten), konzeptionelle Ansätze zur Definition akzeptabler Risikoniveaus und mögliche Maßnahmen zur Risikominderung. Ziel des Forschungsschwerpunkts dieser Arbeitsperiode war es, diese Methodik anhand der neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse sowie Erfahrungen aus der Praxis zu verfeinern sowie neue und überarbeitete Leitlinien für eine eingehende Risikoanalyse und -bewertung der Vereisung von Windenergieanlagen darzustellen. Hierzu wurden sowohl im Expertenkreis akute und weiterführende Fragestellungen erörtert als auch Rückmeldungen aus dem breiteren Kreis der „Cold Climate Wind Industry“ berücksichtigt.

4.3. Forschungsschwerpunkt „Bewertungsempfehlung für das Risiko durch Eiswurf“

In vielen europäischen Ländern ist der Weiterbetrieb von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen zulässig. In diesem Fall kann es zu Eiswurf, also dem Lösen von Eisstücken vom sich drehenden Rotor, kommen. In Österreich ist entsprechend der aktuellen Genehmigungspraxis ein Weiterbetrieb von vereisten Windenergieanlagen nicht erlaubt. Die Anlagen müssen in den Trudelbetrieb überführt werden, wodurch es ausschließlich zum Herabfallen von Eisstücken, also Eisfall kommen kann. Für eine Erstbewertung des Risikos durch Eisfall liegen in Österreich Werkzeuge in Form von Faustformeln vor. Diese Ansätze erlauben eine einfache Einschätzung des Risikos und werden beispielsweise bei der Positionierung von Windenergieanlagen neben höherrangigen Straßen oder der Platzierung von Eiswarntafeln verwendet (z.B. „Blattspitzenhöhe mal 1,2“).

Um auch in Österreich eine Öffnung der Genehmigungspraxis hin zu einem Weiterbetrieb der Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen zu ermöglichen, wurde im Zuge dieses Forschungsschwerpunkts ein wissenschaftlich abgesichertes Werkzeug zur Vorabbewertung des Risikos durch Eiswurf erarbeitet.

Dahingehend wurden in einem ersten Schritt die Auftreffwahrscheinlichkeit von Eisfragmenten für unterschiedliche WKA-Typen und Blattspitzenhöhen modelliert. Anschließend wurden für relevante Schutzobjektkategorien (Bundes- und Landesstraßen, Wirtschaftswege, markierte Wanderwege...) konservative Annahmen hinsichtlich ihrer Frequentierung angenommen. Die Risikoakzeptanzkriterien wurden gemäß den *International Recommendations on Ice Fall and Ice Throw Risk Assessment* gewählt. Für jede IEA Vereisungsklasse ergeben sich so einfache Faustregeln in Bezug auf die Anlagengröße, die für eine Abschätzung des erforderlichen Sicherheitsabstandes zwischen Windenergieanlagen und Infrastruktur an einem Standort verwendet werden können.

5 Ergebnisse

5.1. Allgemeine Ergebnisse aus dem Task 19

In der sechsten Periode des IEA Wind Task 19 (i.e. Periode 2019 bis 2021) ist die internationale Bedeutung des Task 19 weiter gestiegen. Die wichtigsten Meilensteine und Ereignisse während der sechsten Periode waren:

- Präsentation im Zuge der Winterwind Konferenz 2020 zu bisherigen Studien zu *Ice Protection Systems (IPS)* sowie den Erfahrungen bzgl. Retrofits solcher Systeme (Godreau, 2020)
- Veröffentlichung der 2. Edition der Richtlinie *“Performance Warranty Guidelines for Wind Turbines in Icing Climates”* (Wickman et al., 2020)
- Die *„Cold Climate Wind Market Study 2020-2025“* wurde im Zuge der Winterwind Konferenz 2021 veröffentlicht (Karlsson 2021). Auf diese Studie, die eine Zuwachsrate von jährlich mehr als 13 GW ausweist, wird seither von vielen Seiten aus der Forschung und der Industrie verwiesen.
- Präsentation im Zuge der Winterwind Konferenz 2021 zu *„Simple rules-of-thumb for ice fall/throw safety distances“* (Stökl, 2021)
- Veröffentlichung des technischen Berichts *“Ice Detection Guidelines for Wind Energy Applications”* (Godreau et al., 2021)
- Veröffentlichung des technischen Berichts *“Definition of Best Practice for Testing Icephobic Surfaces”* (Rehfeld et al., 2022)
- Veröffentlichung der 2. Edition der internationalen Empfehlungen für Eisfallrisikogutachten *“International Recommendations for Ice Fall and Ice Throw Risk Assessments”* (Krenn et al., 2022)
- Beisteuern von fachlicher Expertise zur Risikobewertung von Eisfall und -wurf für den geplanten Standard IEC 61400-31 ED1 *„Siting Risk Assessment“* (voraussichtliche Veröffentlichung im Dezember 2023)
- Beisteuern von fachlicher Expertise zur Berücksichtigung von Vereisung bei der Verlustmodellierung für den geplanten Standard IEC 61400-15-2 ED1 *„Framework for Assessment and Reporting of the Wind Resource and Energy Yield“* (voraussichtliche Veröffentlichung im Mai 2024)
- Veranstaltung eines Disseminations-Workshops gemeinsam mit den Tasks 32, 36 und 41 im Zuge der IGW Branchenplattform im Oktober 2022
- Durch die breite Außenwirkung hat sich der Task 19 international als zentrale Informationsstelle beim Thema Windenergie in kalten Klimazonen etabliert

5.2. Forschungsschwerpunkt „Ergänzende Aspekte bei der Bewertung des Eisfallrisikos“

Die Zielsetzung bei Erstellung dieser internationalen Empfehlung im Zuge der vorangegangenen Arbeitsperiode war es, das aktuelle Wissen zu Eisfall und Eiswurf von Windkraftanlagen sowie die einschlägigen Erfahrungen aus der Industrie an einer Stelle zusammenzuführen und so eine internationale Standardreferenz für die Erstellung von Eisfall- und Eiswurf-Risikogutachten zur Verfügung zu stellen. Zu den wesentlichen Bausteinen, die notwendig sind um das Risiko durch von Windenergieanlagen herabfallenden Eisteilen abzuschätzen und zu bewerten gehören u. a. geeignete numerische Verfahren, Beobachtungsdaten (insbesondere zur Anzahl und Eigenschaften der Eisfragmente), Ansätze zur Definition von akzeptablen Risikoniveaus und mögliche Maßnahmen zur Reduzierung von Risiken.

Durch die Arbeit mit dem 2018 veröffentlichten Dokument in den vergangenen Jahren und die dabei gesammelten Erfahrungen konnten einige Stellen identifiziert werden, an denen eine Ergänzung bzw. Vertiefung der Darstellungen und Empfehlungen als sinnvoll erachtet wurde. Dafür wurde neben den Einschätzungen der Experten des Subtasks aus der letzten und dieser Arbeitsperiode sowie der Teilnehmer des Task 19 im allgemeinen auch das Feedback aus der gesamten „*Cold Climate Community*“ eingefordert und aufgenommen. Aus der Vielzahl an kleinen Verbesserungen und Ergänzungen lassen sich drei wesentliche Punkte identifizieren, die gegenüber der ersten Edition herausstechen:

- Umfassende Erweiterung der Vereisungsdaten unter Einbezug der Betriebsmodi der Anlagen sowie etwaiger Blattheizungssysteme
- Ausführliche Empfehlungen zur Risikobeurteilung von Verkehrsteilnehmern und Fahrzeuginsassen sowie zur Akkumulation unterschiedlicher Risikofaktoren
- Vorlage eines einheitlichen Warnschilds bzgl. Eisfall und -wurf zur Umsetzung einer risikomindernden Maßnahme im Umfeld der Anlagen

5.2.1. Vereisungsdaten

Die Eismenge stellt eine der größten Unsicherheiten bei der Bewertung von Eisfall und -wurfereignissen dar und muss daher sorgfältig geprüft und begründet werden. Die Eismenge kann z. B. als Anzahl der Eisstücke pro Jahr oder als akkumulierte Eismasse pro Ereignis zusammen mit der Anzahl der Ereignisse pro Jahr und dem Gewicht jedes Eisstücks beschrieben werden. In 2017 hat der Task 19 innerhalb seiner *Expert Group Study on Recommended Practices: 13. Wind Energy Projects in Cold Climates* (Lehtomäki et al., 2017) die Einordnung von Standorten in IEA Vereisungsklassen anhand der Relation von meteorologischer und instrumenteller Vereisung sowie durch Vereisung zu erwartendem Produktionsausfall beschrieben. Die erste Ausgabe der Empfehlungen zur Eisfall- und Eiswurfisikobewertung hat wiederum eine durchschnittlich zu erwartende Anzahl an Eisstücken für die IEA Vereisungsklassen definiert. Im Zuge der Überarbeitung ist diese Definition nun weiter ausdifferenziert worden, in Abhängigkeit der Betriebsmodi der Windenergieanlage sowie etwaiger Blattheizungssysteme.

Vereisungscharakteristika von Windenergieanlagen

Die Windturbinenmerkmale, die hinsichtlich ihres Einflusses auf die Vereisungsdaten zu berücksichtigen sind, sind im mindesten:

- Die Rotorabmessungen
- Die Betriebsart

Die Rotorabmessungen beeinflussen dabei hauptsächlich die sich bildende Eismenge. Ein Einfluss auf Gewicht und Abmessungen der Eisstücke ist ebenfalls möglich. In der Literatur werden verschiedene Gleichungen zur Berechnung der auf einem Rotorblatt angesammelten Eismenge vorgeschlagen, die zur Skalierung von Messdaten einer Rotorgröße auf eine andere verwendet werden können. Diese Gleichungen sind allerdings Vereinfachungen der komplexen Natur der Eisbildung und -ansammlung, die mit einer entsprechend hohen Unsicherheit behaftet sind, und somit die Verwendung eines konservativen Ansatzes bedingen.

Der Betriebsmodus der Turbine kann sowohl die Menge des sich ansammelnden Eises als auch das Verhältnis zwischen geworfenen und gefallenen Eisstücken beeinflussen. Aufgrund der Vielzahl an Systemen und Lösungen, die am Markt verfügbar sind, sollte jede einzelne Windenergieanlage unter Berücksichtigung der jeweiligen Systemkomponenten und Einstellungen untersucht werden, um die Auswirkungen in Bezug auf Eisfall und -wurf zu bestimmen. Die unterschiedlichen Betriebsmodi werden dabei durch die folgenden Teilsysteme definiert:

- Das Eiserkennungssystem
- Das Eisschutzsystem, z. B. ein Blattheizungssystem
- Das Steuerungssystem

Für Eiserkennungssysteme gilt es zu prüfen, wie zuverlässig das System eine Rotorvereisung erkennt, welche Folgen eine Verzögerung in der Detektion hat und wie exakt die angewandte Erkennungsmethode ist. In den Einstellungen des Steuerungssystems wird festgelegt, ob die Windkraftanlage abgeschaltet wird, in den Leerlauf überführt wird oder weiter in Betrieb bleibt, wenn das Eiserkennungssystem Eis detektiert, und unter welchen Voraussetzungen die Anlage wieder anläuft, wenn der Produktionsbetrieb unterbrochen wurde. Das Steuerungssystem kann auch ein Blattheizungssystem ansteuern, das entweder während des Betriebs (Anti-Icing) oder nach dem Abschalten im Leerlauf oder Stillstand (De-Icing) die Rotorblätter enteist. Dessen Betriebsart und die Folgen in Bezug auf das Eisauftreten bei Eisfall und -wurfereignissen sind anhand von Felduntersuchungen, statistischen Modellierungen und konservativen Annahmen evaluiert worden.

Anzahl an Eisstücken bei verschiedenen Eisschutzsystem- und Anlagenbetriebsarten

Manuelle Eisfall- und Eiswurfmessungen, die an mehreren ENERCON E-82-Turbinen an einem Standort der IEA Vereisungsklasse 4 über einen Zeitraum von drei Jahren durchgeführt wurden, ergaben eine durchschnittliche jährliche Anzahl von Eisstücken in der in Tabelle 2 angegebenen Größenordnung. Die Anzahl der Eisstücke für die Vereisungsklasse 4 wurde unter Berücksichtigung der meteorologischen Vereisung auf die anderen Klassen extrapoliert. Manuelle Eiswurf- und Eisfallmessungen desselben Turbinentyps an einem Standort der IEA Vereisungsklasse 3 haben die in Tabelle 2 angegebene Größenordnung bestätigt.

Tabelle 2: IEA Vereisungsklasse und entsprechende jährliche Anzahl von Eisstücken pro Windturbine, basierend auf manuellen Messungen vor Ort an ENERCON E-82-Turbinen (78 m Nabenhöhe) mit und ohne Blattheizungssystem, jeweils im Anti- bzw. De-Icing-Betriebsmodus (Spalte (a), (b) und (d)), sowie eine Extrapolation der Werte des Leerlaufs ohne Heizungssystem auf den Weiterbetrieb ohne Heizungssystem (Spalte (c), siehe Absatz unten).

IEA Vereisungsklasse	Meteorologische Vereisung (% eines Jahres)	Instrumentelle Vereisung (% eines Jahres)	Produktionsausfall (% eines Jahres)	Jährliche Anzahl an Eisstücken pro Windenergieanlage (Eisstücke pro Jahr)			
				Leerlauf	Leerlauf	Betrieb	Betrieb
				Kein Heizsystem (a)	Mit Heizsystem (De-Icing) (b)	Kein Heizsystem (c)	Mit Heizsystem (Anti-Icing) (d)
5	> 10	> 20	> 20	> 3200	> 8800	> 9600	> 8000
4	5 – 10	10 – 30	10 – 25	1600	4400	4800	4000
3	3 – 5	6 – 15	3 – 12	800	2200	2400	2000
2	0.5 – 3	1 – 9	0.5 – 5	400	1100	1200	1000
1	0 – 0.5	0 – 1.5	0 – 0.5	80	220	240	200

Messkampagne (Spalte (a), (b) und (d))

Die Werte der Tabelle sind um nicht erfasste Ereignisse sowie Unsicherheiten bei der Erfassung bereinigt. Es wurden verschiedene Enteisungs- und Steuerungssystemeinstellungen untersucht, und für jede der Spalten (a), (b) und (d) wurde eine Schwankung der Stückzahl von $\pm 50\%$ festgestellt. Dieser Bereich von $\pm 50\%$ kann bei anderen Turbinentypen und Betriebsarten als den untersuchten überschritten werden. Die Tabelle enthält Eisstücke mit einem Gewicht von 50 g oder mehr. Ein Gewichtsschwellenwert von 100 g würde für die Spalten (a), (b) und (d) zu etwa 25 % weniger Eisstücken führen.

Extrapolation (Spalte (c))

Die Anzahl der Eisstücke wurde durch Berechnungen auf der Grundlage langfristiger meso-skaliertes Klimadaten des Standorts extrapoliert. Die Eisakkumulation wurde für die nicht beheizte Windkraftanlage im Leerlauf (Spalte (a)) und für die nicht beheizte Windkraftanlage im Betrieb (Spalte (c)) modelliert. Beide Simulationen ergeben unterschiedliche durchschnittliche Gesamteismassen pro Jahr auf dem Rotor aufgrund der unterschiedlichen auftretenden Windgeschwindigkeiten entlang der Rotorblätter. Die Zunahme der Eismasse wurde direkt als Faktor für die Zunahme der Anzahl von Eisstücken verwendet, die von der in Betrieb befindlichen unbeheizten Windenergieanlage fallen. Das heißt, es wurde angenommen, dass die Massenverteilung der Eisstücke, die von der stillstehenden und der in Betrieb befindlichen Windenergieanlage fallen, unverändert bleibt. Die in Spalte (c) angegebenen Eisstückzahlen sind

nicht direkt mit den Daten in den Spalten (a), (b) und (d) vergleichbar, da die Zahlen in Spalte (c) nicht direkt auf Messungen beruhen, sondern mit vereinfachenden Annahmen berechnet wurden und daher größere Unsicherheiten aufweisen.

Eisstückgewicht in Abhängigkeit von verschiedenen IPS und Anlagenbetriebsarten

Basierend auf den manuellen Messungen vor Ort an ENERCON E-82 Turbinen am Standort der IEA Vereisungsklasse 4 wurden unter Verwendung einer Turbine im Leerlauf ohne Eisschutzsystem (Tabelle 2, Spalte (a)) als Referenz folgende Beobachtungen gemacht:

- Das erwartete durchschnittliche Eisstückgewicht für eine Turbine im Leerlauf mit Blattheizungssystem (De-Icing) ist um bis zu 50 % geringer als das der Referenz.
- Das erwartete durchschnittliche Eisstückgewicht für eine in Betrieb befindliche Turbine mit Blattheizungssystem (Anti-Icing) ist um bis zu 40 % geringer als das der Referenz.

Die Größenordnung der gefallenen/geworfenen Eisstücke für verschiedene Vereisungsklassen sowie die Verringerung des erwarteten durchschnittlichen Eisstückgewichts für verschiedene Heizsystem-Betriebsmodi können als informative Richtwerte verwendet werden, aber nicht als normative Referenz dienen, da diese Zahlen/Faktoren spezifisch für den genannten Turbinentyp und seine jeweiligen Teilsysteme, wie z. B. Eiserkennungssystem und Blattheizungssystem, sowie für die meteorologischen Bedingungen am Mess- und Prüfstandort sind. Darüber hinaus sind die Daten mit Unsicherheiten unbekannter Größe behaftet, z. B. in Bezug auf die Vollständigkeit bei der Erfassung der gefallenen/geworfenen Eisstücke. Es ist auch wichtig zu beachten, dass Vereisung ein Phänomen ist, das eine hohe interannuelle Variabilität aufweist (Cattin, Koller, & Heikkilä, 2016).

Die beiden oben beschriebenen erwarteten Vereisungseigenschaften (Stückzahl und Stückgewicht) basieren auf einer ENERCON E-82 Turbine in einem Ice-Prevention-Setup mit den folgenden Merkmalen:

- Eiserkennung mittels Leistungskurvenabweichungsmethode
- Ausgestattet mit einem Heißluftzirkulationssystem in den Rotorblättern
- Automatische Heizung, wenn Eis erkannt wird:
 - Betriebsheizungsmodus: mindestens 1 Stunde Heizen; die Turbine geht in den Leerlaufheizungsmodus, wenn die Betriebsheizung nicht ausreicht, um die Vereisung zu beseitigen
 - Beheizter Leerlaufmodus: 1-stündiger Heizzyklus; die Turbine kehrt in den Leerlauf-Heizbetrieb zurück, wenn nach dem Zyklus immer noch Eis festgestellt wird
- Automatischer Neustart der Turbine nach Vereisungsereignissen

5.2.2. Risikoanalyse

Die Empfehlungen zur Bewertung des Risikos aufgrund von Eisfall und -wurfereignissen berücksichtigen ausschließlich das Risiko für Personen, nicht für Sachwerte oder Infrastruktur. Das Risiko ergibt sich aus der Auftreffwahrscheinlichkeit von Eisstücken an einem bestimmten Ort, multipliziert mit der Aufenthaltswahrscheinlichkeit an diesem Ort. Daher muss die Frequentierung durch Fußgänger und Fahrzeuge sowie Aufenthalte von Personen im relevanten Umfeld der Windenergieanlagen erhoben und berücksichtigt werden. Speziell bei der Gefährdung von Personen innerhalb von Fahrzeugen müssen darüber hinaus auch die schützenden Eigenschaften eines Fahrzeugs sowie potenzielle Unfallszenarien mit einbezogen werden.

Risikobeurteilung von Verkehrsteilnehmenden und Fahrzeuginsassen

Der Tod einer Person in einem Fahrzeug als direkte Folge des Aufpralls eines Eisstücks ist theoretisch möglich, sofern die Aufprallenergie ausreichend hoch ist. Auf der Grundlage einer Vereinbarung der Vereinten Nationen (United Nations, 2015), die erstmals 1958 in Genf getroffen wurde, müssen Auto-Windschutzscheiben Aufprallenergien von mindestens 89 J standhalten. Eine Studie zu Unfallfolgen durch von Überführungen gefallene/geworfene Gegenstände hat gezeigt, dass handelsübliche Windschutzscheiben im Allgemeinen Aufprallenergien von bis zu 140 J standhalten (Spathonis, 2001). Ein Eisstück mit einer Restenergie von 90 J nach dem Durchbrechen einer Windschutzscheibe könnte mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % direkt zu einem Todesfall führen (Committee for the Prevention of Disasters caused by dangerous substances, 1992). Die Wahrscheinlichkeit, dass eine entsprechende Kombination aus Eisstückgewicht, Beschaffenheit, Flugbahn und Relativgeschwindigkeit zum Auto auftritt, ist jedoch sehr gering. Umgekehrt kann die ermittelte notwendige Aufprallenergie von mindestens 180 J als Schwellenwert dienen, bis zu dem es sehr unwahrscheinlich ist, dass ein entsprechendes Eisstück direkt einen Todesfall verursacht.

Die indirekten Folgen des Aufpralls eines Eisstücks auf ein Fahrzeug oder in unmittelbarer Nähe (z. B. auf der Straße direkt vor dem Fahrzeug) müssen ebenfalls berücksichtigt werden, z. B. der Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug und/oder ein Aufprall auf ein Hindernis oder ein anderes Fahrzeug. Eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst die möglichen Ergebnisse eines solchen Szenarios, die in den meisten Fällen mit vertretbarem Aufwand nicht erschöpfend berechnet/simuliert werden können. Daher müssen erforderlichenfalls konservative Annahmen getroffen werden. Ein insgesamt konservativerer Ansatz ist die Annahme, dass jedes Eisstück oder ein nicht zu vernachlässigender Teil davon, der auf ein Fahrzeug auftrifft, einen tödlichen Unfall verursacht. Ein typisches Verhältnis zwischen Unfällen mit tödlichen und nicht-tödlichen Folgen kann mit 1 zu 10 angegeben werden. Ein ähnliches Verhältnis kann auch zwischen Beinahe-Unfällen und leichten Unfällen ermittelt werden (Herry, Sedlacek, & Steinacher, 2011).

Ein Faktor, der jedoch berücksichtigt werden und in eine Bewertung einfließen kann, ist der Aufprallschutz, den aktuelle Fahrzeuggenerationen bieten. Bei Crashtests nach Euro NCAP (Euro NCAP, 2021) muss die Konstruktion eines Fahrzeugs die Aufprallenergie eines Frontalaufpralls auf eine mobile, progressiv verformbare Barriere absorbieren, wobei sich sowohl das Fahrzeug als auch die Barriere mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h aufeinander zu bewegen. Die Absorption der Aufprallenergie muss so groß sein, dass in Verbindung mit Sicherheitseinrichtungen wie Airbags, Sicherheitsgurten etc. ein schweres Trauma für alle Insassen vermieden wird. Liegt also die Geschwindigkeit der Fahrzeuge unter diesem Schwellenwert von 50 km/h (z. B. auf einem

Straßenabschnitt, auf dem eine Geschwindigkeitsbegrenzung gilt), können tödliche Folgen für die Insassen bei einem durch den Aufprall eines Eisstücks ausgelösten Verkehrsunfall mit hoher Sicherheit ausgeschlossen werden, selbst für den schlimmsten Fall eines Frontalzusammenstoßes. Die Einführung einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 50 km/h auf den betroffenen Straßen bei Eisfall oder im Winter im Allgemeinen ist daher eine sinnvolle Maßnahme zur Risikominderung.

Bei einer Aufprallgeschwindigkeit von mehr als 50 km/h kann es bei einem Unfall wie oben beschrieben zu schweren Verletzungen und zum Tod kommen. In diesem Fall kann man ein geschwindigkeitsabhängiges Skalierungsgesetz für die Folgen eines Frontalaufpralls anwenden. Die zu erwartenden Folgen sind proportional zur kinetischen Energie des Aufpralls, die ihrerseits proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit ist. Berücksichtigt man darüber hinaus die Reaktionszeit des Fahrers sowie die Auswirkung von Fahrerreaktionen auf die Fahrzeugdynamik, kommen zwei weitere Potenzen der Geschwindigkeit hinzu. Daraus ergibt sich ein Skalierungsgesetz proportional zur Geschwindigkeit hoch vier für die Wahrscheinlichkeit eines tödlichen Unfalls als indirekte Folge eines Aufpralls eines Eisstücks auf die Windschutzscheibe eines Autos.

Risikoakkumulation

Die Risikobewertung erfordert im Allgemeinen, dass alle relevanten Risiken, denen ein Individuum im gegenständlichen Szenario ausgesetzt ist, in Betracht gezogen werden. Dabei gibt es zwei Aspekte: (1) mehrere Risiken, die von einer Risikoquelle ausgehen (bei einer Windenergieanlage z. B. das Risiko des Einsturzes der Anlage und das Risiko durch Eisfall/-wurf), und (2) mehrere gleichartige Risikoquellen innerhalb der Reichweite der Bewertung (z. B. mehrere bereits bestehende Windenergieanlagen entlang einer Zufahrtsstraße zu einem geplanten Windpark).

Der erste Aspekt fällt nicht in den Anwendungsbereich der Empfehlungen zur Eisfall- und Eiswafrisikobewertung, die sich ausschließlich auf das Risiko durch Vereisung von Windenergieanlagen beziehen. Die Berücksichtigung multipler Risikoquellen von Windenergieanlagen wird zukünftig im geplanten Standard IEC 61400-31 ED1 „*Siting Risk Assessment*“ behandelt.

Der zweite Aspekt muss jedoch bei der Analyse der Exposition von Personen berücksichtigt werden. Nur wenn das durch den vorliegenden Sachverhalt hinzukommende Risiko das bestehende Risiko nicht signifikant erhöht bzw. im Vergleich zu den relevanten Risikoakzeptanzkriterien unbedeutend ist, kann die Kumulierung mit anderen (vorbestehenden) Risikoquellen vernachlässigt werden. Werden andere relevante (vorbestehende) Risikoquellen vernachlässigt, obwohl sie erheblich sind, ist eine entsprechende Abgrenzung in den Bewertungsumfang aufzunehmen.

Für Landes- und Bundesstraßen sowie Autobahnen, bei denen das gesellschaftliche Risiko relevant wird, ist das Risiko eines Verkehrsunfalls pro Straßenkilometer typischerweise deutlich höher (Herry, Sedlacek, & Steinacher, 2011) als die definierten Risikoakzeptanzkriterien für das gesellschaftliche Todesfallrisiko. Daher kann argumentiert werden, dass eine Kumulation von Risiken durch Windenergieanlagen entlang dieser Straßen nicht berücksichtigt werden muss, es sei denn, mehrere Windenergieanlagen stellen ein Risiko an der gleichen Stelle entlang der Straße dar.

Auf kleinen lokalen Straßen, Wirtschafts-, Forst- und Wanderwegen, wo das individuelle Risiko zum relevanten Risiko wird, kann eine kritische Person definiert werden. Die kritische Person ist diejenige, für die das Risiko als am höchsten eingeschätzt wird. Dies kann z. B. ein Jogger sein, der wöchentlich

am Windpark vorbeikommt, oder ein Anwohner, der täglich seinen Hund ausführt. Die Kumulierung der Risiken kann dann auf die Windenergieanlagen beschränkt werden, die ein Risiko entlang der angenommenen Route der kritischen Person darstellen.

Die Akkumulation mehrerer berechneter Risikowerte muss als eine Fortpflanzung von Wahrscheinlichkeiten behandelt werden, die zu Termen höherer Ordnung führt. Da die Risikowerte im Allgemeinen viel kleiner als 1 sind, können Terme höherer Ordnung in den meisten Fällen vernachlässigt werden. Das Gesamtrisiko wird dann als Summe der Einzelrisiken berechnet.

5.2.3. Vorlage eines allgemeingültigen Warnschilds für Eisfall

Abbildung 1 zeigt eine Zusammenstellung von Beispielen für Warnschilder, die auf die potenzielle Gefahr von Eisfall und/oder Eiswurf im Umfeld von Windenergieanlagen hinweisen sollen. Die Schilder folgen dabei keinem erkennbaren Standard. Die größtenteils vorliegende Fokussierung auf Text anstelle von visueller Kommunikation führt dazu, dass Personen, die sich dem betroffenen Gebiet nähern, das Risiko nicht (ad-hoc) erfassen können, wenn es z. B. eine Sprachbarriere gibt und/oder das Risiko als bedingt ausgedrückt wird (d. h. abhängig von bestimmten Wetterbedingungen oder der Jahreszeit).

Abbildung 1: Zusammenstellung von Warnschildern, die über die potenzielle Gefahr von Eisfall und/oder Eiswurf informieren (Quelle: Mit freundlicher Genehmigung von Thomas Hahm, Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG)



Unter Berücksichtigung der obigen Ausführungen wurde ein Vorschlag für ein allgemeines Warnschild entwickelt, siehe Abbildung 2. Das Warnschild soll auf einfache, aber wirksame Weise auf die Gefahr des Eisfalls in der Nähe von Turbinen hinweisen. Es enthält mehrere Elemente:

- Hinweis auf die Turbine als Quelle der Eisfallgefahr
- Hinweis auf die Eisfallgefahr sowohl unter als auch um die Turbine herum
- Darstellung der Vereisung in Form von Eiszapfen und Schneeflocken, um die Art des Risikos zu verdeutlichen
- Angabe einer Risikozone sowohl in visueller als auch in schriftlicher Form. „Zone“ ist ein in vielen Sprachen gebräuchliches Wort im Gegensatz zu Fläche oder Bereich.

Abbildung 2: Allgemeingültiges Warnschild für das Eisfallrisiko



5.3. Forschungsschwerpunkt „Bewertungsempfehlung für das Risiko durch Eiswurf“

Inzwischen ist es bei der Risikobewertung von Eisfall und Eiswurf gängige Praxis, mithilfe von statistischer Modellierung von Fall- bzw. Wurftrajektorien standortspezifische Auftreffverteilungen von Eisstücken zu simulieren, die die fallweise Bewertung der Gefährdung von Personen im Umfeld von Windenergieanlagen ermöglichen. Dennoch hat es sich in der Vergangenheit vielfach als hilfreich und zielführend erwiesen einfache Bewertungskriterien, häufig anhand von Faustformeln, für Standardsituationen bzw. entsprechende Referenzbedingungen zu definieren. Im Zuge dieses Forschungsschwerpunkts wurden entsprechende Faustformeln anhand der Modellierung von Eisfall- und Eiswurfereignissen für ein repräsentatives Ensemble unterschiedlicher Anlagenkonfigurationen, Wind- und Vereisungsbedingungen sowie Frequentierungsannahmen zu einzelnen Infrastrukturkategorien erarbeitet. Diese sollen einen Beitrag zur Diskussion um die Öffnung der österreichischen Genehmigungspraxis hin zu einem Weiterbetrieb von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen leisten.

5.3.1. Modellierung von Eisfall und -wurf

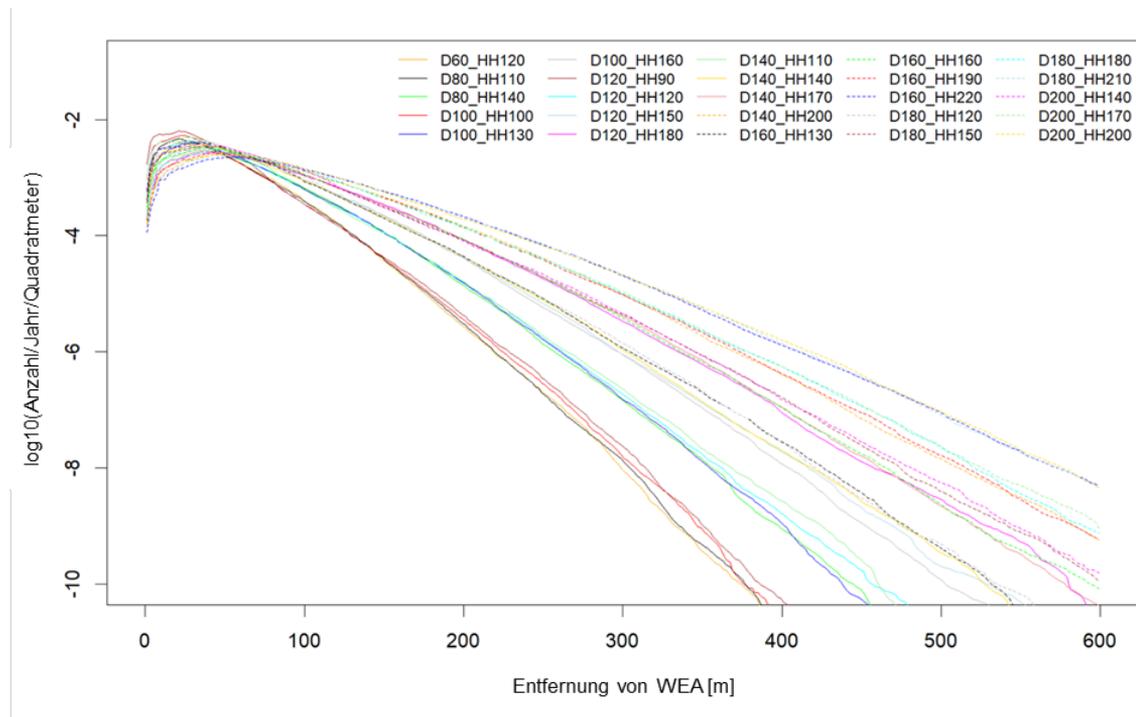
Um eine große Bandbreite von bestehenden und zukünftig zu errichtenden Anlagentypen abzudecken, wurde die Modellierung für 25 verschiedene Anlagenkonfigurationen mit Blattspitzenhöhen von 150 bis 300 m, jeweils für Vereisungsbedingungen der IEA Vereisungsklassen 1 bis 5 durchgeführt. Bei den angenommenen Windbedingungen wurde ausschließlich auf den Windrichtungssektor mit der höchsten Fall- bzw. wurfweite Bezug genommen. In diesem Sektor der höchsten Eisfallweiten wurde jeweils ein Bereich der mittleren Windgeschwindigkeit von 7 bis 15 m/s betrachtet.

Für die numerische Modellierung wurden zusätzlich eine Reihe von Annahmen betreffend des Vereisungsgeschehens, der Windbedingungen und der Anlagenbetriebsführung unterstellt, die sich an typischen Vereisungs- und Betriebsbedingungen orientieren. Dazu zählen:

- Betrieb der Windenergieanlage: Cut-in Windgeschwindigkeit 3 m/s, Nennwindgeschwindigkeit 12 m/s, Cut-out Windgeschwindigkeit 25 m/s.
- Das Spektrum der Eisstücke in dem Flächen-zu-Massen-Verhältnis A/m wurde gemäß den Task 19 Empfehlungen zur Eisfallrisikobewertung festgelegt.
- Nur Eisstücke über 100 g werden als potentiell tödlich angesehen und berücksichtigt. Diese Grenze lässt sich aus den einschlägigen Erfahrungsdaten zur potentiell tödlichen Auftreffenergie ableiten.
- Die Anzahl der Eisstücke pro Anlage und Jahr bei Trudelnbetrieb (Eisfall) und die Skalierung mit der der Turbinengröße wurden gemäß den Task 19 Empfehlungen zur Eisfallrisikobewertung angenommen.
- Für den Fall des Weiterbetriebs unter Vereisungsbedingungen (d.h. für die Simulation von Eiswauf-Szenarien), wurde eine um Faktor 10 erhöhte Anzahl der Eisstücke unterstellt. Der Faktor 10 lässt sich dabei aus der typischen Schnelllaufzahl von WEA, die im Bereich von 8 liegt, motivieren.
- Für die Windgeschwindigkeiten wird eine Rayleigh-Verteilung angenommen. Der Bezugswert ist dabei die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe. Für die Windscherung wurde eine exponentielle Höhenzunahme mit $\alpha=2$ verwendet.
- Die Windrichtungsverteilung wurde in Windrichtungssektoren mit einer Breite von 30° diskretisiert, wodurch sich eine Aufteilung in 12 Windrichtungssektoren ergibt.

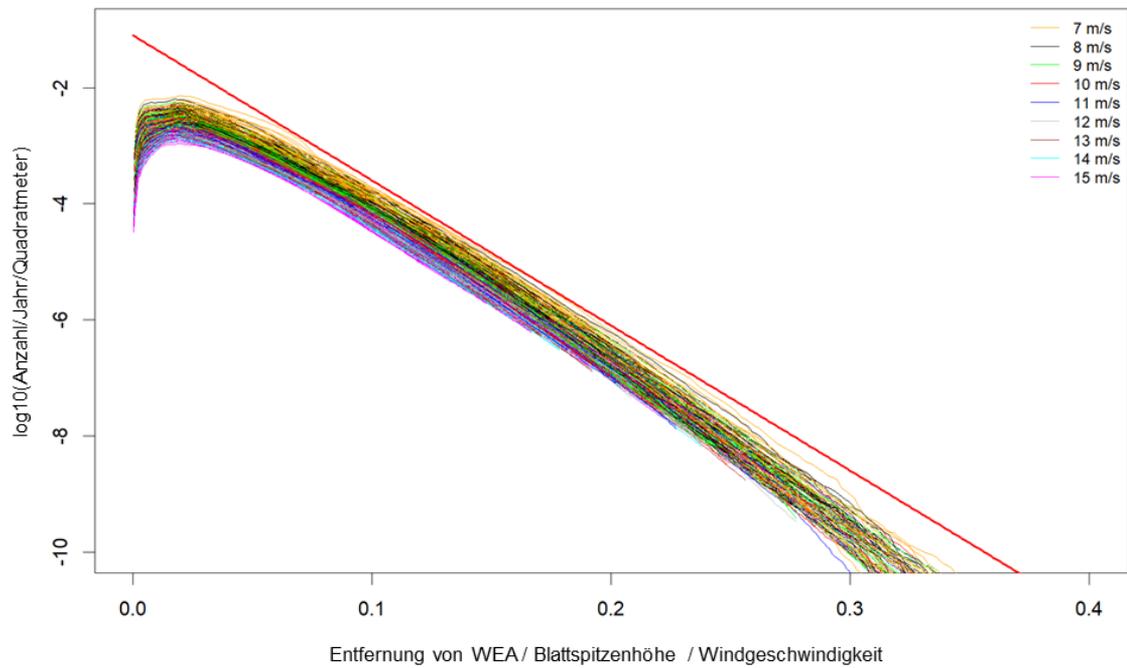
Die berechneten Auftreffwahrscheinlichkeiten für alle 25 Anlagenkonfigurationen – jeweils für den Sektor mit der größten Eisfallweite – sind in Abbildung 3 beispielhaft für eine Windgeschwindigkeit von 8 m/s in einer logarithmischen Skalierung dargestellt.

Abbildung 3: Auftreffwahrscheinlichkeiten der Eisstücke bei Eisfall, Maximum über alle Windrichtungen, mittlere Windgeschwindigkeit 8 m/s, IEA Vereisungsklasse 1



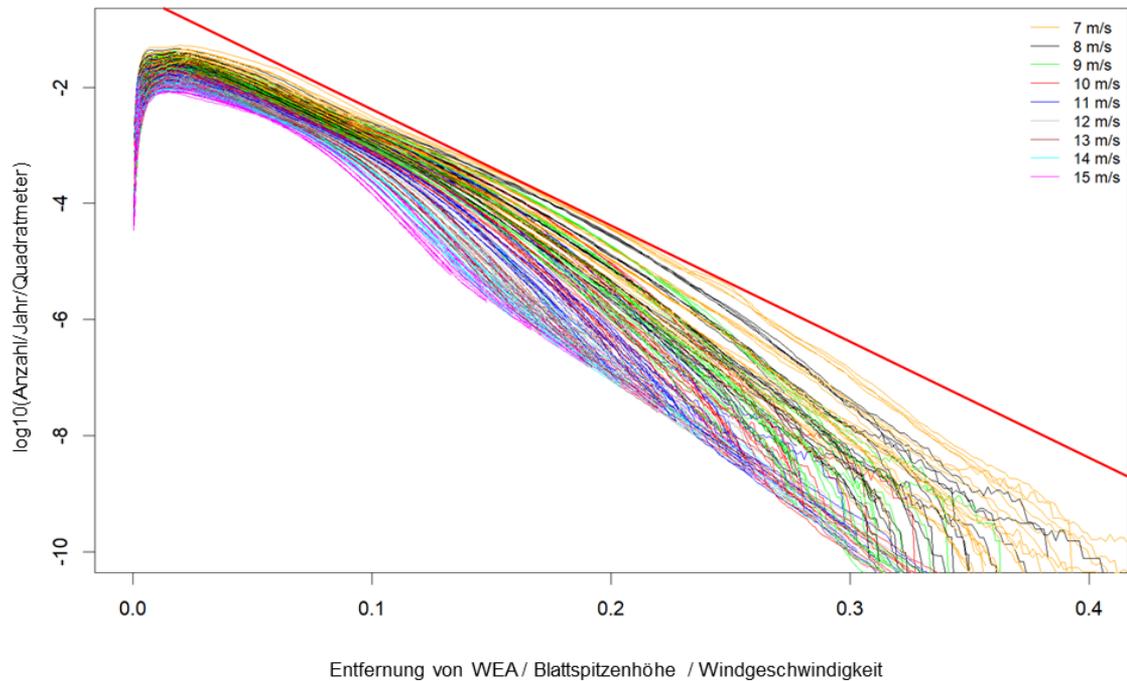
In Abbildung 3 ist erkennbar, dass Anlagen mit einer großen Gesamthöhe auch eine größere Eisfallweite aufweisen. Ein zweiter naheliegender Zusammenhang ist, dass größere Windgeschwindigkeiten zu einem weiteren Transport der Eisstücke führen. Diese beiden Argumente legen eine Skalierung der Abszisse mit der Blattspitzenhöhe und der mittleren Windgeschwindigkeit nahe. Abbildung 4 zeigt eine solche Darstellung der berechneten Auftreffverteilungen, wieder jeweils für den Sektor mit der größten Eisfallweite. Durch diese Skalierung bilden nun die Auftreffverteilungen aller 25 Anlagenkonfigurationen ein relativ eng gebündeltes Ensemble. In Abbildung 4 ist zusätzlich eine rote Gerade als obere einhüllende Begrenzung der berechneten Auftreffverteilungen mit eingezeichnet. Diese rote Gerade stellt somit eine konservative Einschätzung der möglichen Auftreffverteilung von Eisstücken im Umkreis der WEA dar, die für alle Anlagenkonfigurationen im betrachteten Bereich der Anlagenabmessungen Gültigkeit hat.

Abbildung 4: Auftreffwahrscheinlichkeiten der Eisstücke bei Eisfall, Maximum über alle Windrichtungen, mittlere Windgeschwindigkeit von 7 bis 15 m/s, IEA Vereisungsklasse 1



Die Abstrahierung der berechneten Eisauftreffverteilungen in Abbildung 3 und Abbildung 4 beinhaltet ausschließlich die Ergebnisse für das Eisfall-Szenario. Das gleiche Prozedere kann man auch auf die Eiswurf-Berechnungen (d.h. mit Wegschleudern der Eisstücke von der laufenden WEA) anwenden. Die auf diese Weise skalierten Ergebnisse der Eiswurf-Simulationen – jeweils für den für Windrichtungssektor mit den höchsten Eiswurfweiten – sind in Abbildung 5 für die 25 verschiedenen Anlagenkonfigurationen dargestellt. Im Gegensatz zu den reinen Eisfall-Ergebnissen, ist hier eine deutlich größere Streuung der Auftreffwahrscheinlichkeiten bei größeren Windgeschwindigkeiten erkennbar.

Abbildung 5. Auftreffwahrscheinlichkeiten der Eisstücke bei Eiswurf, Maximum über alle Windrichtungen, mittlere Windgeschwindigkeit von 7 bis 15 m/s, IEA Vereisungsklasse 1



Die Streuung lässt sich darauf zurückführen, dass die Windenergieanlagen bei Windgeschwindigkeiten oberhalb der Cut-out Windgeschwindigkeit abschalten. Im darauffolgenden Trudelbetrieb fällt die Eisbildung geringer aus und die Anzahl der Eisstücke sinkt. Da die Windgeschwindigkeit in der Skalierung der horizontalen Achse eingeht, kommt dieser Übergang durch die Cut-out Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Anlagenkonfigurationen an unterschiedlichen Stellen im Diagramm zu liegen.

Die eingezeichnete rote Linie stellt wiederum eine Obergrenze für die simulierten Eiswurfverteilungen dar.

5.3.2. Risikoakzeptanzkriterien und Frequentierungsannahmen

Die Risikoakzeptanzkriterien orientieren sich an den Empfehlungen zur Eisfallrisikobewertung des Task 19. Diese definieren als gesellschaftlich akzeptiertes individuelles Todesfallrisiko betriebsfremder Personen $\leq 10^{-6}$ Todesfälle pro Person und Jahr sowie als akzeptiertes kollektives Todesfallrisiko $\leq 10^{-4}$ Todesfälle pro Jahr. Übertragen auf die Auftreffwahrscheinlichkeiten von Eisstücken wurden auf dieser Basis zwei Grenzwerte für die Bewertung gebildet:

- **10⁻³ pro Quadratmeter pro Jahr**
Für unkritische Infrastruktur und Nutzungsszenarien (auch für Eisfallwarntafeln und -leuchten), z. B.:
 - Nicht spezifizierte Aktivitäten bis zu durchschnittlich 0,5 Std pro Tag (individuell)
 - Fußgänger, Jogger, Radfahrer, im Durchschnitt einmal pro Tag (individuell)
 - Fahrzeuge auf Feld-/Waldwegen, zweimal pro Tag (individuell), 200 pro Tag (kollektiv)
 - Wander-/Radwege, 500 pro Tag (kollektiv)

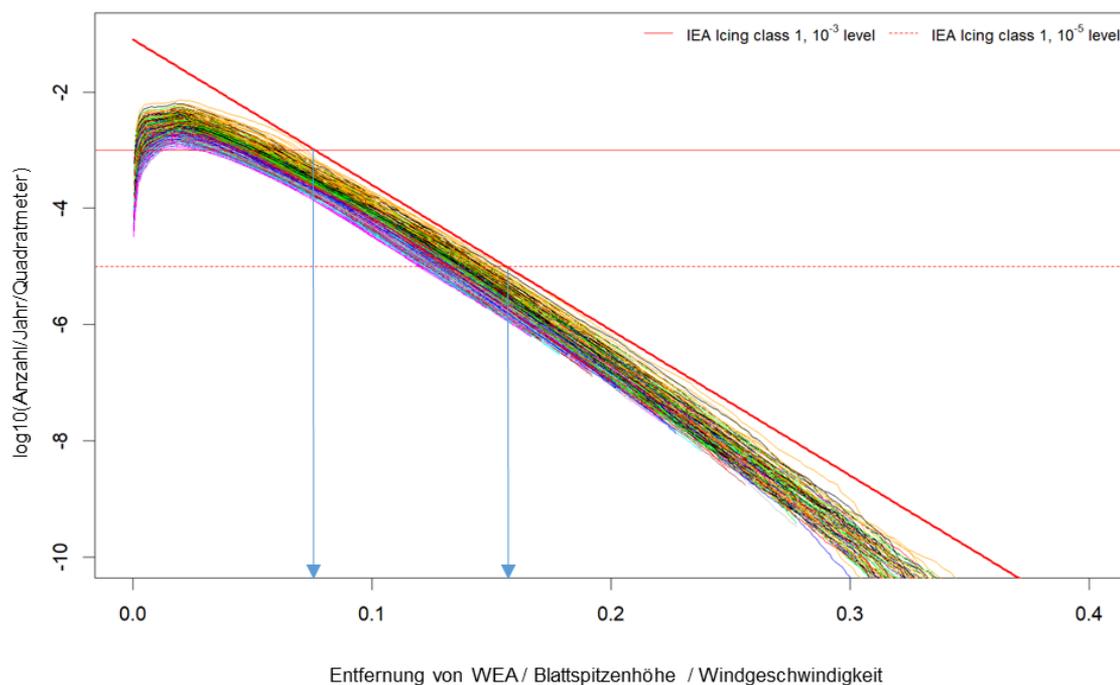
- **10⁻⁵ pro Quadratmeter pro Jahr**

Entspricht einem lokalisierten individuellen Risiko per annum (LIRA) $\leq 10^{-6}$

- Risiko durch Eisfall und -wurf unerheblich
- Keinerlei Gefährdung von Personen im Bereich öffentlicher Straßen, Eisenbahnen, Freizeitgebieten, Siedlungen etc.

Mit diesen Annahmen für die zulässige Auftreffwahrscheinlichkeit und den in Abbildung 4 und Abbildung 5 als rote Geraden eingezeichneten oberen Abschätzungen für die Auftreffverteilung der Eisstücke, lassen sich nun Mindest-Sicherheitsabstände ablesen. Diese Mindestabstände gelten für alle Windkraftanlagen in dem betrachteten Bereich der Anlagenabmessungen und orientieren sich jeweils an dem Windrichtungssektor mit den größten Eisfall- bzw. Eiswurf-Entfernungen. Dieses Schema ist in Abbildung 6 für den Fall von Eisfall bei IEA Vereisungsklasse 1 dargestellt. Die blauen eingezeichneten vertikalen Linien illustrieren die in diesem Fall abgeleiteten Mindestabstände.

Abbildung 6: Auftreffwahrscheinlichkeiten der Eisstücke bei Eisfall, Maximum über alle Windrichtungen, mittlere Windgeschwindigkeit von 7 bis 15 m/s, IEA Vereisungsklasse 1, inkl. Grenzwert 10⁻³ und 10⁻⁵



Höhere Vereisungsklassen bedingen eine größere Anzahl von Eisstücken, die Mechanismen des Wegschleuderns und des Transports mit der Windströmung bleiben jedoch unverändert. Die Ergebnisse für die Auftreffverteilungen für unterschiedliche Vereisungsklassen unterscheiden sich daher nur in der Skalierung mit der Anzahl der Eisstücke, d.h. durch eine Verschiebung entlang der vertikalen Achse in den obigen Abbildungen. Die Ergebnisse für alle Vereisungsklassen 1 bis 5 lassen sich daher, wie in Abbildung 7 und Abbildung 8 gezeigt, zusammenfassen. Man beachte, dass die vertikale Achse nun keine Einheiten mehr trägt, da die Ergebnisse unterschiedlicher Vereisungsklassen mit unterschiedlichen Achsenskalierungen aufgetragen sind. Das zeigt sich auch an den horizontalen Linien zu den 10⁻³ und 10⁻⁵ Grenzwerten, die nun, je nach Vereisungsklasse, auf unterschiedlicher Höhe zu liegen kommen. Abbildung 7 und Abbildung 8 erlauben es nun, aus den

Schnittpunkten der rot dargestellten, oberen einhüllenden Geraden mit den 10^{-3} und 10^{-5} Grenzwerten, konservative Sicherheitsabstände für alle Vereisungsklassen abzulesen.

Abbildung 7: Auftreffwahrscheinlichkeiten der Eisstücke bei Eisfall, Maximum über alle Windrichtungen, mittlere Windgeschwindigkeit von 7 bis 15 m/s, inkl. Grenzwert 10^{-3} und 10^{-5} für die IEA Vereisungsklassen 1 bis 5

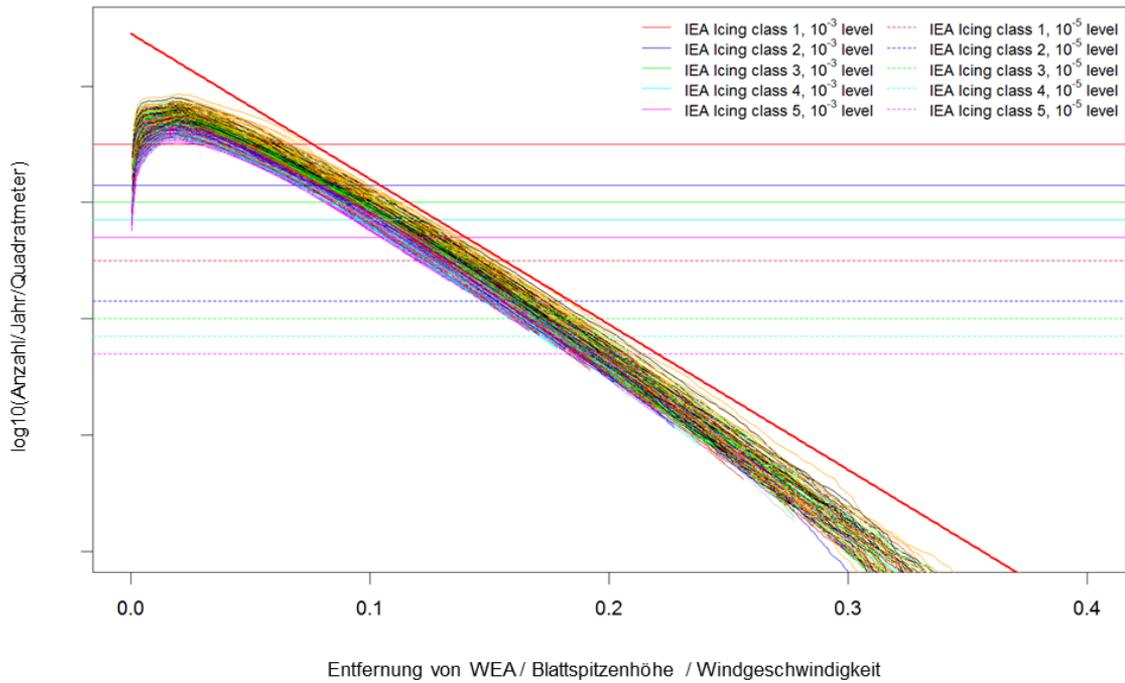
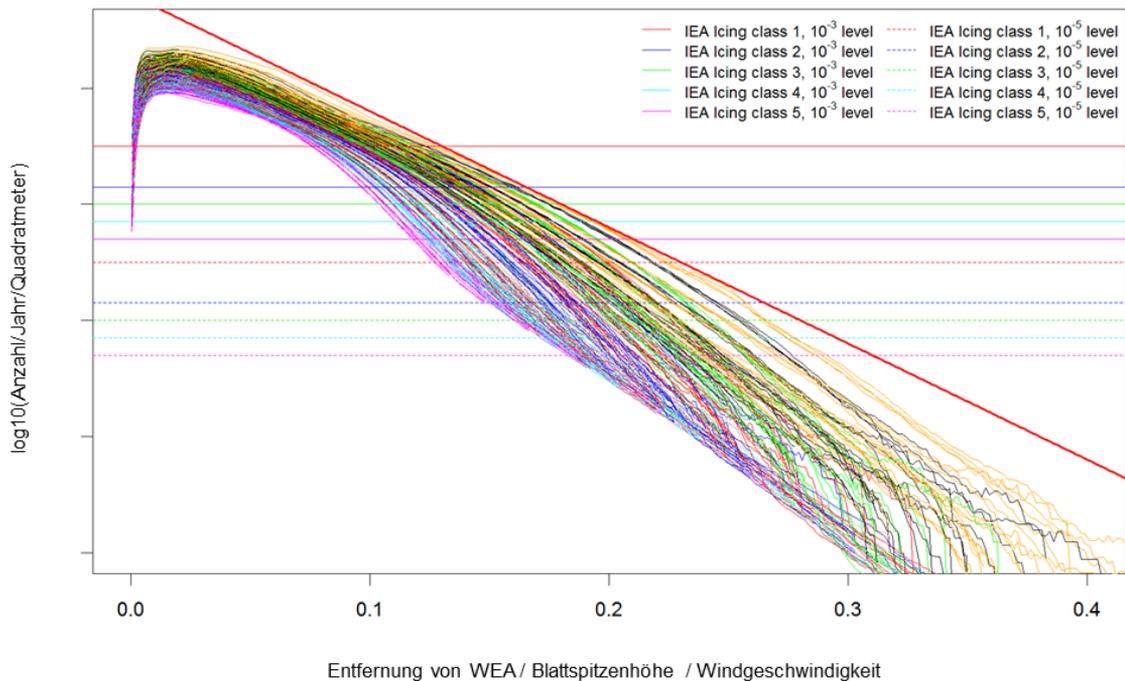


Abbildung 8: Auftreffwahrscheinlichkeiten der Eisstücke bei Eiswurf, Maximum über alle Windrichtungen, mittlere Windgeschwindigkeit von 7 bis 15 m/s, inkl. Grenzwert 10^{-3} und 10^{-5} für die IEA Vereisungsklassen 1 bis 5



5.3.3. Faustformeln für Sicherheitsabstände bei Eisfall und -wurf

Die Ableitung von konservativen Sicherheitsabständen, wie in Abschnitt 5.3.2 graphisch durchgeführt, kann auch in der Form von Formeln ausgedrückt werden. Die Koeffizienten in dieser Darstellung bilden dabei u.a. Offset und Steigung der roten Gerade ab, welche als obere einhüllende Abschätzung der berechneten Auftreffverteilungen bestimmt wurde.

Auf diesem Weg erhält man folgende Faustformeln für die einzuhaltenden Sicherheitsabstände. Gemäß der Herleitung beziehen sich diese Sicherheitsabstände auf den Windrichtungssektor mit den größten Eisfall- bzw. Eiswurfweiten. Bei einer detaillierten, standortspezifischen Betrachtung können sich in manche Richtungen auch sehr viel kleinere notwendige Sicherheitsabstände ergeben.

Eisfall

- **10^{-3} pro Quadratmeter pro Jahr**

$$\frac{R_{min}}{TH} = V_{avg} \frac{3 + \log(a) + \log(b) - 1.1}{25}$$

- **10^{-5} pro Quadratmeter pro Jahr**

$$\frac{R_{min}}{TH} = V_{avg} \frac{5 + \log(a) + \log(b) - 1.1}{25}$$

Eiswurf

- **10^{-3} pro Quadratmeter pro Jahr**

$$\frac{R_{min}}{TH} = V_{avg} \frac{3 + \log(a) + \log(b) - 0.4}{20}$$

- **10^{-5} pro Quadratmeter pro Jahr**

$$\frac{R_{min}}{TH} = V_{avg} \frac{5 + \log(a) + \log(b) - 0.4}{20}$$

Hierbei sind die jeweiligen Parameter wie folgt definiert:

- R_{min} ... Einzuhaltender Sicherheitsabstand
- TH ... Blattspitzenhöhe
- V_{avg} ... mittlere Windgeschwindigkeit im Windrichtungssektor mit der höchsten Fall- bzw. Wurfweite
- $a = \begin{cases} 1 & \dots \text{für IEA Vereisungsklasse 1} \\ 5 & \dots \text{für IEA Vereisungsklasse 2} \\ 10 & \dots \text{für IEA Vereisungsklasse 3} \\ 20 & \dots \text{für IEA Vereisungsklasse 4} \\ 40 & \dots \text{für IEA Vereisungsklasse 5} \end{cases}$
- $b = \max(1, P_{bin} \cdot 12)$
- P_{bin} ... Häufigkeit der Windrichtungsverteilung in dem Windrichtungssektor mit der höchsten Fall- bzw. Wurfweite.

Tabelle 3 bis Tabelle 6 fassen die notwendigen Sicherheitsabstände zusammen, die sich aus den obigen Formeln für mittlere Windgeschwindigkeiten von 7 bis 15 m/s und IEA Vereisungsklasse 1 bis 5 ergeben.

Eisfall

Tabelle 3: Bei Eisfall einzuhaltender Sicherheitsabstand in Einheiten der Blattspitzenhöhe mit $P_{\text{bin}} = 1/12$ für den Grenzwert 10^{-3}

		IEA Vereisungsklasse				
		1	2	3	4	5
Mittlere Windgeschwindigkeit	7 m/s	0,53	0,73	0,81	0,90	0,98
	8 m/s	0,61	0,83	0,93	1,02	1,12
	9 m/s	0,68	0,94	1,04	1,15	1,26
	10 m/s	0,76	1,04	1,16	1,28	1,40
	11 m/s	0,84	1,14	1,28	1,41	1,54
	12 m/s	0,91	1,25	1,39	1,54	1,68
	13 m/s	0,99	1,35	1,51	1,66	1,82
	14 m/s	1,06	1,46	1,62	1,79	1,96
	15 m/s	1,14	1,56	1,74	1,92	2,10

Tabelle 4: Bei Eisfall einzuhaltender Sicherheitsabstand in Einheiten der Blattspitzenhöhe mit $P_{\text{bin}} = 1/12$ für den Grenzwert 10^{-5}

		IEA Vereisungsklasse				
		1	2	3	4	5
Mittlere Windgeschwindigkeit	7 m/s	1,09	1,29	1,37	1,46	1,54
	8 m/s	1,25	1,47	1,57	1,66	1,76
	9 m/s	1,40	1,66	1,76	1,87	1,98
	10 m/s	1,56	1,84	1,96	2,08	2,20
	11 m/s	1,72	2,02	2,16	2,29	2,42
	12 m/s	1,87	2,21	2,35	2,50	2,64
	13 m/s	2,03	2,39	2,55	2,70	2,86
	14 m/s	2,18	2,58	2,74	2,91	3,08
	15 m/s	2,34	2,76	2,94	3,12	3,30

Eiswurf

Tabelle 5: Bei Eiswurf einzuhaltender Sicherheitsabstand in Einheiten der Blattspitzenhöhe mit $P_{\text{bin}} = 1/12$ für den Grenzwert 10^{-3}

		IEA Vereisungsklasse				
		1	2	3	4	5
Mittlere Windgeschwindigkeit	7 m/s	0,91	1,15	1,26	1,37	1,47
	8 m/s	1,04	1,32	1,44	1,56	1,68
	9 m/s	1,17	1,48	1,62	1,76	1,89
	10 m/s	1,30	1,65	1,80	1,95	2,10
	11 m/s	1,43	1,81	1,98	2,15	2,31
	12 m/s	1,56	1,98	2,16	2,34	2,52
	13 m/s	1,69	2,14	2,34	2,54	2,73
	14 m/s	1,82	2,31	2,52	2,73	2,94
	15 m/s	1,95	2,47	2,70	2,93	3,15

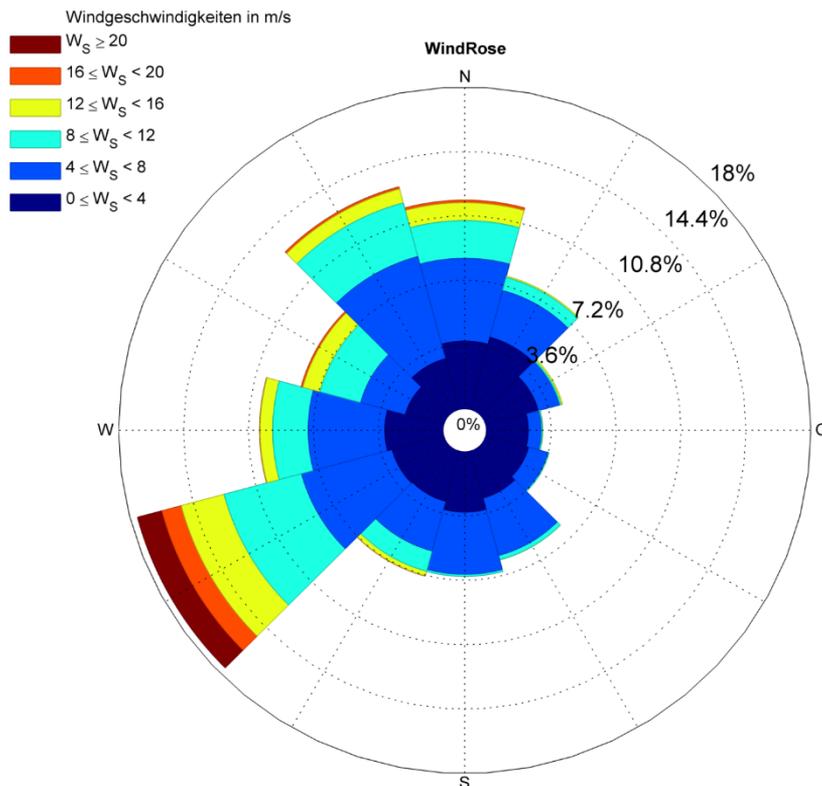
Tabelle 6: Bei Eiswurf einzuhaltender Sicherheitsabstand in Einheiten der Blattspitzenhöhe mit $P_{\text{bin}} = 1/12$ für den Grenzwert 10^{-5}

		IEA Vereisungsklasse				
		1	2	3	4	5
Mittlere Windgeschwindigkeit	7 m/s	1,61	1,85	1,96	2,07	2,17
	8 m/s	1,84	2,12	2,24	2,36	2,48
	9 m/s	2,07	2,38	2,52	2,66	2,79
	10 m/s	2,30	2,65	2,80	2,95	3,10
	11 m/s	2,53	2,91	3,08	3,25	3,41
	12 m/s	2,76	3,18	3,36	3,54	3,72
	13 m/s	2,99	3,44	3,64	3,84	4,03
	14 m/s	3,22	3,71	3,92	4,13	4,34
	15 m/s	3,45	3,97	4,20	4,43	4,65

5.3.4. Anwendungsbeispiel

Die hergeleiteten Faustformeln wurden beispielhaft anhand von Winddaten eines Standortes im Osten Österreichs erprobt. Für eine Anlagenkonfiguration mit Rotordurchmesser und Nabenhöhe von 150 m (Blattspitzenhöhe 225 m) beträgt die mittlere Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe über alle Richtungen 7,5 m/s. Das Eisauftreten am Standort entspricht IEA Vereisungsklasse 2. Anhand der windrichtungsabhängigen Häufigkeitsverteilung lässt sich ablesen, dass die Windrichtung WSW die höchsten Fall- und Wurfweiten aufweist, da der dortige Mittelwert der Windgeschwindigkeit deutlich über dem der anderen Sektoren liegt.

Abbildung 9: Windrose für den Beispielstandort in 150 m Höhe.



Die mittlere Windgeschwindigkeit im Sektor WSW beträgt 9,7 m/s bei einer Häufigkeit von 18%. Anhand der Faustformeln ergeben sich mit diesen Eingangsparametern die folgenden Sicherheitsabstände:

Eisfall

- **10^{-3} pro Quadratmeter pro Jahr**

$$R_{\min} \approx 1,13 \cdot TH \approx 254 \text{ m}$$

- **10^{-5} pro Quadratmeter pro Jahr**

$$R_{\min} \approx 1,90 \cdot TH \approx 428 \text{ m}$$

Eiswurf

- **10^{-3} pro Quadratmeter pro Jahr**

$$R_{\min} \approx 1,75 \cdot TH \approx 394 \text{ m}$$

- **10^{-5} pro Quadratmeter pro Jahr**

$$R_{\min} \approx 2,72 \cdot TH \approx 611 \text{ m}$$

Vergleicht man diese Sicherheitsabstände als Radius mit einer standortspezifischen Eisfall- und Eiswurfsimulation, so lässt sich eine gute Übereinstimmung mit den maximalen Fall- bzw. Wurfweiten der Simulation feststellen. Dieser Vergleich kann sich naturgemäß nur auf den Windrichtungssektor mit den höchsten Eisfall- bzw. Eiswurfweiten beziehen. In anderen Windrichtungen ergeben sich daher auch deutlich kleinere Eisfall- und Eiswurfweiten.

Abbildung 10: Auftreffwahrscheinlichkeit von Eisstücken in der Umgebung der Windenergieanlage bei Eisfall. Der gelbe Bereich entspricht Wahrscheinlichkeiten $> 10^{-5}$, der orangene Bereich entspricht Wahrscheinlichkeiten $> 10^{-3}$.

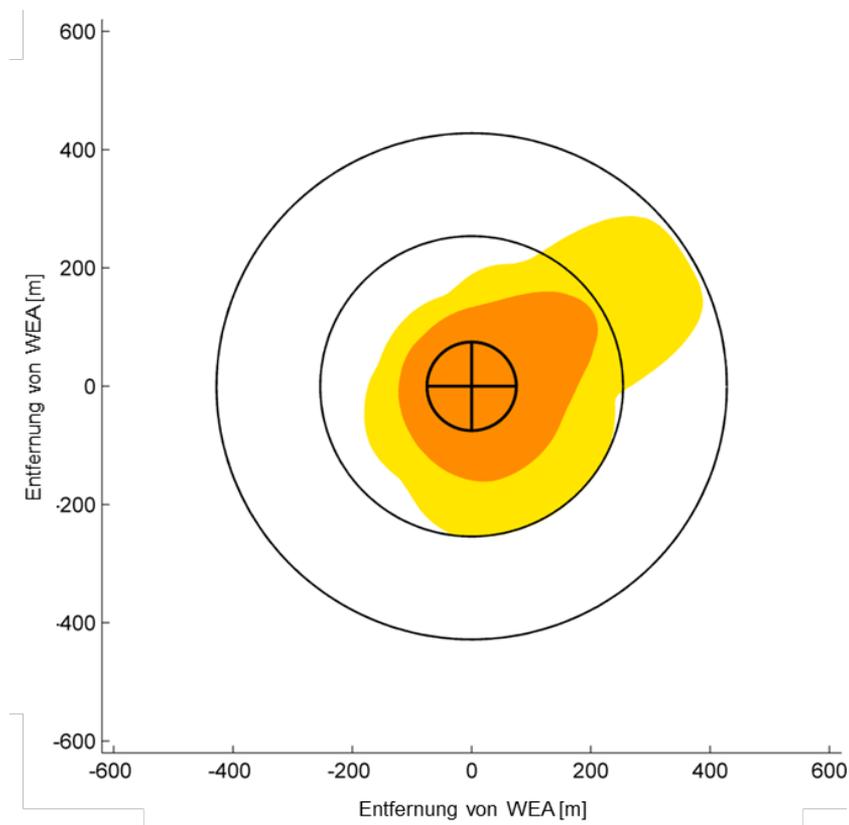
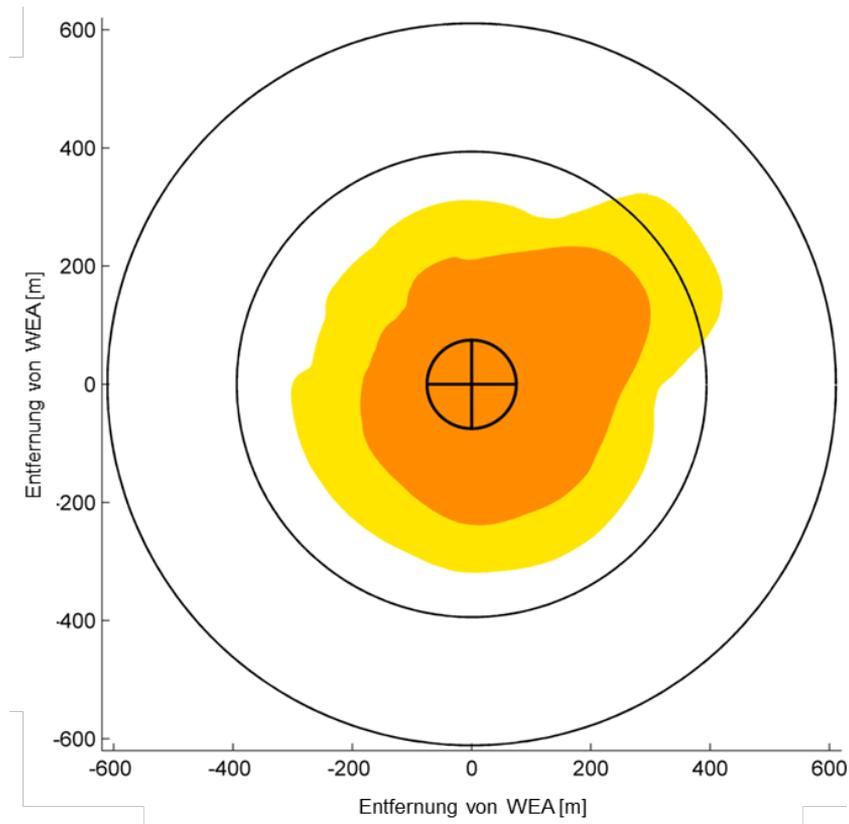


Abbildung 11: Auftreffwahrscheinlichkeit von Eisstücken in der Umgebung der Windenergieanlage bei Eiswurf. Der gelbe Bereich entspricht Wahrscheinlichkeiten $> 10^{-5}$, der orangene Bereich entspricht Wahrscheinlichkeiten $> 10^{-3}$.



Die leichte Überschätzung der einzuhaltenden Sicherheitsabstände im Falle des Eiswurfs lässt sich auf die Nicht-Beachtung der automatischen Abschaltung bei Windgeschwindigkeiten oberhalb der Cut-out Windgeschwindigkeit zurückführen, welche wiederum in der Eiswurfsimulation berücksichtigt wird. Grundsätzlich führt diese Überschätzung zu einer konservativen Abschätzung der einzuhaltenden Sicherheitsabstände bei Eiswurf über die hergeleiteten Faustformeln.

Abschließend soll noch einmal hervorgehoben werden, dass sich die dargestellte Ermittlung der Eisfall und Eiswurf Sicherheitsabstände auf weitgehend konservativen Annahmen beruht. Dazu zählen folgende Punkte:

- Jedes Eisstück mit einer Masse > 100 g verursacht einen Todesfall
- Die Menge an Eisstücken ist bei Eiswurf um den Faktor 10 erhöht gegenüber Eisfall (vgl. Tabelle 1)
- Die Frequentierungsannahmen sind in Bezug auf einen Großteil der heutigen Anlagenstandorte als konservativ zu bewerten
- Die Eingangsgrößen für die zugrundeliegenden Eisfall- und Eiswurfmodellierungen (Masseverteilung, Form, Festigkeit, Luftwiderstand etc. der Eisstücke) sind sämtlich konservativ abgeschätzt

Angesichts dieser konservativen Herangehensweise bestehen keine Bedenken gegen eine allgemeine Anwendung der hier abgeleiteten Sicherheitsabstände auf konkrete Anlagenstandorte.

6 Vernetzung und Ergebnistransfer

Das Hauptziel des Task 19 ist es, die kommerzielle Nutzung von Windenergie unter Vereisungsbedingungen zu erleichtern und zu optimieren. Aus diesem Grund sind nationale und internationale Planer:innen und Betreiber:innen von Windenergieprojekten in vereisungsgefährdeten Regionen eine wesentliche Zielgruppe für die Ergebnisse des Task 19.

In Hinblick auf die Publikationen, die einen direkten Mehrwert für Planer:innen und Betreiber:innen von Windenergieanlagen haben, ist das Deliverable *Performance Warranty Guidelines for Wind Turbines in Icing Climates* zu nennen. Seit Veröffentlichung der ersten Ausgabe im Jahr 2018 haben einige Hersteller von Blattheizungssystemen damit begonnen entsprechende Garantieoptionen für ihre Systeme anzubieten und zu bewerben. Die Überarbeitungen und Erweiterungen zu möglichen Garantiebedingungen und Validierungsprozeduren im Zuge der Erstellung der zweiten Ausgabe des Dokuments leisten damit einen wichtigen Beitrag, um die Anwendung dieser Richtlinie weiter zu festigen und damit die Unsicherheiten für Betreiber von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen zu verringern. Dies bedeutet im Umkehrschluss eine Unterstützung des Ausbaus der Windenergie an entsprechenden Standorten.

Ein zweites wichtiges Dokument für die oben angeführte kommerzielle Zielgruppe ist das Deliverable *Ice Detection Guidelines for Wind Energy Applications*. In der Publikation werden Richtlinien für die verschiedenen Methoden der Eisdetektion in Windenergieanwendungen definiert. Hauptziel ist es, die Planer:innen und Betreiber:innen bei der Auswahl der am besten geeigneten Eiserkennungsmethoden für bestimmte Anwendungen in der Windindustrie zu unterstützen. Durch die Einführung standardisierter Metriken wird die Bewertung und der Vergleich der Leistung einzelner Eiserkennungssysteme erleichtert. Hierbei kommen Leistungskennzahlen zum Einsatz, die sowohl über Labor-, als auch über Feldversuche definiert werden. Der Überblick über die zurzeit zertifizierten Eiserkennungssysteme dient darüber hinaus auch als Orientierungshilfe für Produktentwickler:innen und Forscher:innen zu bisher gewählten Lösungsansätzen.

Für die eben genannte Zielgruppe aus dem Bereich Forschung und Entwicklung ist der technische Bericht *Definition of Best Practice for Testing Icephobic Surfaces* eine weitere wichtige Veröffentlichung. In dieser Publikation werden die Erfahrungen im Zusammenhang mit Tests für eisabweisende Oberflächen zusammengefasst. Grundlegende Testdesigns in Hinblick auf Eisbildungs- und Eishaftungstests im Labor, Eiswindkanaltests und Feldtestkampagnen für eisabweisende Materialien werden erörtert. Neben den Testdesigns und Beständigkeitsaspekten werden auch die für die Eisabweisung relevanten Oberflächeneigenschaften behandelt, um geeignete Überwachungsinstrumente und Alterungsmodelle für die jeweilige beabsichtigte Anwendung identifizieren zu können. Das Dokument bietet damit eine wertvolle Informationsquelle für Forscher:innen und Produktentwickler:innen im Bereich der Oberflächenbearbeitung und -beschichtung, über die Windenergiebranche hinaus, z. B. in der Flugzeug- oder Autoindustrie.

Ein weiteres wichtiges Dokument ist die zweite Ausgabe der *International Recommendations for Ice Fall and Ice Throw Risk Assessments*. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Überarbeitung sind unter Kapitel 5.2 beschrieben. In Hinblick auf die Relevanz dieses Dokuments ist festzuhalten, dass es einen direkten Nutzen in Hinblick auf den weiteren Ausbau der kommerziell genutzten Windenergie national und international hat. Aufgrund der Erkenntnisse dieser Publikation gibt es nun für

Windkraftanlagenbetreiber mehr Planungssicherheit (z. B. hinsichtlich der Auswirkungen unterschiedlicher Betriebsmodi der Anlage und etwaiger Blattheizungssysteme), aber auch konkrete Empfehlungen für Behörden (z. B. in Form einer Vorlage für ein allgemeingültiges Warnschild zu Eisfall).

Daran schließen die Ergebnisse des zweiten Forschungsschwerpunkts zu „Bewertungsempfehlung für das Risiko durch Eisfall und -wurf“ an, die vor allem einen Beitrag zur Diskussion um die Öffnung der österreichischen Genehmigungspraxis hin zu einem Weiterbetrieb von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen leisten sollen. Der Gesetzgeber ist in der Pflicht, die Rahmenbedingungen für einen stabilen Betrieb des Stromnetzes durch die Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber zu schaffen, speziell auch in Hinblick auf einen zukünftigen Erzeugungsmix aus 100% Erneuerbaren. Die bisherige Genehmigungspraxis steht dazu im Widerspruch, da ein je nach Vereisungsereignis großflächiger, zeitgleicher Ausfall an Erzeugung aus Windenergie zu einer signifikanten Instabilität des Stromnetzes führen kann, die von den entsprechenden Steuerungsorganen wiederum nur mit großem Aufwand ausgeglichen werden kann. In potentiellen Folgeprojekten sollte gemeinsam und in Absprache mit den zuständigen Behörden der Weiterbetrieb unter Vereisungsbedingungen erprobt und wissenschaftlich begleitet werden.

Neben den Publikationen in Form von Berichten, die auf diversen Homepages (i.e. IEA Wind, Energiewerkstatt und Nachhaltig Wirtschaften) zum Download bereitgestellt sind, gab es in den vergangenen Jahren mehrere Präsentationen bei Veranstaltungen und Konferenzen. Ein besonderes Ereignis stellte dabei ein mehrtägiger, Task-übergreifender Disseminationsworkshop dar, der zum Auftakt mit einer Vorstellung von aktuellen Forschungsarbeiten der unterschiedlichen Tasks mit österreichischer Beteiligung (Task 19, 32, 26 und 41) im Rahmen der biennalen Branchenplattform der IG Windkraft im Oktober 2022 begann. Zwischen den Vorträgen und im Anschluss wurde Raum für Diskussionen und Vernetzung zwischen den internationalen Task-Teilnehmern und den Vertreter:innen der österreichischen Windbranche geboten. Im weiteren Verlauf der folgenden Tage hielten die Tasks 19, 32 und 41 gemeinsam in Wien Task-Meetings ab, u. a. mit mehreren Joint Sessions zum Austausch über relevante Themen gemeinsamen Interesses sowie zur Vernetzung.

7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

Die österreichische Beteiligung am Task 19 hat eine hohe Relevanz, da viele Windparkprojekte in Österreich mit den Herausforderungen von Vereisung konfrontiert sind. Allein in der Steiermark und in Kärnten ist aktuell und auf Basis der nationalen Ziele des EAG ein Ausbau der Stromerzeugung durch Windkraft von bis zu 7 TWh bis 2030 geplant (Baumann, Dolna-Gruber, Goritschnig, Pauritsch, & Rohrer, 2021). Viele der dortigen Potenzialflächen befinden sich im alpinen und semialpinen Gelände mit großer Vereisungsgefahr, die sowohl in Hinblick auf Sicherheits- und Risikoaspekte als auch unter dem Aspekt der Ertragsminderung berücksichtigt werden muss. Aber auch im östlichen Flachland, wo eine Vielzahl der heutigen Anlagen steht, treten jährlich mehrmals Vereisungsereignisse auf, die zu einer signifikanten wirtschaftlichen Beeinträchtigung des Anlagenbetriebs führen. Wenn großräumige Vereisungsereignisse ein gleichzeitiges Abschalten einer großen Zahl von Anlagen in einer ganzen Region auslösen, kann auch die Stabilität des Stromnetzes gefährdet werden. Letzteres wird bei weiter steigendem Anteil an Windenergie im Strom-Mix sowie steigender Zahl an Anlagenstandorten mit relevantem Vereisungsgeschehen zu einem zunehmend drängenden Problem. Die Untersuchung von Technologien und Strategien zum sicheren und effizienten Umgang mit Vereisung hat daher eine hohe Priorität im Zuge des weiteren Ausbaus der österreichischen Windenergie. Mit der weiteren Teilnahme am Task 19 können die Herausforderungen gemeinsam mit internationalen Partnern auf einer objektiven, wissenschaftlichen Ebene bearbeitet und Technologiekooperationen und Handelsbeziehungen aufgebaut und gefestigt werden.

Der Fokus eines zukünftigen österreichischen Forschungsschwerpunkts bzw. einer fortgeführten Task-Beteiligung sollte die Untersuchung der Auswirkungen des Weiterbetriebs von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen auf die Eisfall- bzw. Eiswurfgefährdung für Personen im Bereich von Windparks sein. Die Vorgabe von Abschaltung bei dem Auftreten von Anlagenvereisungen ist eine im europäischen Umfeld auf Österreich und Deutschland beschränkte Anforderung. In anderen Ländern ist ein – technisch ohnehin durchaus möglicher – Weiterbetrieb unter Vereisungsbedingungen erlaubt. Eine pauschale Abschaltung bei Eiserkennung führt in vielen Fällen dazu, dass auch bei Vereisungsereignissen, während derer mit hoher Wahrscheinlichkeit keine relevante Gefährdung für Personen im Umfeld der Anlage besteht, abgeschaltet wird. Die damit verbundenen Stillstandzeiten bedeuten neben wirtschaftlichen Verlusten auch das Risiko einer Instabilität des Stromnetzes. Ein solches, zu großen Teilen vermeidbares Risiko sollte bei der ohnehin steigenden Volatilität der Erzeugung durch 100% erneuerbare Energien in Zukunft soweit als möglich vermieden werden.

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung eines Probebetriebs ausgewählter Anlagen an Standorten unterschiedlichen Vereisungsgeschehens kann anhand von meteorologischen Daten, kontinuierlicher Foto-Überwachung von Rotor und Umgebung sowie Erhebung und ggf. Vermessung gefallener/geworfener Eisstücke vor Ort, eine umfassende Datenbasis des Standort- und Anlagenbetriebs-spezifischen Eisaufkommens erstellt werden. Die Analyse dieser Datenbasis kann im nächsten Schritt zum einen mit im internationalen Task-Umfeld verfügbaren Referenzdaten und zum anderen mit einschlägiger statistischer Modellierung zu Eisfall/-wurf abgeglichen werden. Im

Ergebnis können Empfehlungen zur standortspezifischen Beurteilung des Eiswafrisikos sowie Bedingungen und Maßnahmen für einen sicheren Weiterbetrieb unter Vereisung zusammengestellt werden, die sowohl für die Mehrzahl der Länder, in denen der Weiterbetrieb bereits erlaubt ist, als auch für Länder, in denen dieser zurzeit noch untersagt ist, von Relevanz sind.

Literaturverzeichnis

- Baumann, M., Dolna-Gruber, C., Goritschnig, W., Pauritsch, G., & Rohrer, M. (2021). *Klima- und Energiestrategien der Länder - Energie, Treibhausgasemissionen und die Kongruenz von Länder- und Bundeszielen*. Wien: Österreichische Energieagentur.
- Cattin, R., Koller, S., & Heikkilä, U. (2016). *Icing at St. Brais and Mont Crosin - Consequences of icing for the operation and power production of wind turbines in the Jura Mountains*. Bern: Swiss Federal Office of Energy.
- Committee for the Prevention of Disasters caused by dangerous substances. (1992). *CPR 16E: Methods for the determination of possible damage*. The Hague.
- Euro NCAP. (November 2021). *MPDB Frontal Impact Testing Protocol, Version 1.1.2*. Von Euro NCAP | Full Width Rigid Barrier: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/adult-occupant-protection/frontal-impact/full-width-rigid-barrier/#abgerufen>
- Godreau et al. (2021). *IEA Wind TCP - Task 19: Ice Detection Guidelines for Wind Energy Applications*.
- Godreau, C. (05. 02. 2020). Abgerufen am 09. 03. 2023 von Index of Winterwind 2020: https://windren.se/WW2020/13_4_39_Godreau_Ice_protection_systems_and_retrofits_Performance_and_experiences_Public.pdf
- Herry, M., Sedlacek, N., & Steinacher, I. (2011). *Verkehr in Zahlen*. Vienna: Federal Ministry of Transportation, Innovation and Technology.
- IEA Wind TCP. (2023). Abgerufen am 09. 03. 2023 von About IEA Wind TCP | IEA Wind TCP: <https://iea-wind.org/about-iea-wind-tcp/>
- Karlsson, T. (21. 04. 2021). Abgerufen am 09. 03. 2023 von Index of Winterwind 2021: https://windren.se/WW2021/14_2_21_Karlsson_IEA_Wind_Task_19_Cold_climate_wind_market_study_Public.pdf
- Krenn et al. (2022). *IEA Wind TCP - Task 19: International Recommendations for Ice Fall and Ice Throw Risk Assessments*.
- Lehtomäki et al. (2017). *IEA Wind TCP - Task 19: Recommended Practice 13 2nd Edition: Wind Energy in Cold Climates*.
- Lehtomäki et al. (2018). *IEA Wind TCP - Task 19: Report on Available Technologies for Wind Energy in Cold Climates*.
- Rehfeld et al. (2022). *IEA Wind TCP Task 19: Definition of Best Practice for Testing Icephobic Surfaces*.
- Spathonis, J. (2001). *Report on testing to determine impact resistance of vehicle windscreens – overpass screening project*. Queensland Government, Department of Main Roads.
- Stökl, A. (21. 04. 2021). Abgerufen am 09. 03. 2023 von Index of Winterwind 2021: https://windren.se/WW2021/16_3_05_Stoekl_Simple_rules-of-thumb_for_ice_fall_throw_safety_distances_Public_v2.pdf

United Nations. (2015). Agreement Concerning the adoption of uniform technical prescriptions for wheeled vehicles, Addendum 42: Regulation No. 43, Revision 4.

Wickman et al. (2020). *IEA Wind TCP - Task 19: Performance Warranty Guidelines for Wind Turbines in Icing Climates*.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammenstellung von Warnschildern, die über die potenzielle Gefahr von Eisfall und/oder Eiswurf informieren (Quelle: Mit freundlicher Genehmigung von Thomas Hahm, Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG)	22
Abbildung 2: Allgemeingültiges Warnschild für das Eisfallrisiko.....	23
Abbildung 3: Auftreffwahrscheinlichkeiten der Eisstücke bei Eisfall, Maximum über alle Windrichtungen, mittlere Windgeschwindigkeit 8 m/s, IEA Vereisungsklasse 1.....	25
Abbildung 4: Auftreffwahrscheinlichkeiten der Eisstücke bei Eisfall, Maximum über alle Windrichtungen, mittlere Windgeschwindigkeit von 7 bis 15 m/s, IEA Vereisungsklasse 1	26
Abbildung 5: Auftreffwahrscheinlichkeiten der Eisstücke bei Eiswurf, Maximum über alle Windrichtungen, mittlere Windgeschwindigkeit von 7 bis 15 m/s, IEA Vereisungsklasse 1	27
Abbildung 6: Auftreffwahrscheinlichkeiten der Eisstücke bei Eisfall, Maximum über alle Windrichtungen, mittlere Windgeschwindigkeit von 7 bis 15 m/s, IEA Vereisungsklasse 1, inkl. Grenzwert 10^{-3} und 10^{-5}	28
Abbildung 7: Auftreffwahrscheinlichkeiten der Eisstücke bei Eisfall, Maximum über alle Windrichtungen, mittlere Windgeschwindigkeit von 7 bis 15 m/s, inkl. Grenzwert 10^{-3} und 10^{-5} für die IEA Vereisungsklassen 1 bis 5	29
Abbildung 8: Auftreffwahrscheinlichkeiten der Eisstücke bei Eiswurf, Maximum über alle Windrichtungen, mittlere Windgeschwindigkeit von 7 bis 15 m/s, inkl. Grenzwert 10^{-3} und 10^{-5} für die IEA Vereisungsklassen 1 bis 5	30
Abbildung 9: Windrose für den Beispielstandort in 150 m Höhe.	34
Abbildung 10: Auftreffwahrscheinlichkeit von Eisstücken in der Umgebung der Windenergieanlage bei Eisfall. Der gelbe Bereich entspricht Wahrscheinlichkeiten $> 10^{-5}$, der orangene Bereich entspricht Wahrscheinlichkeiten $> 10^{-3}$	35
Abbildung 11: Auftreffwahrscheinlichkeit von Eisstücken in der Umgebung der Windenergieanlage bei Eiswurf. Der gelbe Bereich entspricht Wahrscheinlichkeiten $> 10^{-5}$, der orangene Bereich entspricht Wahrscheinlichkeiten $> 10^{-3}$	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Teilnehmende Nationen in der sechsten Periode des Task 19.....	11
Tabelle 2: IEA Vereisungsklasse und entsprechende jährliche Anzahl von Eisstücken pro Windturbine, basierend auf manuellen Messungen vor Ort an ENERCON E-82-Turbinen (78 m Nabenhöhe) mit und ohne Blattheizungssystem, jeweils im Anti- bzw. De-Icing-Betriebsmodus (Spalte (a), (b) und (d)), sowie eine Extrapolation der Werte des Leerlaufs ohne Heizungssystem auf den Weiterbetrieb ohne Heizungssystem (Spalte (c), siehe Absatz unten).....	18
Tabelle 3: Bei Eisfall einzuhaltender Sicherheitsabstand in Einheiten der Blattspitzenhöhe mit $P_{bin} = 112$ für den Grenzwert 10^{-3}	32
Tabelle 4: Bei Eisfall einzuhaltender Sicherheitsabstand in Einheiten der Blattspitzenhöhe mit $P_{bin} = 112$ für den Grenzwert 10^{-5}	32
Tabelle 5: Bei Eiswurf einzuhaltender Sicherheitsabstand in Einheiten der Blattspitzenhöhe mit $P_{bin} = 112$ für den Grenzwert 10^{-3}	33
Tabelle 6: Bei Eiswurf einzuhaltender Sicherheitsabstand in Einheiten der Blattspitzenhöhe mit $P_{bin} = 112$ für den Grenzwert 10^{-5}	33

Abkürzungsverzeichnis

IEA	<i>International Energy Agency</i> , Internationale Energieagentur
IPS	<i>Ice Protection System</i> , Eisschutzsystem
TCP	<i>Technology Collaboration Programme</i> , Technologiekollaborationsprogramm
WEA	Windenergieanlage
D	<i>Diameter</i> , Rotordurchmesser
HH	<i>Hub Height</i> , Nabenhöhe
TH	<i>Tip Height</i> , Blattspitzenhöhe
LIRA	<i>Localized Individual Risk per Annum</i> , Lokalisiertes individuelles Risiko per annum
EAG	Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)