



Executive Summary, 6. April, 2016

VEREISUNG ST. BRAIS UND MONT CROSIN

Auswirkungen der Vereisung auf das
Betriebsverhalten und den Energieertrag von
Windkraftanlagen im Jurabogen

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Windenergie
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Genossenschaft Meteotest
Fabrikstrasse 14
CH-3012 Bern
www.meteotest.ch

Autoren:

René Cattin, Meteotest, rene.cattin@meteotest.ch
Sara Koller, Meteotest, sara.koller@meteotest.ch
Ulla Heikkilä, Meteotest, ulla.heikkila@meteotest.ch

BFE-Bereichsleiter:**BFE-Programmleiter:****BFE-Vertrags- und Projektnummer:**

Dr. Katja Maus

Robert Horbaty / Lionel Perret

154227 / 103208 bzw. 154232 / 103203

TP 8100088, REF-1081-00229, SI/500692-01

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

Inhaltsverzeichnis

1	Projektziele	4
2	Installationen	5
3	Vereisungsbedingungen.....	5
3.1	Häufigkeit der Vereisung	5
3.2	Windverhältnisse während der Eisbildung	8
4	Eisdetektion	9
4.1	Leistungskurve	9
4.2	Temperatur und relative Feuchte	9
4.3	MOOG/Insensys Rotor Monitoring System	11
5	Performance der Blattheizung.....	11
5.1	Heizen im Stillstand.....	11
5.2	Heizen im Betrieb	12
5.3	Präventives Heizen.....	12
6	Eiswurf.....	13

1 Projektziele

Im Kontext mit den Schwerpunkten des Windenergieforschungsprogramms des Bundes wurden im Rahmen dieses P+D beziehungsweise Forschungsprojekts an den Standorten St. Brais (2009 bis 2015) und Mont Crosin (2014 bis 2015) folgende Ziele verfolgt:

- Installation von Webcams für das **Monitoring der Vereisungsbedingungen** auf der Gondel und an den Rotorblättern. Erweiterung des Monitorings für den Standort Mont Crosin
- Bestimmung der **Häufigkeit von Vereisungsereignissen** an den Standorten St. Brais und Mont Crosin, sowie der typischen Temperatur- und Windverhältnisse für Eisbildung. Ergänzung mit den Auswertungen vom Standort Gütsch. Vergleich mit der Vereisungskarte der Schweiz.
- Evaluation unterschiedlicher **Systeme zur Eisdetektion** an den Rotorblättern der WEA am Standort St. Brais:
 - Vergleich der Leistungskurve mit der effektiven Produktion
 - Temperatur und relative Feuchte
 - Moog/Insensys Rotorblatt Monitoring System
- Bestimmung der Effizienz der **ENERCON Blattheizung** mittels Auswertung der Webcam-Bilder am Standort St. Brais: Berechnung der benötigten Energie, Vollständigkeit der Eisentfernung, Kosten-Nutzen Verhältnis, Vergleich verschiedener Betriebsmodi der Blattheizung, Ertragsverluste mit und ohne Rotorblattheizung
- Feldstudien zur **Erfassung des Eiswurfs** an den Standorten St. Brais und Mont Crosin. Ergänzung mit den Resultaten der Studie vom Gütsch.

2 Installationen

Die Rotorblätter der WEA und die Sensorik auf der Gondel wurden mit Webcams überwacht. Dafür wurde 2009 eine Mobotix M12 Netzwerkkamera mit Dualoptik auf einer WEA in St. Brais installiert. Die zweite Anlage in St. Brais wurde 2012 ebenfalls mit Webcams ausgerüstet. 2014 wurden Webcams auf einer Anlage des Windparks Mont Crosin installiert. Abbildung 1 zeigt die Installationen auf einer Anlage am Standort St. Brais.

2010 wurde eine Anlage in St. Brais mit Messgeräten zur Erfassung der Temperatur und der relativen Feuchte ausgestattet. 2009 wurden im Enercon Werk in Aurich die Dehnmessstreifen der Moog/Insensys Eiserkennung in die Rotorblätter der für St. Brais vorgesehenen WEA 1 montiert.



Abb. 1: Installierte Kameras und IR-Scheinwerfer auf der Gondel der WEA in St. Brais. Links: Auf das Rotorblatt gerichtete Kamera. Rechts: Auf die Sensoren gerichtete Kamera.

3 Vereisungsbedingungen

3.1 Häufigkeit der Vereisung

Die Vereisung von Strukturen kann durch folgende Begriffe beschrieben werden:

- **Meteorologische Vereisung** (meteorological icing): Zeitraum während dessen die meteorologischen Bedingungen für Eisansatz gegeben sind, das heißt aktiv Eis gebildet wird
- **Instrumentelle Vereisung** (Instrumental Icing): Dauer der technischen Störung eines Instruments oder einer WKA durch Vereisung, der Zeitraum während dessen Eis am Instrument vorhanden ist
- **Inkubationszeit** (incubation time): Verzögerung zwischen dem Beginn der meteorologischen Vereisung und dem Beginn der instrumentellen Vereisung.

- **Erholungsphase** (recovery time): Verzögerung zwischen dem Ende der meteorologischen Vereisung und der Wiederaufnahme des normalen, eisfreien Betriebs eines Instruments oder einer WKA

Abbildung 2 illustriert die obigen Definitionen am Beispiel einer Windmessung.

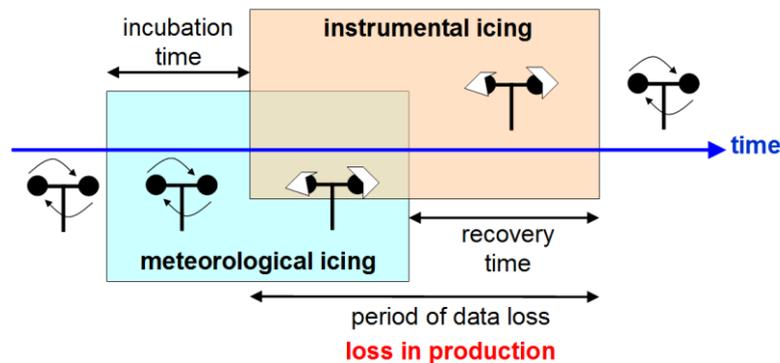


Abb. 2: Beschreibung der Vereisung von Strukturen durch die Begriffe meteorologische Vereisung, instrumentelle Vereisung, Inkubationszeit und Erholungsphase.

Um Informationen über die Häufigkeit von meteorologischer und instrumenteller Vereisung zu erhalten, wurden die Kamerabilder der auf die Sensoren gerichteten Webcam manuell ausgewertet. Als Annäherung wurde der Beginn der meteorologischen sowie der instrumentellen Vereisung mit dem Zeitpunkt des ersten Auftretens von Eis an der Sensorik gleichgesetzt, d.h. die Inkubationszeit wurde auf null gesetzt. Der Zeitraum, während welchem ein Zuwachs des Eises beobachtet werden konnte, wurde als meteorologische Vereisung bezeichnet. Der Zeitpunkt ab welchem kein Eis mehr an der Sensorik erkannt werden konnte, wurde als das Ende der instrumentellen Vereisung bezeichnet.

Tabelle 1 und Abbildung 3 zeigen eine Übersicht der Resultate.

Tab. 1: Übersicht über die Vereisungsereignisse an den Standorten St. Brais, Gütsch und Mont Crosin.

	Meteorologische Vereisung	Instrumentelle Vereisung
Gütsch 2009/10	130h / 5.4 Tage	674h / 28.1 Tage
St. Brais 2009/10	276h / 11.5 Tage	997h / 41.5 Tage
St. Brais 2010/11	247h / 10.3 Tage	853h / 35.5 Tage
St. Brais 2011/12	96h / 4 Tage	454h / 19 Tage
St. Brais 2012/13	538h / 22.3 Tage	1'610h / 67.1 Tage
St. Brais 2013/14	285h / 11.9 Tage	868h / 36.2 Tage
St. Brais 2014/15	199 h / 8.3 Tage	1'449h / 60 Tage
Mont Crosin 2014/15	122h / 5.2 Tage	1'389h / 57.9 Tage

Die Auswertung der Vereisungshäufigkeit an den Standorten zeigt deutlich, dass die Dauer der Perioden von meteorologischer Vereisung (aktive Eisbildung) relativ kurz ist im Gegensatz zur Dauer von Perioden von instrumenteller Vereisung (Persistenz des Eises). Diese Unterscheidung ist zentral für die Bestimmung des Nutzens einer Blattheizung, da es diese ermöglicht, das Eis nach Ende der meteorologischen Vereisung abzuschmelzen und

somit die Anlage früher, vor dem Wende der instrumentellen Vereisung, wieder in Betrieb zu nehmen.

Der Mittelwert der meteorologischen Vereisung über die sechs Messwinter liegt am Standort St. Brais bei 274h oder 11.4 Tagen (3.1% des Jahres). Dieser Wert ist relativ nahe am Wert der Vereisungskarte der Schweiz auf www.wind-data.ch, welche für diesen Standort 9 Tage meteorologische Vereisung pro Jahr auf 100 m über Grund ausgibt. Der Mittelwert der instrumentellen Vereisung über die 6 Messwinter liegt bei 1'038h oder 43 Tagen pro Winter (11.8% des Jahres).

Die Variabilität der Vereisungshäufigkeit in den einzelnen Wintern ist sehr gross. Im Winter 2011/12 traten nur 96h meteorologischer Vereisung auf, im darauffolgenden Winter 2012/13 war die Gesamtdauer mit 538h gut fünf Mal grösser (siehe auch Abb. 3). Dies zeigt, dass eine Vereisungsmessung während eines Winters noch keine ausreichende Datengrundlage ist, um die Verluste durch Vereisung in der Planungsphase eines Windparks zu bestimmen.

Basierend auf den Mittelwerten der Vereisungshäufigkeit liegt der Standort St. Brais in die IEA Eisklasse 3¹ mit einem mittleren jährlichen Produktionsverlust einer WEA von 3-12%, je nach Ausstattung und Betriebsmodus.

Tab. 2: IEA Eis-Klassifikation.

IEA Eisklasse	Meteorologische Vereisung [% pro Jahr]	Instrumentelle Vereisung [% pro Jahr]	Produktionsverlust [% der jährlichen Produktion]
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	0-1.5	0-0.5

Der Vergleich mit dem Standort Gütsch zeigte, dass sich das Vereisungsklima an einem Jura-Standort stark von einem hochalpinen Standort unterscheidet. Die Vereisung auf dem Gütsch beginnt im Herbst ca. 1 Monat früher und dauert im Frühling ca. 1-2 Monate länger. Die Perioden mit meteorologischer Vereisung sind kürzer als im Jura, dafür dauert die instrumentelle Vereisung im Verhältnis dazu länger

Die Vereisungsbedingungen an den beiden Standorten im Jurabogen, St. Brais und Mont Crosin im Winter 2014/15 sind mit 8.3 bzw. 5.2 Tagen meteorologischer Vereisung und ca. 60 Tagen instrumenteller Vereisung im Winter 2014/15 relativ ähnlich.

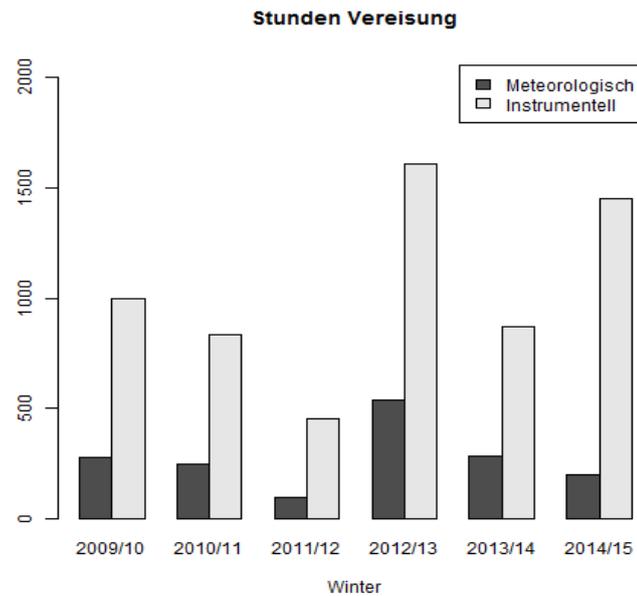


Abb. 3: Anzahl Stunden der meteorologischen und instrumentellen Vereisung während der sechs Messwinter am Windpark St. Brais.

3.2 Windverhältnisse während der Eisbildung

Abbildung 4 zeigt die Abhängigkeit der meteorologischen Vereisung von den lokalen Windbedingungen. Im Messwinter 09/10 fand meteorologische Vereisung hauptsächlich in einem engen Bereich von Windrichtungen aus Nordost und bei Windgeschwindigkeiten zwischen 3 und 5.5 m/s statt. Oberhalb von 12 m/s fand keine meteorologische Vereisung mehr statt. In seltenen Fällen trat meteorologische Vereisung bei Windrichtungen aus Westsüdwest bis Westnordwest auf. Diese Bild wurde in den übrigen Messwintern bestätigt.

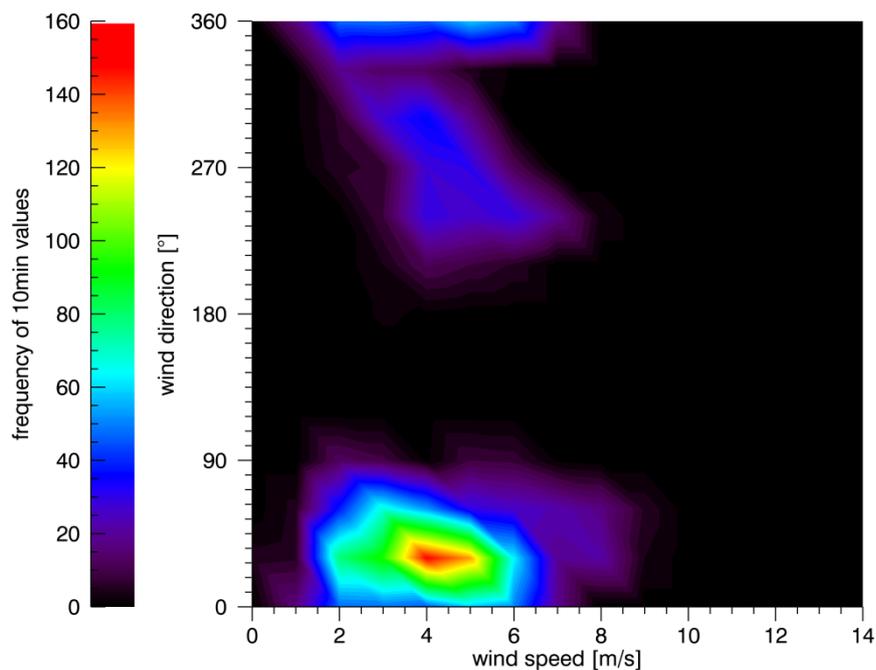


Abb. 4: Häufigkeitsverteilung der meteorologischen Vereisung in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung.

4 Eisdetektion

4.1 Leistungskurve

Die Analyse der von ENERCON serienmässig eingesetzten Eiserkennung der WEA (Vergleich zwischen tatsächlicher Produktion und Produktion gemäss Leistungskurve) zeigte, dass zwischen Dezember 2009 und Mai 2011 die interne ENERCON Eiserkennung basierend auf dem Vergleich der Leistungskurve und der effektiven Stromproduktion in der Lage war, alle Vereisungsereignisse, die beobachtet wurden, zu erkennen. Die Vereisungsereignisse wurden durch die Analyse von Kamerabildern bestimmt.

4.2 Temperatur und relative Feuchte

Auf der Gondel von WEA 1 wurde von ENERCON ein Instrument zur Messung von Temperatur und relativer Feuchte installiert. Diese Messdaten wurden für die beiden Winter 2009/10 und 2010/11 analysiert.

Abbildung 75 zeigt einen Scatter-Plot der Temperatur gegen die relative Feuchte. Es ist zu erkennen, dass bei Temperaturen tiefer als -7°C keine Sättigung mehr erreicht wird. Dies liegt daran, dass gemäss den Richtlinien der World Meteorological Organisation WMO eine Messung der relativen Feuchte immer vom Sättigungsdampfdruck in Bezug auf Wasser ausgehen muss². Dieses Vorgehen ist aber bei Temperaturen unter 0°C nicht korrekt, da der Sättigungsdampfdruck über Eis kleiner ist als über Wasser. Dies führt dazu, dass bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt von einem zu hohen Sättigungsdampfdruck ausgegangen wird und somit eine gesättigte Luft mit einer relativen Feuchte von 100% nicht mehr erreicht werden kann.

In Pink sind in Abbildung 5 diejenigen Werte dargestellt, die während Vereisungsereignissen aufgezeichnet wurden. Im Winter 2009/2010 fand am Standort St. Brais die Vereisung statt bei Temperaturen bis zu -13°C und bei Werten der relativen Feuchte zwischen 90 und 100%.

² WMO/CIMO: Guide to Meteorological Instruments Observation, Chapter 4, Annex 4.A, Item 17

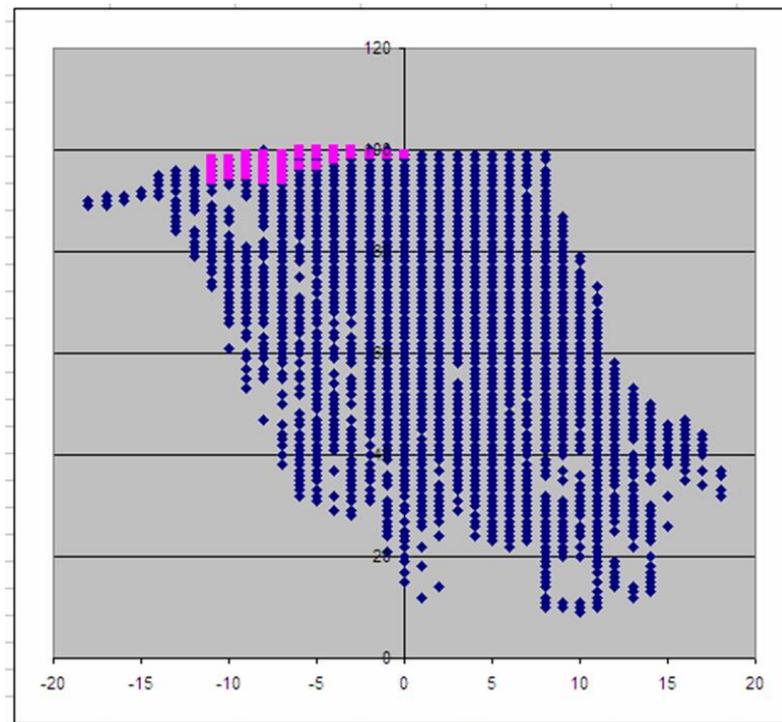


Abb. 5: Blau: Zusammenhang zwischen Temperatur und relativer Feuchte am Standort St. Brais während des Winters 2009/10. Bei Temperaturen unter ca. -7°C wird die Sättigung nicht mehr erreicht. Pink: Werte, die während Vereisungsereignissen aufgezeichnet wurden.

Eine häufig getroffene Annahme besagt, dass Vereisung bei Lufttemperaturen unter dem Gefrierpunkt und relativen Feuchten über 97% stattfindet. Abbildung 6 zeigt in der untersten Reihe Perioden, während welcher diese Bedingungen erfüllt waren.

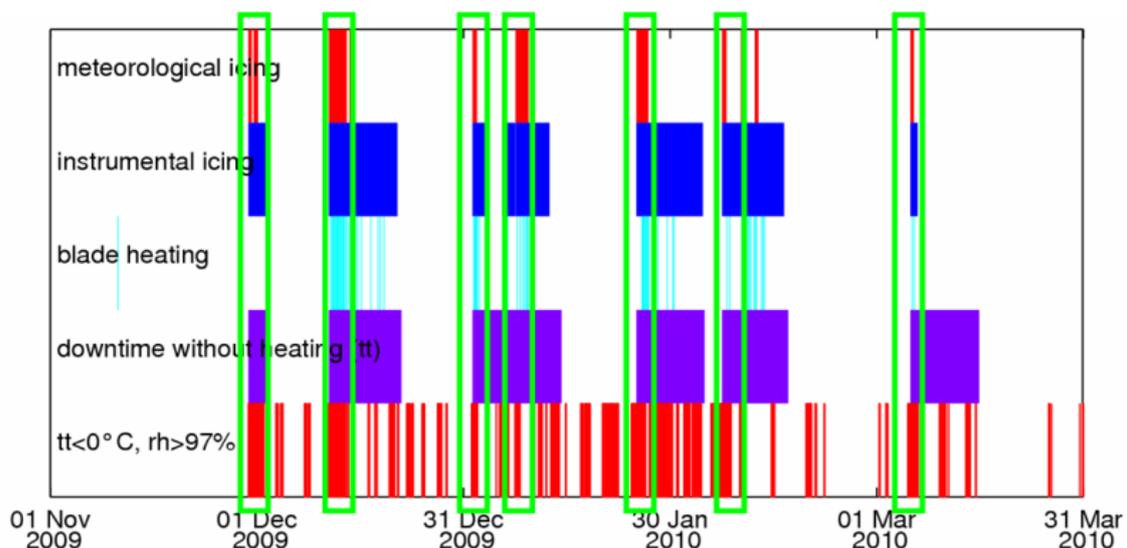


Abb. 6: Perioden während welcher eine Lufttemperatur unter dem Gefrierpunkt und eine relative Feuchte von mehr als 97% vorlagen (unterste Reihe) im Vergleich zur meteorologischen und zur instrumentellen Vereisung. Die grünen Boxen markieren Perioden mit meteorologischer Vereisung.

Es ist deutlich zu erkennen, dass kein Zusammenhang zwischen diesen Perioden und den tatsächlichen Vereisungsereignissen besteht. Die Bedingungen werden in vielen Fällen erfüllt, ohne dass sich Eis bildet. Eine Kombination von Temperatur und Feuchtemessung kann wegen der grossen Wahrscheinlichkeit für „Fehlalarme“ nicht als Eisdetektor verwendet werden.

4.3 MOOG/Insensys Rotor Monitoring System

Die Resultate des Moog/Insensys Rotor Monitoring Systems in Bezug auf Eisdetektion waren grundsätzlich positiv (Abb. 7). Es wurde jedoch auch deutlich, dass ein Einsatz des Systems ohne Zugang auf die Real-Time Betriebsdaten, insbesondere der Pitchdaten der WEA nur bedingt möglich ist. Da diese Daten im Projekt nicht zu Verfügung standen, konnten die Auswertungen mit dem System nicht weitergeführt werden. Inzwischen verreibt MOOG/Insensys das System nicht mehr.

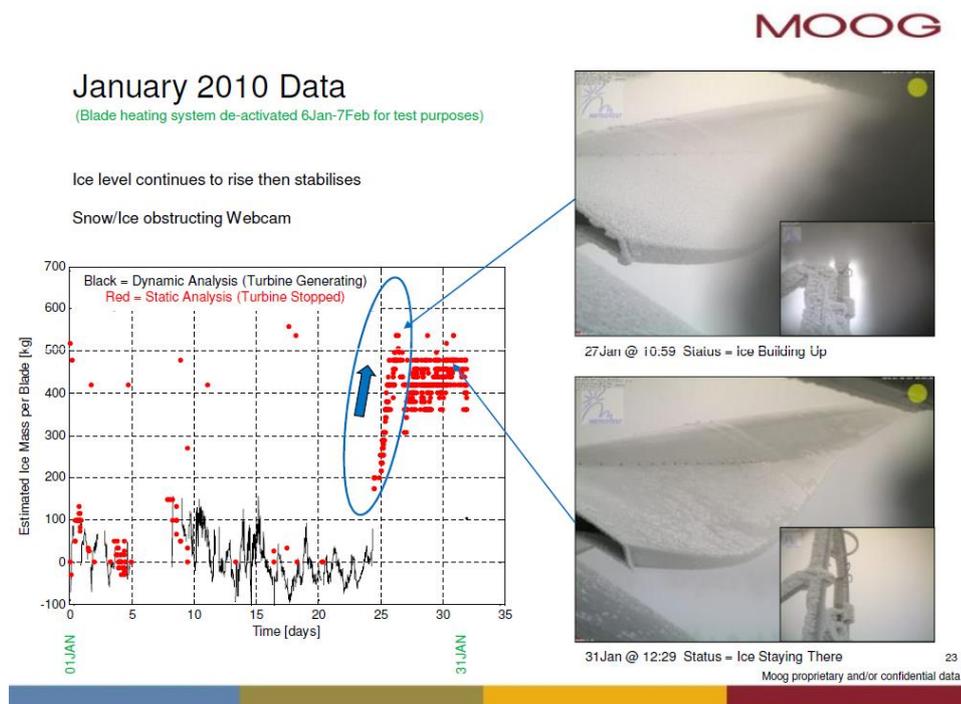


Abb. 7: Eisbildung aufgezeichnet durch das Moog/Insensys Rotor Monitoring System während eines Vereisungsereignisses Ende Januar 2010.

5 Performance der Blattheizung

5.1 Heizen im Stillstand

Die Blattheizung der WEA in St. Brais wurde während des Winters 2009/10 so betrieben, dass nach jeder Eiserkennung die Anlage automatisch abgeschaltet wird. Danach werden die Rotorblätter während drei Stunden beheizt. Nach diesem Enteisungszyklus startet sich die Anlage automatisch wieder.

Insgesamt wurde während des Winters 2009/10 die Blattheizung an beiden WEA 124 Mal aktiviert. Diese aufgewendete Heizleistung entspricht ca. 0.5% des budgetierten Jahresertrags der beiden Anlagen. Die Blattheizung war in erster Linie während Perioden der meteorologischen Vereisung aktiv. Sobald kein Eis mehr gebildet wurde, musste die Blattheizung in der Regel nicht mehr oder nur noch vereinzelt zur Entfernung von Resteis aktiviert werden.

Unter der Annahme, dass eine Anlage ohne Blattheizung während der Perioden der instrumentellen Vereisung stillgestanden wäre, konnte in St. Brais die Stillstandzeit der

Anlage im Vergleich zu einer Anlage ohne Blattheizung um mindestens den Faktor 4 reduziert werden. Dies entspricht einem Mehrertrag von rund 6% im Vergleich zur budgetierten Jahresproduktion der beiden Anlagen. Auf der anderen Seite führte das Abschalten der Anlagen während der Beheizung nach wie vor zu einer nicht unerheblichen Stillstandzeit von ca. 7.5 Tagen pro Anlage oder einem Produktionsverlust von rund 3% im Vergleich zur budgetierten Jahresproduktion.

Bei WEA 1 wurde die Blattheizung vom 6. Januar bis 8. Februar 2010 deaktiviert, WEA 2 wurde normal betrieben. Aus den Resultaten wurde ein Vergleich zwischen der zusätzlich gewonnenen Energie und der eingesetzten Heizenergie erstellt und daraus eine Aussage über das Kosten-Nutzen Verhältnis des eingesetzten Enteisungssystems gemacht. Während der Periode traten 3 Vereisungsereignisse auf. Tabelle 2 zeigt Anfang und Ende der Vereisungsereignisse sowie den während dieser Zeiten produzierten Mehrertrag von WEA 2 im Vergleich zur aufgewendeten Heizleistung. Die Resultate bestätigen den Mehrertrag durch die Blattheizung. Die aufgewendete Heizleistung entspricht für diese Periode in etwa 6.5% der gewonnenen Energie

Tab. 2: Heizleistung im Vergleich zum Produktionsverlust wegen abgeschalteter Blattheizung.

Start Ereignis	Ende Ereignis	Produktion WEA 2 [kWh]
6. Jan. 2010 18:48	7. Jan. 2010 16:30	3'892
25. Jan. 2010 20:01	2. Feb. 2010 18:41	96'608
7. Feb. 2010 11:35	8. Feb. 2010 20:27	2'993
Produktionsverlust WEA 1		103'493
Eingesparte Energie durch deaktivierte Blattheizung		-7'020
Total Produktionsverlust WEA 1		96'473

5.2 Heizen im Betrieb

Im Winter 2010/11 wurde der Betriebsmodus einer Anlage auf Heizen im Betrieb umgestellt. Sobald die Anlage Eis via den Leistungsabfall detektiert, schaltet sich die Heizung ein. Dabei wird ein engeres Toleranzband eingesetzt, als dies bei Heizen im Stillstand der Fall ist. Das Ende der Heizperiode wird ebenfalls über die Leistungskurve sowie über meteorologische Parameter ermittelt. Wird trotz der Beheizung die reguläre Toleranzschwelle im Leistungsabfall überschritten, schaltet sich die Anlage wie bisher aus und heizt im Stillstand weiter.

Die Analyse der Daten zeigte, dass in drei von vier Fällen bei Heizen im Betrieb eine höhere Produktion erzielt werden konnte, als bei Heizen im Stillstand. Der Gewinn lag im Bereich von 10 bis 30%. Die erhöhte Produktion war dabei sowohl von der Windstärke während des Ereignisses als auch von der Dauer des Heizens im Betrieb abhängig. In allen drei Fällen wurden die Rotorblätter eine relativ lange Zeitdauer über die meteorologische Vereisung (Eisbildung) hinaus beheizt. Zum Zeitpunkt des Projektendes werden beide Anlagen im Betriebsmodus Heizen im Betrieb betrieben.

5.3 Präventives Heizen

Während des Winters 2011/12 wurde eine WEA in St. Brais im Betriebsmodus "präventives Heizen" betrieben. Dabei wurde die Anlage während des Betriebs beheizt. Die Steuerung der Heizung erfolgte basierend auf Messwerten von Temperatur und relativer Feuchte. Bei starken Vereisungsereignissen wurde die WEA2 angehalten und im Stillstand beheizt.

Die Datenanalyse zeigte, dass Temperatur und relative Feuchte kein optimaler Trigger für die Auslösung einer präventiven Heizung darstellen. Dieser Trigger führt zu sehr viel unnötig verbrauchter Heizenergie. Dieser Ansatz wurde daher nicht mehr weiter verfolgt.

6 Eiswurf

Sobald sich Eis an den Flügeln einer WEA ansetzt, besteht automatisch das Risiko, dass sich dieses löst und von einer stehenden Anlage herunterfällt oder von einer laufenden Anlage weggeschleudert wird. Dieser so genannte Eisfall oder Eiswurf stellt eine Gefahr für Passanten wie auch für das Servicepersonal dar. Deshalb muss diesem Umstand bei der Planung wie auch beim Betrieb einer WEA unter vereisenden Bedingungen Rechnung getragen werden.

Zwischen 2011 und 2015 wurde eine Eiswurfstudie für die beiden WEA in St. Brais durchgeführt. Im Winter 2014/15 wurde die Studie um einen Standort im Windpark Mont Crosin erweitert

Um einen direkten Vergleich der Resultate mit der Eiswurfstudie vom Gütsch von 2005 bis 2009 zu ermöglichen, wurden die Resultate aus dem Projekt "Alpine Test Site Gütsch" ebenfalls integriert

Es galt herauszufinden wie oft Eiswurf auftrat, wie weit die Stücke geschleudert werden, welche Dimensionen und welches Gewicht sie aufweisen und ob Unterschiede erkennbar sind je nach WEA. Die Geländeuntersuchung wurde durchgeführt, wenn auf den Kamerabildern Eisansatz an den Sensoren oder an den Rotorblättern sichtbar war. Hierfür wurden täglich die aktuellen Bilder heruntergeladen und geprüft.

In allen Feldstudien kumuliert standen eine Datenbasis mit Einträgen von rund 1'000 Eisstücken zu Verfügung. Es konnte dabei nicht zwischen Eisfall (stehende Anlage) und Eiswurf (drehende Anlage) unterschieden werden.

Die Auswertung der Daten von St. Brais (Enercon E-82, 78 m Nabenhöhe) von den Wintern 2012/13 und 2014/15, den Daten vom Gütsch (Enercon E-40, 50 m Nabenhöhe) von 2005 bis 2009 und den Daten von Mont Crosin (Vestas V90, 95 m Nabenhöhe) vom Winter 2014/15 zeigten, dass an allen drei Standorten Eiswurf stattfindet.

Abbildung 8 zeigt eine Häufigkeitsverteilung der Distanz aller gefundenen Eisstücke vom Fuss der WEA in Abhängigkeit der Blattspitzenhöhe der WEA (= Nabenhöhe + Rotorradius) sowie die Summenhäufigkeit. Die Auswertung zeigt ein Maximum der gefundenen Eisstücke im Bereich bis 0.2 bis 0.4 x Blattspitzenhöhe. Im Bereich 0 bis 0.6 x Blattspitzenhöhe wurden rund 75% aller Eisstücke gefunden. Oberhalb von einer Distanz von 1.4 x Blattspitzenhöhe wurden keine Eisstücke mehr gefunden. Daraus kann nicht geschlossen werden, dass oberhalb dieser Distanzen kein Eiswurf mehr auftritt. Da der Auswertung aber eine relativ grosse Datenbasis zugrunde liegt, kann die Wahrscheinlichkeit für grössere Distanzen als klein betrachtet werden.

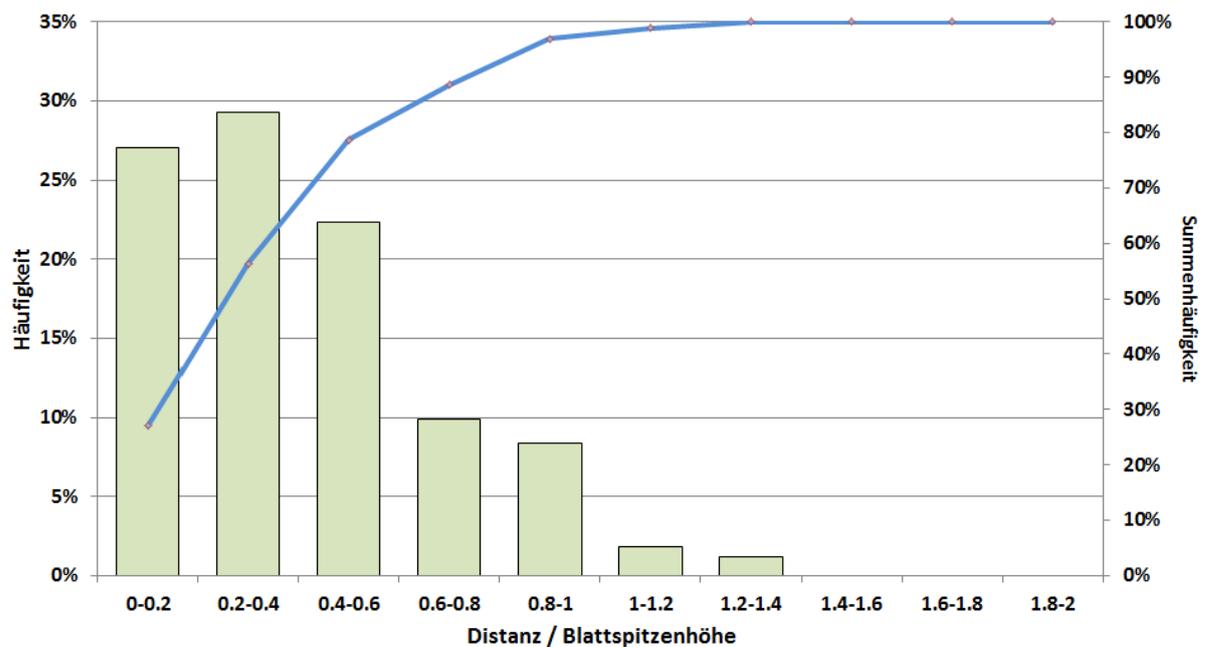


Abb. 8: Häufigkeitsverteilung der gefundenen Eisstücke (Gütsch, St. Brais, Mont Crosin) in Abhängigkeit zur Distanz, normiert mit der Blattspitzenhöhe der jeweiligen Anlage.

Die Analyse hat bis zu einer Distanz der Blattspitzenhöhe einer Anlage an allen drei Standorten eine erhöhte Häufigkeit von Eiswurf gezeigt. Für grössere Distanzen sinkt die beobachtete Häufigkeit deutlich. Bei der Planung und beim Betrieb von Windparks unter vereisenden Bedingungen ist daher das Risiko durch Eiswurf in jedem Fall zu beurteilen und ein entsprechendes Park-Layout und Risikokonzept zu erarbeiten.

Der Gefahrenradius für Eiswurf gemäss der häufig verwendeten Seifert-Formel³ zur Berechnung von Risikobereichen von $1.5 \cdot (\text{Rotordurchmesser} + \text{Nabenhöhe})$ liegt für die drei untersuchten Standorte im Bereich von 1.9 bis 2.0 x Blattspitzenhöhe und wurde während der Feldstudien nie erreicht.

Im Zug der Feldstudien wurden an allen drei Standorten von den Betreibern Massnahmen zur Risikominimierung ergriffen (Warnschilder, Anpassungen Betriebsmodus, Anpassungen Wegführung und Betrieb von Loipen und Winterwanderwegen).

³ Seifert H., Westerhellweg A., Kröning J., 2003, Risk analysis of ice throw from wind turbines, Proceedings of BOREAS VI