



**Schlussbericht vom 13. Mai 2025**

---

# **IEA Wind TCP Task 54**

## **Task 54 Periode 2022 – 2024**

---



Quelle: © Meteotest, 2020



**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech  
CH-3003 Bern  
[www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

**Subventionsempfänger/innen:**

Meteotest AG  
Fabrikstrasse 14, CH-3012 Bern  
[www.meteotest.ch](http://www.meteotest.ch)

**Autor/in:**

Dr. Franziska Gerber, Meteotest AG, [franziska.gerber@meteotest.ch](mailto:franziska.gerber@meteotest.ch)  
Dr. Jérôme Kopp, Meteotest AG, [jerome.kopp@meteotest.ch](mailto:jerome.kopp@meteotest.ch)  
Sara Koller, Meteotest AG, [sara.koller@meteotest.ch](mailto:sara.koller@meteotest.ch)

**BFE-Projektbegleitung:**

Dr. Katja Maus, [katja.maus@bfe.admin.ch](mailto:katja.maus@bfe.admin.ch)  
Lionel Perret, [lionel.perret@planair.ch](mailto:lionel.perret@planair.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/502463-01

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren/Autorinnen dieses Berichts verantwortlich.**



## Zusammenfassung

Die Windenergie in kalten Klimazonen ist stark von Produktionsverlusten aufgrund der Vereisung von Windkraftanlagen betroffen. Obwohl Eisschutzsysteme inzwischen marktreif sind, gibt es kein System, das Windturbinen völlig eisfrei halten kann. Neben den Produktionsausfällen birgt die Vereisung von Windturbinen das Risiko von Eiswurf und kann die Lebensdauer der Turbine verkürzen. Daher sind ein tiefes Verständnis und Methoden zur Schadensbegrenzung wichtig, um Produktionsausfälle zu bewältigen und die Netzstabilität und -sicherheit zu gewährleisten. Der «International Energy Agency Wind Technology Collaboration Programme» (IEA Wind TCP) Task 54 befasst sich mit Windenergie in kalten Klimazonen, insbesondere mit der Vereisung von Windkraftanlagen. Er zielt darauf ab, den grossflächigen Einsatz von Windenergie in kalten Klimazonen in einer sicheren und wirtschaftlich machbaren Weise zu verbessern, indem er sich auf Standardisierung, Referenzlösungen, das Sammeln und Verbreiten von Informationen und die Bereitstellung von Werkzeugen zum besseren Verständnis und zur Abschätzung der mit kaltem Klima verbundenen Risiken konzentriert. Meteotest vertritt die Schweiz seit 2009 im Task 54 (ehemals Task 19). In der Task 54 Periode 2022-2024 war Meteotest hauptsächlich in der Arbeitsgruppe «Performance envelope» aktiv. In dieser Arbeitsgruppe wurde ein Modell zur Simulation des Leistungsbereichs von Rotorblattheizungen entwickelt, das auf Turbineneigenschaften und meteorologischen Bedingungen basiert. Es wurde anhand von Vereisungsereignissen getestet, die in einer öffentlichen Datenbank gesammelt und verfügbar gemacht wurden. Erste Ergebnisse zeigen eine gute Leistung des Modells. Allerdings basiert das Modell auf zahlreichen Annahmen. Insbesondere im Hinblick auf das Framework für die Feldvalidierung von Rotorblattheizsystemen, welches in der Arbeitsgruppe entwickelt wurde, wären Verfeinerungen des Modells von Vorteil. Der Code ist öffentlich zugänglich und kann bereits zur Bewertung des Leistungsumfangs eines Rotorblattheizungssystems verwendet werden, wenn Daten über die lokalen meteorologischen Bedingungen verfügbar sind. Die Datenbank mit Vereisungsereignissen kann als Beispiel für Vereisungsereignisse in verschiedenen geografischen Regionen dienen. In anderen Arbeitspaketen hat der Task 54 ein Referenz-Eiswurfmodell entwickelt, das als Open-Source-Referenz-Eiswurfmodell dienen soll. Darüber hinaus wurden Klimawindkanal-Experimente durchgeführt, um ein Verfahren zu definieren, mit dem Studien in verschiedenen Klimawindkanälen vergleichbar gemacht werden können (Round-Robin-Test). In Anbetracht der Auswirkungen der Vereisung, die von einem einzelnen Blatt bis hin zur Netzstabilität reichen, sind mehr Forschung und vor allem harmonisierte Lösungen für einen transparenten, sicheren und stabilen Betrieb von Windenergieanlagen in kaltem Klima erforderlich. Um den internationalen Austausch zu fördern, ist für den Zeitraum 2025-2028 eine Erweiterung des Task 54 geplant, mit dem Ziel, eine überarbeitete Ausgabe des Dokuments «Recommended Practices on Wind Energy Projects in Cold Climate» zu veröffentlichen.

## Résumé

L'énergie éolienne en climat froid est fortement affectée par des pertes de production dues au givrage des éoliennes. Bien que les systèmes de protection contre le givre soient désormais arrivés à maturité commerciale, il n'existe à ce jour aucun système capable de maintenir les éoliennes totalement exemptes de glace. En plus des pertes de production, le givrage des éoliennes présente un risque de projection de glace (ice throw) et peut réduire la durée de vie de la turbine. C'est pourquoi une compréhension approfondie ainsi que des méthodes d'atténuation des dommages sont essentielles pour limiter les pertes de production et garantir la stabilité et la sécurité du réseau électrique. Le Task 54 de l'« International Energy Agency Wind Technology Collaboration Programme » (IEA Wind TCP) se consacre à l'énergie éolienne en climat froid, et plus particulièrement au phénomène de givrage des éoliennes. Son objectif est d'améliorer l'intégration à grande échelle de l'énergie éolienne en climat froid de manière sûre et économiquement viable. Pour ce faire, il met l'accent sur la standardisation, le développement de solutions de référence, la collecte et la diffusion d'informations, ainsi que la mise à disposition d'outils permettant une meilleure compréhension et évaluation des risques associés aux climats froids. Meteotest représente la Suisse dans le Task 54 (anciennement Task 19) depuis 2009.



Durant la période 2022–2024, Meteotest a principalement participé au groupe de travail « Performance envelope ». Dans ce groupe, un modèle de simulation des performances des systèmes de chauffage des pales de rotor a été développé, basé sur les caractéristiques des turbines et les conditions météorologiques. Ce modèle a été testé à l'aide d'événements de givrage collectés et rendus disponibles dans une base de données publique. Les premiers résultats montrent de bonnes performances, bien que le modèle repose sur de nombreuses hypothèses. Des améliorations seraient notamment souhaitables, en lien avec le cadre de validation sur le terrain des systèmes de chauffage, également développé dans le groupe de travail. Le code est accessible publiquement et peut déjà être utilisé pour évaluer les performances d'un système de chauffage de pale, à condition de disposer de données sur les conditions météorologiques locales. La base de données des événements de givrage peut servir d'exemple pour des cas de givrage dans différentes régions géographiques. Dans d'autres volets du projet, le Task 54 a développé un modèle de référence pour la projection de glace, qui doit servir de modèle open source. Par ailleurs, des expériences en soufflerie climatique ont été réalisées afin de définir une méthode permettant de comparer les études menées dans différentes souffleries climatiques (test interlaboratoire de type Round-Robin). Étant donné les impacts du givrage – allant de l'affectation d'une seule pale jusqu'à la stabilité du réseau électrique – il est nécessaire de poursuivre les recherches et surtout de mettre en place des solutions harmonisées pour assurer un fonctionnement transparent, sûr et stable des installations éoliennes en climat froid. Afin de favoriser les échanges internationaux, une extension du Task 54 est prévue pour la période 2025–2028, avec l'objectif de publier une version révisée du document « Recommended Practices on Wind Energy Projects in Cold Climate ».

## Summary

Wind energy in cold climate regions is significantly affected by production losses due to the icing of wind turbines. Although anti-icing and de-icing systems are now commercially available, no system can keep wind turbines completely ice-free. In addition to production losses, icing poses the risk of ice throw and may shorten the turbine's lifetime. Therefore, a deep understanding of icing processes and effective mitigation strategies are crucial for managing production losses and ensuring grid stability and safety. The International Energy Agency Wind Technology Collaboration Programme (IEA Wind TCP) Task 54 addresses wind energy in cold climates, particularly the icing of wind turbines. Its aim is to support the large-scale deployment of wind energy in cold climates in a safe and economically feasible manner. To achieve this, it focuses on standardization, reference solutions, the collection and dissemination of information, and the provision of tools to improve understanding and estimation of risks related to cold climates. Meteotest has represented Switzerland in Task 54 (formerly Task 19) since 2009. During the 2022–2024 phase of Task 54, Meteotest was primarily involved in the «Performance Envelope» working group. This group developed a simulation model for the performance range of rotor blade heating systems, based on turbine characteristics and meteorological conditions. The model was tested using icing events that were collected and made available in a public database. Initial results show good model performance. However, the model is based on numerous assumptions. Refinements would be particularly beneficial in view of the framework for field validation of rotor blade heating systems, which was also developed within the working group. The code is publicly accessible and can already be used to assess the performance of a rotor blade heating system, provided that data on local meteorological conditions is available. The icing event database can serve as an example of icing events in different geographic regions. In other work packages, Task 54 developed a reference model for ice throw, intended to serve as an open-source standard. Additionally, climate wind tunnel experiments were carried out to define a method for making studies conducted in different climate wind tunnels comparable (Round-Robin test). Given the impacts of icing – from affecting a single blade to grid stability – more research is needed, along with harmonized solutions to ensure transparent, safe, and stable operation of wind turbines in cold climates. To foster international collaboration, an extension of Task 54 is planned for the period 2025–2028, with the goal of publishing a revised edition of the document «Recommended Practices on Wind Energy Projects in Cold Climate».



## Kernbotschaften («Take-Home Messages»)

- Die «Performance envelope» von Rotorblatttheizsystemen, das heisst die Leistungsfähigkeit des Systems in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Temperatur, kann vereinfacht modelliert werden und dient zur Bestimmung der Effizienz eines Rotorblatttheizsystems unter bestimmten meteorologischen Bedingungen.
- Die Modellierung der «Performance envelope» kann als Grundlage für Feldvalidierungen von Rotorblatttheizsystemen herbeigezogen werden.
- Die internationale Zusammenarbeit bezüglich Vereisung von Windenergieanlagen ist wichtig, um die Problematik möglichst einheitlich zu behandeln und Wissen und Erfahrungen auszutauschen und um voneinander zu lernen und sich gegenseitig weiterzubringen.
- Vereisungsereignisse weisen eine hohe Komplexität auf. Ein besseres Verständnis dieser Komplexität ist für die Windindustrie in kalten Klimazonen in Hinsicht auf Produktionsverluste wichtig.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>3</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>3</b>
<b>Summary .....</b>	<b>4</b>
<b>Kernbotschaften («Take-Home Messages»).....</b>	<b>5</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>6</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>7</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>8</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>9</b>
<b>1     Einleitung .....</b>	<b>10</b>
1.1     Kontext und Motivation .....	10
1.2     Projektziele .....	11
<b>2     Vorgehen, Methode, Ergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>12</b>
2.1     Vorgehen und Methoden .....	12
2.1.1.   Performance Envelope .....	12
2.1.2.   Eiswurfmodell .....	18
2.1.3.   Klimawindkanalvergleich .....	20
2.2     Ergebnisse und Diskussion .....	20
2.2.1.   Performance Envelope .....	20
2.2.2.   Eiswurfmodell .....	31
2.2.3.   Klimawindkanalvergleich .....	31
<b>3     Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>32</b>
<b>4     Nationale und internationale Zusammenarbeit .....</b>	<b>35</b>
4.1     Internationale Projektpartner .....	35
4.2     Aktivitäten im Rahmen des Task 54 .....	35
<b>5     Publikationen und andere Kommunikation .....</b>	<b>37</b>
5.1     Publikationen / Modelle / Codes des Task 54 .....	37
5.2     Konferenztteilnahmen.....	38
<b>6     Literaturverzeichnis .....</b>	<b>40</b>
<b>7     Anhang .....</b>	<b>41</b>



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Graphische Darstellung einer Zeitreihe eines Beispielvereisungsereignisses in Deutschland.....	14
Abbildung 2: Graphische Darstellung einer Zeitreihe eines Beispielvereisungsereignisses in Kanada. ....	15
Abbildung 3: Wärmeschaltkreis der Modellberechnungen.....	16
Abbildung 4: Benutzeroberfläche der Modellierung der Performance envelope, wobei vier Beispiel Performance envelopes für verschiedene Parametrisierungen dargestellt sind.....	18
Abbildung 5: Benutzeroberfläche des Eiswurfmodells "Windthrow". Quelle: Sarlak et al., 2024.....	19
Abbildung 6: IEA Wind TCP Vereisungsklassifizierung (IEA Wind, 2017).....	20
Abbildung 7: Eistyp abhängig von den meteorologischen Bedingungen Temperatur und Windgeschwindigkeit. Eine Verschiebung der Kurven entsteht bei höherem Flüssigwassergehalt und kleinerer Objektgrösse. Quelle: ISO 12494:2017.....	21
Abbildung 8: Webcam Bilder von Vereisungsereignissen an verschiedenen Tagen in Ostkanada zur Illustration unterschiedlicher Eistypen bei unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen. ....	21
Abbildung 9: Vereisungsereignis am 31.12.2018 in Ostkanada. Die Bilder zeigen den Verlauf des Vereisungsereignisses. Die meteorologischen Bedingungen sind in der Zeitreihe in Abbildung 10 dargestellt. ....	22
Abbildung 10: Zeitreihen der meteorologischen Bedingungen während des Vereisungsereignisses am 31.12.2018 in Ostkanada. ....	22
Abbildung 11: Vereisungsereignis am 25.-27.1.2022 in Deutschland. Die Bilder zeigen den Verlauf des Vereisungsereignisses. Die meteorologischen Bedingungen sind in der Zeitreihe in Abbildung 12 dargestellt. ....	24
Abbildung 12: Zeitreihen der meteorologischen Bedingungen während des Vereisungsereignisses am 25.-27.1.2022 in Deutschland. ....	25
Abbildung 13: Vereisungsstunden von Windturbinen an drei Standorten (links: Ostkanada, mitte: Zentraleuropa, rechts: Nordeuropa). ....	26
Abbildung 14: Zeitreihe der meteorologischen Verhältnisse und der Eisdicke für ein Vereisungsereignis in Ostkanada am 9.4.2019. ....	27
Abbildung 15: Modellierung der Performance envelope für zwei Oberflächentemperaturen (links: 3°C und rechts: 0°C) für ein Rotorblattheizsystem mit einer Heizleistung von 25 kW. Die Sterne, Kreuze, etc. zeigen die meteorologischen Bedingungen während des Ereignisses am 9.4.2019.....	27
Abbildung 16: Wie Abbildung 15 aber mit einer Heizleistung von 35 kW. ....	28
Abbildung 17: Vergleich des Wärmeübergangskoeffizienten entlang des Rotorblattes berechnet anhand von gemessenen Oberflächentemperaturen und der Vorhersage des Performance envelope Modells des Task 54 durch den Hersteller Nordex. Quelle: Nordex Group, 2024.....	28
Abbildung 18: Modelliertes turbinenspezifisches verlaufendes Rotorblattheizungsprofil basierend auf dem vereinfachten Wärmetransfermodell, welches im Rahmen des Task 54 entwickelt wurde und Blattheizzyklen einer Testturbine in Deutschland während zweier Winter. Die zwei gestrichelten Linien zeigen die Grenzen für 0% und 100% Produktionsverlust nach dem Heizzyklus. Die Punkte zeigen die Produktionsverluste (%) nach allen Blattheizzyklen der Testturbine während der zwei Winter. Quelle: Gerber and Froidevaux, 2023 .....	29
Abbildung 19: Framework zur Feldvalidierung von Rotorblattheizsystemen. ....	30
Abbildung 20: Eiswachstum an einem Zylinder mit einem Durchmesser von 3 cm bei einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s, einer Temperatur von -8°C, einem Flüssigwassergehalt von 0.4 g/m <sup>3</sup>	



und einem Medianwert-Durchmesser von 20  $\mu\text{m}$  (dunkelblau: Windkanal von Deutsche Windguard, hellblau: Windkanal von DTU). Quelle: Kim et al., 2024 ..... 32

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Metadaten, welche im Verzeichnis pro Vereisungsereignis zusammengefasst sind. Informationen in schwarz beziehen sich auf Typ, Herkunft und Abdeckung, Informationen in dunkelblau beziehen sich auf die Sensoren und den Inhalt der Zeitreihen. Freiwillige Informationen sind kursiv.....	13
Tabelle 2: Parameter der Turbine und der Rotorblattheizung, welche ins Modell einfließen. ....	17
Tabelle 3: Teilnehmer am Task 54 – Periode 2022-2024.....	35
Tabelle 4: Liste von Task 54 meetings und Teilnahme von Meteotest (FG: Franziska Gerber, JK: Jérôme Kopp, PF: Paul Froidevaux, SK: Sara Koller). ....	35





## Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
CDP-2	Cloud droplet probe
CSV	comma-separated value
DTU	Technical University of Denmark
ExCo	Executive Committee
FFG	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FG	Franziska Gerber
IEA Wind TCP	International Energy Agency Wind Technology Collaboration Programme
IEC	International Electrotechnical Commission
IFAM	Frauenhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung
ISO	International Organization for Standardization
JK	Jérôme Kopp
LWC	Flüssigwassergehalt (liquid water content)
PF	Paul Froidevaux
SK	Sara Koller
SOPWICO	Smart Operation of Wind Power Plants in Cold Climate
SOWINDIC	Smart Operation of Wind Turbines under Icing Conditions
vgbe energy	Internationaler technischer Fachverband der Elektrizitäts- und Wärmeversorgung
VTT	VTT Technical Research Center of Finland



# 1 Einleitung

## 1.1 Kontext und Motivation

Die Schweiz ist offizielle Teilnehmerin des «International Energy Agency Wind Technology Collaboration Programme» kurz «IEA Wind TCP» (<http://www.ieawind.org/>), welches das Programm der Internationalen Energieagentur zur Zusammenarbeit im Bereich der Windenergietechnologie ist. Seit mehr als zehn Jahren vertritt Meteotest AG die Schweiz im Rahmen des IEA Wind TCP Task 54 (beziehungsweise vorgängig Task 19), welcher sich spezifisch mit Windkraftanlagen in kalten Klimazonen beschäftigt.

Windenergie in kalten Klimazonen ist stark verbreitet und wächst in den letzten Jahren rasch. Gemäss der Marktstudie des Task 19 im Jahr 2020 betrug der Anteil von Windkraftanlagen in kalten Klimazonen im Jahr 2020 mit 156 GW rund 22% des globalen Onshore-Windmarktes (Karlsson, 2021). Ein Wachstum von weiteren 67 GW wurden für das Jahr 2025 vorhergesagt. Grund für das starke Wachstum der Onshore-Windenergie, trotz technischer Herausforderungen, ist insbesondere die Tatsache, dass in kalten Klimazonen die Windbedingungen oft gut sind, während die Bevölkerungsdichte eher gering ist. Ausserdem erreichen Speziallösungen für den Betrieb von Windturbinen in kalten Klimazonen immer mehr Marktreife.

In der Schweiz sind momentan 47 Windkraftanlagen mit einer Gesamtleistung von ungefähr 100 MW in Betrieb (Suisse Eole, 2025). Die meisten Turbinen sind aufgrund der geographischen Lage von vereisenden Bedingungen betroffen, insbesondere die grossen Parks, welche sich in den Jurahöhen oder auf grossen Alpenpässen befinden, sind stark von Vereisung betroffen. Die Höhenlage und demzufolge die tiefen Temperaturen in Kombination mit moderater oder hoher Luftfeuchtigkeit, welche zu Wolkenbildung oder Niederschlag führen, bilden meteorologische Bedingungen, welche zu Vereisung führen. Vereisung der Rotorblätter führt zu einem Verlust des Auftriebs und einer Zunahme des Widerstands, und somit zu einer verminderten Produktion (Hochart et al., 2008). Obwohl die Turbinen mit Rotorblattheizungen ausgestattet sind, verlieren die Windparks in der Schweiz mehrere Prozent ihrer Winterproduktion aufgrund von Vereisung. Zusätzlich zu Produktionsverlusten birgt Vereisung von Rotorblättern die Gefahr von Eiswurf und somit ein Risiko für die Bevölkerung (IEA Wind, 2018) und kann zu Strukturinstabilitäten (Frohboese and Anders, 2007) und somit zu einer verkürzten Lebensdauer der Windturbinen führen.

Um die Auswirkung der Rotorblattvereisung abzumildern, können die Turbinen mit Eisschutzsystemen wie zum Beispiel Rotorblattheizungen, ausgestattet werden. Die Effizienz solcher Systeme ist jedoch stark von den meteorologischen Bedingungen abhängig, welche die Bildung und den Abfall der Vereisung bestimmen. Trotz technischer Fortschritte kann bisher kein System Vereisung unter allen Bedingungen verhindern. Der Bereich, in welchem die Systeme wirkungsvoll sind wird als Performance envelope bezeichnet und wird mehrheitlich über Temperatur- und Windgeschwindigkeit definiert. Die Definition, Anwendung und Interpretation der Performance envelope ist in vielen Bereichen entscheidend, sei es bei der Entwicklung von Windkraftanlagen und Eisschutzsystemen, bei der Planung von Windparks in Regionen mit vereisenden Bedingungen, deren Betrieb oder zur Vorhersage der Stromerzeugung. Die Performance envelope beeinflusst somit die Auswahl der Turbine, die Regelungsstrategien und den verbleibenden Gewinn aus dem Verkauf des erzeugten Stroms beziehungsweise den Kauf der benötigten Ausgleichskapazität.

Da bisher weder durch eisabweisende Materialien noch durch das Beheizen der Rotorblätter Vereisung komplett verhindert werden kann, stellt das Risiko durch Eiswurf ein ernstzunehmendes Problem dar. Windparkplaner und -betreiber müssen daher die Gefahr und das Risiko, welche durch Eisfall- und Eiswurf von Windturbinen ausgehen, detailliert untersuchen und beurteilen. Der Prozess zur Berechnung von Eiswurfisiken ist komplex und braucht viel Expertise. Es existieren verschiedene Modelle mit unterschiedlicher Komplexität. Ein einfaches Modell, welches einer groben Abschätzung des Eiswurfperimeters dient und öffentlich zugänglich ist, existiert bis anhin nicht.



Um Effekte und Folgen von Vereisung, wie zum Beispiel Rotorblattvereisung, zu verstehen ist es wichtig, das Phänomen Vereisung an sich zu erfassen. Die Modellierung von Vereisung macht grosse Fortschritte und das Verständnis von Vereisung wächst. Für detaillierte Studien ist es daher zentral, die Vereisungsbedingungen genau zu kennen. Für detaillierte Studien zu spezifischen Phänomenen eignen sich Klimawindkanal-Studien. Das Setup von Klimawindkanälen ist nicht standardisiert. Daher sind Klimawindkanäle Einzelstücke und somit sind Resultate von verschiedenen Klimawindkanälen schwer vergleichbar. Die Vergleichbarkeit kann mit sogenannten «round robin» Versuchen (Ringversuchen), wobei die gleichen Versuche nacheinander mit identischen Probematerialien durchgeführt und miteinander verglichen werden, erhöht werden. Dies legt die Grundlage um zukünftig Studien aus unterschiedlichen Windkanälen besser einordnen zu können.

## 1.2 Projektziele

Task 54 fördert die internationale Zusammenarbeit im Bereich der Windenergie in kalten Klimazonen. Dabei wird Wissen und Erfahrung zwischen den Projektpartnern ausgetauscht. Ziel des Task 54 ist es Empfehlungen sowohl für die Entwickler von technischen Lösungen, für die Planungsphase wie auch für den Betrieb von Windparks zu erarbeiten und herauszugeben.

Der Task 54 ist in mehrere Arbeitsgruppen unterteilt, welche jeweils von einer Teilgruppe der Taskteilnehmer bearbeitet werden. Die Schweiz war in den Jahren 2022-2024 insbesondere in der Arbeitsgruppe «Performance envelope of rotor blade heating systems» aktiv. Die «Performance envelope» spiegelt die äusseren Bedingungen (hauptsächlich Windgeschwindigkeit und Temperatur) wider, bei denen ein Rotorblattbeheizungssystem in der Lage ist, Eis effizient zu entfernen. Derzeit gibt es weder einen Konsens noch eine internationale Referenz, wie ein Leistungsbereich zu definieren und zu validieren ist. Dies führt zu höheren Risiken bei der Entwicklung von Windenergieprojekten in kalten Klimazonen, da Projektentwickler die verschiedenen verfügbaren Technologien nicht direkt und quantitativ vergleichen können. Aufgrund fehlender Standards bei der Definition der Performance envelope, fehlen den Projektentwicklern Informationen, um das für die spezifischen Bedingungen eines bestimmten Standorts am besten geeignete Eisschutzsystem der Turbine zu identifizieren. Die Arbeitsgruppe «Performance envelope» erarbeitet Formulierungen von Empfehlungen zu Standards für die Definition, Validierung und Interpretation von Performance envelopes. Die Aufgaben und Ziele sind in drei Schritte aufgeteilt:

- Die Charakteristik von Vereisungsereignissen ist wichtig bei der Wahl der Windturbine und den Eisschutzsystemen, wie auch später zum Optimieren des Betriebs. Vereisungsereignisse unterscheiden sich stark zwischen verschiedenen Regionen der Welt, zwischen verschiedenen Vereisungsereignissen oder sogar während eines einzelnen Vereisungsereignisses. Eines der Ziele des Subtasks war es daher, konkrete Einblicke in die Vielfalt von Vereisungsereignissen zu gewinnen, indem relevante Daten aus verschiedenen Teilen der Welt gesammelt und der interessierten Öffentlichkeit in Form einer Datenbank zur Verfügung gestellt werden.
- Um den Effekt der Rotorblattheizung unter bestimmten meteorologischen Bedingungen abschätzen zu können, braucht es einen Zusammenhang zwischen dem erwarteten oder tatsächlichen Auftreten von Vereisung und der Leistung eines bestimmten Rotorblattheizsystems unter diesen Bedingungen. Die Hersteller von Windturbinen, welche oft Heizsysteme zusammen mit den Turbinen anbieten, halten sich bedeckt bezüglich der Bedingungen, unter welchen die Anlage Vereisung erfolgreich verhindern kann. Dies erschwert zum einen eine fundierte Entscheidung im Zuge der Projektentwicklung hinsichtlich der Wahl der Turbine und gegebenenfalls des Heizsystems und zum anderen die Bewertung der tatsächlichen Leistung solcher Systeme unter bestimmten Umgebungsbedingungen nach der Installation. Daher soll im Rahmen des Subtask ein Modell entwickelt werden, welches anhand von meteorologischen und systemtechnischen Parametern einen Bereich definiert, in dem eine Rotorblattheizung die Eisbildung effizient verhindern beziehungsweise angesammeltes Eis schmelzen kann, die sogenannte Performance envelope.
- Die Validierung der Leistung eines Systems im Feld ist der letzte Schritt in der Projektentwicklung von Windturbinen oder Windparks mit Rotorblattheizsystemen. Dazu müssen die Temperaturen



auf den Rotorblattoberflächen während des Betriebs gemessen und mit Herstellerangaben (falls vorhanden) oder einem möglichst präzisen Modell verglichen werden. Dabei war das Ziel der Arbeitsgruppe, ein Verfahren zur Validierung der Leistung einer Rotorblattheizung als Ausgangspunkt für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu beschreiben.

Des Weiteren haben sich die Mitglieder des Task 54 mit den Themen Eiswurf und Eiskanaltests auseinandergesetzt. Meteotest war nicht direkt involviert und hat einzig in Diskussionen zum Thema Eiswurf teilgenommen. Ziel der Arbeitsgruppen war es:

- Eiswurf – Eiswurf stellt für Windturbinen in kalten Regionen ein Sicherheitsrisiko dar. Daher sind Abschätzungen des betroffenen Gebietes zentral in der Planung von Windparks. Es gibt zahlreiche Modelle, die Eiswurf simulieren. Im Rahmen des Task 54 soll ein öffentlich zugängliches Eiswurfmodell herausgegeben werden, welches als Referenzmodell in Vergleichsstudien dient und erste Abschätzungen von Eiswurf ermöglicht.
- Klimawindkanal-Tests – In Klimawindkanälen kann Vereisung unter ganz bestimmten Bedingungen untersucht werden. Für den Setup von Klimawindkanälen gibt es keine Standards und verschiedene Klimawindkanäle sind Einzelstücke, welche oft direkt am Standort entwickelt wurden. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde im Rahmen des Task 54 ein Set von einfachen Experimenten entwickelt, welche in verschiedenen Klimawindkanälen durchgeführt werden können. Eine Vergleichsstudie zwischen vier verschiedenen Windkanälen wurde im Rahmen einer «round robin»-Kampagne durchgeführt mit dem Ziel ein Standardprozess für Klimawindkanal-Vergleiche zu bestimmen.

## 2 Vorgehen, Methode, Ergebnisse und Diskussion

### 2.1 Vorgehen und Methoden

#### 2.1.1. Performance Envelope

Zur Bearbeitung der verschiedenen Unteraufgaben wurden unterschiedliche Vorgehen und Methoden gewählt. Dabei wurden meteorologische Daten gesammelt und analysiert, eine Datenbank erstellt und dokumentiert, Python Code erstellt und Messinstrumente evaluiert. Die einzelnen Aufgaben wurden mehrheitlich von den einzelnen Teilnehmern des Task 54 durchgeführt, während im Konsortium mehrheitlich die Problematik diskutiert, Resultate zusammengetragen und verbreitet wurden. Im Zentrum der Aktivitäten standen auch zwei Workshops an der Winterwind Konferenz, bei welchen das Ziel war einerseits den aktuellen Stand der Arbeiten des Task 54 mit der Community in der Windenergie zu teilen und andererseits die Bedürfnisse verschiedener Akteure zusammenzutragen. In den Workshops wurden dazu nebst Präsentationen der neusten Erkenntnisse, Diskussionen zu verschiedenen Fragestellungen gehalten. Meteotest hat sich insbesondere der Thematik der Vereisungsdatenbank angenommen und die Modellierungssoftware für die Performance envelope getestet. Des Weiteren hat sich Meteotest aktiv an der Vorbereitung und der Durchführung der zwei Workshops an den Winterwind Konferenzen 2023 und 2024 beteiligt.

#### **Vereisungsereignisdatenbank**

Zum Erstellen einer Datenbank musste zuerst die Struktur der Datenbank und ein Prozess diese zu managen definiert werden. Dabei war das Ziel eine Datenbank zu erstellen, welche die Vielfalt und regionale Unterschiede der Vereisungsereignisse darstellt und dennoch die Anonymität der sensiblen Daten berücksichtigt. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurden Einträge in die Datenbank in Metadaten und Zeitreihen aufgeteilt. Die Zeitreihen werden als einfache comma-separated value (CSV) Dateien gesammelt, um eine möglichst universelle Verwendung zu gewährleisten. In den Zeitreihendateien werden einzig die relevanten Parameter (Tabelle 1) verlangt. Um den Überblick über die Ereignisse zu behalten, wurde ein Verzeichnis entwickelt, welches die Metadaten der individuellen Vereisungsereignisse zusammenfasst. Dies beinhaltet die geographische Klassifikation, die Art der meteorologischen Daten und den zur Bestimmung der Vereisung verwendeten Sensor (Eisdetektoren,



Kamerabilder, elektrische Widerstandsmessung, etc.). Um der Sensibilität der Daten gerecht zu werden und Beiträge aus allen Bereichen der Industrie zu ermöglichen, ist das Teilen von Metadaten, welche Rückschlüsse auf das spezifische Messgerät oder die Windturbine ziehen lassen, freiwillig. Dennoch ist es stark empfohlen zumindest Information zum groben Standort (Region) der Messung zu teilen, um einen Vergleich von Vereisungsereignissen in verschiedenen Regionen der Welt zu ermöglichen.

Tabelle 1: Metadaten, welche im Verzeichnis pro Vereisungsereignis zusammengefasst sind. Informationen in schwarz beziehen sich auf Typ, Herkunft und Abdeckung, Informationen in dunkelblau beziehen sich auf die Sensoren und den Inhalt der Zeitreihen. Freiwillige Informationen sind kursiv.

Parameter	Daten
<i>Anbieter</i>	<i>Anbieter des Datensatzes</i>
Region	Regionaler Standort der Messungen (z.B. Ostkanada)
<i>Location</i>	<i>Präzise Information zum Standort der Messungen</i>
Name des Datensatzes	Name des Datensatzes
Höhe	Höhe über Meer des Messstandortes
Anzahl Ereignisse	Anzahl individueller Vereisungsereignisse im Datensatz
Totale Zeitspanne	Totale Zeitspanne im Datensatz
Zeitliche Auflösung	Zeitliche Auflösung der Zeitreihe
Vereisungsrelevante meteorologische Daten	Meteorologische Daten, welche für Vereisung relevant sind
Instrumente	Sensoren und Datenreihen für instrumentelle Vereisung
Rotorblattvereisung	Sensoren und Datenreihen für Rotorblattvereisung
Turbinendaten	Datenreihen zu Turbinenstatus und (falls vorhanden) Leistungs- und Betriebsdaten
<i>Zusätzliche Informationen</i>	<i>Weitere Datenreihen zu meteorologischen oder Turbinen Parametern</i>
<i>Kommentare</i>	<i>Weitere Informationen zum Datensatz und dessen Verwendung</i>

Um die Inhalte der Datenbank zu illustrieren wurden einige Datensätze visuell aufbereitet. Die Beispiele einer Windturbine in Deutschland (Abbildung 1) und eines Vereisungsereignisses in Kanada (Abbildung 2) zeigen mögliche Unterschiede der geteilten Daten in der Datenbank. Für beide Ereignisse wurden generelle meteorologische Informationen wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit geteilt. Die Informationen zu Vereisung unterscheiden sich: Während Turbinen- und



Eisdetektordaten im Datensatz von Deutschland die Vereisung beschreiben, ist die Vereisung in den Daten aus Kanada basierend auf der Eisdicke von Kamerabildern bestimmt.

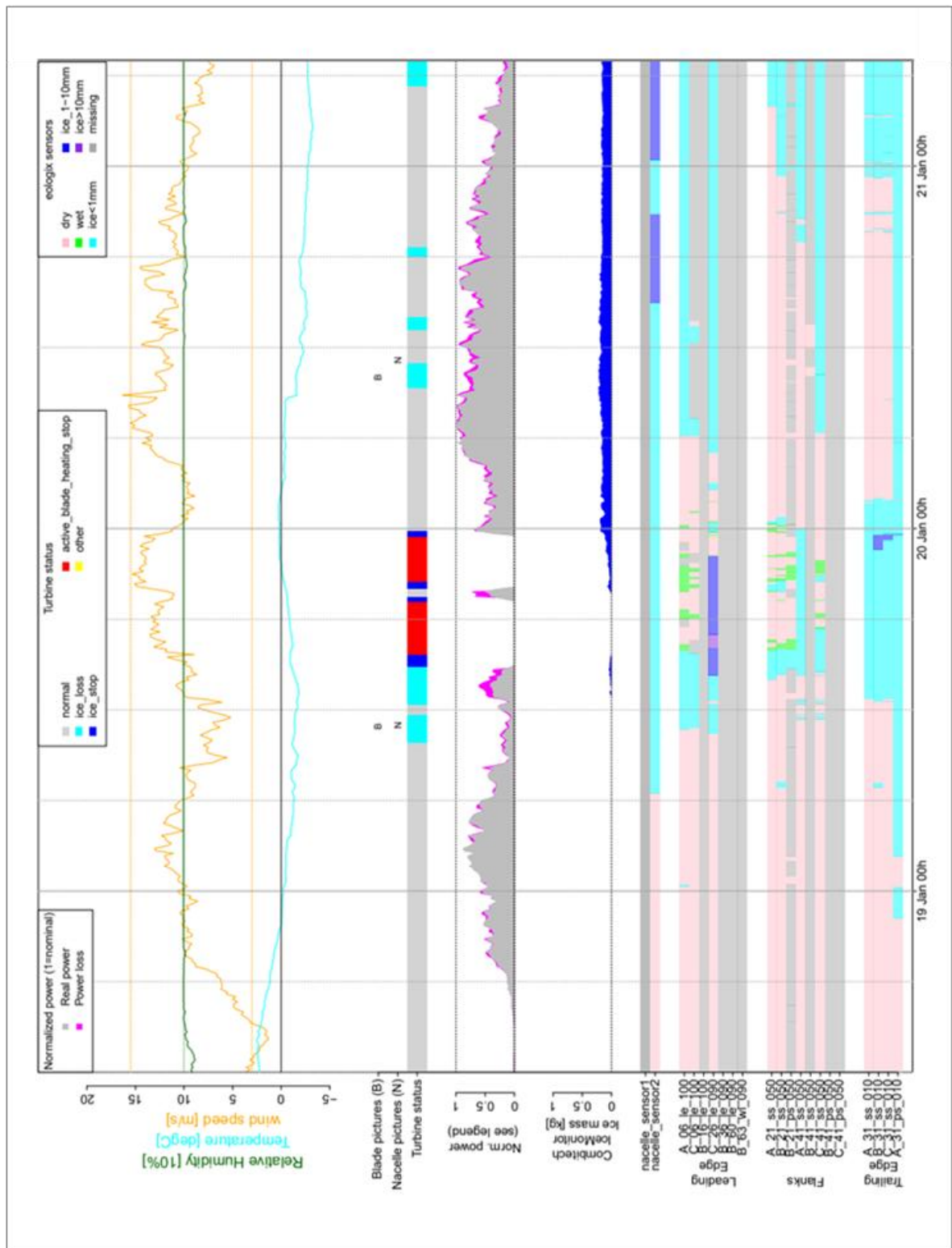


Abbildung 1: Graphische Darstellung einer Zeitreihe eines Beispielvereisungsereignisses in Deutschland.



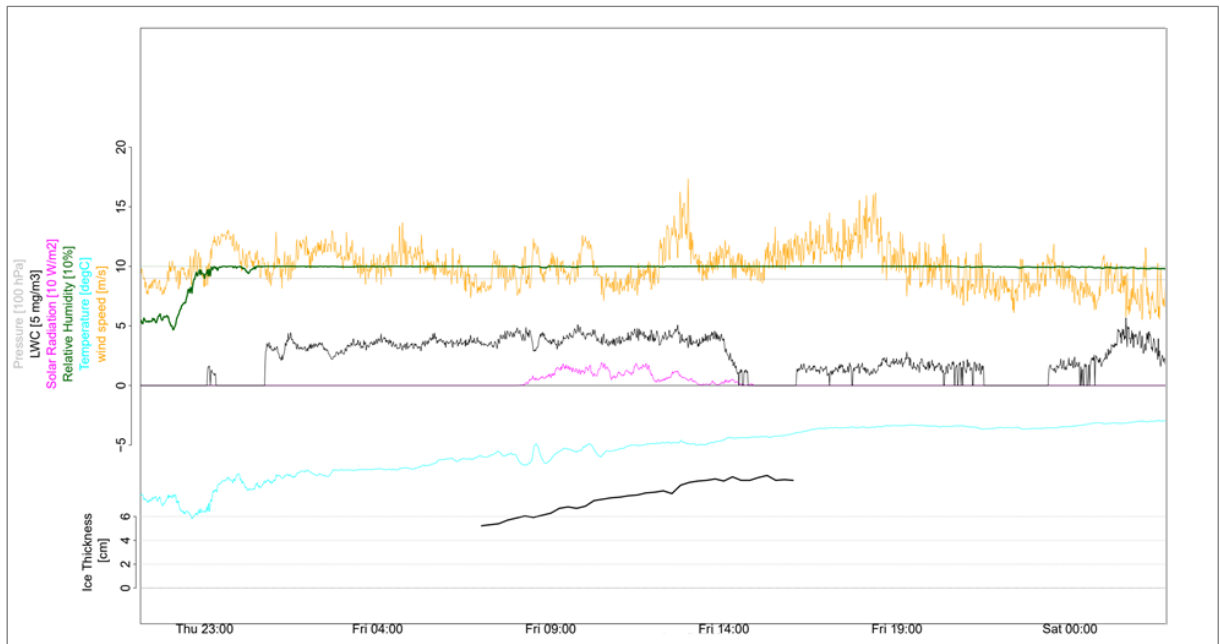


Abbildung 2: Graphische Darstellung einer Zeitreihe eines Beispielvereisungsereignisses in Kanada.

### Modellierung der «Performance envelope»

Die Modellierung der Performance envelope basiert auf einer vereinfachten Wärmebilanzgleichung. Dabei soll das Rotorblatt eisfrei gehalten werden, indem die Temperatur der Rotorblattoberfläche auf einen Wert oberhalb des Gefrierpunktes oder einen bestimmten Wert bei einer bestimmten Umgebungstemperatur erwärmt wird, um die Bildung von Eis durch das Anfrieren von Wassertröpfchen zu verhindern.

Die vereinfachte Wärmebilanzgleichung wird beschrieben als,

$$T_R - T_U = f(v_W, LWC, C_{WKA}) \times P_H$$

- mit  $T_R$  ... Oberflächentemperatur der Rotorblätter  
 $T_U$  ... Umgebungstemperatur  
 $v_W$  ... Windgeschwindigkeit  
 $LWC$  ... Flüssigwassergehalt  
 $C_{WKA}$  ... Parameter der Windturbine und des Rotorblattheizsystems  
 $P_H$  ... Heizleistung des Rotorblattheizsystems.

Der erste Schritt des Modells besteht darin, die Gleichungen des Wärmekreislaufes, der die Erwärmung des Rotorblattes darstellt (Abbildung 3), zu lösen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Oberflächentemperatur des Rotorblattes entlang des Blattes konstant ist. Da sich das Rotorblatt im Leerlauf oder gemäß der Drehzahlkurve dreht, variiert die relative Windgeschwindigkeit entlang des Blattes. Das Rotorblatt wird daher in Abschnitte unterteilt, für welche die relative Windgeschwindigkeit pro Abschnitt berechnet wird. Ausserdem wird für jeden Abschnitt ein Wärmeübertragungskoeffizient berechnet, der unter anderem den Einfluss des Flüssigwassergehalts (LWC) widerspiegelt. Daraus wird für jeden Abschnitt ein Wärmewiderstand berechnet. Unter Berücksichtigung der Heizleistung der Rotorblattheizung werden dann die Gleichungen des Wärmekreislaufs für die Differenz zwischen der vorgegebenen, angenommenen konstanten Oberflächentemperatur des Rotorblattes (0°C oder höher) und der Umgebungstemperatur gelöst.

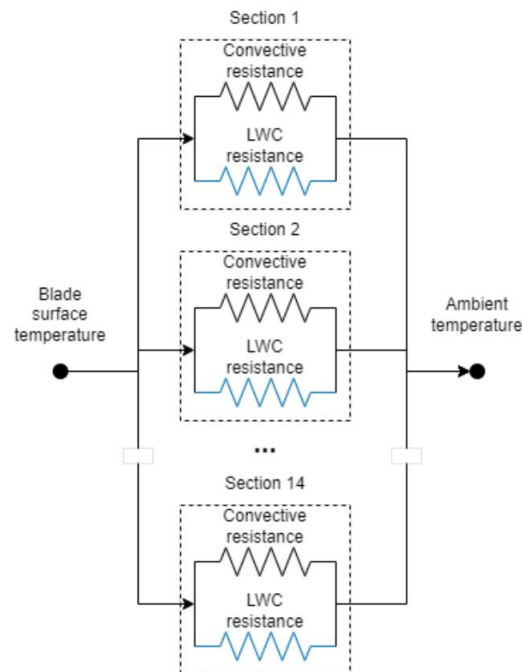


Abbildung 3: Wärmeschaltkreis der Modellberechnungen

Im Modell werden verschiedene Parameter der Turbine und der Rotorblattheizung berücksichtigt (Tabelle 2). Zudem basiert die vereinfachte Berechnung auf verschiedenen Annahmen:

- Die Oberflächentemperatur entlang des Rotorblattes ist konstant. Bei den meisten Rotorblattheizsystemen ist die Heizleistung entlang des Rotorblattes konstant oder zumindest für wenige definierte Abschnitte konstant. Aufgrund der Rotationsgeschwindigkeit variiert die relative Windgeschwindigkeit und somit auch die Oberflächentemperatur entlang des Rotorblattes.
- Lineare Skalierung der Blattgeometrie. Die Geometrie der Rotorblätter ist sehr komplex, so dass die exakte Abbildung der Blätter im Modell nur mit grossem Aufwand möglich wäre. Zudem unterscheiden sich die Geometrien zwischen den einzelnen Herstellern und können auch in Abhängigkeit der Länge des Rotorblattes variieren. Der Einfluss der genauen Geometrie auf die Modellierung ist jedoch als untergeordnet einzustufen, so dass der Modellierung eine beispielhafte Blattgeometrie mit einer Länge von 50 m zugrunde liegt, die für andere Blattlängen linear skaliert wird.
- Eisfreie Rotorblätter als Anfangsbedingung. Eis kann einen positiven oder einen negativen Einfluss auf den Schmelzprozess haben. Die isolierenden Eigenschaften von Eis können den Schmelzprozess beschleunigen. Andererseits führt die erhöhte Oberflächenrauigkeit zu einem erhöhten konvektiven Wärmeflusskoeffizient, was wiederum den Schmelzprozess verlangsamt.
- Konstante Lufteigenschaften für eine Umgebungstemperatur von  $-5^{\circ}\text{C}$ . Da die Modellberechnungen auf dem Unterschied der Oberflächentemperatur zur Umgebungstemperatur basieren, müssen die Lufteigenschaften fix gewählt werden.
- Eine Wahrscheinlichkeit von 1 für das Gefrieren von Wassertropfchen bei Zusammentreffen mit dem Rotorblatt. In Wirklichkeit können sich Wassertropfchen, die auf den sich drehenden Rotor treffen, nach einer kurzen Bewegung entlang der Oberfläche wieder ablösen, bevor diese einfrieren.





Tabelle 2: Parameter der Turbine und der Rotorblattheizung, welche ins Modell einfließen.

Parameter	Beschreibung	Standardwert
Rotorblattlänge	Länge des Rotorblattes	50 m
De-Icing/Anti-Icing	De-Icing = Enteisung: Reaktive Eisentfernung; Turbine im Leerlauf Anti-Icing = Vereisungsschutz: Präventives Heizen während des Betriebs	Anti-Icing
Heizverlust	Heizverluste aufgrund der Rotorblatt- und Heizsystemgeometrie, d.h. Wärme, die über andere Oberflächen als die Rotorblattoberfläche abgeleitet wird.	20 %
Beheizter Teil des Rotorblattes	Beheizter Teil des Rotorblattes ab dem Stagnationspunkt. Es wird angenommen, dass der beheizte Anteil gleichmässig auf die Ober- und Unterseite (Druck- und Saugseite) verteilt ist.	0.125
Heizleistung	Heizleistung der Rotorblattheizung	25 kW

Der Output des Modells ist eine Grenzkurve, welche in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und der Windgeschwindigkeit den Bereich der meteorologischen Bedingungen angibt, unter welchen die gewünschte Oberflächentemperatur erreicht wird, die sogenannte Performance envelope.

Das Modell wurde in Python programmiert und kann als solches in andere Modelle integriert oder eigenständig eingesetzt werden. Zusätzlich wurde eine Benutzeroberfläche programmiert, bei welcher die Eingangsparameter (Tabelle 2) eingegeben werden können und eine Abbildung der Performance envelope basierend auf der Modellberechnung ausgegeben wird (Abbildung 4).

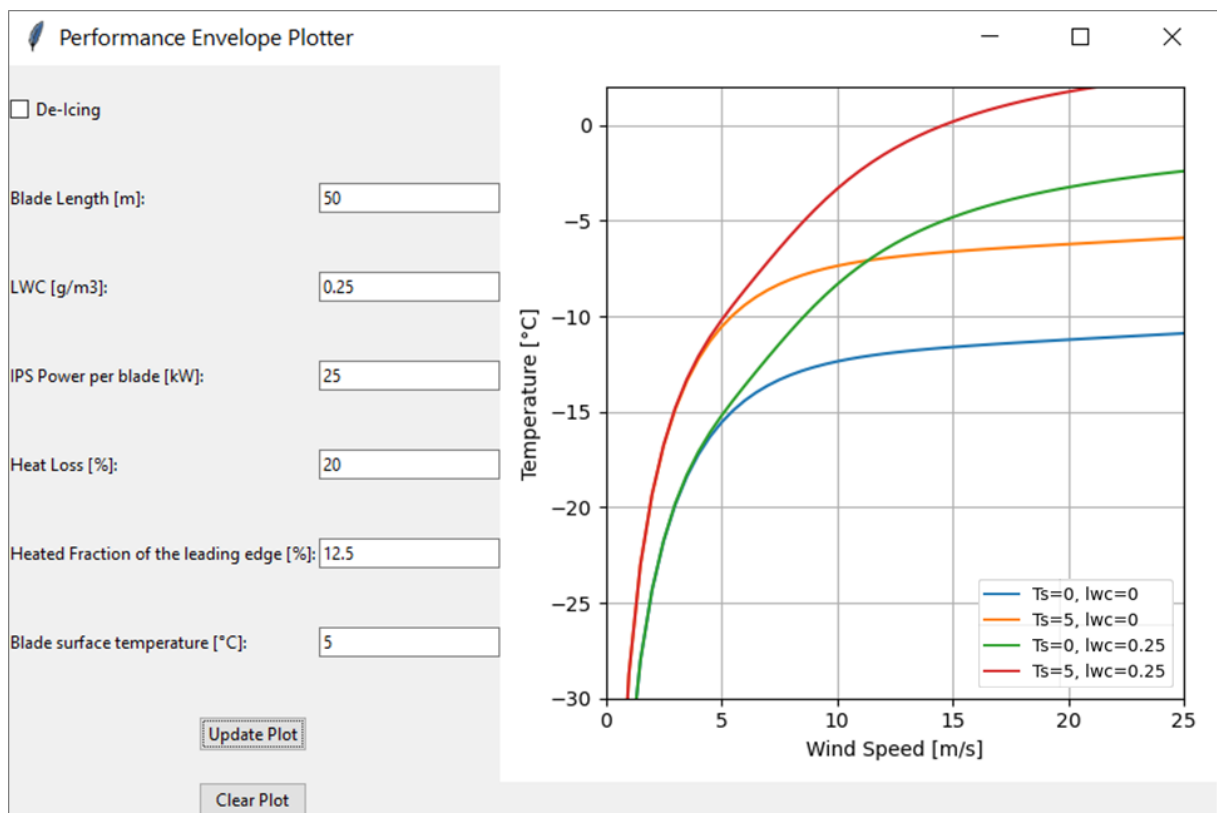


Abbildung 4: Benutzeroberfläche der Modellierung der Performance envelope, wobei vier Beispiel Performance envelopes für verschiedene Parametrisierungen dargestellt sind.

### Feldvalidierung von Rotorblattheizungen

Um die Leistung einer Rotorblattheizung zu beurteilen, kann die Steigerung des Stromertrags im Vergleich zu einer Anlage ohne aktives Rotorblattheizsystem unter gleichen Bedingungen herangezogen werden. Solche Vergleiche sind jedoch selten vorhanden. Zusätzlich wird der Stromertrag einer Windenergieanlage neben der Rotorblattheizung auch von vielen anderen (Regelungs-)Systemen beeinflusst, so dass ein Vergleich bestenfalls eine indirekte Aussage über die Leistung der Rotorblattheizung zulässt. Im Rahmen der Arbeitsgruppe wurde daher die Frage besprochen, wie ein Verfahren zur Validierung von Rotorblattheizsystemen im Feld definiert werden kann, welches einerseits möglichst direkte Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit des Systems zulässt und andererseits mit vertretbarem Aufwand im Rahmen der Entwicklung und Errichtung von Windenergieprojekten realisiert werden kann. Diese Verfahren wurden im Rahmen von zwei Workshops bei den Winterwind Konferenzen 2023 und 2024 besprochen, sowie durch die Sammlung und Diskussion relevanter Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten einzelner Teilnehmerländer der Arbeitsgruppe entwickelt. Neben der Darstellung des aktuellen Standes der Arbeiten der Arbeitsgruppe ging es in den Workshops auch darum, im direkten Austausch mit den Teilnehmern aus der Windindustrie die einzelnen Schritte des Prozesses und mögliche Lösungen oder Alternativen zu den Problemen zu diskutieren und deren spezifische Bedürfnisse zu verstehen.

#### 2.1.2. Eiswurfmodell

Ein einfaches Eiswurfmodell, welches Informationen über die Eiseinschlaghäufigkeit im Umkreis einer Windturbine simulieren kann, wurde im Rahmen des Task 54 an der DTU entwickelt (Sarlar et al., 2024). Das Modell «windThrow» ist eine aerodynamische Toolbox, die die gesamte Aerodynamik sowie die sechs Freiheitsgrade der Bewegung von abgelösten Eisstücken berücksichtigt und verschiedene Zuordnungen von Variablen berechnet, darunter die Eisflugbahnen und das Energieniveau beim Auftreffen des Eises auf den Boden. Neben anderen Funktionen enthält die Software ein Monte-Carlo-Simulations-



Plugin, mit dem umfangreiche Berechnungen des Eiswurfs bei einer Reihe statischer oder verteilter Eingaben wie Windrichtung, Spitzengeschwindigkeitsverhältnis, azimuthaler Winkel der Eisablösung usw. durchgeführt werden können. Zusätzlich zum Modellcode, welcher in Fortran geschrieben wurde, ist eine Benutzeroberfläche in Python erstellt worden. Die Benutzeroberfläche vereinfacht die Anwendung für die Endbenutzer und stellt sicher, dass Kenntnisse von Fortran nicht notwendig sind.

**INPUT PARAMETERS**

Name	Unit	Input values
Hub Height	[m]	100.0
Blade Length	[m]	50.0
Nb. of Blade Elmts.	[-]	25
Wind Profile	[-]	uniform
Surface Roughness	[m]	0.1
Power law Exponent	[-]	0.143

**WINDTHROW**

**TERRAIN, WIND AND TURBINE OPERATIONAL PARAMETERS**

Terrain file: NO FILE LOADED

Wind rose file: NO FILE LOADED

Name	Unit	Input values
Reference height h	[m]	10.0
Wind speed (at h)	[m/s]	8.0
Wind direction	[deg]	0.0

Wind turbine operation file: NO FILE LOADED

Name	Unit	Input values
Cut-in wind speed	[m/s]	3.0
Cut-out wind speed	[m/s]	24.0
Nominal wind speed	[m/s]	12.0
Nom. rotational speed	[rpm]	11.0
Nom. pitch	[deg]	0.0
Nom. turbine power	[MW]	2.5

**MONTE-CARLO SIMULATION**

RANDOM VARIABLES can be adjusted below:

Name	Unit	Random distribution:				Input values	
		Static	Uniform	Gaussian	Weibull	Min.=	Max.=
Turb. Intensity	[%]	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	8.0	14.0
Yaw error	[deg]	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Mean= 0.0	St. Dev.= 25.0
Azimuth throw	[deg]	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Min.= 0.0	Max.= 360.0
Detachment point	[%BlldLen]	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Min.= 20.0	Max.= 95.0
Ice aspect ratio	[-]	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Min.= 0.1	Max.= 10.0
Ice width	[m]	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Min.= 0.05	Max.= 0.5
Ice density	[kg/m <sup>3</sup> ]	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Min.= 300.0	Max.= 900.0

100 Enter total number of samples for Monte-Carlo simulation here, before pressing: **Execute!**

**ICING CONDITIONS (according to IEA Task 19 icing classes)**

Choose icing class: ☒ Class 1 ☐ Class 2 ☐ Class 3 ☐ Class 4 ☐ Class 5

Icing periods	[% of Year]	0.5
Number of pieces	[ice pieces per Year]	200

**PLOTTING**

PLOTTING in a pop-up window and storing corresponding data to file (in folder 'DataOut')

Choose plotting option:

- ☒ Hit scatter map
- ☐ Mass scatter map
- ☐ Momentum scatter map
- ☐ Energy scatter map
- ☐ Distance density histogram
- ☐ Strike density map (E > 40 J - Lin. scale)
- ☐ Strike density map (All samples - Linear scale)
- ☐ Strike density map (All samples - Logarithmic scale)

**Plot!**

Abbildung 5: Benutzeroberfläche des Eiswurfmodells "Windthrow". Quelle: Sarlak et al., 2024



### 2.1.3. Klimawindkanalvergleich

Für die Vergleichsstudie von Klimawindkanälen wurde eine «round robin»-Kampagne durchgeführt. Dazu wurden die gleichen Experimente in den Klimawindkanälen von VTT Technical Research Center of Finland (VTT), dem Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), der Deutsche Windguard Wind Tunnel Services gmbh und der Technical University of Denmark (DTU) durchgeführt (Kim et al., 2024). Die Klimawindkanäle sind alle Einzelstücke und weisen somit unterschiedliche Charakteristiken auf, wie beispielweise unterschiedliche Sprühsysteme. Für den Experimentaufbau wurde eine Cloud droplet probe (CDP-2) und ein Aluminiumzylinder mit einem Durchmesser von 3 cm verwendet. Aufgrund der unterschiedlichen Geometrien der Klimawindkanäle wurde die Länge der Zylinder der jeweiligen Windkanalgrösse angepasst. Um die Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit von Resultaten aus Klimawindkanälen zu gewährleisten wurde einerseits die Tröpfchengrößenverteilung und andererseits die Eisform, welche an einem Zylinder wächst verglichen. Experimente wurden für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten und Temperaturen durchgeführt.

## 2.2 Ergebnisse und Diskussion

### 2.2.1. Performance Envelope

#### Vereisungsereignisdatenbank

Aufgrund verschiedener klimatischer Bedingungen unterscheiden sich Vereisungsereignisse in unterschiedlichen Regionen teilweise deutlich. Während die IEA Ice Classification (IEA Wind, 2017) Vereisungsereignisse basierend auf der Anzahl meteorologischer und instrumenteller Vereisungstage in unterschiedliche Kategorien einteilt, zeigt diese auch, dass gewisse Regionen in bis zu drei Vereisungskategorien eingeteilt werden können (Abbildung 6). Vereisungsereignisse in unterschiedlichen Regionen mit gleicher Klassifizierung können ebenfalls sehr unterschiedlich sein, insbesondere wenn man die zeitliche Entwicklung und die Intensität betrachtet. Beide Perspektiven zeigen, dass meteorologische Verhältnisse, welche die lokalen klimatischen Bedingungen widerspiegeln, für die Beurteilung der standortspezifischen Vereisungseigenschaften herangezogen werden sollen. Die Vereisungsereignisdatenbank ist in Hinsicht auf diese Problematik erstellt worden. Die Vereisungsereignissen aus verschiedenen Regionen der Welt können sowohl auf deren zeitliche Entwicklung wie auch auf die lokalen meteorologischen Bedingungen hin analysiert werden.

IEA Ice class	Meteorological icing	Instrumental icing	Icing loss
	% of year	% of year	% of gross annual production
5	>10	>20	> 20
4	5-10	10-30	10-25
3	3-5	6-15	3-12
2	0.5-3	1-9	0.5-5
1	0-0.5	<1.5	0 - 0.5

Abbildung 6: IEA Wind TCP Vereisungsklassifizierung (IEA Wind, 2017).

Die unterschiedlichen Eistypen, sowie die meteorologischen Bedingungen, unter welchen diese sich bilden, sind in der International Organization for Standardization (ISO) standard 12494:2017 Atmospheric icing of structures beschrieben. Dabei wird zwischen Glaze (Klareis), Wet snow (Nassschnee), Hard rime (Harter Raureif) und Soft rime (weicher Raureif) unterschieden. Weicher Raureif bildet sich insbesondere bei tiefen Temperaturen und geringeren Windgeschwindigkeiten, während Klareis das Produkt von höheren Temperaturen und höheren Windgeschwindigkeiten ist (Abbildung 7).

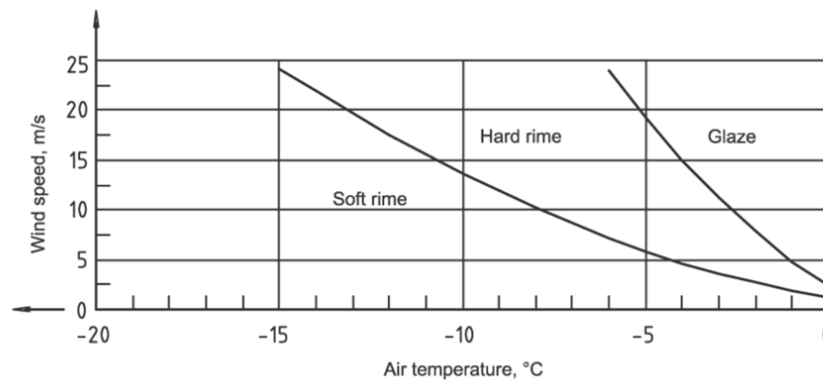


Abbildung 7: Eistyp abhängig von den meteorologischen Bedingungen Temperatur und Windgeschwindigkeit. Eine Verschiebung der Kurven entsteht bei höherem Flüssigwassergehalt und kleinerer Objektgrösse. Quelle: ISO 12494:2017

Basierend auf diesen Charakteristiken lassen sich Vereisungsereignisse gut analysieren. Dabei können die Intensität wie auch der zeitliche Verlauf der Ereignisse betrachtet werden. Drei Beispielergebnisse in Ostkanada zeigen unterschiedliche Eistypen (Abbildung 8). Während sich am 11.3.2020 bei niedrigen Temperaturen und moderater Windgeschwindigkeit weicher Raureif bildet, entsteht am 29.1.2020 bei leicht höheren Windgeschwindigkeiten harter Raureif da zu diesem Zeitpunkt zusätzlich der Flüssigwassergehalt der Atmosphäre erhöht ist. Am 17.4.2019 entstand erst Klareis und anschliessend harter Raureif. Dies ist auf die Entwicklung der Temperatur zurückzuführen, welche erst milder war ( $-1.7^{\circ}\text{C}$  bis  $-3^{\circ}\text{C}$ ) bei einer Windgeschwindigkeit von 15 bis 20 m/s und somit zu Klareis führte (Abbildung 3). Anschliessend sanken die Temperaturen und die Windgeschwindigkeit nahm ab, wodurch die Bedingungen zum Zeitpunkt der Aufnahme zu hartem Raureif führten.

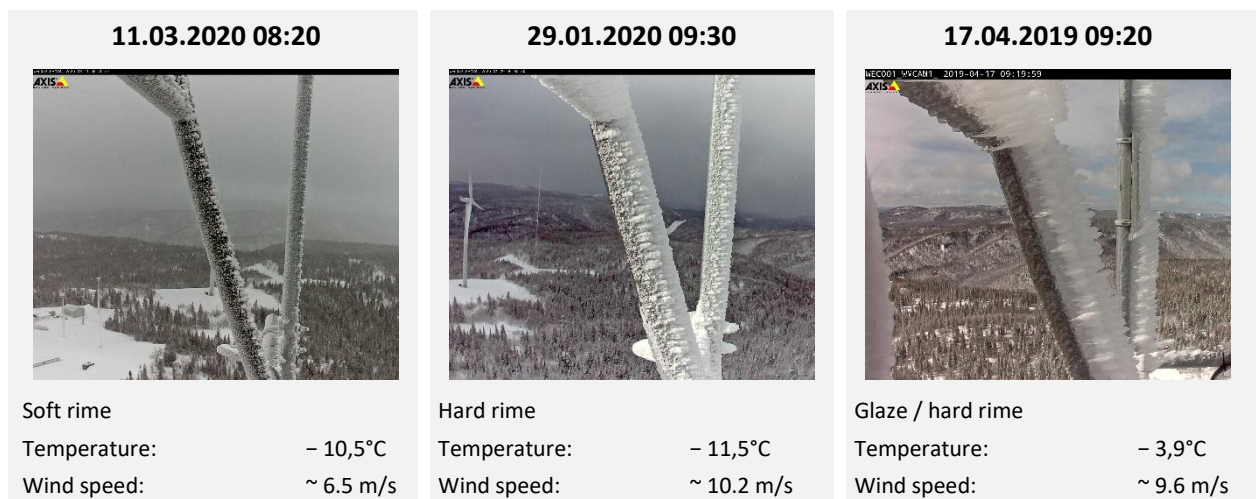


Abbildung 8: Webcam Bilder von Vereisungsereignissen an verschiedenen Tagen in Ostkanada zur Illustration unterschiedlicher Eistypen bei unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen.

Zwei weitere Ereignisse illustrieren die möglichen Entwicklungen von Vereisungsereignissen sowie die Darstellungen der Daten, welche im Rahmen der Arbeiten des Task 54 erarbeitet wurden. An einem Standort in Ostkanada hat sich am 31.12.2018 harter Raureif gebildet. Die Bildabfolge in Abbildung 9 und die Zeitreihen in Abbildung 10 zeigen, dass sich während des Ereignisses ein Teil des Eises abgelöst hat (shedding) und anschliessend wieder neues Eis gebildet wurde.



Abbildung 9: Vereisungsereignis am 31.12.2018 in Ostkanada. Die Bilder zeigen den Verlauf des Vereisungsereignisses. Die meteorologischen Bedingungen sind in der Zeitreihe in Abbildung 10 dargestellt.

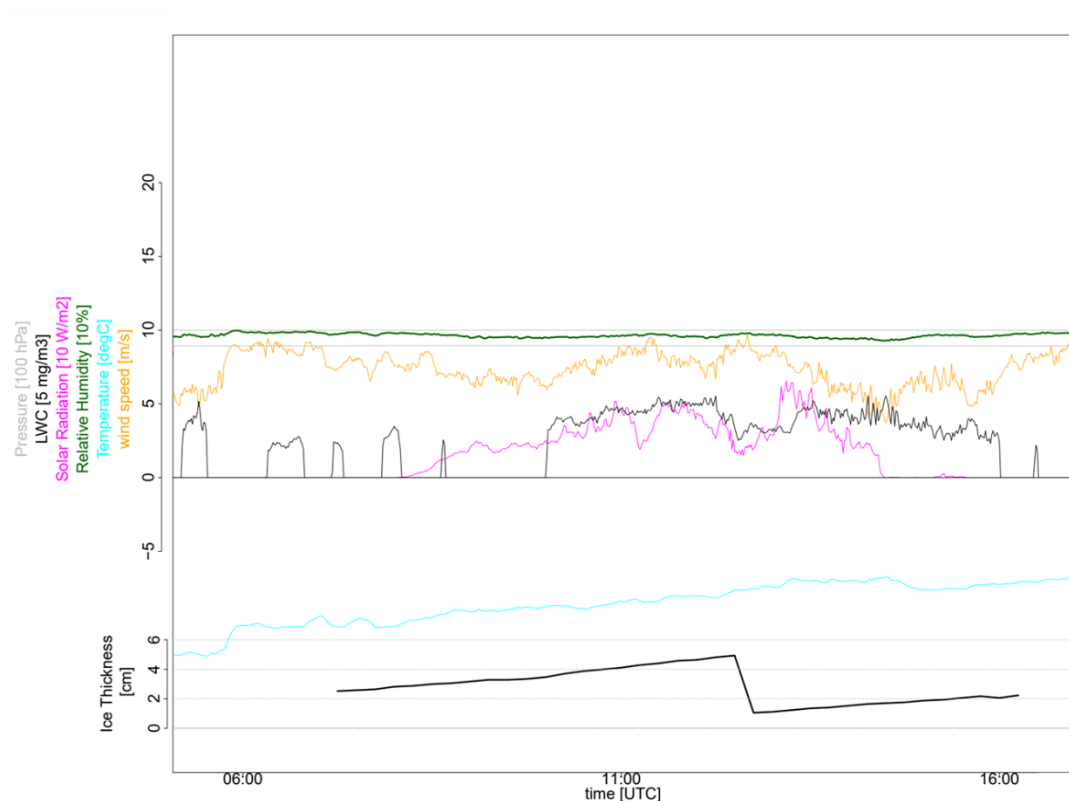


Abbildung 10: Zeitreihen der meteorologischen Bedingungen während des Vereisungsereignisses am 31.12.2018 in Ostkanada.

Ein intensives Vereisungsereignis hat am 25.-27.1.2022 in Deutschland stattgefunden (Abbildung 11 und Abbildung 12). In der Nacht vom 25.1.2022 auf den 26.1.2022 fällt die Temperatur unter den Gefrierpunkt und die relative Luftfeuchtigkeit steigt auf 100% an (Abbildung 12). Die Vereisung setzt zu





diesem Zeitpunkt ein, wobei die Windgeschwindigkeiten noch gering sind (5-10m/s), was beispielsweise dem Sensor «nacelle\_sensor2» entnommen werden kann. Die Vereisung nimmt in den Folgestunden zu und führt basierend auf dem «Turbine status» erst zu Vereisungsverlusten und anschliessend am 26.1.2022 um ca. 04:00 zu einem Turbinenstopp. Steigende Windgeschwindigkeiten (10-20 m/s) und Temperaturen um den Gefrierpunkt am 27.1.2022 führen zu einer intensivierten Vereisungszunahme wie der «Combitech IceMonitor» und die Webcam Bilder (Abbildung 11) bestätigen. Wenn die Temperatur am 27.1.2022 um die Mittagszeit über den Gefrierpunkt steigt, kann die Rotorblattheizung die Rotorblattvereisung soweit entfernen, dass ein Neustart der Turbine möglich wird (siehe «Norm. Power» und «Turbine status»), obwohl die Vereisung an den Strukturen gemäss «Combitech\_IceMonitor» und Webcam Bildern weiter ansteigt. In den Abendstunden mit weiter steigenden Temperaturen und abnehmender Windgeschwindigkeit kann schliesslich auch das Eis an den Strukturen vollständig wegschmelzen. Am Anfang des Vereisungsereignisses bei moderaten Windgeschwindigkeiten und Temperaturen um -2°C bildet sich erst harter Reif, während bei höheren Temperaturen in den Abendstunden des 27.1.2022 der Eistyp zu Klareis gewechselt hat. Diese Entwicklung stimmt mit den erwarteten Eistypen basierend auf der Klassifizierung in ISO 12494:2017 überein (Abbildung 7).

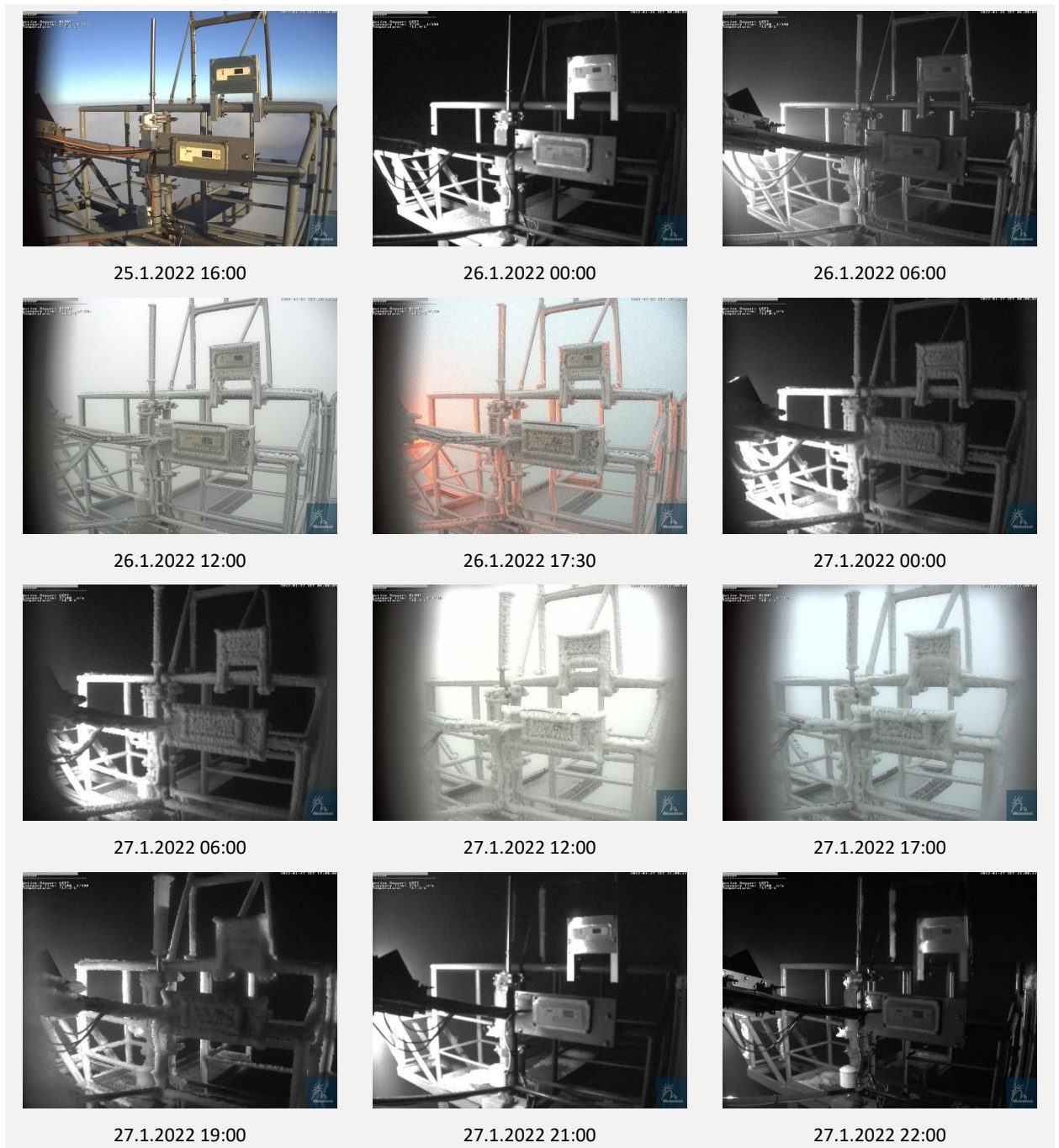


Abbildung 11: Vereisungsereignis am 25.-27.1.2022 in Deutschland. Die Bilder zeigen den Verlauf des Vereisungsereignisses. Die meteorologischen Bedingungen sind in der Zeitreihe in Abbildung 12 dargestellt.



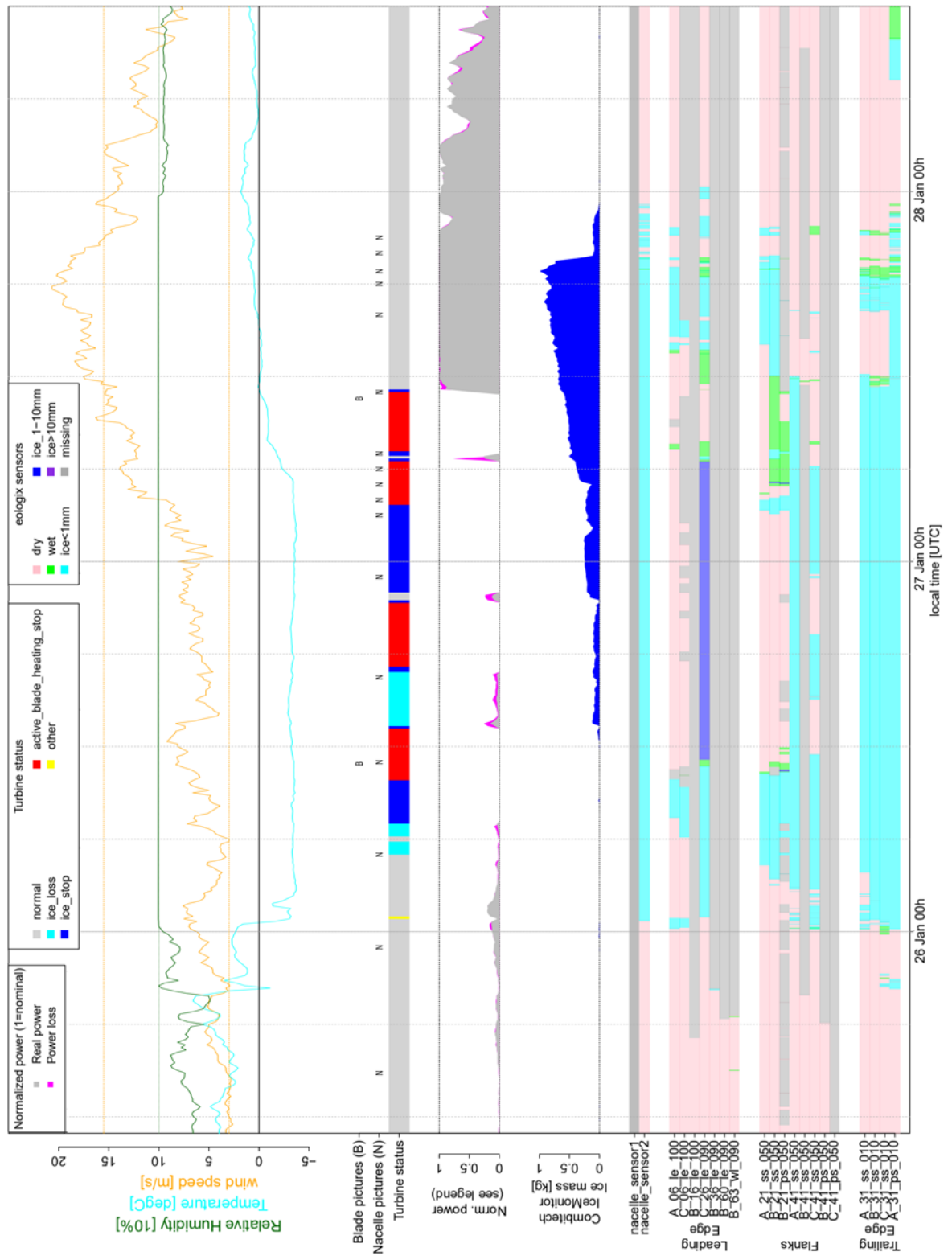


Abbildung 12: Zeitreihen der meteorologischen Bedingungen während des Vereisungsereignisses am 25.-27.1.2022 in Deutschland.

Ein Anwendungsbeispiel der Verteilung der Stunden, während welcher eine Windturbine gestoppt werden muss, nach Windgeschwindigkeit und Temperatur, zeigt deutliche Unterschiede zwischen verschiedenen Regionen (Abbildung 13). Der Vergleich umfasst Daten verschiedener Turbinentypen und ist somit nicht ganz robust. Dennoch zeigt sich, dass die klimatischen Bedingungen sich an den drei Standorten unterscheiden. Solche Vergleiche werden insbesondere dann interessant, wenn die Datenbank viele Vereisungsereignisse umfasst und beispielsweise Vereisungsereignisse mit gleicher Vereisungsklassifizierung in verschiedenen Regionen mit gleichem Turbinentyp, oder unterschiedliche Vereisungsereignisse an einem Ort miteinander verglichen werden können. Eine Erweiterung der Datenbank ist möglich und erwünscht in Hinblick auf die geplanten Aktivitäten im Verlaufe der Verlängerung des Task 54 in den Jahren 2025-2028.

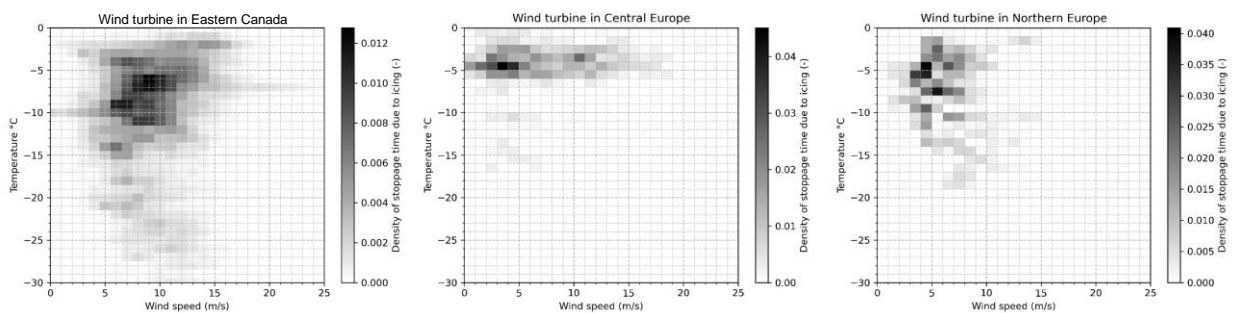


Abbildung 13: Vereisungsstunden von Windturbinen an drei Standorten (links: Ostkanada, mitte: Zentraleuropa, rechts: Nordeuropa).

### Modellierung der «Performance envelope»

Die Modellierung der «Performance envelope» kann eingesetzt werden, um die Effizienz eines oder mehrerer Rotorblattheizsysteme unter spezifischen meteorologischen Bedingungen zu bestimmen. Um festzustellen, ob ein bestimmtes Rotorblattheizsystem für die meteorologischen Bedingungen eines Standorts geeignet ist, muss die berechnete Kurve (Performance envelope) mit standortspezifischen meteorologischen Daten verglichen werden. Ein Beispielergebnis in Ostkanada aus der Vereisungsereignisdatenbank zeigt, wie das Modell eingesetzt werden kann.

Beim Vereisungsereignis in Ostkanada am 9.4.2019 steigt der LWC um Mitternacht auf über  $0.1 \text{ g/m}^3$  an (Abbildung 14). Die Temperatur ist mit  $-10^\circ\text{C}$  sehr niedrig und die Windgeschwindigkeit beträgt  $10\text{--}15 \text{ m/s}$ , was auf die Bildung von hartem Reif hindeutet (Abbildung 7). Die Webcam-Bilder, aus welchen die Eisdicke bestimmt wurde, lassen darauf hindeuten, dass die Vereisung mit dem Anstieg des LWC in der Nacht einherging, da in den Morgenstunden bei Einsetzen des Tageslichtes bereits eine Vereisungsdicke von ca.  $2 \text{ cm}$  ersichtlich ist. Die Vereisungsdicke steigt stetig an und erreicht eine Dicke von ca.  $6 \text{ cm}$  bis der LWC um die Mittagszeit auf  $0 \text{ g/m}^3$  absinkt. Der Vergleich der modellierten Performance envelope für ein Rotorblattheizsystem im «anti-icing» Modus (Tabelle 2) mit einer Heizleistung von  $25 \text{ kW}$  mit den lokalen meteorologischen Bedingungen während des Ereignisses zeigt, dass für eine Rotorblattemperatur von  $3^\circ\text{C}$  die meteorologischen Bedingungen ausserhalb der Performance envelope (unterhalb der Grenzlinie) liegen (Abbildung 15). Einzig nach Ende der aktiven Vereisung sind die meteorologischen Bedingungen für das vorliegende Rotorblattheizsystem innerhalb der Performance envelope. Wenn die Oberflächentemperatur auf  $0^\circ\text{C}$  parametrisiert wird, sind die meteorologischen Bedingungen teilweise innerhalb der Performance envelope beziehungsweise näher an der Grenze. Allerdings kann mit einer Rotorblattemperatur von  $0^\circ\text{C}$  nicht sichergestellt werden, dass das Eis schmilzt. Dies zeigt, dass das gewählte Rotorblattheizsystem mit einer Heizleistung von  $25 \text{ kW}$  für das betrachtete Vereisungsereignis nicht ausreicht. Wird die Heizleistung auf  $35 \text{ kW}$  erhöht, kann festgestellt werden, dass für eine Oberflächentemperatur von  $0^\circ\text{C}$  alle Ereigniszeitpunkte klar innerhalb der Performance envelope liegen (Abbildung 16). Bei einer Oberflächentemperatur von  $3^\circ\text{C}$  liegen die Zeitpunkte innerhalb der Performance envelope beziehungsweise nahe der Grenze. Für das vorliegende Beispiel sollte somit das vorliegende Rotorblattheizsystem mit einer Heizleistung von  $35 \text{ kW}$  ausreichen.

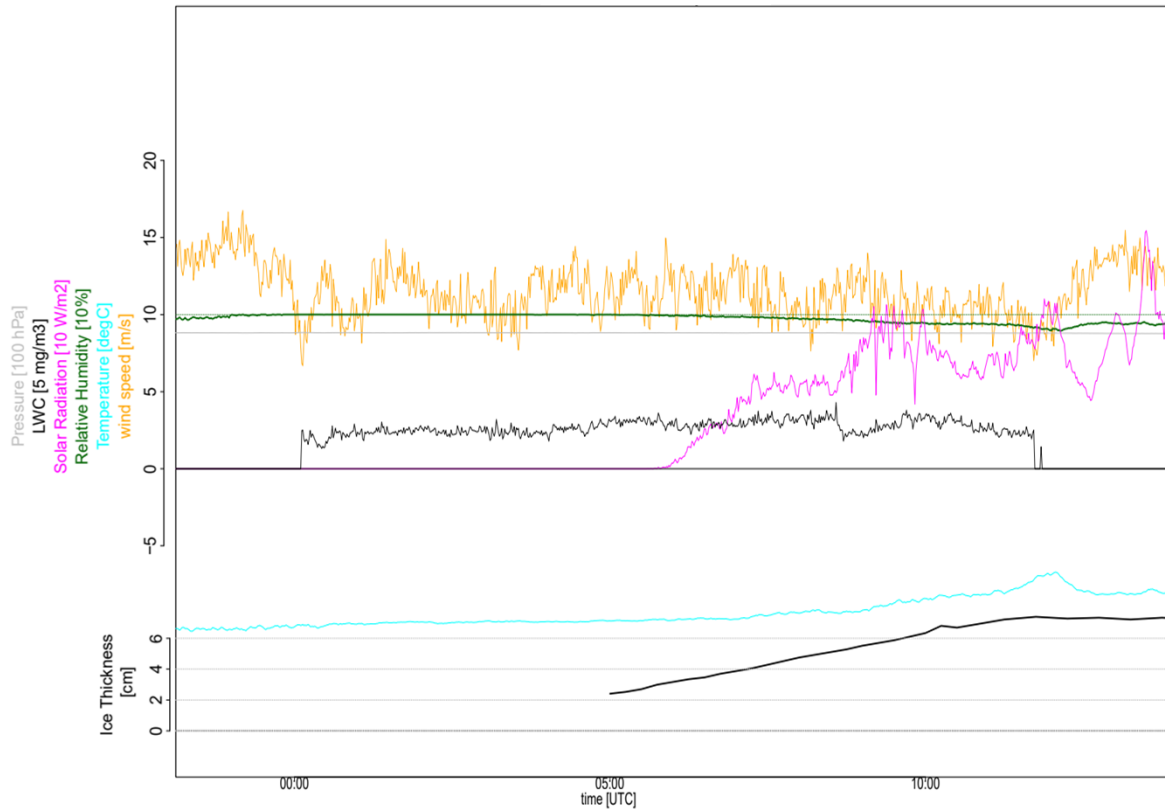


Abbildung 14: Zeitreihe der meteorologischen Verhältnisse und der Eisdicke für ein Vereisungsereignis in Ostkanada am 9.4.2019.

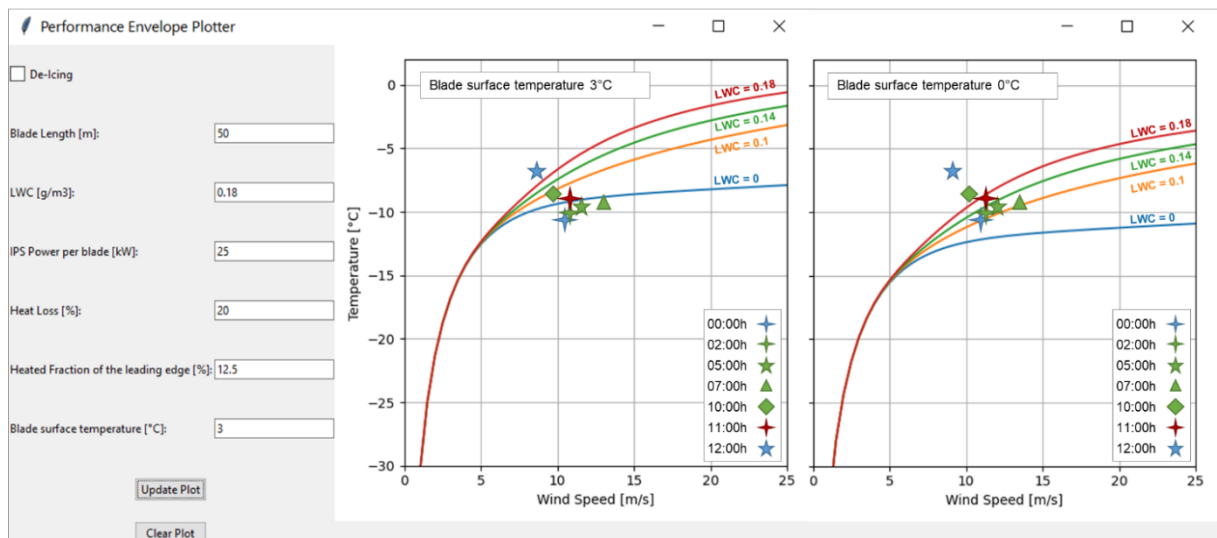


Abbildung 15: Modellierung der Performance envelope für zwei Oberflächentemperaturen (links: 3°C und rechts: 0°C) für ein Rotorblattheizsystem mit einer Heizleistung von 25 kW. Die Sterne, Kreuze, etc. zeigen die meteorologischen Bedingungen während des Ereignisses am 9.4.2019.

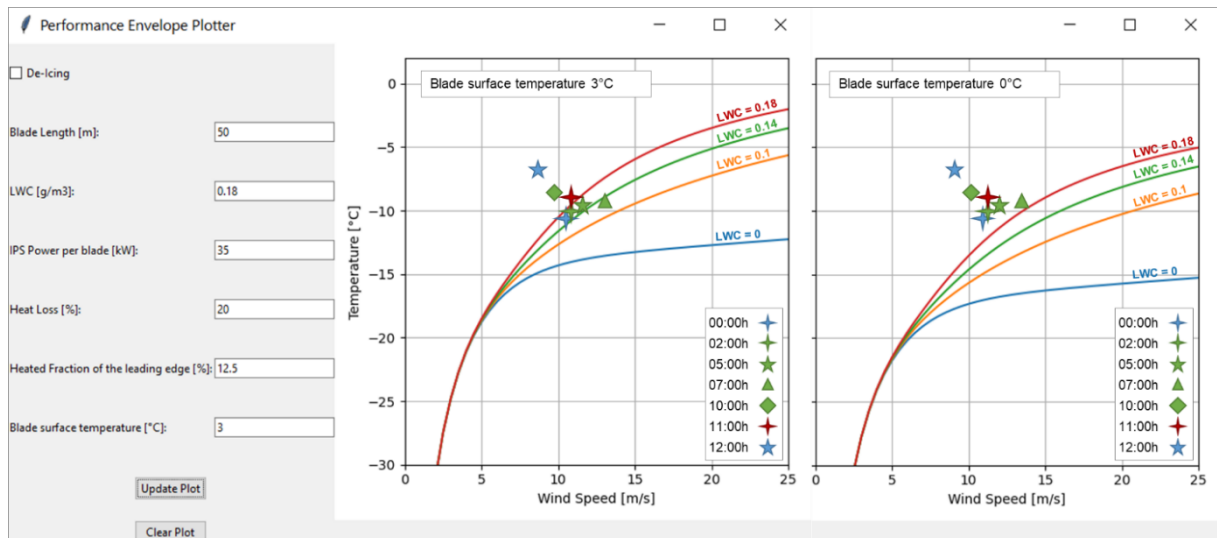


Abbildung 16: Wie Abbildung 15 aber mit einer Heizleistung von 35 kW.

Während im dargestellten Beispiel einzig die Heizleistung angepasst wird, ist zu berücksichtigen, dass auch Anpassungen der anderen Inputparameter zu Veränderungen/Verschiebungen der Performance envelope führen. Daher ist es wichtig die zu testenden Blattheizsysteme im Modell möglichst präzise abzubilden. Für eine weiterführende Evaluation des Modells hat der Turbinenhersteller Nordex das Modell der Performance envelope mit Feldmessungen der Oberflächentemperatur an einer Turbine mit eigens entwickeltem Rotorblattheizsystem im «anti-icing» Modus getestet und an der Winterwind-Konferenz 2024 präsentiert (Nordex Group, 2024). Die Resultate zeigen, dass die Vorhersagen des Modells gut mit den Messungen übereinstimmen. Dennoch ist es aufgrund der vielen Vereinfachungen im Modell wichtig die Resultate richtig einzuordnen.

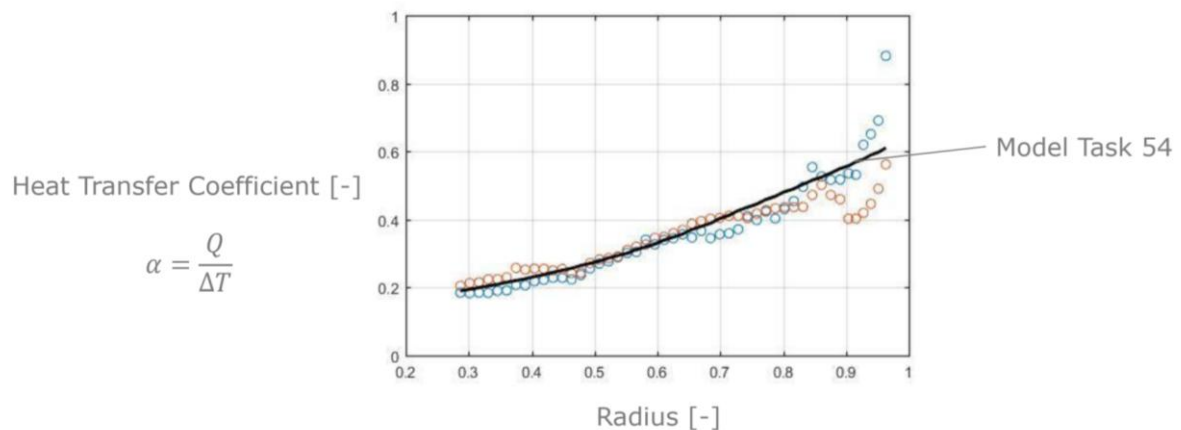


Abbildung 17: Vergleich des Wärmeübergangskoeffizienten entlang des Rotorblattes berechnet anhand von gemessenen Oberflächentemperaturen und der Vorhersage des Performance envelope Modells des Task 54 durch den Hersteller Nordex. Quelle: Nordex Group, 2024

Des Weiteren konnte Meteotest das Modell im Rahmen von zwei Forschungsprojekten anwenden: SO-WINDIC («Smart Operation of Wind Turbines under Icing Conditions»), welches durch die österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG finanziert wurde und SOPWICO («Smart Operation of Wind Power Plants in Cold Climate»), welches durch den internationalen technischen Fachverband der Elektrizitäts- und Wärmeversorgung (vgbe energy) und acht vgbe Partner finanziert wird. Dabei wurde versucht anhand einer frühen Version des Modells und vorliegender historischer Turbinendaten eine turbinenspezifische Performance envelope, welche mögliche Teileffizienzen der Rotorblattheizung



darstellt, zu bestimmen (Gerber and Froidevaux, 2023). Das turbinenspezifische Leistungsprofil (Abbildung 18) wird durch ein Set zweier zu erreichender Oberflächentemperaturen aus dem Wärmetransfermodell bestimmt. Dabei wird angenommen, dass ein Rotorblattheizzyklus, bei atmosphärischen Bedingungen über dem Profil der höheren Oberflächentemperatur, komplett erfolgreich ist und nach Ende des Heizzyklus keine vereisungsbedingten Produktionsverluste stattfinden. Zwischen den zwei Grenzlinien für bestimmte Oberflächentemperaturen wird von einer linearen Zunahme der Produktionsverluste mit sinkender Temperatur ausgegangen, während die Vereisungsverluste unterhalb der unteren Oberflächentemperatur 100 % betragen, d.h. kein Erfolg erzielt wird. Dabei wird das Set an Oberflächentemperaturen gewählt, für welches die mittlere quadratische Differenz zwischen den Erfolgen der historischen Heizzyklen der Windturbine und der berechneten Effizienz aus dem Modell am geringsten ist. Aufgrund der beschränkten Anzahl von Heizzyklen und da im Allgemeinen und im Projekt keine Messungen des Flüssigwassergehalts vorliegen, wurde darauf verzichtet, mehrere Leistungsprofile der Rotorblattheizung für variierenden Flüssigwassergehalt zu bestimmen.

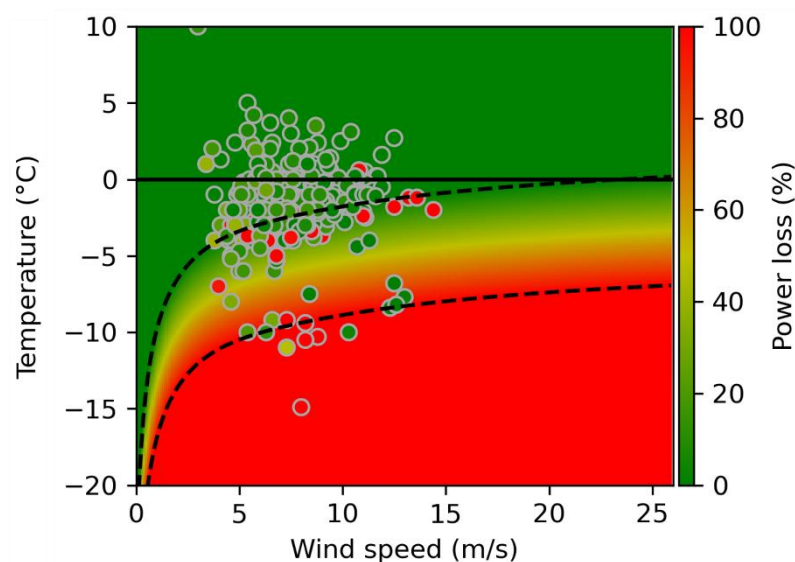


Abbildung 18: Modelliertes turbinenspezifisches verlaufendes Rotorblattheizungsprofil basierend auf dem vereinfachten Wärmetransfermodell, welches im Rahmen des Task 54 entwickelt wurde und Blattheizzyklen einer Testturbine in Deutschland während zweier Winter. Die zwei gestrichelten Linien zeigen die Grenzen für 0% und 100% Produktionsverlust nach dem Heizzyklus. Die Punkte zeigen die Produktionsverluste (%) nach allen Blattheizzyklen der Testturbine während der zwei Winter. Quelle: Gerber and Froidevaux, 2023

Die Messdaten zeigen, dass für Temperaturen zwischen 0°C und -10°C und für alle Windgeschwindigkeiten eine hohe Variabilität von Produktionsverlusten auftreten kann. Daher ist eine klare Abgrenzung zwischen Erfolg (innerhalb der Performance envelope) und kein Erfolg (ausserhalb der Performance envelope) schwierig. Die Bestimmung der Produktionsverluste nach den Heizzyklen war im vorliegenden Projekt schwierig, da die Turbine nach beendetem Heizzyklus erst visuell inspiziert werden muss, bevor diese wieder gestartet werden kann. Dies könnte mit ein Grund für die starke Variabilität in den Daten sein. Dennoch konnte das erweiterte Modell in einem Algorithmus zur Bestimmung der besten Heizzeitpunkte für die Rotorblattheizung im Rahmen des Projektes SOWINDIC eingesetzt werden.

### Feldvalidierung von Rotorblattheizungen

Bei Betreibern von Windturbinen kommt oft die Frage auf wie die Rotorblattheizung im Verlaufe der Inbetriebsetzung beziehungsweise des Betriebs validiert werden kann. Task 54 hat sich dieser Frage angenommen und den Rahmen eines Frameworks zur Validierung des Rotorblattheizsystems anhand von Blattoberflächentemperaturmessungen festgelegt (Abbildung 19). Dabei sollen Oberflächentemperaturmessungen unter verschiedenen Bedingungen in eine Performance envelope übersetzt werden können und mit Herstellerinformationen oder Modellberechnungen (Kapitel 2.1.1) verglichen werden.

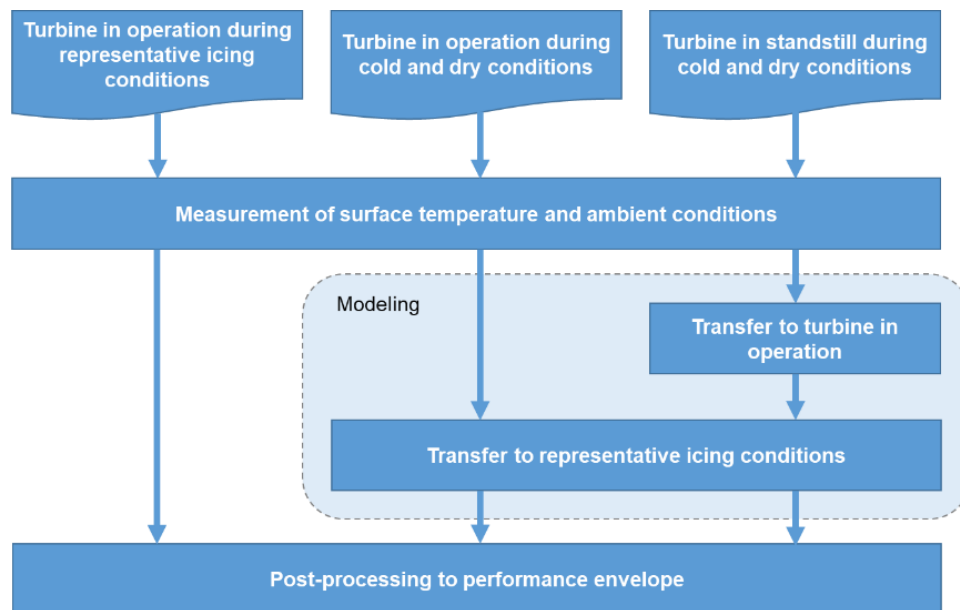


Abbildung 19: Framework zur Feldvalidierung von Rotorblattheizsystemen.

Die Messung der Oberflächentemperatur von Rotorblättern stellt eine grosse Herausforderung dar, insbesondere für Turbinen im Betrieb. Zur Messung der Oberflächentemperatur gibt es verschiedene Möglichkeiten, wobei die geläufigsten Methoden thermische Kameras und Sensoren direkt auf der Blattoberseite sind. Abhängig vom Modell erlauben thermische Kameras sehr gute Oberflächentemperaturmessungen. Jedoch muss ein Kompromiss zwischen der Genauigkeit, den Kosten und der technischen Komplexität gemacht werden. Während die Auflösung eines einfacheren Modells bei gewissen Messbedingungen nicht ausreicht für Messungen aus der Distanz, sind Modelle mit höherer Auflösung oft mit höheren Kauf- oder Mietkosten verbunden. Die höchste Auflösung kann nur mit gekühlten Kameras erzielt werden, was jedoch mit einer grösseren technischen Komplexität und zusätzlichen Kosten einhergeht.

Die Art der Oberflächentemperaturmessung ist für den Validierungsprozess von entscheidender Bedeutung. Je nach Messgerät kann die Messung während des Betriebs der Turbine, d.h. bei sich drehendem Rotor, erfolgen, zum Beispiel wenn Temperatursensoren direkt auf der Rotorblattoberfläche vorhanden sind, oder mit einer drohnenmontierten Wärmebildkamera, die der Bewegung des Rotorblatts folgen kann. Bodengebundene Wärmebildkameras hingegen benötigen je nach Modell entweder ein stationäres Aufnahmeobjekt oder mehrere unterschiedliche Aufnahmepositionen, um je nach Blickwinkel übermässige Reflexionen zu vermeiden und die notwendigen Belichtungszeiten zu gewährleisten.

Neben der Messung der Oberflächentemperatur werden die meteorologischen Daten der Umgebungsbedingungen benötigt, vor allem Temperatur und Windgeschwindigkeit. Diese sind in der Regel Bestandteil der SCADA-Daten der betrachteten Anlage. Zusätzlich hat der LWC einen wesentlichen Einfluss auf die Art und Intensität der Vereisung und damit auch auf die zur Vermeidung der Vereisung erforderliche Energie. In Ermangelung entsprechender Daten zum LWC muss daher eine Modellierung entwickelt werden, die für den Validierungsprozess verwendet werden kann.

Eine weitere wichtige Ausgangsbedingung für den Validierungsprozess sind die Bedingungen während der Messungen. Wenn es möglich ist, vollständige Messungen und Daten der Umgebungsbedingungen direkt während repräsentativer Vereisungsereignisse aufzuzeichnen, kann eine entsprechende Performance envelope direkt daraus abgeleitet werden. Solche Messungen sind jedoch selten möglich. Im Rahmen des Validierungsprozesses werden daher auch Möglichkeiten zur Durchführung von Messungen in Zeiten ohne akute Vereisung beschrieben. Für die Auswertung und Umsetzung in eine Performance envelope muss dann eine entsprechende Modellierung entwickelt werden.





Für die Entwicklung der genannten Modellierung zur Übertragung der Messergebnisse bei kalten und trockenen Bedingungen auf repräsentative Vereisungsbedingungen mit entsprechendem LWC beziehungsweise vom Stillstand auf Geschwindigkeiten, die der Leistungskurve und repräsentativen Windbedingungen entsprechen, sind weitere Forschungsarbeiten auf Ebene der Mitgliedsländer erforderlich. Hinsichtlich des Übergangs von trockenen Bedingungen zu höherem LWC liegen entsprechende Vergleichsmessungen in Klimawindkanälen vor, die zur Validierung der diesbezüglichen Modellierung herangezogen werden können. Hinsichtlich des Übergangs vom Stillstand zu Betriebsbedingungen werden Daten von Windenergieanlagen mit Rotorblattheizungen im Feld unter entsprechenden Betriebsbedingungen benötigt, mit denen die Modellierung verglichen werden kann.

Als Ausgangspunkt für die Modellierung dient das Modell zur Modellierung der Performance envelope (Kapitel 2.1.1). Für die Verwendung im Rahmen des Validierungsprozesses ist es jedoch notwendig, möglichst viele der verwendeten Vereinfachungen durch detailliertere Parametrisierungen und Berechnungen zu ersetzen. Dies gilt sowohl für die Annahmen bezüglich des Rotorblattheizsystems als auch für die einzelnen Faktoren der Wärmebilanzgleichung. Die folgenden Punkte stellen erste Ansätze für mögliche Verbesserungen der Methodik dar:

- Umrechnung von einer konstanten Temperatur über das gesamte Rotorblatt auf eine repräsentative Temperaturverteilung über das Rotorblatt
- Variable Anpassung der Heizleistung für einzelne Rotorblattabschnitte
- Detaillierte Verlustanalyse des Heizsystems in Hinblick auf Wärmeverluste ausserhalb der beheizten Bereiche
- Berücksichtigung der Eigenschaften verschiedener Eistypen in Bezug auf den Wärmeübergang insbesondere bei Enteisung

### 2.2.2. Eiswurfmodell

Das Eiswurfmodell, welches im Rahmen des Task 54 entwickelt wurde (Sarlak et al., 2024) weist mittlere Komplexität auf. Während viele Eiswurfmodelle existieren, sind diese meist nicht öffentlich zugänglich. Um die Transparenz in der Community zu fördern, soll das Modell öffentlich zugänglich gemacht werden. Die Benutzeroberfläche ermöglicht die einfache Anwendung. Die Resultate zeigen die Wahrscheinlichkeitsverteilung für Eiseinschläge um die Turbine. Diese können benutzt werden um Risikoanalysen durchzuführen, welche momentan nicht integraler Bestandteil des Modells sind. Zusätzlich soll das Modell als Referenz für eine Vergleichsstudie verschiedener Eiswurfmodelle dienen, welche während der Verlängerung des Task 54 in den Jahren 2025-2028 geplant ist.

### 2.2.3. Klimawindkanalvergleich

Ein Vergleich der Tröpfchengrössenverteilung in den unterschiedlichen Klimawindkanälen zeigt, dass die Verteilungen ähnlich sind, jedoch in gewissen Bereichen Unterschiede aufweisen (Kim et al., 2024). Bei einem Klimawindkanal gibt es mehr Tröpfchen mit einem Durchmesser von 15  $\mu\text{m}$ , während in den anderen Windkanälen vergleichsweise mehr kleinere Tröpfchen entstehen. Bei zunehmender Windgeschwindigkeit nimmt in geschlossenen Windkanälen die Anzahl kleiner Tröpfchen zu, während in offenen Windkanälen die Anzahl Tröpfchen mit einer Grösse von ca. 15  $\mu\text{m}$  mit zunehmender Windgeschwindigkeit zunimmt. Allgemein sind Unterschiede vermutlich auf die unterschiedlichen Sprühsysteme der Windkanäle zurückzuführen. Bei einem Vergleich der Eisform am Zylinder gibt es ebenfalls Unterschiede (Abbildung 20). Bei gleichen Windgeschwindigkeit-, Temperatur-, Flüssigwassergehalt- und Medianwert-Durchmesser-Bedingungen ist das Eiswachstum in gewissen Windkanälen grösser als in anderen. Dies ist vermutlich auf die unterschiedliche Tröpfchengrössenverteilungen zurückzuführen, wobei eine erhöhte Anzahl von Tröpfchen mit einem Durchmesser von ca. 15  $\mu\text{m}$  die Kollisionseffizienz erhöht und somit zu einem stärkeren Wachstum führt (Kim et al., 2024).

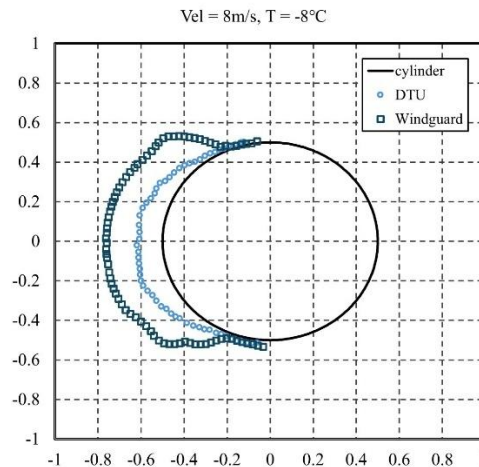


Abbildung 20: Eiswauchstum an einem Zylinder mit einem Durchmesser von 3 cm bei einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s, einer Temperatur von  $-8^{\circ}\text{C}$ , einem Flüssigwassergehalt von  $0.4 \text{ g/m}^3$  und einem Medianwert-Durchmesser von  $20 \mu\text{m}$  (dunkelblau: Windkanal von Deutsche Windguard, hellblau: Windkanal von DTU). Quelle: Kim et al., 2024

### 3 Schlussfolgerungen und Ausblick

Vereisung ist eine grosse Herausforderung für Windturbinen in kalten Regionen, da sie zu Produktionsverlusten führt und ein Sicherheitsrisiko darstellt. Die internationale Zusammenarbeit im Rahmen des IEA Wind TCP Task 54 soll den Austausch von Erfahrungen und die Erarbeitung von Guidelines bezüglich Windenergie in kalten Klimazonen fördern. Während der Jahre 2022-2024 wurde intensiv an den Themen «Performance envelope», «Windkanal» und «General Ice Throw Model» gearbeitet. Meteotest, in Vertretung für die Schweiz, war insbesondere in der Arbeitsgruppe «Performance envelope» aktiv.

Rotorblattheizsysteme zur Bekämpfung von Rotorblattvereisung sind bereits weit verbreitet. Solche Systeme haben allerdings nur einen eingeschränkten Leistungsbereich, die sogenannte Performance envelope, welcher durch die Umgebungsbedingungen bestimmt ist. Die Arbeitsgruppe «Performance envelope» hat sich zum Ziel gesetzt die Performance envelope zu definieren, zu modellieren und zu validieren, um die Effizienz von Rotorblattheizsystemen in Zukunft besser einschätzen zu können.

Die Arbeit wurde in drei Bereiche aufgeteilt: In einem ersten Schritt wurde eine Datenbank mit Vereisungsereignissen erstellt. Diese beinhaltet meteorologische Informationen sowie nach Möglichkeit Betriebsdaten von Windturbinen aus unterschiedlichen Regionen der Welt und ermöglicht so eine detaillierte Analyse von Vereisungsereignissen. Analysen der Vereisungsereignisse zeigen, dass Vereisungsereignisse eine sehr hohe Variabilität aufweisen. Es können nicht nur Unterschiede zwischen Vereisungsereignissen an unterschiedlichen Standorten festgestellt werden, sondern auch Unterschiede zwischen unterschiedlichen Vereisungsereignissen an einem Standort und sogar innerhalb eines einzelnen Vereisungsereignisses. Die Unterschiede sind auf variierende meteorologische Bedingungen zurückzuführen. Dabei hat sich gezeigt, dass die weit verbreitete IEA Icing Classification (IEA Wind, 2017), welche zur groben Abschätzung der Vereisungsintensität an einem Standort verwendet werden kann, für die Bestimmung der Performance envelope inadäquat ist. Sowohl die klimatischen Bedingungen wie auch die sich kontinuierlich verändernden meteorologischen Bedingungen beeinflussen den Typ und die Intensität von Vereisungsereignissen und die benötigte Heizenergie um Vereisung zu verhindern oder angesammeltes Eis zu schmelzen. Vereisungsereignisse an zwei Standorten mit der gleichen Vereisungsklasse gemässe IEA Icing Classification (IEA Wind, 2017) können dabei komplett unterschiedliche Vereisungsintensitäten aufweisen, insbesondere wenn sich der Flüssigwassergehalt der Atmosphäre unterscheidet oder sich dieser während des Ereignisses unterschiedlich entwickelt. Für einen Standort ist es daher wichtig, die klimatischen und meteorologischen Bedingungen zu kennen,





um eine Abschätzung der Vereisungsverhältnisse machen zu können. Die Vereisungsereignisdatenbank ist öffentlich zugänglich und soll als Grundlage dienen, um die Vielfalt und Komplexität von Vereisungsereignissen besser zu charakterisieren und zu verstehen.

Um eine Übersetzung zwischen den meteorologischen Verhältnissen und der Effizienz eines Rotorblattheizsystems zu finden, wurde in einem zweiten Schritt ein Modell zur Berechnung der Performance envelope eines Rotorblattheizsystems für bestimmte meteorologische Bedingungen entwickelt, welches auf einer vereinfachten Wärmebilanzgleichung basiert. Dabei fließen Parameter der Turbinengeometrie, des Rotorblattheizsystems und die meteorologischen Bedingungen ins Modell ein. Die Performance envelope ist als Grenzkurve in Abhängigkeit der Temperatur und Windgeschwindigkeit definiert. Nicht zuletzt hat der Flüssigwassergehalt der Atmosphäre einen grossen Einfluss auf die Performance envelope und kann den Bereich, in welchem das Rotorblattheizsystem effizient ist, stark reduzieren. Ein Vergleich von Rotorblatttemperaturmessungen eines beheizten Rotorblatts durch Nordex mit Modellsimulationen zeigt gute Übereinstimmung bei präzise-gewählten Parametrisierungen im Modell.

Ein Framework für die Feldvalidierung von Rotorblattheizsystemen wurde von den Teilnehmern des Task 54 in enger Zusammenarbeit mit Experten der Windindustrie in einem dritten Schritt entwickelt. Dieses soll es ermöglichen standortspezifische Beurteilungen der Leistung eines Rotorblattheizsystems durchzuführen und diese mit den Herstellerangaben zu vergleichen. Der Prozess basiert auf der Messung der Oberflächentemperaturen und berücksichtigt unterschiedliche Bedingungen (Turbine in Betrieb oder im Stillstand; repräsentative Vereisungsverhältnisse oder eisfreie Rotorblätter). Zur Validierung des Frameworks sind weitere Studien notwendig.

In den weiteren Arbeitspaketen des Task 54 wurde in den Jahren 2022-2024 einerseits ein einfaches Eiswurfmodell mit einer Benutzeroberfläche zur einfachen Anwendung entwickelt (Sarlak et al., 2025). Das Modell soll zur ersten Abschätzung der Gefahr durch Eiswurf bei der Planung neuer Windparks dienen und wird im Jahr 2025 öffentlich zugänglich publiziert. Andererseits wurde eine «round robin»-Kampagne mit vier Klimawindkanälen durchgeführt. Dabei wurden Experimente mit einem Standardzylinder durchgeführt. Die Vereisung und die Eiströpfcheneigenschaften wurden untersucht und zeigen, dass die unterschiedlichen Sprühsysteme und ob ein Windkanal offen oder geschlossen ist einen Einfluss auf die Tröpfchengrössenverteilung haben, während die Tröpfchengrössenverteilung die Eisbildung am Zylinder beeinflusst. Weitere Studien sind nötig, um den Einfluss der Tröpfchengrössenverteilung auf das Eiswachstum zu verstehen (Kim et al., 2024). Zusätzlich wurde eine Präsentation zur Auswirkung der Vereisung auf Stromnetze und -märkte an der Winterwind 2024 präsentiert (Karlsson, 2024). Diese diskutiert, dass Vereisung am Rotorblatt Konsequenzen für die Turbine, für den Park, für den Betreiber, für den Stromhändler und letztendlich für den Strommarkt hat. Eine Abmilderung ist wichtig was ein breites Verständnis aller Aspekte voraussetzt.

Die Arbeiten im Rahmen des Task 54 haben gezeigt, dass es weiterhin von grosser Wichtigkeit ist, die internationale Kollaboration aufrechtzuerhalten, um Fragestellungen im Bereich der Vereisung von Windenergieanlagen in kalten Regionen zu diskutieren und Empfehlungen herauszugeben. Daher haben die Mitglieder des Task 54 beim Executive Committee (ExCo) des IEA Wind TCP ein Proposal für eine Verlängerung der Arbeiten des Task 54 eingereicht. Die folgenden Arbeitspakete sind für den Task 54 für die Periode 2025-2028 vorgesehen:

"Operational strategies": Um einen möglichst effizienten Umgang mit Vereisung anzustreben, ist es bereits in der Planungsphase wichtig, Vereisung zu berücksichtigen. Zudem muss die Betriebsstrategie den meteorologischen Bedingungen angepasst werden. Dazu soll ein Review zu empfohlenen Praktiken für operationelle Strategien von Windturbinen in kaltem Klima erstellt werden, welches auch die Planungsphase miteinbezieht.

"Managing the ice throw risk": Aufgrund der Gefahr, welche von Eiswurf ausgeht, bleibt die Wichtigkeit dieses Themas für Windenergieanlagen, welche vereisenden Bedingungen ausgesetzt sind, allgegenwärtig. Risikobewertungen sind weit verbreitet. Um die Beurteilung zu vereinfachen soll eine vereinheitlichte Beurteilung des Risikos und risikomindernder Massnahmen erarbeitet werden. Ziel des Task 54 ist es, einen Entscheidungsbaum zum Management und der Entschärfung des Risikos durch Eiswurf zu erstellen.



"Wind turbine and blade heating performance": Die Evaluation von Vereisungsverlusten sowie die Klassifizierung von Vereisungsevents sind wichtig für die Vorhersage der Betriebsstrategie der Windturbinen sowie der produzierten Energie. Ausserdem ist die Performance von Rotorblattheizungen stark von den vereisenden Bedingungen abhängig. Es hat sich gezeigt, dass die Vereisungsklassifikation des IEA Wind, 2017 und die IceLoss Methode gewisse Aspekte nicht berücksichtigen. In diesem Arbeitspaket sollen die Arbeiten des Arbeitspaketes «Performance envelope» weitergeführt werden mit den zusätzlichen Zielen ein Update der IceLoss Methode zu erstellen (IceLoss 3.0), die Vereisungsklassen (IEA Ice Class 2.0) zu überarbeiten aber auch das Framework zur Feldvalidierung von Rotorblattheizsystemen fertigzustellen.

"Offshore wind": Mehr und mehr Offshore-Windparks werden insbesondere in Skandinavien, Ostkanada, aber auch Japan und den USA geplant und gebaut. Ziel des Arbeitspaketes ist es, ein State-of-the-Art Review zu Vereisungseffekten von Offshore-Windparks zu erstellen.

"Icing events complexity": Vereisungsevents unterscheiden sich aufgrund unterschiedlicher meteorologischer Bedingungen, was zu unterschiedlicher Eisakkumulation, Eistyp und Eisverteilung an Strukturen führen kann. Der Task 54 möchte einerseits das Bewusstsein für diese Komplexität steigern und andererseits Informationen für Spezialisten zusammenstellen, welche unter anderem ein Dokument zu "Best Practices" im Umgang mit der Komplexität von Vereisungsereignissen für verschiedene Anwendungen umfasst.

"Uncertainty": Die Abschätzung von Unsicherheiten von Vereisung, sowohl im Betrieb als auch in der Planungsphase ist wichtig für einen ökonomischen Betrieb wie auch für die Effizienz von Windenergieprojekten. Sowohl während des Betriebs als auch in der Planungsphase ist es zentral die Unsicherheiten in der Vorhersage von Vereisung zu betrachten. Ziel des Arbeitspaketes ist es die Unsicherheitsmetriken für Vereisung von Windanlagen zu aktualisieren, die International Electrotechnical Commission (IEC) Standards zu erneuern und ein Framework und Formulierungen zu erarbeiten sowohl für die Planungsphase als auch für die Unsicherheitsabschätzung.

"Climatic wind tunnel validations": Zur Untersuchung von Vereisung und den physikalischen Prozessen unter kontrollierten Bedingungen an Strukturen eignen sich Tests in Klimawindkanälen. Dabei ist es wichtig, dass Experimente in verschiedenen Windkanälen vergleichbar sind. Das Arbeitspaket ist eine Fortsetzung der Arbeiten in der Periode 2022-2024 und plant einen technischen Bericht zu erstellen, welcher eine Empfehlung zur Messung von Flüssigwassergehalt in Windkanälen abgibt sowie den Effekt der Oberflächenrauigkeit auf die aerodynamischen Eigenschaften und Eisformen beschreibt.

Insbesondere soll mit den Aktivitäten im Rahmen des IEA Wind TCP Task 54 das Industriebewusstsein gefördert werden. Eine aufdatierte Edition der «Recommended Practices on Wind Energy Projects in Cold Climate», welche zuletzt im Jahr 2017 erschienen ist, soll die neuen Erkenntnisse des Task 54 (beziehungsweise vorher Task 19) der letzten Jahre sowie der geplanten Periode zusammenfassen.



## 4 Nationale und internationale Zusammenarbeit

### 4.1 Internationale Projektpartner

Im Rahmen des Task 54 vertritt Meteotest die Schweiz in einem internationalen Konsortium zur Bearbeitung von Fragestellungen im Bereich der Windenergie in kalten Klimazonen. In Tabelle 3 sind die internationalen Partner des Task 54 aufgelistet.

Tabelle 3: Teilnehmer am Task 54 – Periode 2022-2024

Land	Firma
Dänemark	DTU Wind Energy
Deutschland	Fraunhofer IFAM
Finnland	VTT
Japan	Nedo, Komaihaltec
Kanada	Nergica Icetek (extern) FabricAir / Borealis Wind (extern)
Norwegen	Kjeller Vindteknikk
Österreich	Energiewerkstatt Verein
Schweiz	Meteotest AG
Schweden	WindREN Vattenfall
UK	DNV

### 4.2 Aktivitäten im Rahmen des Task 54

Über die Jahre haben mehrere General Task 54 Meetings, teils online (aufgrund von Covid-19) und teils vor Ort stattgefunden (Tabelle 4). Meteotest hat nach Möglichkeit vor Ort an den Meetings teilgenommen, wobei der Reiseaufwand nach Calgary im Herbst 2023 zu gross war und eine Online-Teilnahme vorgezogen wurde. Während der Jahre haben PF, JK und FG zusätzlich regelmässig an Meetings der Arbeitsgruppe «Performance envelope» mitdiskutiert (Tabelle 4) sowie an General Task 54 meetings, welche zweiwöchentlich online stattfinden, teilgenommen (nicht in der Tabelle aufgelistet).

Tabelle 4: Liste von Task 54 meetings und Teilnahme von Meteotest (FG: Franziska Gerber, JK: Jérôme Kopp, PF: Paul Froidevaux, SK: Sara Koller).

Datum	Meeting	Persönlich	Online	Teilnahme Meteotest
2022-02-08	Kick-off Task 54		X	PF
2022-04-07	Subtask Performance envelope		X	PF
2022-04-20	General Task 54 social meeting nach der Winterwindkonferenz	Skellefteå, SE		FG
2022-06-30	Subtask Performance envelope		X	PF
2022-10-19	General Task 54 meeting	Wien, AT		FG



2022-10-20	Joint Meeting Task 54, Task 41 (distributed wind) und Task 52 (Large-Scale Deployment of Wind Lidar)	Wien, AT		FG, SK (Task 52)
2022-11-16	Subtask Performance envelope		X	PF
2023-01-18	Subtask performance envelope		X	PF
2023-02-22	Subtask performance envelope (Winterwind workshop preparation)		X	FG
2023-02-23	Subtask performance envelope		X	FG
2023-03-16	Subtask performance envelope (Winterwind workshop preparation)		X	FG
2023-03-30	General Task 54 meeting	Åre, SE		FG
2023-05-11	Subtask performance envelope		X	FG
2023-06-01	Subtask performance envelope – WP2		X	FG, PF
2023-06-22	Subtask performance envelope		X	-
2023-07-20	Subtask performance envelope		X	FG
2023-08-17	Subtask performance envelope		X	PF
2023-09-21	Subtask performance envelope		X	PF
2023-10-26	Subtask performance envelope	Calgary, CA		FG, PF (online)
2023-10-26	General Task 54 meeting	Calgary, CA		FG (online)
2023-10-27	General Task 54 meeting	Calgary, CA		PF (online)
2023-11-23	Subtask performance envelope		X	FG
2024-01-11	Subtask performance envelope		X	FG
2024-02-15	Subtask performance envelope (Winterwind workshop preparation)		X	FG
2024-02-29	Subtask performance envelope (Winterwind workshop preparation)		X	FG
2024-03-07	Subtask performance envelope (Winterwind workshop preparation)		X	FG
2024-03-14	Subtask performance envelope (Winterwind workshop preparation)		X	FG
2024-03-20	Subtask performance envelope	Åre, SE		FG
2024-04-25	Subtask performance envelope		X	PF
2024-06-17	General Task 54 meeting	Narvik, NO		PF
2024-06-18	General Task 54 meeting	Narvik, NO		PF
2024-07-18	Subtask performance envelope		X	-
2024-08-29	Subtask performance envelope		X	PF
2024-09-26	Subtask performance envelope		X	JK
2024-10-24	Subtask performance envelope		X	-
2024-12-12	Subtask performance envelope		X	JK
2025-04-07	Kick-off Task 54 Period 2025-2028	Risø, DK		FG (online)



## 5 Publikationen und andere Kommunikation

### 5.1 Publikationen / Modelle / Codes des Task 54

#### Factsheets

(geleitet durch die Schweiz; erstellt unter Task 19, publiziert während der Periode des Task 54):

- Mapping blade icing: [https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2022/11/IEA\\_Wind\\_TCP\\_Task19\\_factsheet\\_icing\\_maps.pdf](https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2022/11/IEA_Wind_TCP_Task19_factsheet_icing_maps.pdf) (zugegriffen: 2025-04-08)
- Forecasting blade icing: [https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2022/11/IEA\\_Wind\\_TCP\\_Task19\\_factsheet\\_icing\\_forecasts.pdf](https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2022/11/IEA_Wind_TCP_Task19_factsheet_icing_forecasts.pdf) (zugegriffen: 2025-04-08)

#### Code

- Roberge, P., Petterson, J., Rittinghaus, C., Godreau, C., Froidevaux, P., Gerber, F., Roeper, D., Wallenius, T., & Bégin-Drolet, A. (2025): Task 54 Blade heating Envelope model, Zenodo, <https://doi.org/10.5281/zenodo.15058134>

#### Datenbank

- Froidevaux, P., Godreau, C., Rittinghaus, C., Roberge, P., Bégin-Drolet, A., Petterson, J., Gerber, F., & Kopp, J. (2024): IEA Wind T54 Public Icing Event Database [Data set], Zenodo, <https://doi.org/10.5281/zenodo.14447171>

#### Präsentationen & Workshops (im Rahmen des Task 54 mit Beteiligung der Schweiz)

Koller, S., Kopp, J., Froidevaux, F., Rittinghaus, C., Godreau, Ch., Roberge, P., Bégin-Drolet, A., Petterson, J. and Gerber, F. (2025): Illustrating icing events complexity using the IEA Task54 public database, Winterwind 2025, Skellefteå, Sweden, [https://windren.se/WW2025/11\\_3\\_05\\_Kopp\\_Illustrating\\_icing\\_events\\_complexity\\_using\\_the\\_IEA\\_Task54\\_public\\_database\\_Pub\\_v2.pdf](https://windren.se/WW2025/11_3_05_Kopp_Illustrating_icing_events_complexity_using_the_IEA_Task54_public_database_Pub_v2.pdf)

Sarlak, H., Rittinghaus, C., Stökl, A., Bredesen, R., Froidevaux, P. and Karlsson, T. (2024): IEA Wind Task 54 Wind turbine ice throw tool, IWAIS 2024, Session 8c, Narvik, Norway, <https://uit.cloud.panopto.eu/Panopto/Pages/Viewer.aspx?id=c8a21525-ef8d-4b23-a6b3-b17e00b513eb>

Froidevaux, P., Rittinghaus, C., Godreau, Ch., Roberge, P., Bégin-Drolet, A., Petterson, J. and Gerber, F. (2024): A public icing event database, IWAIS 2024, Session 8c, Narvik, Norway, <https://uit.cloud.panopto.eu/Panopto/Pages/Viewer.aspx?id=c8a21525-ef8d-4b23-a6b3-b17e00b513eb>

Rittinghaus, C., Godreau, Ch., Roeper, D., Roberge, P., Bégin-Drolet, A., Wallenius, T., Petterson, J., Gerber, F. and Froidevaux, P. (2024): Performance envelopes of blade heating systems, IWAIS 2024, Session 8c, Narvik, Norway, <https://uit.cloud.panopto.eu/Panopto/Pages/Viewer.aspx?id=c8a21525-ef8d-4b23-a6b3-b17e00b513eb>

Gerber, F., Roeper, D., Roberge, P., Bégin-Drolet, A. and Rittinghaus, C. (2024): Performance envelopes of blade heating systems, Workshop, Winterwind 2024, Åre, Sweden, [https://windren.se/WW2024/00\\_8\\_40\\_Rittinghaus\\_Performance\\_envelopes\\_of\\_blade\\_heating\\_systems-A\\_subtask\\_of\\_IEA\\_Wind\\_TCP\\_Task\\_54\\_Cold\\_climate\\_wind\\_power\\_Pub\\_v2.pdf](https://windren.se/WW2024/00_8_40_Rittinghaus_Performance_envelopes_of_blade_heating_systems-A_subtask_of_IEA_Wind_TCP_Task_54_Cold_climate_wind_power_Pub_v2.pdf)

Gerber, F., Roeper, D., Roberge, P., Godreau, Ch. and Rittinghaus, C. (2023): Performance envelopes of blade heating systems, Workshop, Winterwind 2023, Åre, Sweden, [https://windren.se/WW2023/10\\_1\\_13\\_Rittinghaus\\_Winterwind\\_Workshop-Performance\\_envelopes\\_of\\_blade\\_heating\\_systems\\_v2.pdf](https://windren.se/WW2023/10_1_13_Rittinghaus_Winterwind_Workshop-Performance_envelopes_of_blade_heating_systems_v2.pdf)

Godreau, Ch., Paquet, Y., Froidevaux, P., Krenn, A., Wickmann, H. and Karlsson, T. (2022): Ice detection guidelines for wind energy applications, Winterwind 2022, Skellefteå, Sweden,



[https://windren.se/WW2022/13\\_3\\_33\\_Godreau\\_Ice\\_Detection\\_Guidelines\\_for\\_Wind\\_Energy\\_Applications\\_by\\_IEA\\_Wind\\_TCP\\_Task19\\_Pub\\_v1.pdf](https://windren.se/WW2022/13_3_33_Godreau_Ice_Detection_Guidelines_for_Wind_Energy_Applications_by_IEA_Wind_TCP_Task19_Pub_v1.pdf)

#### **Präsentationen (thematisch verwandt aber ausserhalb des Task 54)**

Gerber, F., Froidevaux, P., Sedlmayer, M., Bot, R., Gruber, M., Kloiber, S., Gruber, D. and Fritze, G. (2024): Smart control for blade heating systems – physics or machine learning?, Winterwind 2024, Åre, Sweden, [https://windren.se/WW2024/06\\_3\\_08\\_Gerber\\_Smart\\_control\\_for\\_blade\\_heating\\_systems-physics\\_or\\_machine\\_learning\\_Pub\\_v2.pdf](https://windren.se/WW2024/06_3_08_Gerber_Smart_control_for_blade_heating_systems-physics_or_machine_learning_Pub_v2.pdf)

Gerber, F. and Froidevaux, P. (2023) : Can we make better use of ice protection systems?, Winterwind 2023, Åre, Sweden, [https://windren.se/WW2023/7\\_3\\_10\\_Gerber\\_Can\\_we\\_make\\_better\\_use\\_of\\_ice\\_protection\\_systems\\_Pub\\_v2.pdf](https://windren.se/WW2023/7_3_10_Gerber_Can_we_make_better_use_of_ice_protection_systems_Pub_v2.pdf)

Burchhart, T., Kloiber, S., Gerber, F., Froidevaux, P., Bot, R., Sedlmayer, M., Glück, T., Gruber, D. and Fritze, G. (2023): Challenges for a smart algorithm controlling wind turbines under icing conditions, Winterwind 2023, Åre, Sweden, [https://windren.se/WW2023/7\\_2\\_20\\_Kloiber\\_Challenges\\_for\\_a\\_smart\\_algorithm\\_Pub\\_v3.pdf](https://windren.se/WW2023/7_2_20_Kloiber_Challenges_for_a_smart_algorithm_Pub_v3.pdf)

Gerber, F., Froidevaux, P., Sedlmayer, M., Bot, R., Gruber, D., Glück, T., Burchhart, T. and Kloiber, S. (2022): A smart algorithm for wind turbine controlling under icing conditions, IGW Wind Industry Stakeholder Meeting, Wien, Österreich.

Gerber, F., Froidevaux, P., Sedlmayer, M., Bot, R., Gruber, D., Glück, T., Burchhart, T. and Kloiber, S. (2022): A smart algorithm for wind turbine controlling under icing conditions, Winterwind 2022, Skellefteå, Sweden, [https://windren.se/WW2022/02\\_3\\_36\\_Gerber\\_A\\_smart\\_algorithm\\_for\\_wind\\_turbine\\_controlling\\_under\\_icing\\_conditions\\_Pub\\_v2.pdf](https://windren.se/WW2022/02_3_36_Gerber_A_smart_algorithm_for_wind_turbine_controlling_under_icing_conditions_Pub_v2.pdf)

## **5.2 Konferenzteilnahmen**

### **2022.04.20 Skellefteå, Schweden: Winterwind 2022**

Teilnahme: FG

- Präsentation: A smart algorithm for wind turbine controlling under icing conditions
- Mitarbeit im Programmkomitee der Konferenz

### **2023.03.27 Åre, Schweden: Winterwind 2023**

Teilnahme: FG & SK

FG:

- Ko-Moderation des Task 54 workshop: Performance envelope of blade heating systems
- Präsentation: Can we make better use of ice protection systems?
- Chair der Session: Technology
- Mitarbeit im Programmkomitee der Konferenz

SK:

- Präsentation: Icing detection with LiDAR
- Chair der Session: O&M



**2024.03.20 in Åre, Schweden: Winterwind 2024**

Teilnahme: FG & SK

FG:

- Ko-Moderation des Task 54 Workshops: Performance Envelopes of Blade Heating Systems
- Präsentation: Smart control for blade heating systems – physics or machine learning?
- Chair der Session: Safety
- Mitarbeit im Programmkomitee der Konferenz

SK:

- Präsentation: The challenge of detecting the liquid water content with ceilometer and Wind LiDAR

**2024.06.19-21 Narvik, Norwegen: 20th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS)**

Teilnahme: PF

PF:

- Präsentation: A public icing events database

**2025.02.04 Skellefteå, Schweden: Winterwind 2025**

Teilnahme: SK

SK:

- Präsentation: Illustrating icing events complexity using the IEA Task54 public database
- Chair der Session: Hybrid systems

JK:

- Mitarbeit im Programmkomitee der Konferenz





## 6 Literaturverzeichnis

- Frohboese, P. and Anders, A. (2007): Effects of Icing on Wind Turbine Fatigue Loads, Journal of Physics: Conference Series 75, 012061, doi:10.1088/1742-6596/75/1/012061.
- Gerber, F. and Froidevaux, P. (2024): Can we make better use of ice protection systems?, Winterwind 2023, Åre, Sweden, [https://windren.se/WW2023/7\\_3\\_10\\_Gerber\\_Can\\_we\\_make\\_better\\_use\\_of\\_ice\\_protection\\_systems\\_Pub\\_v2.pdf](https://windren.se/WW2023/7_3_10_Gerber_Can_we_make_better_use_of_ice_protection_systems_Pub_v2.pdf) (zugegriffen: 2025-04-29)
- Hochart, C., Fortin, G., Perron, J., and Ilinca, A. (2008): Wind turbine performance under icing conditions, Wind Energy, 11(4), pp. 319–333.
- IEA Wind (2017): 13. Expert Group Study on Recommended Practices – Wind Energy Projects in cold climate, 2<sup>nd</sup> edition, International Energy Agency Programme for Research Development and Deployment on Wind Energy Conversion Systems, <https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2022/12/RP-13.2-Cold-Climates.pdf>
- IEA Wind (2018): International Recommendations for Ice Fall and Ice Throw Risk Assessments, Technical Report, International Energy Agency Technology Collaboration Programme, <https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2022/09/Task-19-Technical-Report-on-International-Recommendations-for-Ice-Fall-and-Ice-Throw-Risk-Assessments.pdf>
- Karlsson, T. (2021): Cold climate wind market study 2020-2025, Winterwind 2021, [https://windren.se/WW2021/14\\_2\\_21\\_Karlsson\\_IEA\\_Wind\\_Task\\_19\\_Cold\\_climate\\_wind\\_market\\_study\\_Public.pdf](https://windren.se/WW2021/14_2_21_Karlsson_IEA_Wind_Task_19_Cold_climate_wind_market_study_Public.pdf)
- Karlsson, T. (2024): Icing impacts on electricity grids and markets, Winterwind 2024, Åre, Sweden, [https://windren.se/WW2024/03\\_3\\_17\\_Karlsson\\_IEA\\_Wind\\_Task\\_54\\_Icing\\_impacts\\_on\\_electricity\\_grids\\_and\\_markets\\_Pub\\_v1.pdf](https://windren.se/WW2024/03_3_17_Karlsson_IEA_Wind_Task_54_Icing_impacts_on_electricity_grids_and_markets_Pub_v1.pdf)
- Nordex Group, Runge R. (2024): Performance of Ice Protection Systems, Winterwind 2024, Åre, Sweden, [https://windren.se/WW2024/04\\_2\\_12\\_Runge\\_Performance%20of%20ice%20protection%20systems\\_Pub\\_v1.pdf](https://windren.se/WW2024/04_2_12_Runge_Performance%20of%20ice%20protection%20systems_Pub_v1.pdf) (zugegriffen: 2025-04-29)
- Sarlak, H., Rittinghaus, C., Stökl, A., Bredesen, R., Froidevaux, P. and Karlsson, T. (2024): IEA Wind Task 54 Wind turbine ice throw tool, IWAIS 2024, Session 8c, Narvik, Norway, <https://uit.cloud.panopto.eu/Panopto/Pages/Viewer.aspx?id=c8a21525-ef8d-4b23-a6b3-b17e00b513eb> (zugegriffen: 2025-05-06)
- Suisse Eole (2025): Windenergie in der Schweiz in Zahlen, Factsheet, Stand: 27.3.2025, [https://suisse-eole.ch/wp-content/uploads/2025/02/001\\_SE\\_02\\_FACTSHEET\\_2024\\_D\\_v4.pdf](https://suisse-eole.ch/wp-content/uploads/2025/02/001_SE_02_FACTSHEET_2024_D_v4.pdf) (zugegriffen: 2025-04-15)
- Kim, T., Min, Seungin, Koss, H., Karlsson, T., Rehfeld, N. and Westermann, H. (2024): Study on Cold Climate Wind Tunnel Round Robin Test, IWAIS 2024, Session 2c, Narvik, Norway, <https://uit.cloud.panopto.eu/Panopto/Pages/Viewer.aspx?id=9367053c-e573-4c9c-9b06-b17e00b12253> (zugegriffen: 2025-05-06)





## 7 Anhang

Im Dokument «Anhang\_IEAWindTCPTask54\_SI502463-01.zip» sind folgende Dateien enthalten:

ConferencePresentations:	Konferenzpräsentationen im Rahmen des Task 54 mit Beteiligung der Schweiz
CountryPresentationsCH:	Country Presentations Switzerland der General Task Meetings
MeetingMinutes:	Meeting Minutes der General Task Meetings Meeting Minutes der Subtask Meetings "Performance Envelope"
WinterwindWorkshops:	Präsentationen der zwei Workshops an der Winterwind 2023 und 2024