



Jahresbericht 01.11.2013

Optimierung des Betriebes von Freileitungen aus meteorologischer Sicht

Einfluss des Wetters auf die Leiterseiltemperatur und die Vereisung

Auftraggeber:

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

Auftragnehmer:

Meteodat GmbH
Technoparkstrasse 1
CH-8005 Zürich
www.meteodat.ch

Autoren:

Urs Steinegger, Meteodat GmbH, steinegger@meteodat.ch
Silke Dierer, Meteotest, silke.dierer@meteodat.ch
Walter Sattinger, Swissgrid, walter.sattinger@swissgrid.ch

BFE-Bereichsleiter:	Dr. Michael Moser
BFE-Programmleiter:	Dr. Michael Moser
BFE-Vertragsnummer:	SI/500713-01

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

Projektziele

Einfluss der Lufttemperatur auf die Leiterseiltemperatur
Einfluss der Strahlung auf die Leiterseiltemperatur
Einfluss der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung auf die Leiterseiltemperatur
Weiterführung der existierenden Messungen an der Lukmanierleitung
Installation von Messgeräten an zwei Messpunkten an der Berninalerleitung
Installation von automatischen Webcams für die Eiserkennung an fünf Standorten
Vereisungsvorhersagen für verschiedene Leitungen
Bestimmung von monatlichen und täglichen Leiterseil-Grenztemperaturen
Lufttemperaturprognosen

Zusammenfassung

Dieser Bericht dokumentiert den Stand der Arbeiten im BFE Forschungsprojekt „Optimierung des Betriebes von Freileitungen aus meteorologischer Sicht“.

Die Datenbank der Meteodat GmbH wurde mit den Daten der drei neuen Messstellen an der Berninalerleitung, den Erweiterungen an der Lukmanierleitung sowie der beiden Messstellen an der Habsburgerleitung aus dem benachbarten Projekt „Temperaturabhängige Kapazitätsausnutzung für Freileitungsnetze“ (TeKaF) ergänzt. Die Meteodat konnte die Integration der Bildinformationen der Web-Kameras in deren Datenbank abschliessen. Damit steht eine optimale Datenbasis für die geplanten Auswertungen bereit.

Die Bestimmung von monatlichen Leiterseil-Grenztemperaturen steht kurz vor dem Abschluss.

Die Modellierungen der Leiterseiltemperatur mit verschiedenen bekannten Modellen sind im Gange.

Das Aufsetzen der Modelle für die Vereisungsprognosen ist erfolgt.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Messstellen

Das Monitoring an Hochspannungs-Leitungen konnte im 2012 massiv ausgebaut werden. Im Jahr 2013 konnten letzte Ergänzungen realisiert werden. Neu werden auch an den drei Stationen Erstfeld, Mittelplatte und Cugnasco die Globalstrahlung gemessen.

Die Unterhaltsarbeiten an den acht Messstellen mit meteorologischen und elektrotechnischen Installationen erweisen sich als recht umfangreich und kostenintensiv. Durch die Meteodat GmbH werden regelmässige Datenkontrollen durchgeführt. Bei Unregelmässigkeiten wird nach Fehlerquellen gesucht, und diese, wo möglich, schnell behoben. Allerdings brauchte die Behebung folgender Schäden den Einsatz von diversen Akteuren und war teilweise sehr zeitintensiv.

Vermutlich durch Eisschlag wurde auf der Lagalb der Temperatur-/Feuchte-Sensor abgebrochen und ein Kabel beschädigt. An der Station Campocologno musste ein Leiterseil-Temperatur-Fühler ausgetauscht werden. Vermutlich lag die Fehlfunktion allerdings bei einem Montagefehler. Diese Schäden konnten im August 2013 behoben werden. Auf der Mittelplatte wurde, ebenfalls durch Eisschlag, der Strahlungsschutz und das Belüftungsrohr beschädigt. Da die Reparatur dieses Standortes nur mit Unterstützung durch einen Helikopter machbar ist, belaufen sich die Kosten für einen Interventions-Einsatz schnell auf mehrere Tausend Franken. Für diese Kosten sind bisher noch keine spezifischen Kostenstellen definiert. Es wird daran gearbeitet, dass ab 2014 für Unterhalt und Reparatur des Monitoring-Systems ein ordentlicher Kredit bei der Swissgrid bereitgestellt wird.

An einer Messstelle an der Habsburgerleitung genügte im letzten Winter die Stromeinspeisung nicht um die Station zu betreiben. Um die Datenausfälle möglichst gering zu halten wurde in den sonnenarmen Monaten Dezember 2012 und Januar 2013 die Messfrequenz deutlich reduziert. Im Mai 2013 konnte als erste Massnahme eine reduziert belastbare Batterie ausgetauscht werden. Zusätzlich soll im November der Windgenerator an den Mastkopf verschoben werden. Diese Massnahme erhöht hoffentlich die Stromeinspeisung, da der Generator dann weniger im Windschatten der Bäume steht.

An der Messstelle in Erstfeld konnte ein neues Windmessgerät in Betrieb genommen werden. Umfangreiche Untersuchungen und Tests durch die Meteodat GmbH haben gezeigt, dass das alte Gerät

falsch konfiguriert war. Die mit diesem Gerät erfasste 10 jährige Datenreihe konnte glücklicherweise korrigiert werden.

Die acht Messstellen werden durch die Meteodat GmbH intensiv betreut. Die erfassten Daten werden täglich in den Datenbanken abgelegt. Die Qualität der Daten wird regelmässig überprüft und Fehlwerte, wo möglich, bereinigt oder Korrekturmassnahmen eingeleitet. Somit wird sichergestellt, dass die Modellierungen welche im vorliegenden Projekt und im Projekt TeKaF laufen auf eine ideale Datenbasis aufbauen können.

Standorte mit Eismonitoring

Das Ziel des Teilprojekts Vereisungsmonitoring ist es, das Wissen über Vereisungshäufigkeit und Eislasten in verschiedenen Regionen der Schweiz zu erweitern. Hierfür wurden fünf Freileitungen in verschiedenen Regionen der Schweiz mit Webcams ausgestattet. Webcams erlauben eine gute Einschätzung der Vereisungssituation, während andere Vereisungsmessungen häufig ohne zusätzliche Bildinformation nicht interpretiert werden können. An einigen Freileitungen sind zusätzlich Zugkraftmessungen und meteorologische Messungen verfügbar, so dass die Kombination der Messungen eine weitere Analyse der Vereisungssituationen erlaubt.

An fünf Standorten wurden von August bis Mitte November 2012 Webcams des Typs Mobotix M12 installiert (Tab. 1). Die Kameras haben eine fixe Brennweite von 43 mm und besitzen zwei Objektive, die sowohl Tag- als auch Nachtaufnahmen ermöglichen. Für die Nachtaufnahmen wird ein Infrarotscheinwerfer eingesetzt. Die Stromversorgung erfolgt durch ein Solarpanel und eine Batterie. Die Kameras wurden mit einem Metaldach versehen, um die Vereisungsgefahr zu minimieren und um die Kamera gegen Beschädigungen z.B. durch Eisschlag zu schützen. Die Bilder wurden zunächst stündlich und später mit halbstündiger Auflösung gespeichert.

Die Kameras blicken jeweils auf den Isolator und die Leitung (Abb. 1). Sie sind unbeheizt, so dass bei ungünstigen Windverhältnissen das Objektiv vereist. Es wurde bei der Installation versucht, die Blickrichtung der Kamera gegen die Windrichtung auszurichten, für die Vereisung erwartet wird.

Die Bilder der Kameras werden auf einem für das Projekt entwickelten Webportal zugänglich gemacht. Auf dem Webportal sind die aktuellen Webcam-Bilder an allen Standorten zu sehen. Zusätzlich können im Archiv auch Webcam-Bilder für vergangene Perioden angeschaut werden. Das Webportal ermöglicht einen schnellen Überblick, ob alle Kameras in Betrieb sind und wo Vereisungsbedingungen herrschen. Zusätzlich kann nachvollzogen werden, ob zu bestimmten Zeiten Vereisungen aufgetreten sind.

Tab. 1 Standorte der Webcams für das Monitoring von Vereisung.

Leitung	Ort	Installation
Bernina	Lagalb	2. August 2012
Bickigen-Bassecourt	Scheltenpass	8. November 2012
Bickigen-Innertkirchen	Chrinde	24. Oktober 2012
Innertkirchen-Ulrichen	Grimsel	25. Oktober 2012
Lukmanier	Mittelplatte	15. November 2012



Abb. 1: Das Kamerabild am Standort Chrinde zeigt beispielhaft die Ausrichtung der Webcams.

Technische Verfügbarkeit der Kameras

Die Kameras haben im Winter 2012/2013 insgesamt zuverlässig Bilder geliefert. Es gab nur wenige und zeitlich begrenzte Perioden, in denen keine Webcam-Bilder gesendet wurden. Die Gründe für Kameraausfälle werden im Folgenden diskutiert.

Es wurden einige Perioden beobachtet, in denen die Webcams keine Bilder lieferten, aber dann selbstständig und ohne weitere Eingriffe wieder in den Betrieb übergingen. Solche Perioden traten z.B. am Standort Grimsel in den Zeiträumen vom 30. November 2012 bis zum 12. Dezember 2012 und vom 6. Februar 2013 bis 13. Februar 2012 auf. Während dieser Perioden war die Lufttemperatur an der SwissMetNet-Station Grimsel Hospiz tief und erreichte Werte von -17°C bzw. -20°C . Während einer ähnlich kalten Periode um den 19. Januar 2013 herum wurden allerdings zuverlässig Bilder geliefert. Aber auch an anderen Standorten scheint es einen Zusammenhang zwischen tiefen Temperaturen und nicht gelieferten Webcam-Bildern zu geben. Dort wo Temperaturmessungen zur Verfügung stehen, wurden die Temperaturbedingungen stichprobenartig untersucht. Die Analyse zeigte, dass für Temperaturen deutlich unter -10°C Schwierigkeiten aufzutreten scheinen.

Die Ursache für die Ausfälle bei tiefen Temperaturen ist nicht klar. Eine These ist, dass die Batteriespannung bei geringen Temperaturen zu gering wird. Ein Logger würde helfen, die Batteriespannung zu überwachen und so zu untersuchen, ob bei Kälte Schwierigkeiten auftreten. Ein Logger könnte zusätzlich helfen, den Verbrauch zu optimieren, indem Router und Kamera nur bei Bedarf eingeschaltet werden. Eine andere mögliche Ursache für die Ausfälle bei tiefen Temperaturen könnten Übertragungsprobleme sein. Dies könnte überprüft und der Datenverlust vermieden werden, indem die Speicherung der Bilder auf der Kamera eingerichtet würde (zusätzliche Speicherkarte).

Die Kameras an den Standorten Lagalb und Chrinde haben sich zeitweise nach unten geneigt, so dass die Kamera nicht mehr auf die Leitung gerichtet war. Am Standort Chrinde ist dies im Anschluss

an ein Vereisungsereignis Ende Oktober kontinuierlich über einen Zeitraum von etwa zwei Tagen geschehen. Am 9. November 2013 wurde die Kamera bereits wieder ausgerichtet und ist seitdem stabil. Am Standort Lagalb dagegen änderte sich die Ausrichtung der Kamera abrupt während eines Schneefallereignisses. Vermutlich lagerte sich Schnee an der Kamera an und das zusätzliche Gewicht führte vermutlich dazu, dass sich die Kamera in der Halterung löste. Die Kamera wurde Anfang August wieder ausgerichtet und ist seitdem stabil. Auch der Blickwinkel der Webcam am Grimselpass hat sich etwas gesenkt. Die Leitung und der Isolator sind aber noch im Bild, so dass eine Auswertung bezüglich Vereisung weiter möglich ist.

Am Standort Chrinde ist die Webcam Mitte Mai 2013 ausgefallen. Ein Standortbesuch Ende Oktober 2013 zeigte, dass die Kamera funktionierte, aber der Router vermutlich durch eine Überspannung beschädigt war. Der Router wurde ausgetauscht. Die Kamera funktionierte für wenige Stunden, bevor sie wieder ausfiel. Die Vermutung ist, dass der Laderegler ersetzt und ein zusätzlicher Überspannungsschutz installiert werden müsste.

Für den Winter 2013/2014 sind ausser der Kamera am Standort Chrinde alle Kameras im Betrieb und korrekt ausgerichtet.

Bildqualität

Vereisungsperioden werden visuell aufgrund der Kamerabilder bestimmt. Die Bildqualität der Tagaufnahmen ist dabei generell gut. In der Regel ist Vereisung auf der Leitung gut zu erkennen. Lediglich bei starker Sonnenstrahlung oder Kontrastproblemen bei weissem Hintergrund können Unsicherheiten bei der Bestimmung von Vereisung auftreten. Insbesondere am Standort Lagalb ist die Bestimmung von Vereisung schwierig.

Die Qualität der Nachtaufnahmen ist insgesamt schlechter als für die Tagaufnahmen und die Unsicherheit bei der Bestimmung von Vereisung ist grösser. Ein Grund hierfür ist, dass während der Nacht die Kameras häufiger vereist sind als am Tag. Am Standort Mittelplatte ist die Qualität der Nachtaufnahmen besonders schlecht, da der Infrarotscheinwerfer bei der Installation beeinträchtigt wurde. Am Standort Mittelplatte ist die Webcam auch am Tag häufig vereist.

Die Vereisung der Kameras ist ein wiederkehrendes Problem bei starken Vereisungsereignissen. Da die Kameras nicht beheizt sind, kann eine Eisschicht, die sich auf der Kamera bildet, nicht künstlich wieder entfernt werden. Da die Kameras auch nicht schwenkbar sind, gibt es an Standorten, in denen Vereisung bei verschiedenen Windrichtungen auftritt, keine Möglichkeit, die Kamera aus dem Wind zu drehen. Im Rahmen eines anderen Projekts wurden Kameras mit Heizplatten ausgestattet, um die Vereisung zu minimieren. Erste Erfahrungswerte werden im Winter 2013/2014 gewonnen werden.

Die Verfügbarkeit der Kamerabilder bezeichnet den Anteil von Kamerabildern, der bezüglich Vereisung ausgewertet wurde. Dieser Anteil ist je nach Standort sehr unterschiedlich (Abb. 2). An den Standorten Lagalb und Chrinde ist die Verfügbarkeit mit 99% bzw. 96% sehr hoch. An den Standorten Grimsel und Schelten ist die Verfügbarkeit mit 79% und 72% schon deutlich geringer. Ursache hierfür ist insbesondere, dass die Kameras regelmässig vereist sind. Am niedrigsten ist die Verfügbarkeit am Standort Mittelplatte, was vor allem damit zusammenhängt, dass die mit der Infrarotkamera aufgenommenen Nachtbilder quasi nicht ausgewertet werden können.

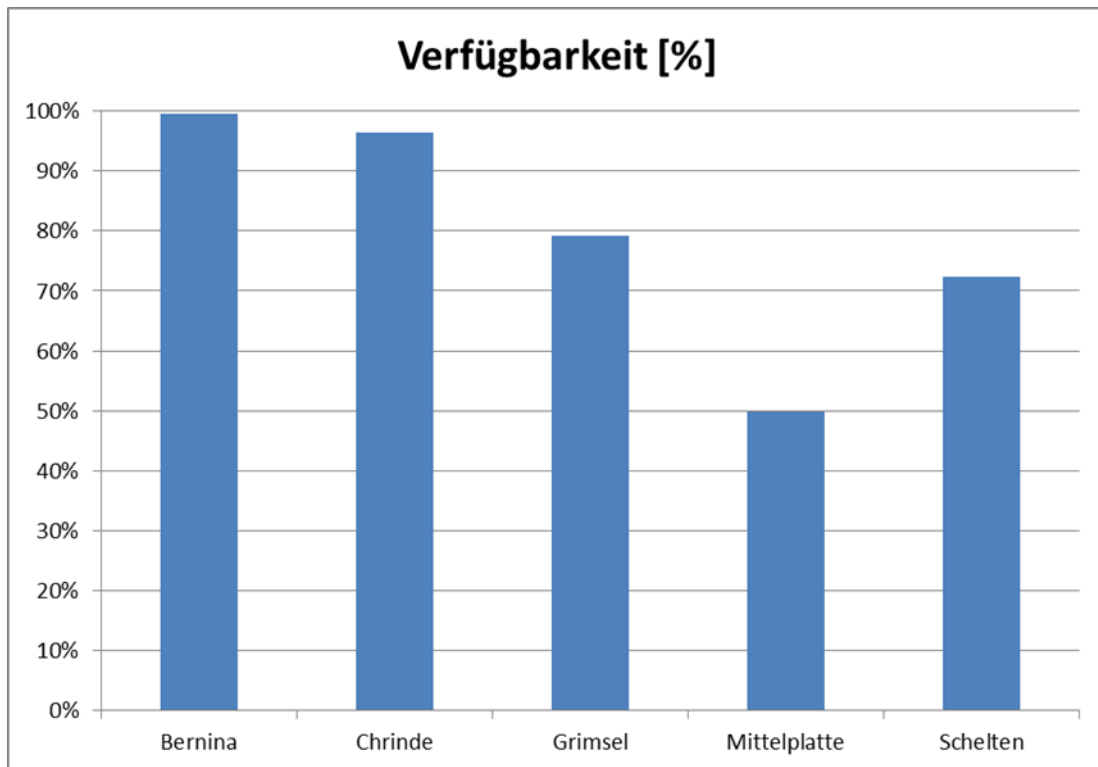


Abb. 2: Verfügbarkeit der Webcam-Bilder in Prozent an den Standorten Lagalb (Bernina), Chrinde, Grimsel, Mittelplatte und Schelten während des Winters 2012/2013.

Beobachtete Vereisung

Die Auswertung der Kamerabilder erfolgte für den Zeitraum ab Installation bis Mitte Mai. Es wurden Tag- und Nachtaufnahmen ausgewertet. Kamerabilder, die nicht klassifiziert werden konnten, weil die Bildqualität zu schlecht war, wurden von der Auswertung ausgeschlossen.

Es wurden die Perioden meteorologischer und instrumenteller Vereisung bestimmt. Meteorologische Vereisung beschreibt den Zeitraum, wenn die meteorologischen Bedingungen eine Zunahme der angelagerten Eismasse erlauben. Instrumentelle Vereisung beschreibt die Periode, wenn Eisanlagerungen an der Leitung vorhanden sind. Wenn die Leitung nicht sichtbar war, weil die Kamera vereist war, wurde von instrumenteller Vereisung ausgegangen. Ob meteorologische Vereisung aufgetreten ist, konnte in solchen Fällen in der Regel nicht bestimmt werden.

Die visuelle Auswertung der Kamerabilder ist mit Unsicherheiten behaftet. Für die meteorologische Vereisung gibt es Schwellwerte, ab denen die Zunahme der Eismasse wahrgenommen werden kann. Damit bleiben Ereignisse mit geringer Eismassenzunahme unerkannt. Insbesondere während Perioden, wenn schon Eis an der Leitung vorhanden war, ist die Bestimmung meteorologischer Vereisung schwierig. Gleichzeitig führt die teilweise beschränkte Bildqualität zu Ungenauigkeiten. Ein Beispiel für eine Situation am Standort Lagalb, in der das Vorhandensein von Vereisung schwer zu beurteilen ist, ist in Abbildung 3 dargestellt. Die visuelle Identifikation von Vereisungsperioden erfasst starke und langandauernde Vereisungsperioden. Kürzere oder schwächere Ereignisse können eventuell unerkannt bleiben.



Abb. 3: Beispiel für eine schwer zu beurteilende Vereisungssituation am Standort Lagalb im März 2013. Das Bild um 18:07 Uhr (oben) scheint keine Vereisung zu zeigen, während das nächste Bild um 18:37 Uhr (unten) am Seil im Vordergrund deutliche Vereisung zu zeigen scheint.

Tab. 2 zeigt die Zeiträume, für die im Winter 2012/2013 die Auswertung der Kamerabilder Vereisungsperioden ergab. Es ist zu beachten, dass der Anfang der Vereisung aufgrund der unterschiedlichen Installationstermine nicht direkt vergleichbar ist.

Tab. 2 Start und Ende der Vereisungsperioden an den Standorten Lagalb, Chrinde, Grimsel, Mittelplatte und Schelten.

Standort	Start der Vereisung	Ende der Vereisung
Lagalb	Ende Dezember 2012	Ende April 2013
Chrinde	Ende Oktober 2012	Ende April 2013
Grimsel	Ende Oktober 2012	Anfang Mai 2013
Mittelplatte	Ende November 2012	Ende April 2013
Scheltenpass	Ende November 2012	Anfang April 2013

In Abbildung 4 und Tab. 3 sind die aus den Kamerabildern bestimmten Häufigkeiten für meteorologische und instrumentelle Vereisung im Winter 2012/2013 dargestellt. Das Ergebnis der Auswertung zeigt, dass sich die Vereisungshäufigkeit an den verschiedenen Standorten stark unterscheidet. Die stärkste Vereisung trat am Standort Grimsel mit 27 Tagen meteorologischer und 70 Tagen instrumen-

teller Vereisung auf. Auch am Standort Chrinde ist Vereisung mit 19 Tagen meteorologischer Vereisung und 54 Tagen instrumenteller Vereisung häufig. Die geringste Vereisungshäufigkeit tritt mit 2 Tagen meteorologischer und etwa 6 Tagen instrumenteller Vereisung am Standort Lagalb auf. Mit welchen Wetterlagen die Vereisung jeweils verbunden ist, muss noch näher untersucht werden.

Die alpinen Standorte zeigen ein Verhältnis von instrumenteller zu meteorologischer Vereisung im Bereich von 2.6 und 2.9. Dieses liegt deutlich unter dem Verhältnis von 5.2, das am Standort Gütsch im Winter 2009/2010 bestimmt wurde. Eine Ausnahme bildet der Standort Mittelplatte, der mit 8.2 ein sehr hohes Verhältnis von instrumenteller zu meteorologischer Vereisung zeigt. Die Ursache hierfür liegt vermutlich darin, dass die Nachtaufnahmen an diesem Standort nicht ausgewertet werden konnten, so dass insbesondere die Dauer meteorologischer Vereisung nur ungenau bestimmt werden konnte. Das Verhältnis von instrumenteller und meteorologischer Vereisung am Standort Scheltenpass stimmt qualitativ gut mit dem am Standort St. Brais im Jura bestimmten Verhältnis mit Werten zwischen 3.4 und 4.7 überein.

Tab. 3 Dauer meteorologischer und instrumenteller Vereisung und Verhältnis von instrumenteller zu meteorologischer Vereisung an den Standorten Lagalb, Chrinde, Grimsel, Mittelplatte und Schelten.

Standort	Meteorologische Vereisung [h]	Instrumentelle Vereisung [h]	Faktor instrumentelle / meteorologische Vereisung
Lagalb	48	136	2.8
Chrinde	455	1305	2.9
Grimsel	648	1686	2.6
Mittelplatte	128	1048	8.2
Scheltenpass	120	510	4.3

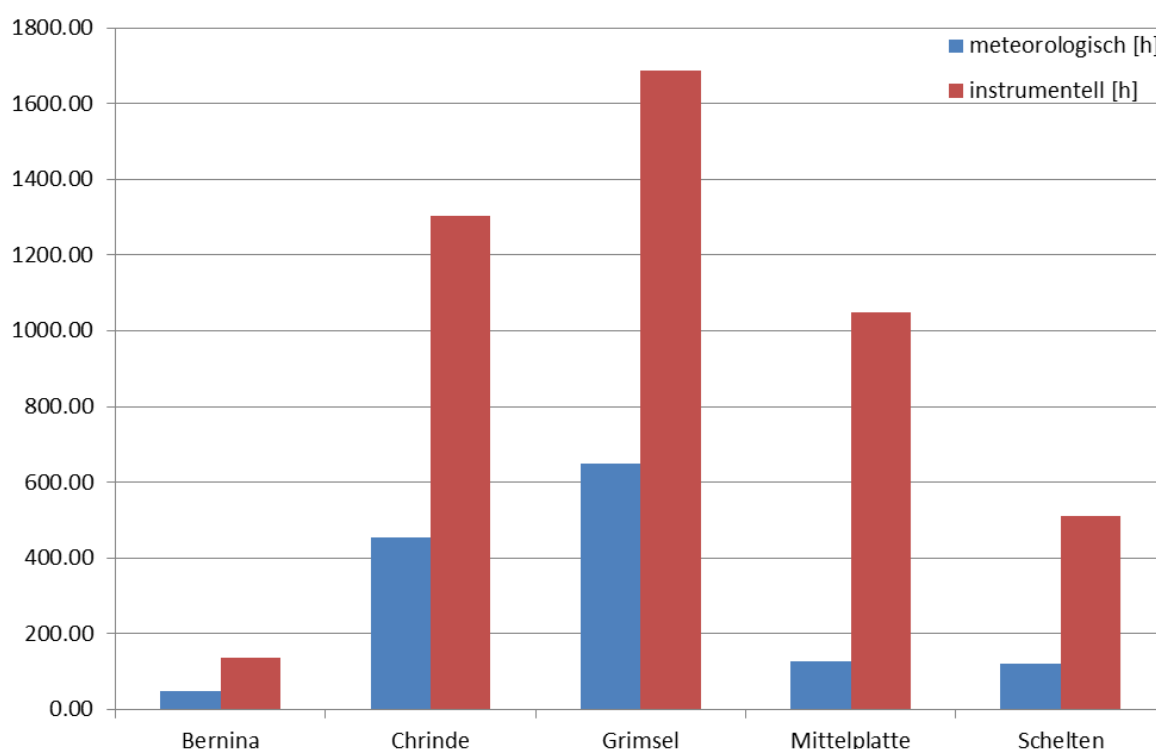


Abb. 4: Stunden mit meteorologischer (blau) und instrumenteller (rot) Vereisung an den Standorten Lagalb (Bernina), Chrinde, Grimsel, Mittelplatte und Schelten für den Winter 2012/2013.

Vorhersagen

Die Meteodat GmbH erstellt für die Swissgrid seit 2005 Temperaturprognosen. Zur Eichung der Prognosen wurden bisher die Messungen von Bodenstationen der MeteoSchweiz verwendet. Analysen der

Prognosequalität und Vergleiche mit den gemessenen Lufttemperaturen, der acht Swissgrid-Messstellen, haben ergeben, dass die Temperaturdaten einen wesentlichen Informationsgewinn ergeben. Neu wird bei der Eichung der Lufttemperaturprognosen auch die Temperatur an den acht Swissgrid-Messstellen berücksichtigt.

Vereisungsvorhersagen

Modellsystem

Für die fünf mit Webcams ausgerüsteten Leitungen (Tab. 1) wurden für den Winter 2012/2013 quasi-operationelle Vereisungsvorhersagen durchgeführt. Die besondere Herausforderung liegt dabei in der Vorhersage des sehr kleinräumigen Phänomens Vereisung im komplexen Gelände der Alpen und des Juras. Das Modellsystem besteht aus dem Wettervorhersagemodell WRF, das Informationen über Wind, Temperatur, Wolken- und Regenwasser liefert, das mit einem Vereisungsalgorithmus gekoppelt wird. Der Vereisungsalgorithmus beschreibt die Anlagerung von Eis an einem frei rotierenden Zylinder, was recht gut die Eisanlagerungen an Freileitungen beschreibt, wo sie sich verdrehen können.

Die Vereisungsvorhersagen wurden mit der in Abbildung 5 dargestellten Konfiguration der Modellgebiete durchgeführt. Die Gitterweite im innersten Modellgebiet beträgt 2 km. Dies ist eine recht hohe horizontale Auflösung. Die Vorhersage mit dem Wettermodell WRF wird einmal täglich basierend auf den GFS-Daten des 00 UTC-Laufs gerechnet und stellt die meteorologischen Eingabedaten für den Vereisungsalgorithmus zur Verfügung. Für die Vereisungsvorhersagen wurden die Ergebnisse an den die Webcam-Position umgebenden Gitterpunkten extrahiert. Welcher Gitterpunkt die meteorologischen Bedingungen am Standort am besten beschreibt oder ob interpolierte Werte verwendet werden sollten, wird zurzeit noch untersucht.

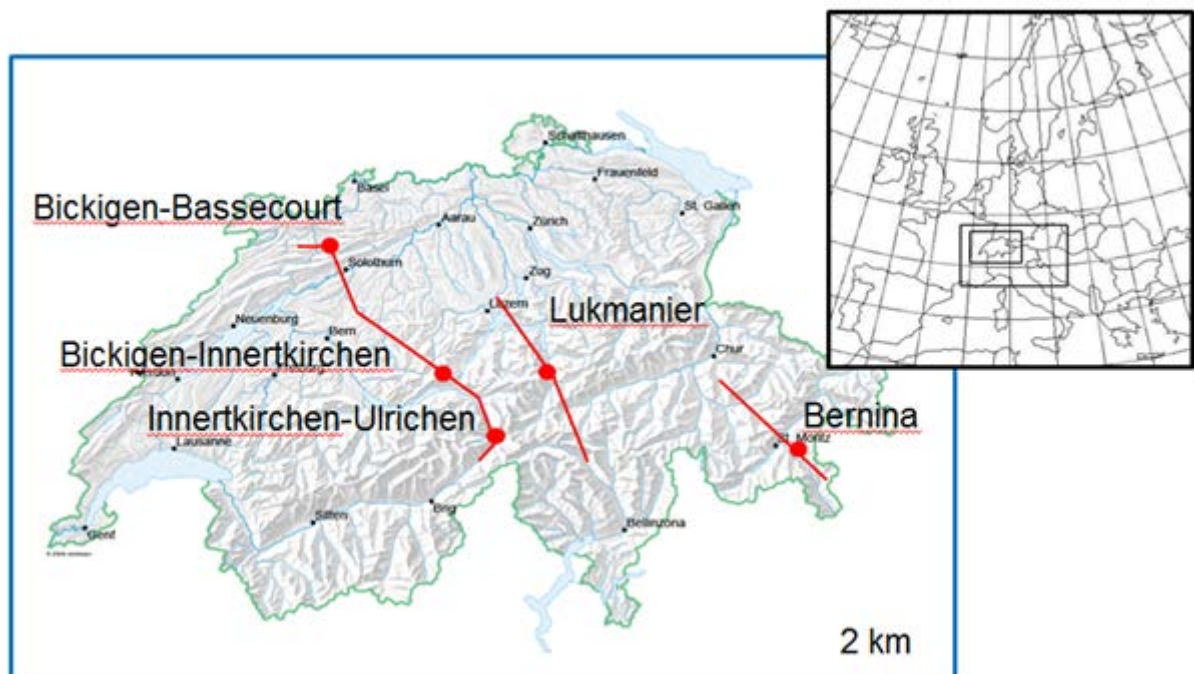


Abb. 5: Konfiguration der Modellgebiete für die Vorhersagen des Wettermodells WRF mit 2 km Gitterweite im innersten Modellgebiet. Die roten Linien markieren den ungefähren Verlauf der Freileitungen und die roten Punkte markieren die ungefähren Standorte der Webcams.

Der Vereisungsalgorithmus beschreibt die Eisanlagerung an einem Zylinder durch Raueis und Klareis. Neben Wolken- und Nebeltröpfchen können auch Nieseltröpfchen zur Eisanlagerung beitragen. Ge-

frierender Niesel tritt selten auf, führt aber aufgrund grosser Tröpfchendurchmesser zu einem starken Wachstum der Eisanlagerung. Der Algorithmus ist an der Eisanlagerung an Stromleitungen orientiert und geht von einem frei rotierenden Zylinder aus, so dass die Eisanlagerung symmetrisch stattfindet. Der Anfangsdurchmesser des Zylinders beträgt 3 cm.

Eingabeparameter für das Modell sind Informationen über Windgeschwindigkeit, Temperatur, Wolken- und Regenwasser aus Modellsimulationen. Zusätzlich wird eine Information über die Teilchenzahl-dichte der Wolkentropfen benötigt. Da hierzu wenige Messungen vorliegen, ist diese Angabe meist sehr unsicher. Für die Studie ist diese Unsicherheit zunächst von untergeordneter Bedeutung, da sie hauptsächlich auf die Masse des angelagerten Eises wirkt und nur sehr schwach auf Häufigkeit und Dauer der Vereisung.

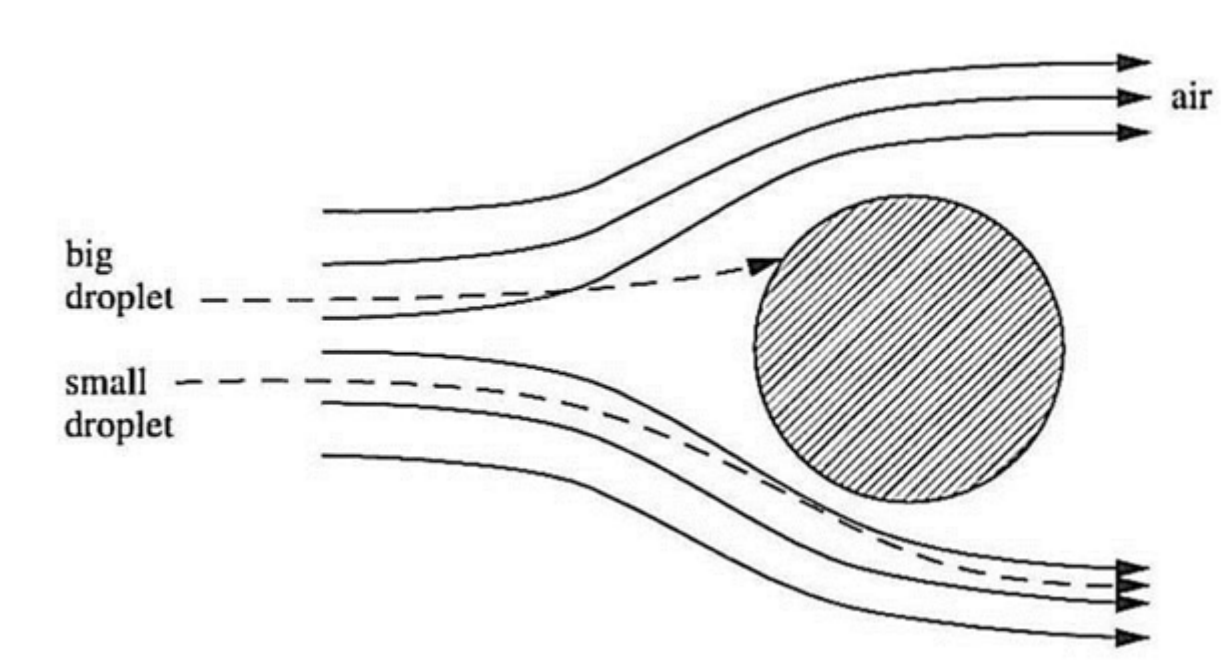


Abb. 6: Schematische Darstellung der Trajektorien von Tröpfchen bei Umströmung des Zylinders.

Der Vereisungsalgorithmus berechnet zunächst den Flüssigwasserfluss zum Zylinderquerschnitt. Von diesem Flüssigwasserfluss trägt nur ein Teil zum Anwachsen der Eislast bei. Dieser Anteil wird durch drei Koeffizienten beschrieben:

- Aufprall-Koeffizient: Beschreibt den Anteil der Teilchen, der auf die Zylinderoberfläche trifft und nicht, wie z.B. kleine Tröpfchen, um den Zylinder herumtransportiert wird (Abb. 6).
- Anhaftungs-Koeffizient: Beschreibt den Anteil der auf der Zylinderoberfläche auftreffenden Teilchen, der an der Oberfläche anhaftet und nicht abprallt.
- Anlagerungs-Koeffizient: Beschreibt den Anteil der auf der Zylinderoberfläche anhaftenden Teilchen, der anfriert und nicht wieder abtropft, weil der Wärmefluss nicht ausreichend gross ist.

Der Anteil der Tröpfchen, der alle drei Kriterien erfüllt, trägt zur Zunahme der Eismasse bei. Der Algorithmus liefert als Ergebnisse eine Zeitreihe der an dem Zylinder angelagerten Eismasse.

Vereisungsvorhersagen Winter 2012/2013

Die Vorhersagen für den Winter 2012/2013 liefen sehr zuverlässig, so dass fast für den gesamten Zeitraum Vorhersagen zur Verfügung stehen. Es wurden erste Vergleiche zwischen der beobachteten und der simulierten Vereisung durchgeführt. Hierfür wurde an allen Standorten zunächst der Gitterpunkt südwestlich der Webcam-Position verwendet.

Abbildung 7 zeigt den Vergleich zwischen den simulierten und beobachteten Perioden meteorologischer und instrumenteller Vereisung. Dargestellt sind für die fünf Kamera-Standorte jeweils die beobachtete meteorologische Vereisung in rot (basierend auf den Bildauswertungen) und die modellierte meteorologische Vereisung in pink. Hellblau sind die beobachteten Perioden mit instrumenteller Vereisung und violett die Perioden mit modellierter instrumenteller Vereisung visualisiert.

Die Zahlenwerte für die Stunden meteorologischer und instrumenteller Vereisung unterscheiden sich aufgrund eines unterschiedlichen Untersuchungszeitraums von denen in Tabelle 3. Die beobachteten Perioden meteorologischer Vereisung werden in den Vorhersagen für die Standorte Chrinde, Grimsel und Schelten im Prinzip gut wiedergegeben. Auch am Standort Mittelplatte stimmen simulierte und beobachtete meteorologische Vereisung prinzipiell überein. Hier ist die Auswertung aufgrund der schlechten Bildqualität in der Nacht allerdings mit grösserer Unsicherheit behaftet. Am Standort Bernina treten grössere Abweichungen auf. Hier werden die meisten Perioden mit meteorologischer Vereisung vom Modell erkannt. Es werden aber auch Phasen mit meteorologischer Vereisung simuliert, in denen keine Vereisung beobachtet wurde.

Für die instrumentelle Vereisung ist an allen Standorten zu erkennen, dass die simulierte instrumentelle Vereisung die beobachtete deutlich überschätzt. Dies beruht vor allem darauf, dass im Vereisungsalgorithmus nur Schmelzen und eine sehr einfache Parametrisierung von Erschütterungen zur Abnahme der Eismasse beitragen. Im Bereich der Alpen spielen aber kurzweilige Strahlung, Sublimation sowie Wind und Erschütterung der Struktur eine wichtige Rolle bei der Abnahme der Eismasse. Dagegen ist der ‚klassische‘ Schmelzvorgang weniger bedeutend. Kurzweilige Strahlung, Sublimation sowie Wind- und Erschütterungseinflüsse sind im Vereisungsalgorithmus aber bisher nicht oder nur stark vereinfacht enthalten. Es wird untersucht, ob der Einfluss von Sublimation und kurzweiliger Einstrahlung in einfacher Form berücksichtigt werden kann.

Abbildung 8 zeigt die Windrosen unter Vereisungsbedingungen. Da nicht an allen Standorten gemessene Windrichtungsdaten vorlagen, wurden für alle Abbildungen die simulierten Windrichtungen verwendet. Die Perioden mit meteorologischer Vereisung wurden jeweils aufgrund der Beobachtungen bzw. aufgrund der simulierten Vereisung bestimmt. Vereisung tritt an den verschiedenen Standorten für sehr unterschiedliche Windrichtungen auf. An den Standorten Chrinde, Grimsel und Mittelplatte herrschen während Vereisungsperioden vor allem nordwestliche Winde. Am Standort Lagalb ist Vereisung überwiegend mit südöstlicher Anströmung verbunden. Am Standort Schelten tritt Vereisung besonders bei östlicher Anströmung auf. Auch am Standort St. Brais im Jura wehen unter Vereisungsbedingungen vorherrschend nordöstliche Winde. Die Windrosen unter Vereisungsbedingungen werden in der Simulation an fast allen Standorten gut reproduziert. Lediglich am Standort Grimsel, wird auch bei Südanströmung Vereisung simuliert, obwohl während den beobachteten Vereisungsperioden kaum südliche Winde auftraten.

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass die Vereisungsvorhersage für den Winter 2012/2013 gute erste Ergebnisse zeigt. Daher wird das Wettervorhersagemodell für den Winter 2013/2014 in gleicher Konfiguration weiterbetrieben. Die Einzelheiten der Ergebnisse werden noch genauer analysiert. So wird untersucht, welcher Gitterpunkt die Bedingungen an den Standorten am besten repräsentiert oder ob interpolierte Werte die beste Lösung liefern. Weiterhin wird untersucht, wie der Abbau von angelagerter Eismasse in alpinen Gebieten im Modell besser dargestellt werden kann.

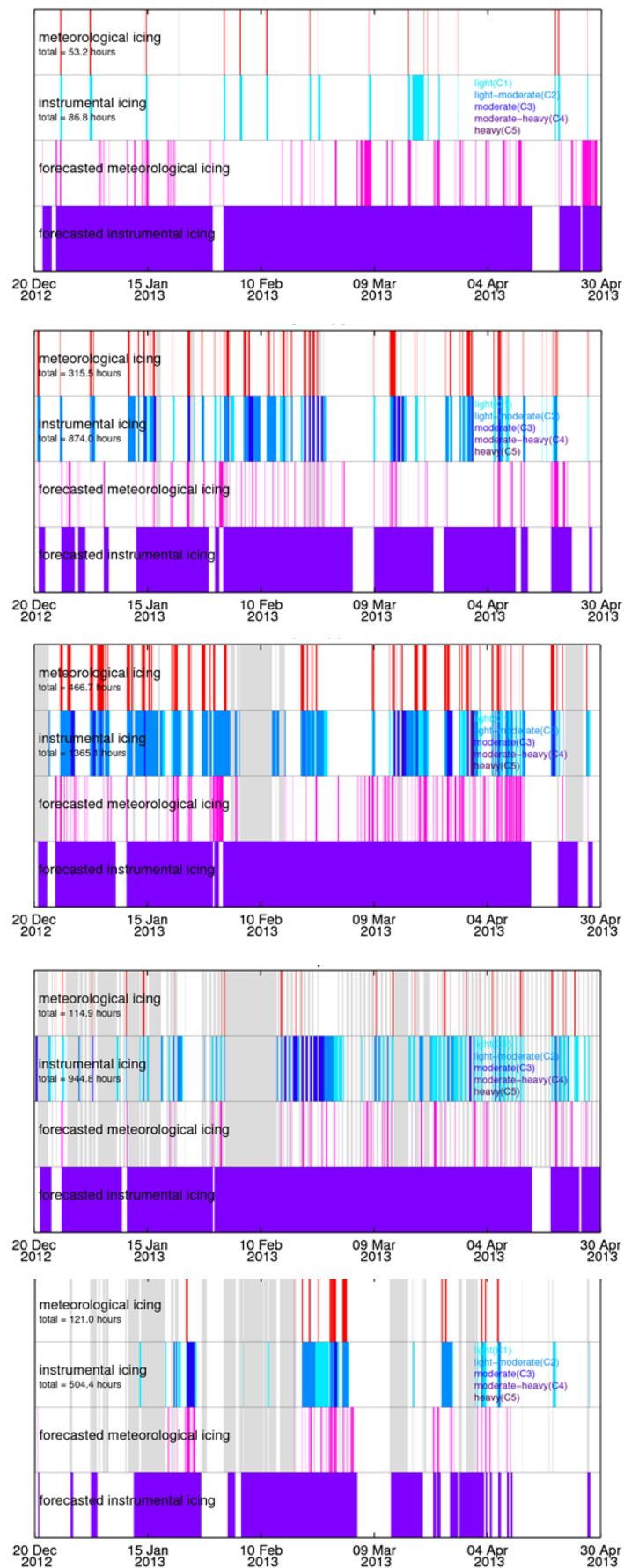


Abb. 7: Vergleich der Perioden meteorologischer und instrumenteller Vereisung in der Beobachtung und in der Vereisungsvorhersage für die Standorte Lagalb (oben), Chrinde (1. Reihe), Grimsel (2. Reihe), Mittelplatte (3. Reihe) und Schelten (unten).

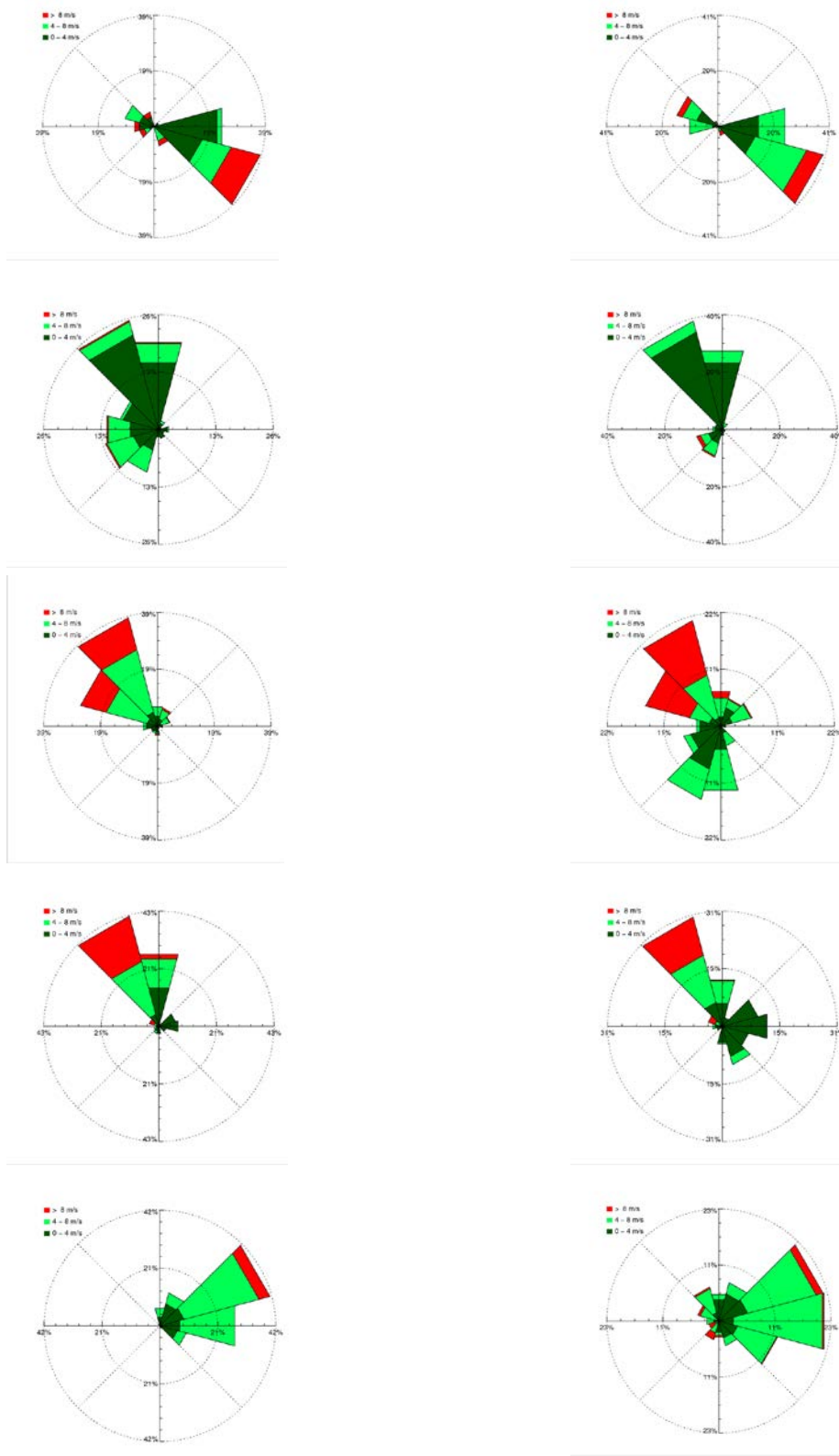


Abb. 8: Beobachtete (links) und simulierte (rechts) Windrose während Perioden mit meteorologischer Vereisung für die Standorte Lagalb (oben), Chrinde (2. Reihe), Grimsel (3. Reihe), Mittelplatte (4. Reihe) und Schelten (unten).

Veröffentlichungen

Basierend auf Gesprächen mit Prof. Franck (TeKaF) und Urs Steinegger, sowie Material aus den beiden Projekten, wurden durch Herrn Vogel diverse Veröffentlichungen realisiert. Im Rahmen seines

BFE-Mandats erschienen im Juni 2013 in ET – Elektrotechnik [1] sowie in der BFE-Zeitschrift „energeia“ [2] jeweils Berichte über die Projekte und deren Ziele.

Grenztemperaturen Leiterseil

Heute werden drei Grenztemperaturen zur Berechnung der maximalen Durchleitungskapazitäten verwendet. Für die Monate November bis März (Winter) beträgt die Grenztemperatur 10 °C, für die Monate April und Oktober (Übergang) 20 °C und von Mai bis September (Sommer) 40 °C. Der Grenzwert für die Übergangsmonate wurde im Jahre 2004 eingeführt, nachdem aufgezeigt werden konnte, dass die früher verwendeten Grenztemperaturen für die Übergangsmonate nicht ausreichend waren [3]. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass im Sommer die Grenztemperatur kaum erreicht wird, hingegen in den übrigen Monaten oft mit einer Überschreitung zu rechnen ist. Aus dem vorliegenden Projekt sollen daher die Grundlagen für eine Verbesserung der Sicherheit sowie eine Optimierung der Netzauslastung bereitgestellt werden. In einem ersten Schritt werden monatliche Grenztemperaturen für die sieben Prognoseregionen der Swissgrid erarbeitet. Im weiteren Verlauf des Projektes sollen dann auch tägliche Limiten bestimmt werden.

Zur Abklärung der optimalen Daten-Grundlage für die Bestimmung der monatlichen Grenztemperaturen wurden Analysen mit langen Zeitreihen von einigen Messstationen durchgeführt. Die Abbildung 9 zeigt ein Resultat für die Station Bern. Die Basis für die Auswertungen ist das Tagesmaximum der Lufttemperatur. Die Berechnung der Überschreitungs-Wahrscheinlichkeiten wurde mit Daten in Tages- und Monatsauflösung durchgeführt. Ausgewertet wurden die Daten von 1944 bis 2013.

Die Auswertung zeigt, dass egal welcher Ansatz für die Bestimmung der monatlichen Grenztemperatur verwendet wird, immer besteht im Sommer Kapazität für höhere Durchleitung im Vergleich zu den aktuell gültigen Limiten. Für die übrigen Monate hingegen müssten die Kapazitäten reduziert werden. Die Berechnung der monatlichen Grenztemperaturen für die sieben Prognoseregionen wird anhand der Daten der automatischen Messstationen der MeteoSchweiz ausgeführt. Damit wird sichergestellt, dass repräsentative Tagesmaxima für die Region auch bei unterschiedlichen Wettersituationen gefunden werden. Der Vergleich von Auswertungen aktueller Daten (2000 – 2013) mit den langen Datenreihen hat ergeben, dass die Daten der letzten rund 14 Jahre eine ausreichende Basis für die Auswertung darstellen.

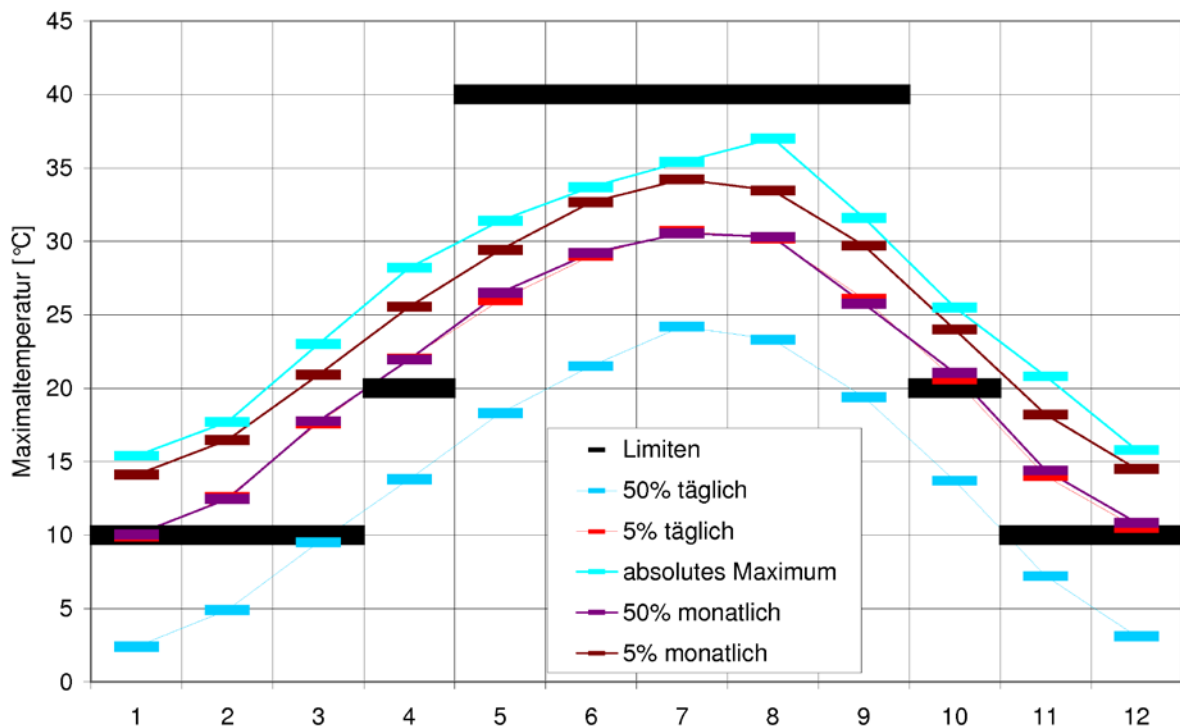


Abb. 9: Darstellung der Referenztemperatur für Grenzwerte, absolute monatliche Temperaturmaxima und Maximal-Temperaturen mit bestimmten Überschreitungswahrscheinlichkeiten für die Station Bern (Datenbasis tägliche Temperatur-Maxima von 1944 bis 2013).

Modellierung der Leiterseil-Temperatur

In der Praxis werden verschiedene Formeln zur Modellierung der Leiterseil-Temperatur verwendet. Die Unterschiede in diesen Formeln sind verglichen mit den Unsicherheiten relativ gering. Die Abbildung 10 zeigt ein Resultat der Modellierungen mit dem IEEE-Modell. Mit einer maximalen Stromdurchleitung von 2500 A und einer resultierenden Seilerwärmung um 59 °C wurde am 7. November ein sehr interessantes Ereignis registriert. In der dargestellten Periode traten auch zwei kurze Zeitabschnitte ohne Stromdurchfluss auf.

Die bisherigen Versuche mit den bekannten Modellen haben durchwegs vergleichbare Stärken und Schwächen offenbart. Besonderes Schwergewicht wird im Projekt auf die erkannten Schwächen bei den meteorologischen Grössen gelegt. Verbesserungsversuche werden bei geringen Windgeschwindigkeiten und bei der Gewichtung des Strahlungseinflusses erarbeitet.

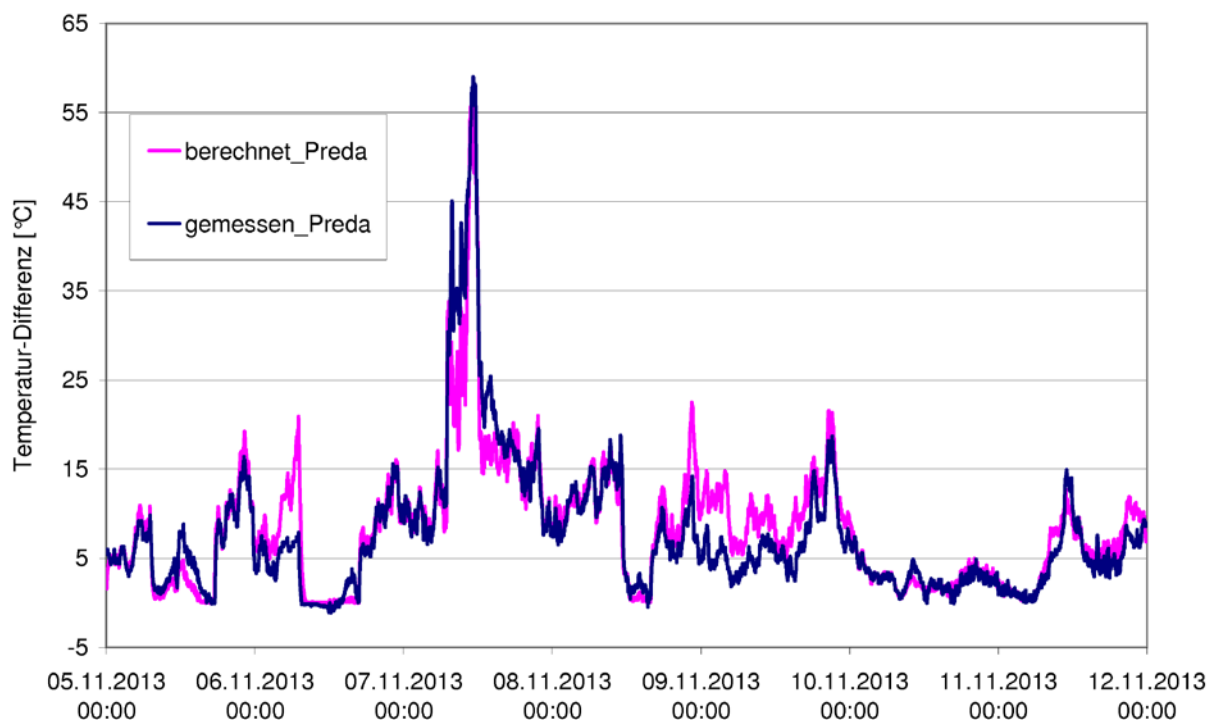


Abb. 10: Verlauf der Temperatur-Differenz zwischen der gemessenen Lufttemperatur und der gemessenen, respektive modellierten Seiltemperatur an der Messstation in La Punt. Neben den meteorologischen Eingangsgrössen wurden die Stromdaten der Leitung Robbia Preda verwendet.

Nationale Zusammenarbeit

Das an der ETH-Zürich und der EMPA laufende Partnerprojekt „TeKaF“ ist auf gutem Wege. Als Mitglied des Steering Committee stellt Walter Sattinger die Zusammenarbeit zwischen den beiden Projekten sicher. Urs Steinegger unterstützt das Projektteam bei Fragen zur Meteorologie und bei der Datenbereitstellung und -auswertung. Die Stromdaten diverser Leitungen werden seit Ende 2012 durch die Swissgrid bereitgestellt und durch die Meteodat GmbH in die Datenbanken integriert.

Am High Voltage Laboratory der ETH profitiert Prof. Franck und der Doktorand Moonjo Kang von den Daten und der Web-Plattform. Die aktuellen Schwerpunkte im TeKaF-Projekt liegen bei der genauen Ergründung der radialen Temperaturverteilung im Leiterseil bei verschiedenen Randbedingungen, sowie der Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der Leiterseile einschliesslich der genauen Modellierung der thermischen und mechanischen Zusammenhänge und Gesetzmässigkeiten.

Die, im Projekt bereitgestellten Daten, dienen als Grundlage für eine Bachelorarbeit [4] an der Hochschule für Technik in Rapperswil. Der Elektrotechnik Student Matthias Hinder wurde durch die Herren Sattinger und Geidl von der Swissgrid betreut. Urs Steinegger stellte die Betreuung bezüglich Daten-

verwendung und meteorologischen Zusammenhängen sicher. Die Arbeit konnte im Juni 2013 erfolgreich abgeschlossen werden. Die Bachelorarbeit von Matthias Hinder sowie auch weitere eigene Detailauswertungen der Swissgrid dienten hauptsächlich der Ermittlung weiterer bisher nicht bekannter oder ungenügend ausgewerteter Zusammenhänge bezüglich zukünftiger Anwendung der Messverfahren und Ergebnisse im Netzbetrieb.

Die SBB planen ein Pilotprojekt zur Messung der Fahrleitungstemperatur und der meteorologischen Einflussgrössen. Erfahrungen aus dem BFE-Projekt können durch Urs Steinegger in dieses Projekt einfließen.

Internationale Zusammenarbeit

Im Rahmen der COST Aktion ES1002

An der Cigré Fachtagung vom 6. Juni 2013 in Olten hat Herr Walter Sattinger in seinem Referat die Notwendigkeit der Intensivierung von Zusammenarbeit und Forschung von allen Akteuren im Netz unterstrichen. Die Gewährleistung der Netzsicherheit stellt heute und in Zukunft eine grosse Herausforderung dar, dessen war man sich unter den Teilnehmern aus diversen Europäischen Ländern einig.

Bewertung 2013 und Ausblick 2014

Das vorliegende Projekt läuft seit April 2012. Die Ziele für 2013 konnten erreicht werden.

Referenzen

- 1 Vogel, B.:2013(1); Wetterfähige Stromleitungen, energieia 01.07.2013
- 2 Vogel, B.: 2013(2), Wetterfähige Stromleitungen, Et – Elektrotechnik, Juni 2013
- 3 Sattinger, W.: 2004, Einführung von Zwischengrenzwerten für maximale Leiterseilbelastungen; Etrans, interner Bericht
- 4 Hinder, M.: 2013; Analyse der direkten Leiterseiltemperaturmessungen auf einer 220- und einer 380-kV-Leitung; Bachelorarbeit, HSR

Anhang

Zu den Messstellen an der Lukmanier-, der Habsburg- und der Bernina-Leitungen wurden Dokumentationen erstellt. Diese können bei Bedarf bei der Meteodat GmbH bezogen werden.