



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 07.12.2015

Optimierung des Betriebes von Freileitungen aus meteorologischer Sicht

**Einfluss des Wetters auf die Leiterseiltemperatur
und die Vereisung**

Datum: 07.12.2015

Ort: Bern

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

Projektpartner:

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

Autoren:

Urs Steinegger, Meteodat GmbH, steinegger@meteodat.ch
René Cattin, Meteotest, rene.cattin@meteotest.ch
Walter Sattinger, Swissgrid, walter.sattinger@swissgrid.ch

BFE-Bereichsleiter:

Dr. Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch

BFE-Programmleiter:

Dr. Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer:

SI/500713-01

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

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Zusammenfassung

Der Fokus dieses Projekts lag auf der Erforschung der Wetterabhängigkeit der Leiterseiltemperatur sowie der Messung und der Vorhersage von Vereisung an Freileitungen. Es konnten drei neue Messstellen an der Berninaleitung errichtet werden. Diese Stationen liefern wertvolle Informationen zu diesem Leiterseilabschnitt mit zeitweise hoher Strombelastung. Die Datenbank der Meteodat GmbH wurde laufend mit den Daten dieser neuen Messstellen, der Lukmanierleitung sowie der beiden Messstellen an der Habsburgleitung ergänzt.

Modellierungen der Leiterseiltemperatur mit verschiedenen bekannten Modellen wurden ausgeführt und verifiziert. Die Arbeiten führten zu vergleichbaren Resultaten und guten Übereinstimmungen mit den Messungen. Unsicherheiten bestehen bei der Festlegung der Emissivität und der Reflektivität der Leiterseile. Prognosen der Leiterseiltemperatur oder der Ampacity (Ampère Capacity) können mit den bekannten Modellen gerechnet werden. Vorschläge für ein Vorgehen bei den meteorologischen Parametern liegen vor. Die Lufttemperaturprognosen der letzten sieben Jahre wurden verifiziert und Vergleiche mit anderen Prognosemodellen angestellt. Die Prognosen weisen ein stabiles hohes Genauigkeitsniveau auf.

Freileitungen in der Schweiz wurden an den fünf Standorten Lagalb, Chrinde, Grimsel, Mittelplatte und Scheltenpass mit Webcams ausgestattet, um das Wissen über Vereisungshäufigkeit und Eislasten an Freileitungen in verschiedenen Regionen der Schweiz zu erweitern. Bei starken Vereisungssereignissen war die Vereisung der Kameras selber ein Problem, da die installierten Kameras nicht beheizt sind. Im Allgemeinen war die Bildqualität aber gut und die Resultate bezüglich Datenverfügbarkeit sehr positiv. Aus den Kamerabildern wurden Perioden meteorologischer und instrumenteller Vereisung bestimmt. Für die fünf betrachteten Leitungen wurden Vereisungsvorhersagen mit dem numerischen Wettermodell WRF durchgeführt. Die Vorhersagen liefen sehr zuverlässig und haben das Potenzial, einen Beitrag zu einer sicheren und effizienten Betriebsführung der Freileitungen zu liefern. Die meteorologische Vereisung wurde in den Vorhersagen für die Standorte Lagalb, Chrinde, Grimsel und Mittelplatte gut wiedergegeben. Es werden jeweils Trefferquoten von mindestens 80% erreicht. An einigen Standorten traten mit etwa 30% zudem recht geringe Fehlalarmquoten auf.

Résumé

Le projet «Optimisation de la gestion de réseau de transport d'électricité du point de vue météorologique» de l'OFEN a mis au point la dépendance de la température des lignes à haute tension des facteurs météorologiques et la mensuration puis la prédiction de la congélation des lignes. Dans le cadre du projet, on a établi trois nouvelles stations situées à la ligne Bernina. La base de données de la Meteodat GmbH a été enrichie avec ces données à haute résolution et elle est actualisée avec toutes les informations acquises. Il est possible d'en tirer profit aussi dans le futur.

Les modèles, qui sont appliqués par les gestionnaires du réseau de transport d'électricité, ont été testés et vérifiés. Les résultats des différents modèles sont comparables. Ils restent des incertitudes concernant les paramètres de l'émissivité et de la réflectivité. Des prévisions de la température de lignes et de l'Ampacity (courant permanent admissible) sont faisables. Concernant les paramètres météorologiques des propositions ont été élaboré.

Cinq sites ont été équipés avec des webcams dans le but d'améliorer le savoir des charges de givre et des fréquences de la formation des givrages. La qualité des images a été adéquate avec un peu plus d'incertitude pendant la nuit. Pendant les événements de forte formation de givrage les caméras ont été affectées également. En général les installations d'essai ont délivré des bons résultats de la disponibilité des données. Les périodes de formation de givrages (givrage météorologique) et les périodes avec givrage (givrage instrumental) ont été déterminés à la base des images. Pendant trois hivers, il était possible d'acquérir des informations manquantes jusqu'à présent. Pour les endroits équipés avec des caméras, des prévisions météorologiques de la formation de givrages ont été calcu-

lées pour deux hivers. Pour la plupart des stations, les résultats du modèle numérique (WRF) étaient satisfaisantes. En revanche, pour l'endroit situé le plus bas, le taux d'erreur était assez haut. Une cause probable pour les estimations fausses est que la température des lignes n'était pas encore prise en compte. Les courants causent des températures des lignes beaucoup plus hautes que la température de l'air, par conséquence l'accumulation de givrage est empêchée malgré les conditions météorologiques favorables. Des prévisions de givrages exactes sont possibles. De plus c'est une possibilité de soutenir la gestion opérationnelle des lignes à haute tension pour un fonctionnement sûre.

Summary

Within the SFOE project „Optimisation of power system management from a meteorological point of view“ the focus had been put on the weather dependence of the line temperature as well as on the measurement and forecast of icing on the power lines. Three new measuring stations had been built on the Bernina line. The database of the Meteodat GmbH had been extended with this high resolution data and is updated regularly with all the collected information. This excellent pool of data remains available for further evaluation.

Modelling and verification of in use models had been performed. The results of different models are comparable. The setting of the emissivity and the reflectivity pose unsolved uncertainties. Forecasts of the line temperature or of the ampacity can be delivered. For the settings of the meteorological parameters suggestions are on hand.

Five sites have been equipped with Web cams with the aim to improve the knowledge about ice loadings and the frequency of icing. The quality of the pictures was appropriate with a little more uncertainties during night. Icing of the camera itself turned out to be a problem during strong icing events. With the installation of a heating surface this problem can be reduced. The test installations in general delivered good results for the data availability. Based on the pictures periods with meteorological and instrumental icing had been detected. During three winters knowledge about icing of power lines in Switzerland so far lacking could be gained. For the spots equipped with Web cams forecasts of icing had been performed for two winters. The results of the used numerical weather model (WRF) for some stations had been reliable. For the lowest spot the error rate was quite high. One likely source of misjudgement is the temperature of the line not yet taken into account. With high currents the line temperature rises high above the air temperature and therefore ice accumulation may be prevented. Forecasts of icing can reach high quality and showed the potential to improve safe operational management of power lines.

Ausgangslage

Im Zentrum der Untersuchungen steht die Frage nach der maximalen Stromdurchleitung auf den vorhandenen Hochspannungsleitungen unter der Bedingung eines sicheren Betriebes sowie nach dem Einfluss der Vereisung auf die Leiterseile.

Die Swissgrid finanziert zur Klärung seit 2003 ein Monitoringsystem an der Lukmanierleitung. Zunächst stand die Suche nach einem Messsystem zur Bestimmung der Leiterseiltemperatur im Fokus. Zusätzlich wurden meteorologische Parameter auf Höhe der Leiterseile erhoben, um Vergleiche zwischen diesen Messungen und solchen an offiziellen meteorologischen Messstellen anstellen zu können. Die Meteodat GmbH betreute das Monitoringsystem und erstellte ein auf die Bedürfnisse der Swissgrid optimiertes Datenspeichersystem mit einem Web-Interface.

Mit dem „Easy Monitoring Overhead Transmission“-System konnte ein verlässliches, robustes System zur Bestimmung der Leiterseiltemperatur gefunden werden. Die hohe Strombelastung an der Berninaleitung weckte das Bedürfnis nach Messdaten an diesen Strängen. Das nun abgeschlossene Forschungsprojekt ermöglichte in Kombination mit der Unterstützung durch die Repower, die Alpiq Enertrans sowie die Swissgrid den Bau und Betrieb von Messstellen und die Analyse und Auswertung vieler Daten.

Zu der Vereisung von Leiterseilen existierten zu Projektbeginn kaum Informationen. Es lagen keine Angaben zur Häufigkeit oder Messstellen an Freileitungen vor.

Ziele der Arbeit

- Bestimmung des Einflusses der Lufttemperatur, der Strahlung sowie des Windes auf die Leiterseiltemperatur.
- Weiterführung der existierenden Messungen an der Lukmanierleitung.
- Installation und Betrieb von Messgeräten an zwei Messpunkten an der Berninaleitung.
- Installation und Betrieb von automatischen Webcams für die Eiserkennung an fünf Standorten.
- Erarbeitung und Erstellung von Vereisungsvorhersagen für verschiedene Leitungen.
- Bestimmung von monatlichen und täglichen Leiterseil-Grenztemperaturen.
- Verifikation der Lufttemperaturprognosen zur optimalen Unterstützung des Betriebes.

Vorgehen

Leiterseiltemperatur

Der Bau neuer Messstellen zur Überwachung der Berninaleitung ermöglicht Leiterseiltemperaturen in hoher zeitlicher Auflösung zu sammeln und mit den meteorologischen Parametern zu vergleichen.

Der Bau von Beobachtungsstationen an neuralgischen Stellen der Hochspannungsleitungen ermöglicht erstmals reelle Situationen von meteorologischer und instrumenteller Vereisung zu bestimmen. Der Vergleich solcher Vereisungsfälle mit Modellresultaten berechnet mit einem hochauflösten Vereisungsmodell ermöglicht die Verifikation und Eichung des Modells.

Die Codierung eines Standards für die Berechnung der Leiterseiltemperatur ermöglicht die Messungen mit den Berechnungen zu vergleichen. Daraus kann die Qualität der Berechnungen und allfällige Schwächen der Methode erkannt werden. Vergleiche der Resultate eines detaillierten Modells mit dem vereinfachten Modell, welches die Swissgrid verwendet, ermöglichen das Erkennen von Sicherheits-relevanten Situationen.

Mit dem Modell zur Berechnung der Leiterseiltemperatur kann unter Vorgabe von gemessenen oder festgelegten Inputgrößen der Einfluss auf die Leiterseil-Temperatur überprüft werden. Situationen mit einer Überschreitung der Grenztemperatur können so erkannt und hinterfragt werden.

Seit 2006 erstellt die Meteodat GmbH Temperaturprognosen für die Swissgrid. Die Qualität der Prognosen sowie der festgelegte Modus werden überprüft um die Anforderungen der Swissgrid optimal abdecken zu können. Dazu werden die Prognosen mit Messdaten und Resultaten von hochauflösten Prognosemodellen verglichen. Bei der Swissgrid wird abgeklärt, ob Ansprüche zur Neugestaltung oder Erweiterung der Temperaturprognosen existieren.

Vereisung

Messung der Vereisung

Fünf Freileitungen in der Schweiz wurden mit Webcams ausgestattet, um das Wissen über Vereisungshäufigkeit und Eislasten an Freileitungen in verschiedenen Regionen der Schweiz zu erweitern (Tab. 1 und Abb. 1). Webcams erlauben eine gute Einschätzung der Vereisungssituation, während andere Methoden der Vereisungsmessung häufig nicht ohne zusätzliche Bildinformation interpretiert werden können. Durch die Beobachtung der Vereisungsverhältnisse über mehrere Winter ergibt sich eine gute Grundlage, um die Vereisungsverhältnisse in verschiedenen Regionen und deren jährliche Variabilität zu beurteilen.

Es wurden Webcams des Typs Mobotix M12 installiert. Die Kameras blicken jeweils auf den Isolator und die Leitung. Sie 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 sollten mit einem Metalldach versehen werden (Abb. 3). Eisschlag hat an einigen Messstellen dazu geführt, dass die Ausrichtung der Kamera verschoben wurde. Durch ein Metalldach kann diese Gefahr und die Gefahr vor Beschädigung durch Eisschlag deutlich reduziert werden. Auf der Mittelplatte und der Chrinde sind diese Optimierungen in Planung. Die Kameras sind unbeheizt und speichern die Bilder mit halbstündiger Auflösung. Auf der Chrinde ist die Montage einer Heizplatte ebenfalls kurz vor der Realisierung.

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

Leitung	Ort	In Betrieb seit	m.ü.M.	Bemerkungen
Robbia – Filisur/La Punt	Lagalb	2. August 2012	2110	mit Meteorologie
Bickigen-Bassecourt	Scheltenpass	8. November 2012	1194	
Bickigen-Innertkirchen	Chrinde	24. Oktober 2012	1744	Heizleitung; ausser Betrieb seit 6.4.2015
Innertkirchen-Ulrichen	Grimsel	25. Oktober 2012	2228	Heizleitung
Mettlen - Lavorgo	Mittelplatte	15. November 2012	2487	mit Meteorologie

Die Kamerabilder sind auf einem für das Projekt entwickelten Webportal zugänglich. Es sind jeweils die aktuellen Webcam-Bilder an allen Standorten zu sehen. Zusätzlich sind im Archiv Webcam-Bilder für vergangene Perioden verfügbar. Das Webportal ermöglicht einen schnellen Überblick, ob alle Kameras in Betrieb sind und wo Vereisungsbedingungen herrschen.

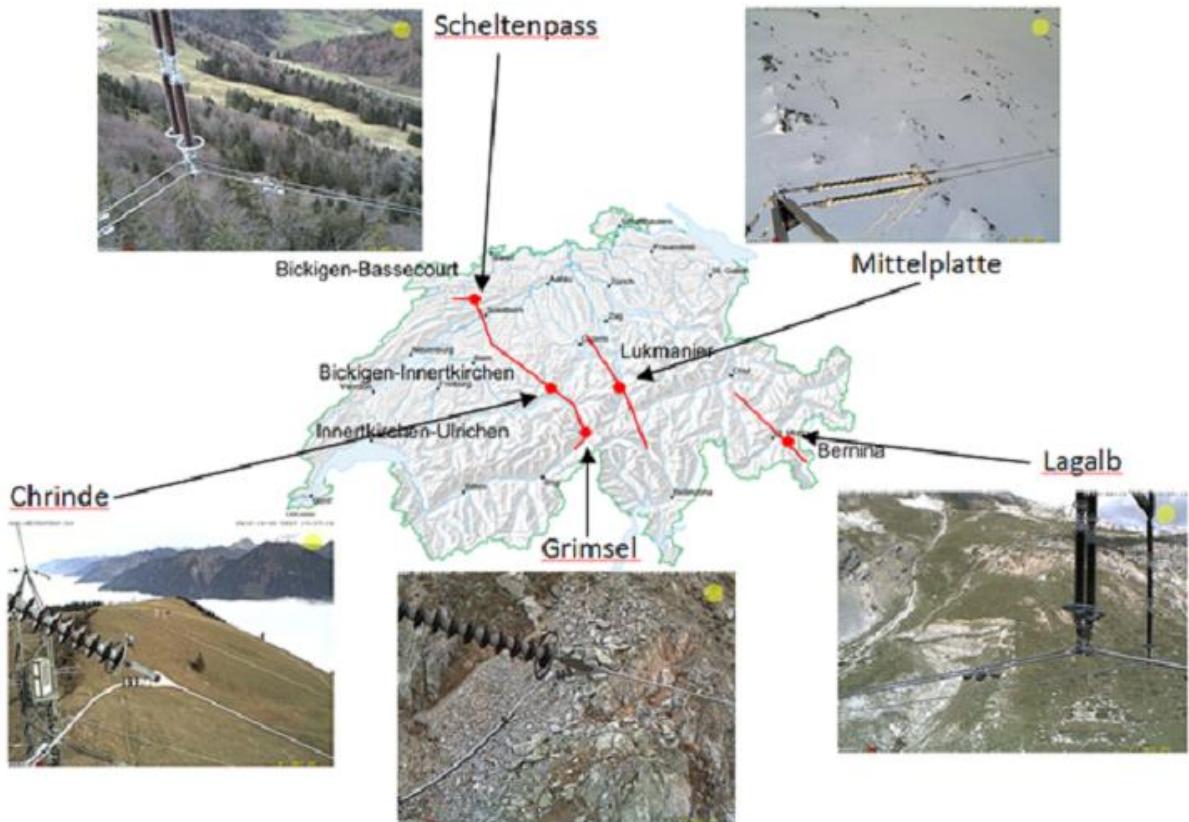


Abb. 1: Untersuchte Freileitungen, Standorte der Webcams und Beispielbilder.

Vereisungsvorhersage

Für die fünf mit Webcams ausgerüsteten Leitungen wurden in den beiden Wintern 2012/2013 und 2013/2014 Vereisungsvorhersagen durchgeführt. Die Vorhersage mit dem Wettermodell WRF wird einmal täglich basierend auf den GFS-Daten des 00 UTC-Laufs gerechnet. Die Vereisungsvorhersagen wurden mit der in Abbildung 3 dargestellten Konfiguration der Modellgebiete durchgeführt. Die Gitterweite im innersten Modellgebiet beträgt 2 km. Die Modellrechnung mit WRF stellt die meteorologischen Eingabedaten Wind, Temperatur, Wolken- und Regenwasser für den Vereisungsalgorithmus zur Verfügung.

Der Vereisungsalgorithmus¹ beschreibt die Anlagerung von Eis an einem frei rotierenden Zylinder wie in Abbildung 2 dargestellt. Ein solcher Prozess ist gut vergleichbar mit Eisanlagerungen an Freileitungen, die sich verdrillen können. 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
- 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.

¹ Makkonen, L., 2000: "Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures", Philosophical Transactions of the royal society, vol. 358, no. 1776, pp. 2913-2939.

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. Es wurde ein initialer Zylinderdurchmesser von 3 cm verwendet, gemäss den Empfehlungen der Richtlinie ISO 12494.²

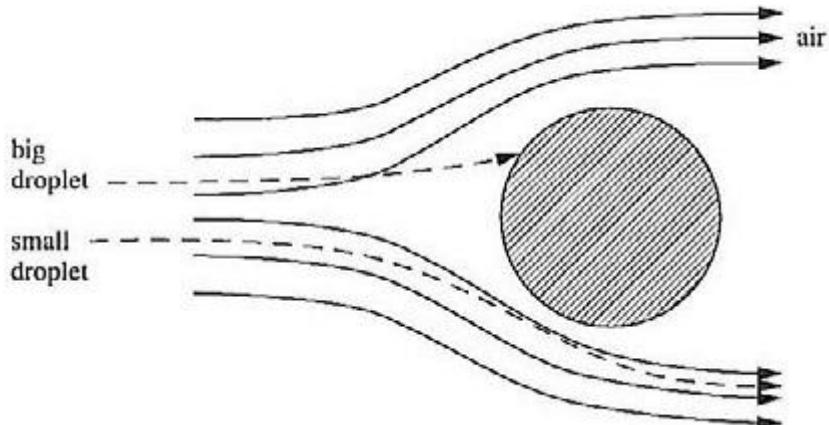


Abb.2: Schematische Darstellung der Trajektorien von Tröpfchen bei Umströmung des Zylinders.

Für die Vereisungsvorhersagen wurden die Ergebnisse an den Gitterpunkten extrahiert, welche die Webcam-Position umgeben. Welcher Gitterpunkt die meteorologischen Bedingungen am Standort am besten beschreibt oder ob interpolierte Werte verwendet werden sollten, wurde anhand der Übereinstimmung mit der gemessenen Windrose unter Vereisungsbedingungen untersucht.

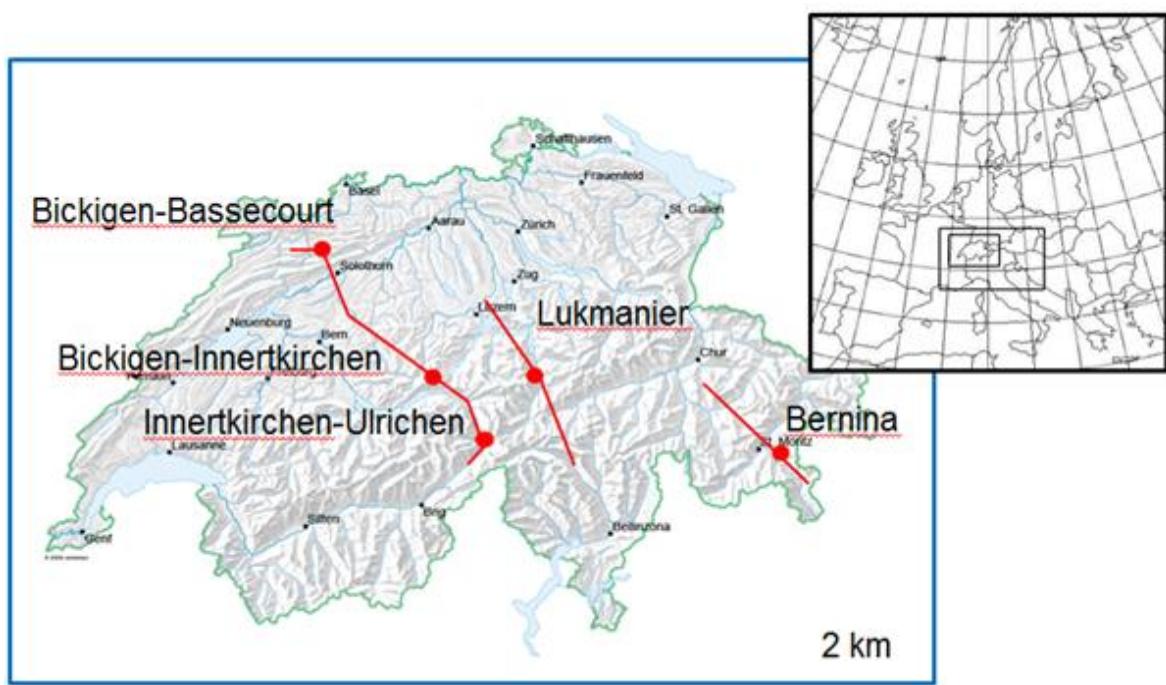


Abb. 3: Konfiguration der Modellgebiete für die Vorhersagen des Wettermodells WRF mit 2 km Gitterweite im innersten Modellgebiet. Die roten Linien markieren den ungefähren Verlauf der Freileitungen und die roten Punkte markieren die ungefähren Standorte der Webcams.

Ab dem Winter 2015/16 besteht die technische Möglichkeit, für die fünf Projektstandorte oder auch andere Standorte in der Schweiz Vereisungsvorhersagen via einen standardisierten Webservice zu beziehen.

²

ISO, ISO 12494:2001 Atmospheric icing on structures, ISO, 2001

Ergebnisse

Messstellen

Das Monitoring an Hochspannungs-Leitungen konnte während der Projektdauer ohne grössere Störungen durchgeführt werden. Die Unterhaltsarbeiten an den acht Messstellen mit meteorologischen und elektrotechnischen Installationen erweisen sich als umfangreich und kostenintensiv. Durch die Meteodat GmbH werden regelmässige Datenkontrollen durchgeführt. Bei Unregelmässigkeiten wird nach Fehlerquellen gesucht, und diese, wo möglich, schnell behoben.

Auch die Funktionalität der fünf Webcams wurde durch die Meteotest regelmässig kontrolliert. Reparaturarbeiten sind auch hier, wegen der abgelegenen Standorte, aufwändig.

Die erfassten Messungen und gespeicherten Bilder stehen für weitere Forschung und Anwendung bereit.

Temperaturvorhersagen

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. Bei der Eichung der Lufttemperaturprognosen wird die Temperatur an den acht Swissgrid-Messstellen nun einbezogen.

Im Sommer 2013 wurden die Prognosen durch graphische Darstellungen ergänzt. Basierend auf einer 35 °C Grenztemperatur und Sicherheitsmargen wurde mit Ampelfunktionen die Entscheidungsfindung der Dispatcher betreffend Durchleitungserhöhungen unterstützt. Die Abbildung 6 zeigt ein Beispiel mit hohen Temperaturprognosen für die Tallagen. Aus der Tabelle 3.1 und 3.2 sind die Nennströme der Durchleitung für zwei konkrete Leitungen gelistet. Die Schweiz ist gemäss den Bedürfnissen der Swissgrid in sieben Prognoseregionen eingeteilt. Die Verifikation der Prognosen bescheinigt eine hohe Qualität für die fünf Vorhersagetage. Selbst in den Regionen mit ausgeprägten Föhnsituationen, welche schwierig vorherzusagen sind, ist der Unterschied zwischen gemessenen Tagesmaxima und Prognosen klein. Die Abbildung 5 zeigt ein Histogramm für die Region „Nord_Reuss“. Diese Region umfasst die Föhngebiete von Château d’Oex über das Reusstal bis zum oberen Rheintal. Die Auswertung der Tagesdaten der letzten sieben Jahre bescheinigt ein konstantes hohes Niveau der Prognosequalität. Bei speziellen Wettersituationen können aber grössere Abweichungen nicht ausgeschlossen werden. Die Abbildung 4 zeigt die Beziehung zwischen den Prognosen und den Messungen. 85 % der Prognosen weichen weniger als 3 °C von den Messungen ab.

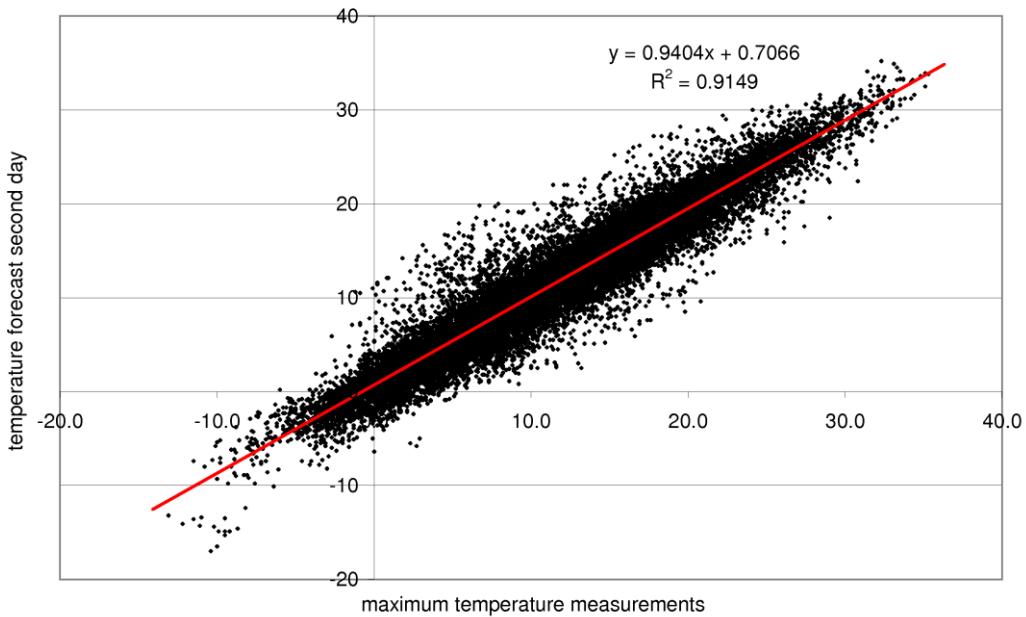


Abb. 4: Vergleich der maximalen Tageswerte [$^{\circ}\text{C}$] der Temperaturprognosen für den 2. Prognosetag mit den Messungen für die Region Nord_Reuss (Periode August 2006 bis Dezember 2013).

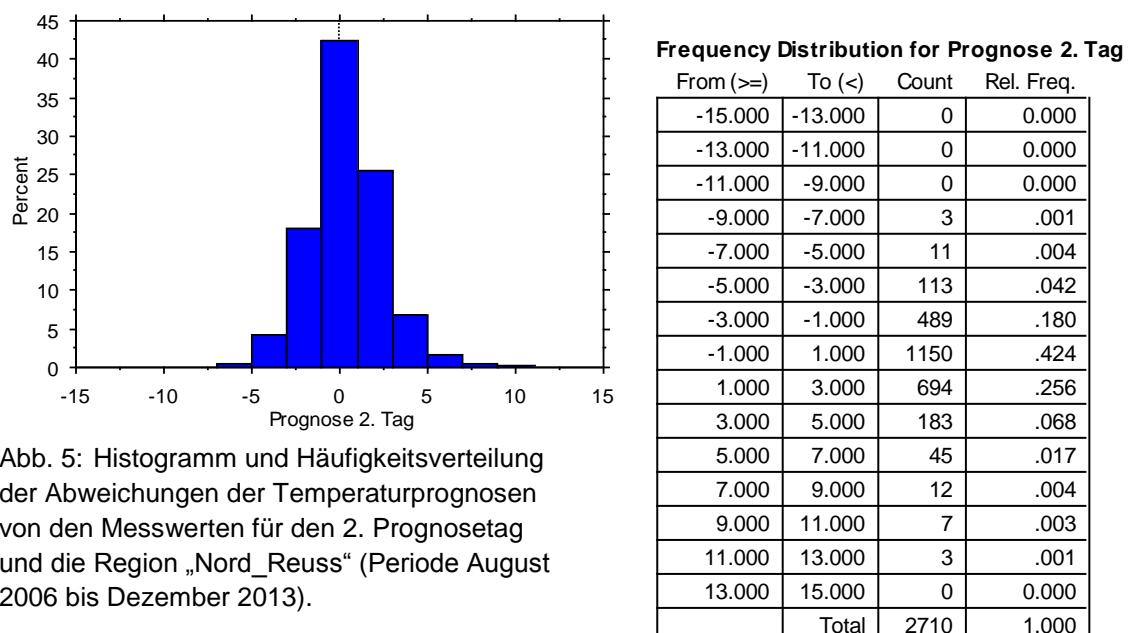


Abb. 5: Histogramm und Häufigkeitsverteilung der Abweichungen der Temperaturprognosen von den Messwerten für den 2. Prognosetag und die Region „Nord_Reuss“ (Periode August 2006 bis Dezember 2013).

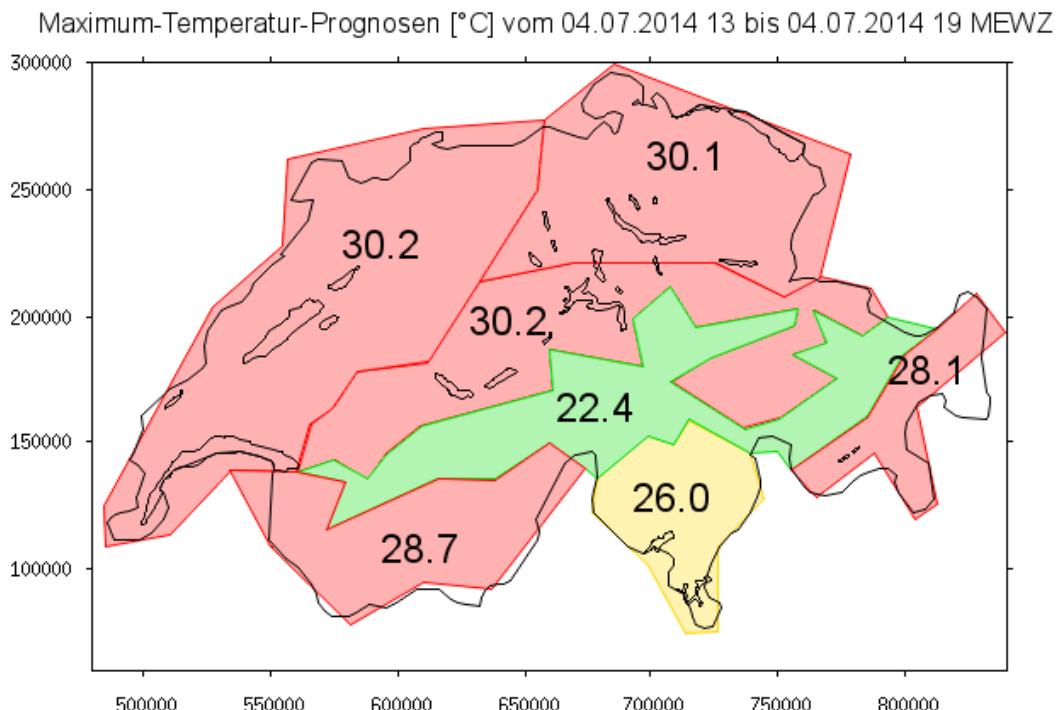


Abb. 6: Beispiel einer graphischen Darstellung von Maximum-Temperaturprognosen. Erstellt durch die Meteodat GmbH für die Swissgrid für den Pilotversuch mit einer 35 °C Sommerlimite (rot: keine Erhöhung des Nennstroms; grün: Erhöhung möglich; gelb: Erhöhung eingeschränkt möglich).

Eismonitoring

Technische Verfügbarkeit der Kameras und Bildqualität

Die Datenverfügbarkeit beschreibt den Anteil der Kamerabilder, die für die Auswertung der Vereisungsbedingungen zur Verfügung stehen. Die Verfügbarkeit war reduziert, wenn die Kamerabilder nicht vorhanden sind oder die Bildqualität zu schlecht war, um die Vereisungsbedingungen zu beurteilen. Die Bildqualität der Tagaufnahmen war dabei generell gut. In der Regel war Vereisung auf der Leitung gut zu erkennen. Lediglich bei starker Sonnenstrahlung oder Kontrastproblemen bei weissem Hintergrund traten Unsicherheiten bei der Bestimmung von Vereisung auf.

Die Qualität der Nachtaufnahmen war insgesamt schlechter als für Tagaufnahmen und die Unsicherheit bei der Bestimmung von Vereisung war grösser. Gründe hierfür waren, dass während der Nacht die Kameras häufiger vereist waren als am Tag und dass die Reflexionen des Scheinwerfers zusätzliche Unsicherheiten erzeugten. Die Datenverfügbarkeiten der drei Messwinter 2012/2013, 2013/2014 und 2014/15 sind für die Kameras Lagalb, Chrinde, Grimsel, Mittelplatte und Scheltenpass in Abbildung 7 dargestellt.

Am Standort Lagalb konnte die beste Datenverfügbarkeit erzielt werden. Am Standort Chrinde war die Verfügbarkeit ebenfalls sehr hoch, im Winter 2013/14 führte ein Kamera- und Routerausfall zu einer reduzierten Verfügbarkeit. Am Standort Scheltenpass konnte die Verfügbarkeit während des Projekts stark gesteigert werden. Am Standort Grimsel war die Verfügbarkeit wegen der häufigen und starken Vereisung etwas reduziert. Der Standort Mittelplatte wies in den ersten beiden Wintern eine sehr niedrige Verfügbarkeit auf. Dies lag daran, dass an diesem Standort wegen des beschädigten Infrarotscheinwerfers die Nachtbilder nicht ausgewertet werden konnten. Im Winter 2014/15 konnte die Verfügbarkeit deutlich gesteigert werden.

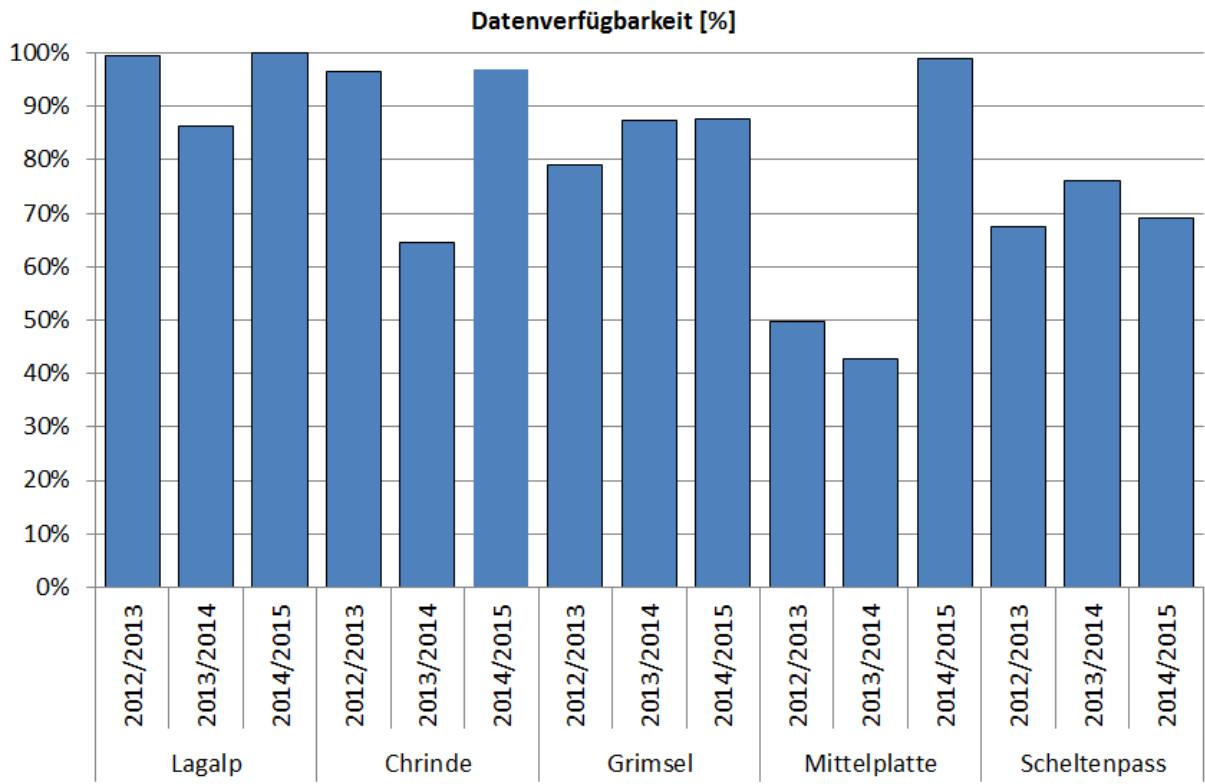


Abb. 7: Verfügbarkeit der Kamerabilder während der drei Messwinter.

Bei starken Vereisungssereignissen war die Vereisung der Kameras selber ein Problem, da die installierten Kameras nicht beheizt sind. Im Rahmen eines anderen Projekts wurden Kameras mit Heizplatten ausgestattet, um die Vereisung zu minimieren (Abb. 8). Die Erfahrungen zeigten, dass die Heizplatte auch mit einer autonomen Stromversorgung (Solarpanels) zuverlässig betrieben werden kann. Ein permanenter Betrieb der Heizung ist allerdings aufgrund der hohen Leistungsaufnahme nicht möglich. Daher wird mit einem Bilderkennungsverfahren geprüft, ob Vereisung der Kamera vorliegt. Falls dies der Fall ist, wird eine Warnung gesendet und die Heizplatte wird manuell aktiviert. Dieses Vorgehen hat sich im operationellen Betrieb bewährt und stellt somit eine Option für eine signifikante Verbesserung von Bildqualität und Verfügbarkeit dar.

Eine zweite Herausforderung bestand im Betrieb bei tiefen Temperaturen. Es wurden verschiedene Fälle beobachtet, in denen die Webcams keine Bilder lieferten und danach aber selbstständig und ohne weitere Eingriffe wieder in den Betrieb übergingen. Erste Untersuchungen zeigten, dass diese Perioden vermutlich im Zusammenhang mit Temperaturen deutlich unter -10 °C stehen. Als Ursache für die Ausfälle bei den sehr tiefen Temperaturen wurde vermutet, dass die Batteriespannung aufgrund der Kälte zu gering sein könnte.

Unter der Berücksichtigung der im Projekt zu Verfügung stehenden Mittel für diesen Testbetrieb im Sinne einer Machbarkeitsstudie waren die erreichten Resultate bezüglich Datenverfügbarkeit sehr positiv. Das Fehlen von Mitteln für den Unterhalt der Mess- und Beobachtungsstationen könnte jedoch nach Abschluss des vorliegenden Projektes zu einem schlechenden Zerfall der Messinfrastruktur führen.

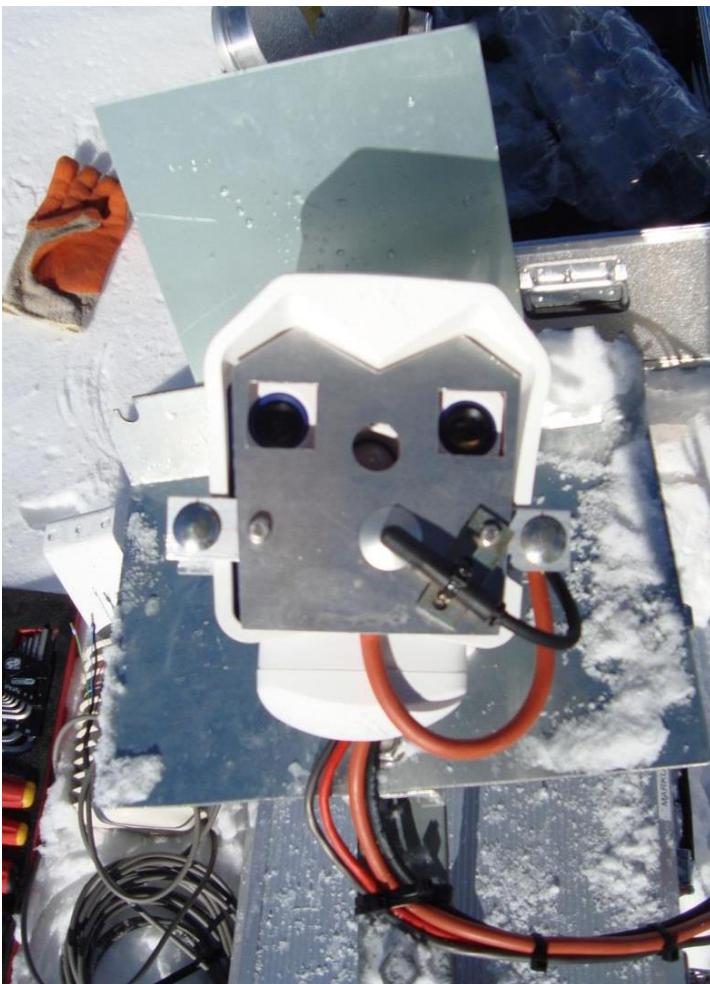


Abb. 8: Beispiel einer Webcam des Typs Mobotix M12 mit Schutzdach und installierter Heizplatte.

Die Livebilder von den Kameraeinstellungen werden bei der Swissgrid im operationellen Betrieb regelmässig eingesetzt für das Monitoring der Leitungen bei Vereisung. Die BKW hat basierend auf den Bildern während der Projektdauer Leitungen ausser Betrieb genommen und Heizzyklen zur Enteisung ausgeführt, in Situationen als die eigenen dafür zuständigen Messsysteme gestört waren.

Vereisungshäufigkeit

Die Auswertung der Kamerabilder der fünf Standorte erfolgte für alle drei Messwinter. Es wurden Tag- und Nachtaufnahmen manuell ausgewertet. Kamerabilder, die fehlten und solche, deren Bildqualität schlecht war, wurden von der Auswertung ausgeschlossen. Die visuelle Identifikation von Vereisungsperioden erfasst starke und langandauernde Vereisungsperioden. Kürzere oder schwächere Ereignisse bleiben eventuell unerkannt.

Aus den Kamerabildern wurden Perioden meteorologischer und instrumenteller Vereisung bestimmt (Abb. 9). Meteorologische Vereisung beschreibt den Zeitraum, wenn die meteorologischen Bedingungen eine Zunahme der angelagerten Eismasse erlauben. Instrumentelle Vereisung beschreibt die Zeitspanne, während der Eisablagerungen an der Leitung vorhanden sind. Wenn die Kamera vereist war, wurde von instrumenteller Vereisung ausgegangen. Ob meteorologische Vereisung aufgetreten ist, konnte in solchen Fällen in der Regel nicht bestimmt werden. Ganz generell erwies sich die Bestimmung der meteorologischen Vereisung an den Leiterseilen als sehr schwierig und ungenau.

Abbildung 10 zeigt die Anzahl Stunden mit meteorologischer und instrumenteller Vereisung an allen fünf Standorten für alle drei Messwinter auf. Der Standort Grimsel weist die mit Abstand häufigste instrumentelle Vereisung auf. Die Werte weisen während der drei Messwinter eine geringe Variabilität auf. Ebenfalls stark von Vereisung betroffen war der Standort Chrinde. Die niedrige Häufigkeit im Winter 2013/14 liegt an der geringen Datenverfügbarkeit während dieses Winters. Am Standort Mittelplat-

te kann davon ausgegangen werden, dass ebenfalls häufig Vereisung auftritt. Diese Aussage ist aber wegen der schlechten Verfügbarkeit der Kamerabilder mit einer grossen Unsicherheit behaftet. An den Standorten Lagalb und Scheltenpass tritt die Vereisung deutlich weniger oft auf.

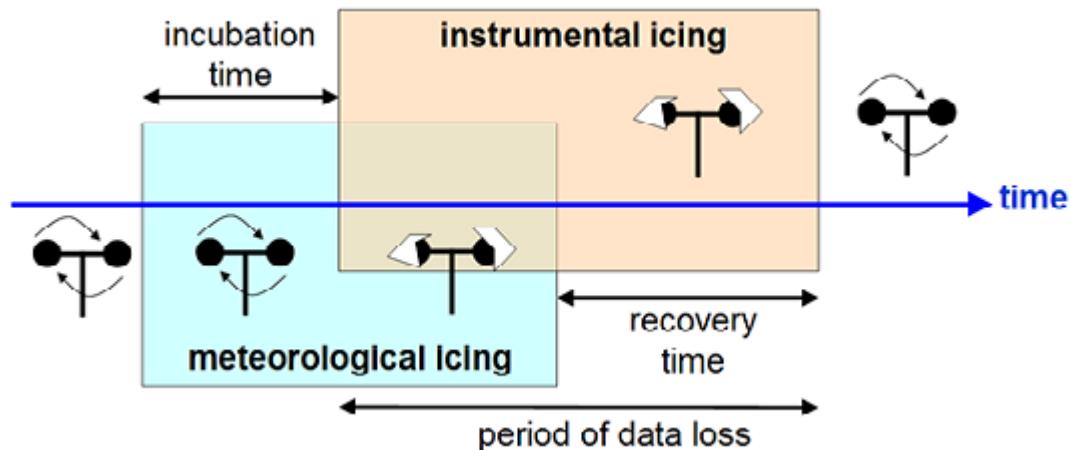


Abb. 9: Schematische Darstellung von meteorologischer und instrumenteller Vereisung.

Abbildung 11 zeigt die instrumentelle Vereisung aufgeschlüsselt nach fünf Vereisungsstärken. Für die Vereisungsstärke zeigt sich eine sehr grosse Variabilität zwischen den einzelnen Messwintern.

Die Bestimmung der Vereisungshäufigkeit aus den Kamerabildern ist mit einer relativ grossen Unsicherheit behaftet, wegen der technischen Verfügbarkeit, der Bildqualität und damit verbunden mit der schwierigen manuellen Klassifikation der Bilder unter Vereisungsbedingungen. Nichtsdestotrotz konnten in diesem Projekt während dreier Messwinter wichtige Erkenntnisse zu der Vereisungshäufigkeit an Freileitungen in der Schweiz gewonnen werden, welche in dieser Form bisher nicht zu Verfügung standen.

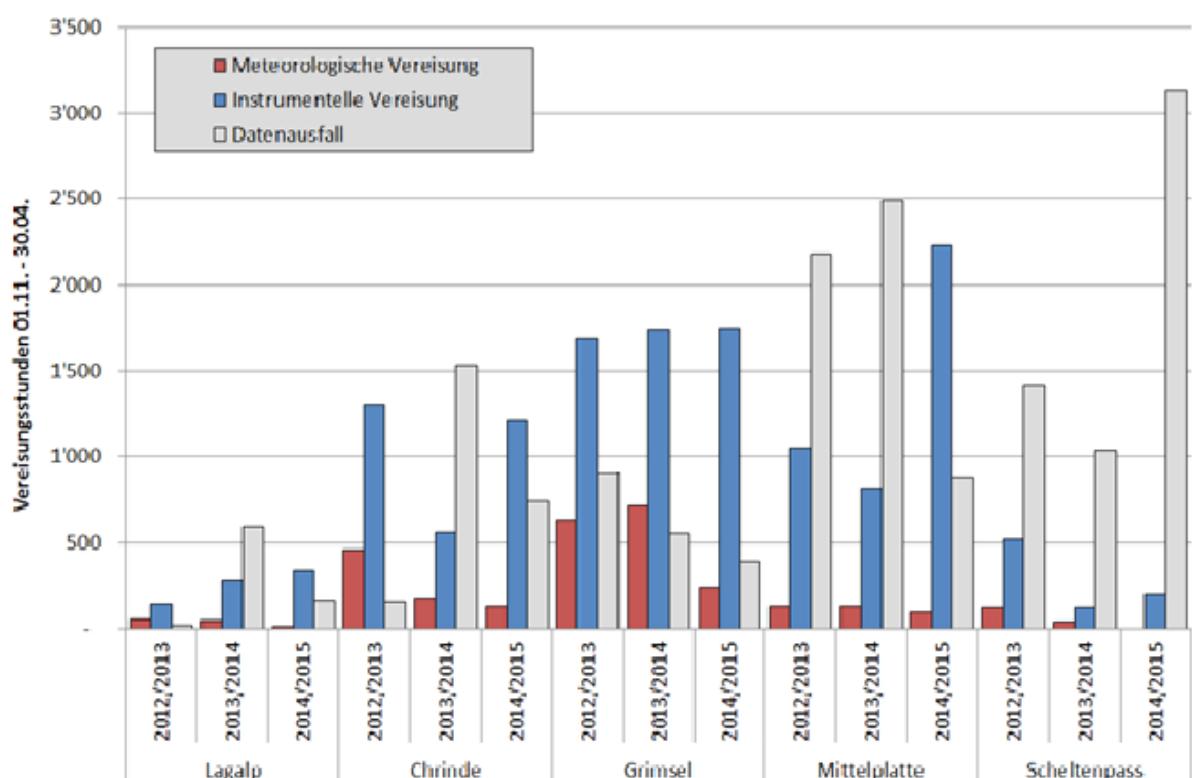


Abb. 10: Instrumentelle und meteorologische Vereisung während der drei Messwinter an allen fünf Standorten.

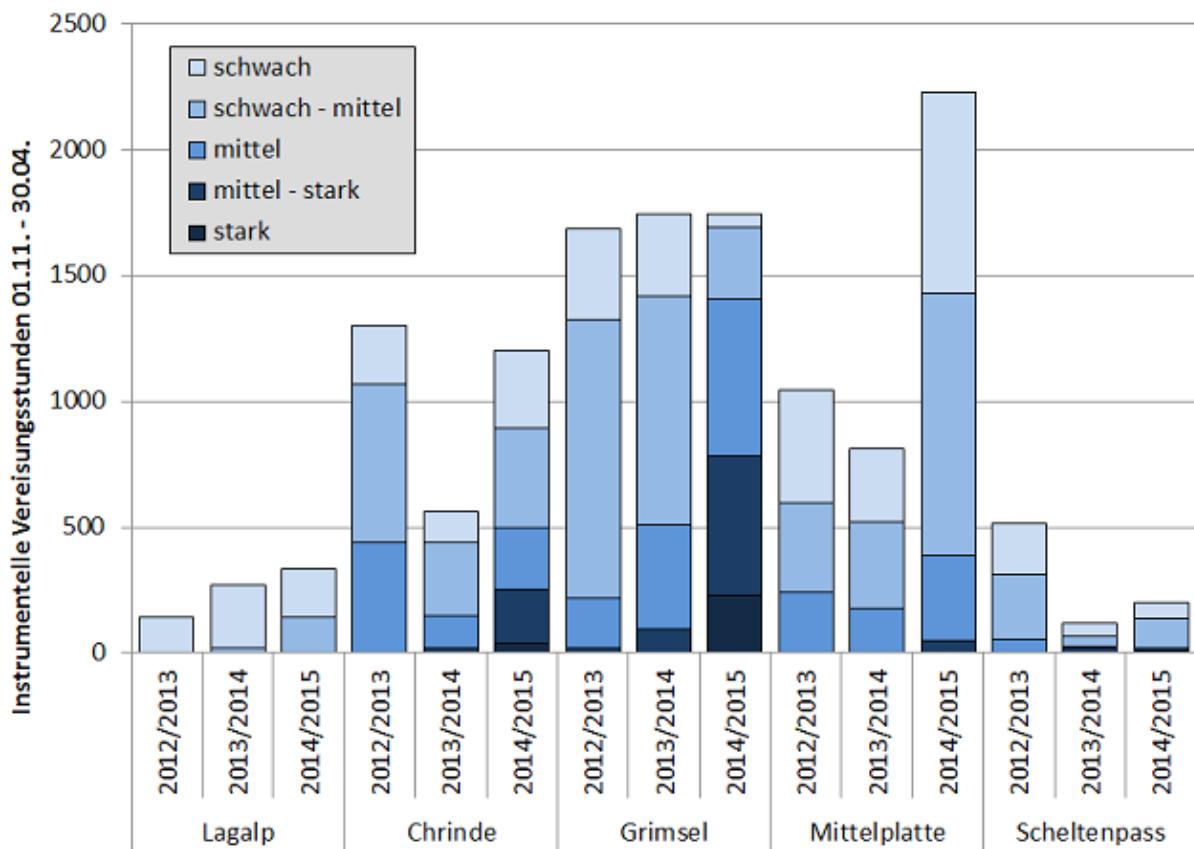


Abb. 11: Häufigkeit der fünf Kategorien instrumenteller Vereisung an den fünf Standorten während der drei Messwinter.

Vereisungsvorhersagen

Die Vorhersagen für die Winter 2012/2013 und 2013/2014 liefen sehr zuverlässig und es stehen für den beide Winter Vorhersagen zur Verfügung.

Abbildung 12 zeigt den Vergleich zwischen den beobachteten Perioden meteorologischer und instrumenteller Vereisung und den simulierten Perioden meteorologischer Vereisung für den Winter 2013/14. Die beobachteten Perioden meteorologischer Vereisung werden in den Vorhersagen für die Standorte Lagalp, Chrinde, Grimsel und Mittelplatte gut wiedergegeben. Es werden jeweils Trefferquoten von mindestens 80% erreicht, was bedeutet, dass der überwiegende Anteil, mindestens 80%, der beobachteten Vereisungsperioden vom Modell vorhergesagt wurden (Tab. 2). Am Standort Scheltenpass mit nur neun Vereisungseignissen wurden lediglich 67% der Ereignisse vorhergesagt.

Neben der Trefferquote ist auch die Fehlalarmquote von Bedeutung. Diese beschreibt, wie häufig das Modell Vereisung vorhersagt, aber in Realität keine Vereisung eintritt. Während dieser Anteil relativ zur Anzahl der Vereisungseignisse an den Standorten Chrinde, Grimsel und Mittelplatte mit 20% und 30% recht gering ist, treten an den Standorten Lagalp und Scheltenpass Fehlalarmquoten von 54% bzw. 122% auf. Dies bedeutet, dass das Modell häufig Vereisung vorhersagt, ohne dass sie tatsächlich eintritt. Diese Fehlvorhersagen können darauf beruhen, dass die Luft- oder die Leiterseilttemperatur in Realität höher waren und so Vereisung verhindert haben.

Die simulierte instrumentelle Vereisung ist nicht dargestellt, da sie die beobachtete Vereisung an allen Standorten deutlich überschätzt. Dies beruht darauf, dass im Vereisungsalgorithmus Schmelzen und eine einfache Parametrisierung von Erschütterungen zur Abnahme der Eismasse beitragen. Im Bereich der Alpen spielen aber zusätzlich kurzwellige Strahlung, Sublimation sowie Wind und Erschütterung der Struktur eine wichtige Rolle. Diese Einflüsse sind im Vereisungsalgorithmus bisher nicht oder nur stark vereinfacht enthalten. Die Ergänzung der Eisabnahme durch Sublimation ist in Vorbereitung, aber noch nicht ausreichend getestet.

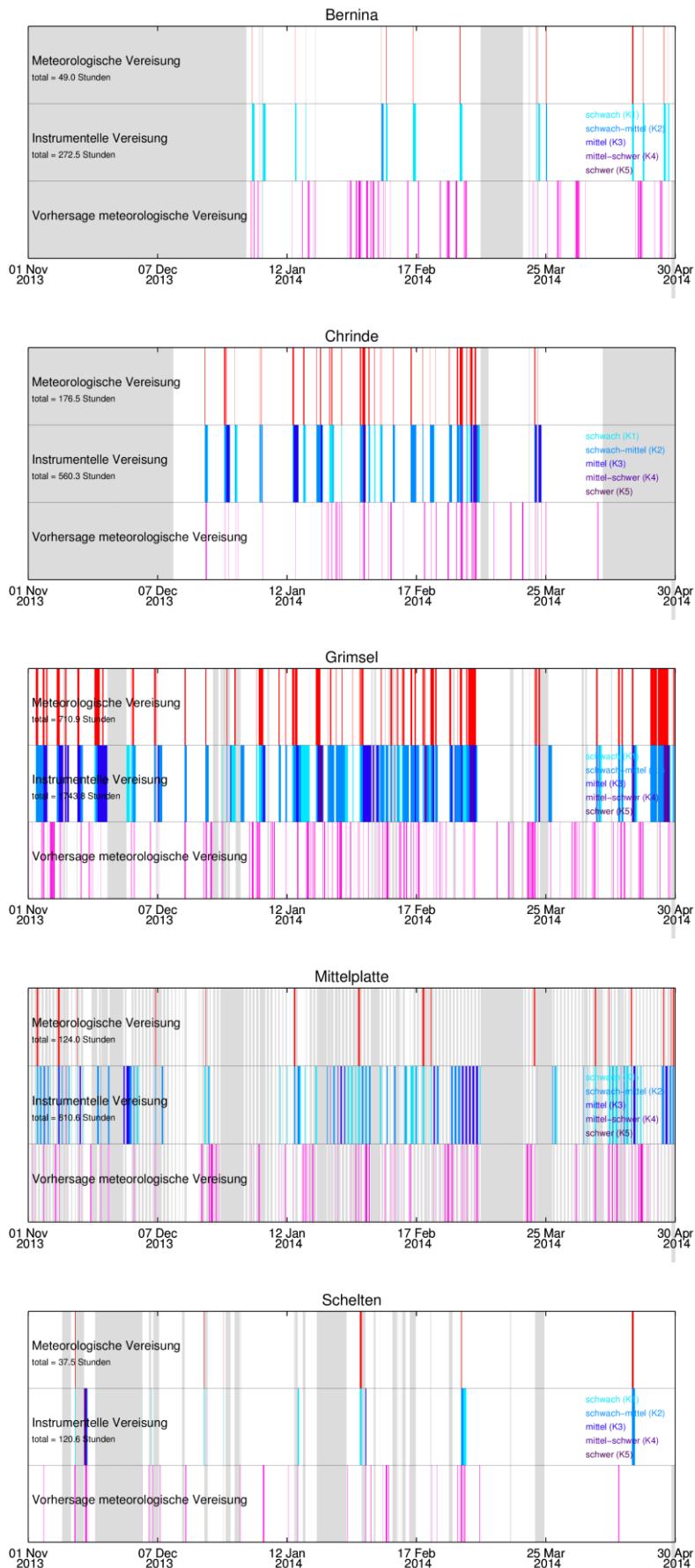


Abb. 12: Vergleich der Perioden meteorologischer und instrumenteller Vereisung für den Winter 2013/2014 in der Beobachtung und in der Vereisungsvorhersage für die Standorte Lagalb, Chrinde, Grimsel, Mittelplatte und Scheltenpass (von oben nach unten).

Tabelle 2 und Abbildung 12 zeigen, dass die Vereisungsvorhersage für den Winter 2013/2014 für die Standorte Chrinde, Grimsel und Mittelplatte gute Ergebnisse produziert. An den Standorten Lagalb und Scheltenpass werden die Vereisungssereignisse gut bzw. befriedigend erfasst, aber die Fehlalarmquote ist relativ hoch. Es sind dies aber auch die Standorte mit der geringsten Vereisungshäufigkeit, d.h. einzelne Fehlprognosen wirken sich hier stärker aus.

Tab. 2: Anteil zutreffender Vereisungsvorhersagen (Trefferquote) und Anteil von Fehlvorhersagen, wenn in Realität keine Vereisung beobachtet wurde (Fehlalarmquote) für die Standorte Lagalb, Chrinde, Grimsel, Mittelplatte und Scheltenpass.

Standort	Anzahl der Vereisungssereignisse	Trefferquote relativ zur Anzahl der Vereisungssereignisse [%]	Fehlalarmquote relativ zur Anzahl der Vereisungssereignisse [%]
Lagalb	13	92	54
Chrinde	23	83	17
Grimsel	41	80	31
Mittelplatte	30	80	20
Scheltenpass	9	67	122

Einfluss der Leiterseiltemperatur auf die Vereisung

Die Vereisungsvorhersage überschätzt an den Standorten Lagalb und Scheltenpass die beobachtete Vereisung. Als Ursachen ist ein Einfluss der Leiterseiltemperatur wahrscheinlich. Bei hohen Leiterseiltemperaturen wird eventuell Vereisung verhindert, obwohl sie aufgrund der Wetterbedingungen möglich wäre.

Leider stehen von den Kamerastandorten nur für den Standort Lagalb Leiterseiltemperaturen zur Verfügung. An den anderen Standorten sind Angaben zu den Stromstärken verfügbar. Der Vergleich der Zeitreihen von Leiterseiltemperatur und Stromstärke am Standort Lagalb zeigt keinen eindeutigen Zusammenhang (Abb. 13). Es ist daher an den anderen Standorten nur mittels Berechnungen möglich, von der Stromstärke auf die Leiterseiltemperatur zu schliessen. Somit wurde der Zusammenhang zwischen Fehlalarm in der Vereisungsvorhersage und der Leiterseiltemperatur bisher nur für den Standort Lagalb ausgewertet.

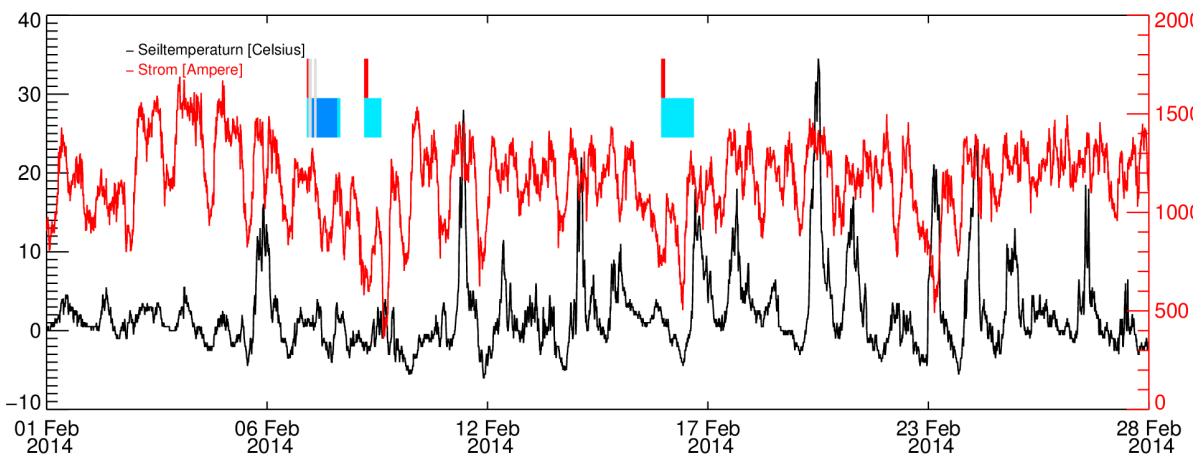


Abb. 13: Zeitreihen der Leiterseiltemperatur (schwarz) und der Stromstärke (rot) am Standort Lagalb im Februar 2014.

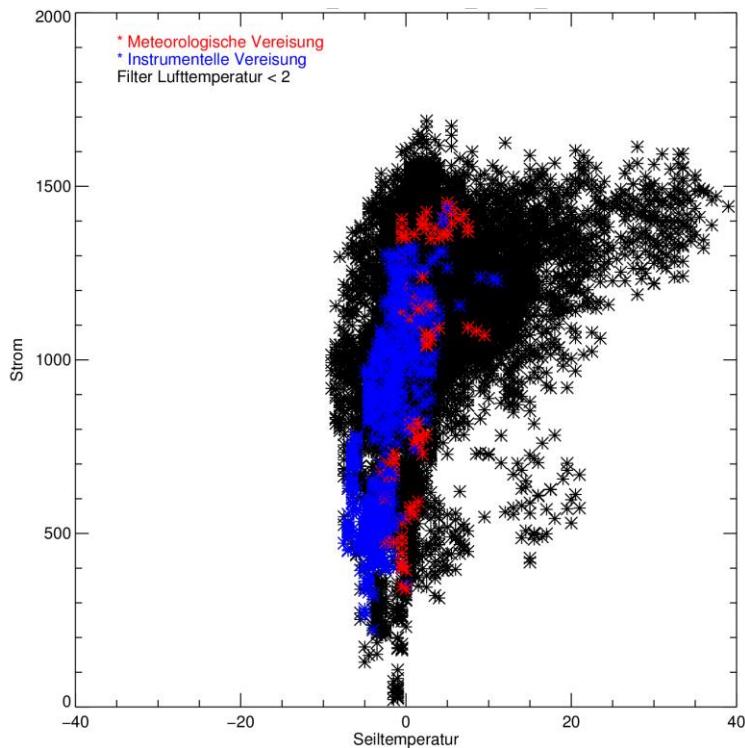


Abb. 14: Scatterplot von Leiterseiltemperatur [$^{\circ}\text{C}$] und Stromstärke [A] für alle Zeitpunkte mit Lufttemperaturen unter $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (schwarz), für alle Zeitpunkte mit beobachteter meteorologischer (rot) und instrumenteller (blau) Vereisung.

Für den Standort Lagalb wurden die gemessenen Luft- und Leiterseiltemperaturen zusammen mit den aus den Bildern bestimmten Vereisungen dargestellt (Abb. 15). Betrachtet man die Leiterseiltemperatur in den Perioden, in denen Vereisung beobachtet wird, so erkennt man, dass Vereisung immer bei relativ geringen Leiterseiltemperaturen von bis zu wenigen Grad Celsius auftritt. Teilweise endet eine Periode instrumenteller Vereisung, wenn die Leiterseiltemperatur stark ansteigt. Die Tatsache, dass Vereisung nur bei moderaten Leiterseiltemperaturen auftritt, wird im Scatterplot (Abb. 14), der das Verhältnis von Stromstärke und Leiterseiltemperatur bei tiefen Lufttemperaturen darstellt, bestätigt.

Aus Abbildung 12 wurden einige Episoden bestimmt, während denen die Vereisungsvorhersage meteorologische Vereisung simulierte, ohne dass Vereisung beobachtet wurde. Solche Perioden traten z.B. am 20. Januar 2014, am 1. Februar 2014 und am 24. Februar 2014 auf. Für diese Zeitpunkte wurde geprüft, wie sich die Leiterseiltemperatur verhält und ob sie die Ursache dafür sein kann, dass keine Vereisung beobachtet wird. In Abbildung 15 sind die Leiterseiltemperaturen während der drei Perioden gekennzeichnet. Für die Perioden 20. Januar 2014 und 24. Februar 2014 ist zu erkennen, dass die Leiterseiltemperaturen in diesem Zeitraum sehr hoch waren und eine Vereisung an der Leitung verhindert haben. Für die Periode um den 1. Februar ist dieser Zusammenhang unwahrscheinlich, da Abbildung 14 zeigt, dass bei Leiterseiltemperaturen bis $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durchaus Vereisung beobachtet werden kann. Allerdings lagen die gemessenen Lufttemperaturen am 1. Februar 2014 über $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und starker Wind hat die Leiterseil-Temperatur der Lufttemperatur angeglichen. Es handelt sich also vermutlich um eine Fehlprognose.

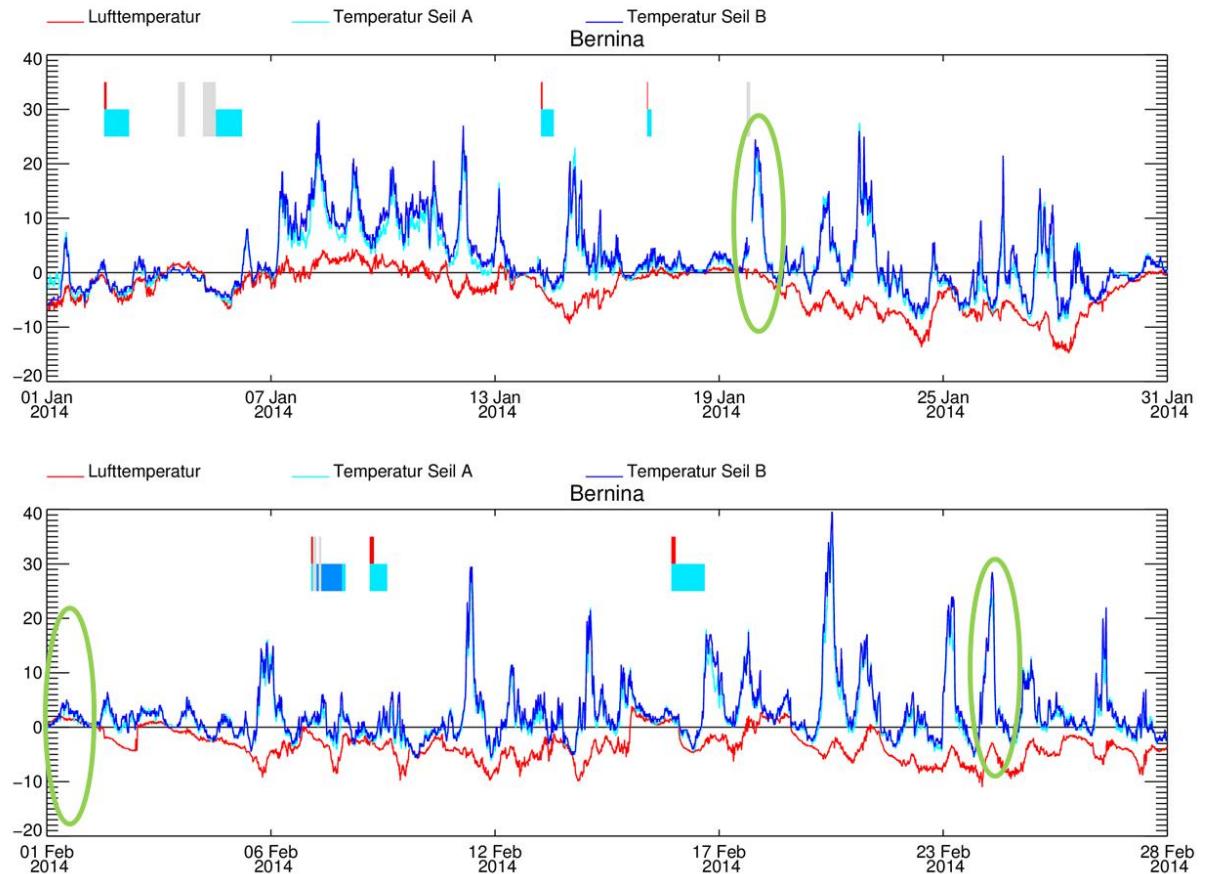


Abb. 15: Zeitreihen der Seiltemperaturen [$^{\circ}\text{C}$] am Leiterseil A (hellblau; Strang Preda) und am Leiterseil B (dunkelblau; Strang Albula) sowie die Lufttemperatur (rot) am Standort Lagalb im Januar 2014 (oben) und im Februar 2014 (unten). Die Perioden mit beobachteter meteorologischer (rote Linie) und instrumenteller Vereisung (Blautöne) sind jeweils im oberen Teil der Abbildungen dargestellt (grau: keine Bilder). In grün sind die gewählten Episoden mit Fehlalarmen in den Vereisungsvorhersagen gekennzeichnet (siehe Text).

Diese ersten Untersuchungen zeigen, dass für die Vorhersage von Vereisung am Leiterseil die Leiterseiltemperatur berücksichtigt werden muss. Für weitere Berechnungen kann versucht werden, die entsprechend des Abschnitts „Modellierung der Leiterseil-Temperatur“ berechnete Leiterseiltemperatur in der Berechnung zu berücksichtigen.

Die im Projekt durchgeführten Vereisungsvorhersagen wiesen eine gute Qualität auf und haben das Potenzial, einen Beitrag zu einer sicheren und effizienten Betriebsführung der Freileitungen zu liefern. Ab dem Winter 2015/16 ist Meteotest technisch in der Lage, operationelle Vereisungsvorhersagen via einen Web Service zu Verfügung zu stellen.

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.

Von uns wird eine in Fortran programmierte Version des „IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors“ verwendet. Die Resultate der Modellierungen werden periodisch in der Datenbank gespeichert. Diese Resultate können on the fly über das Web-Interface visualisiert werden. Ein Beispiel dafür ist die Abbildung 16.

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 wurden bei der Kühlung durch Wind

und bei der Berechnung des Strahlungseinflusses erarbeitet. Der kühlende Effekt von Feuchtigkeit auf dem Leiterseil wird in den Modellierungen bewusst nicht berücksichtigt. Primär, da dieser Effekt für die Leiterseil-Sicherheit nicht von Belang ist und sekundär, da eine zeitliche Zuordnung oder eine Prognose nicht mit der notwendigen Genauigkeit realisiert werden kann. In der Abbildung 16 ist der kühlende Effekt von Niederschlag am Abend des 5. September deutlich zu sehen. Die gemessene Seiltemperatur (grün) nähert sich dabei der gemessenen Lufttemperatur (rot) an. Die berechnete Seiltemperatur (blau) liegt in dieser Phase wesentlich höher. Schwache Niederschläge von kurzer Dauer verursachten auch am 6./ 8. und 9. September ein kurzfristiges, deutliches Sinken der gemessenen Seiltemperaturen.

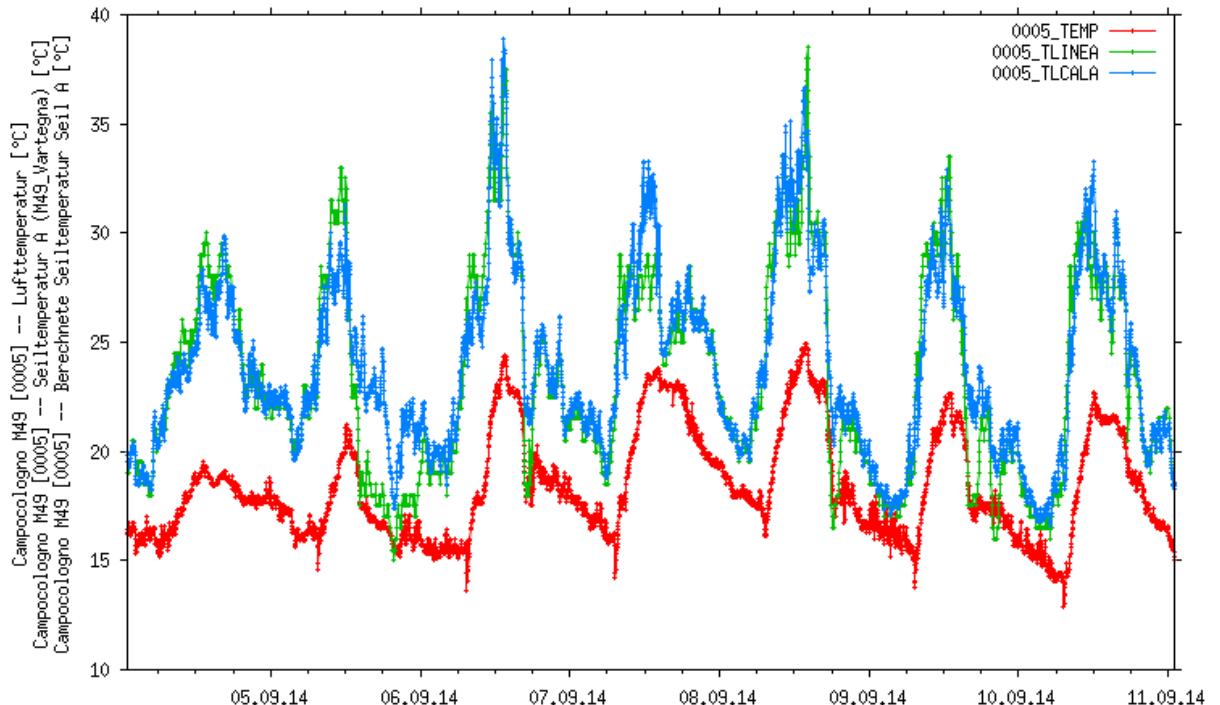


Abb. 16: Visualisierung von Temperatur-Messungen und Berechnungen aus der Leiterseil-Datenbank (gemessene Lufttemperatur: rot; gemessene Seiltemperatur: grün; berechnete Seiltemperatur: blau).

Mit der vorliegenden Modellversion können die Seiltemperaturen basierend auf Messungen oder Annahmen oder Prognosen berechnet werden. Bei tiefen Seiltemperaturen unter etwa 50 °C sind die Unterschiede zwischen berechneten und gemessenen Seiltemperaturen unter Verwendung von gemessenen Inputgrößen gering. Hingegen bestehen bei grossen Stromflüssen und damit hohen Seiltemperaturen noch relevante Unsicherheiten. Solche Fälle sind selten und daher schwierig zu eichen. Zudem wirken sich geringe Anpassungen zum Beispiel am Parameter Emissivität sehr stark auf die berechneten Resultate aus. In der Literatur wird der Emissionsgrad von Seilen aus Aluminium oder Aluminium-Legierungen je nach Verschmutzung in einem weiten Bereich von 0.27 bis 0.91 angegeben (aus Morgan, 1982). Effektive Werte für die Aldrey-Seile an den Messstandorten fehlen bisher. Um bei hohen Seiltemperaturen verlässlichere Resultate zu erhalten, wäre die Bestimmung der Emissivität zwingend.

Eine Reduktion der Fehlprognosen der Vereisungsmodellierung kann durch die Bereitstellung von Seiltemperaturen ermöglicht werden. Für Modellierungen können die gemessenen Leiterseiltemperaturen wie auf der Lagalb oder berechnete Leiterseiltemperaturen verwendet werden. Die gemessenen Stromdaten als wesentliche Grundlage liegen für alle Kamerastandorte vor. Prognostisch müssten Stromdaten und meteorologische Daten als Prognosen vorliegen.

Das Modell zur Berechnung der Leiterseil-Temperatur könnte auch zur Berechnung der maximal möglichen Ströme verwendet werden.

Am 24./25. September 2012 fand bei Meteotest in Bern im Rahmen der von Meteotest geleiteten COST Aktion ES1002 ein Workshop zum Thema "Dynamic Line Rating and Icing on power lines" statt. In Zuge dieses Workshops wurde das Schweizer Projekt vorgestellt. Ebenfalls in diesem Rahmen wurde ein Position Paper zum Thema "FORECASTING FOR DYNAMIC LINE RATING" verfasst. Silke Dierer von Meteotest war dabei als Co-Autorin beteiligt. Schliesslich wurde eine neue Working Group innerhalb des CIGRE Study Committee B2 "Overhead lines" gegründet. Diese Working Group WG B2.59 "Forecasting Dynamic Line Ratings" hielt ihr erstes Treffen am 25. August 2014 in Paris, Frankreich ab.

Im Bulletin SEV/VSE 5/2014 konnte ein Beitrag mit dem Titel „Der Weg zur temperaturbasierten Netzführung“ platziert werden. Auswertungen der Daten der Windgeschwindigkeit haben gezeigt, dass sogar auf der Höhe der Leiterseile oft mit geringen Windgeschwindigkeiten gerechnet werden muss. Dies hat wesentlichen Einfluss auf die Kühlung der Leiterseile. Basierend auf Strahlungsdaten aus dem Projekt und Daten der MeteoSchweiz, welche gratis zur Verfügung gestellt wurden, konnte die Thematik Messung in der Horizontalen versus Strahlungseingang am Leiterseil beleuchtet werden. Anhand von Beziehungen zwischen dem Stromfluss und gemessener Leitererwärmung wurden Szenarien für eine dynamische Netzführung erarbeitet.

Das an der ETH-Zürich und der EMPA ausgeführte Partnerprojekt „TeKaF“ wurde im 2015 erfolgreich abgeschlossen. Die Schwerpunkte in diesem Projekt lagen bei der 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. Als Mitglied des Steering Committee stellte Walter Sattinger die Zusammenarbeit zwischen den beiden Projekten sicher. Urs Steinegger (Meteodat GmbH) unterstützte das Projektteam bei Fragen zur Meteorologie und bei der Datenbereitstellung und -auswertung. Am 10. September fand zum Abschluss des „TeKaF Projektes“ ein Meeting bei Swissgrid in Laufenburg statt.

Die Stromdaten diverser Leitungen werden seit 2012 durch die Swissgrid bereitgestellt und durch die Meteodat GmbH laufend in die Datenbanken integriert. Neben dem High Voltage Laboratory der ETH Zürich profitieren weitere Hochschulen von diesem Datensatz.

Die SBB haben ein Pilotprojekt zur Messung der Fahrleitungstemperatur und der meteorologischen Einflussgrössen durchgeführt. Die Erfahrungen aus dem vorliegenden Projekt konnten erfolgreich auf die Bedürfnisse der SBB übertragen werden.

Am 24. September 2015 wurde bei Swissgrid ein Workshop zum Thema meteorologische Prognosen durchgeführt. Dabei konnten Mitarbeiter der Firmen Meteomatics GmbH und Meteodat GmbH den interessierten Mitarbeitern die Belange der Meteorologie im Zusammenhang mit den Übertragungsleitungen näher bringen.

Resultate von Analysen der Winddaten

Die Kühlung durch den Wind wurde wie im IEEE-Standard beschrieben berechnet. Allerdings wird auch unter 0.6 m/s mit dem gemessenen Wind (Richtung und Geschwindigkeit) gerechnet. Früher konnten mit mechanischen Messgeräten tiefe Windgeschwindigkeiten kaum erfasst werden. Mit den, im Projekt verwendeten Ultraschall Geräten, können auch minimale Luftbewegungen registriert werden. Die Abbildung 17 zeigt für den Messstandort Campocologno die zeitliche Verteilung von Schwachwindphasen über den Tag und das Jahr. Zur Berechnung der Durchleitungskapazität wird oft von einer minimalen Windgeschwindigkeit von etwa 0.5 oder 0.6 m/s rektwinklig zum Leiterseil ausgegangen. Bereits ohne die Windrichtung zu berücksichtigen zeigen die in Abbildung 17 dargestellten Messungen, dass diese Annahme oft zu einer Überschätzung der Kühlwirkung durch die Luftbewegung führt. Überraschend ist, dass selbst bei Sonnenhöchststand um die Mittagszeit im Sommer Schwachwind-Situationen nicht ausgeschlossen werden können. Eine vergleichbare Situation wurde am Mast 34 an der Habsburgleitung festgestellt. In Waldschneisen muss offensichtlich häufig mit Situationen mit sehr tiefen Windgeschwindigkeiten gerechnet werden.

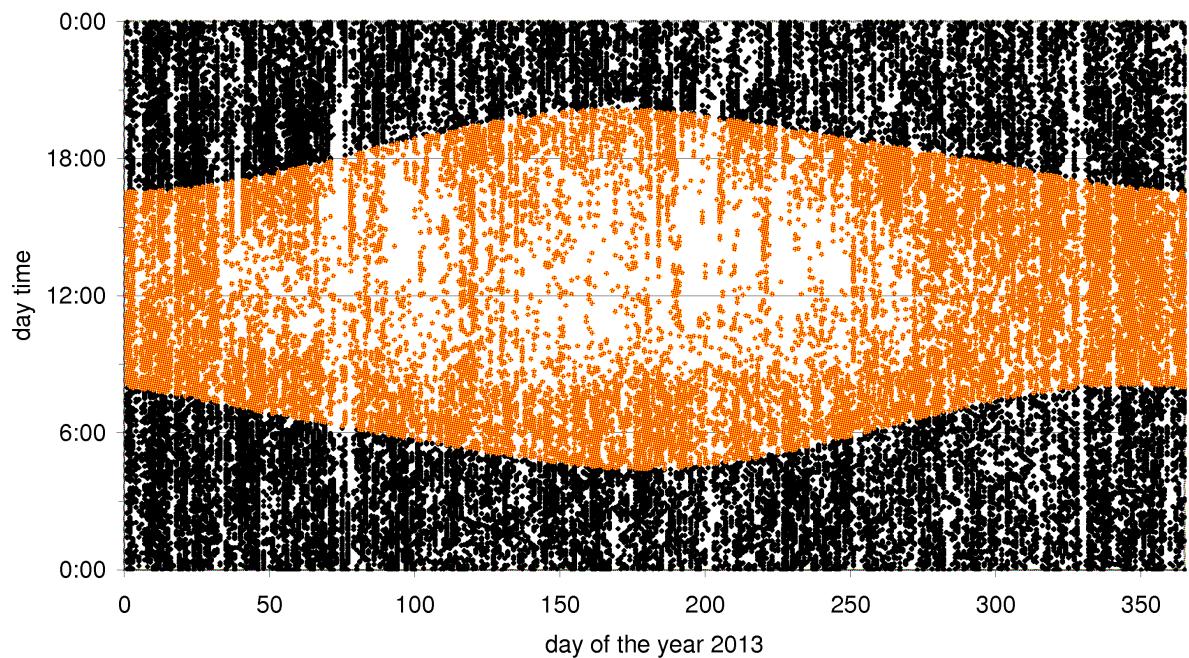


Abb. 17: Situationen mit gemessenen Windgeschwindigkeiten unter 0.5 m/s in Campocologno; schwarze Punkte stehen für Messzeitpunkte während der Nacht, orange für solche zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang.

In der vorliegenden Modellversion kann die vertikale Windgeschwindigkeit, wie sie an allen unseren Stationen gemessen wird, in die Berechnungen einbezogen werden. Durch diese Erweiterung des ursprünglichen IEEE-Ansatzes wird eine deutliche Resultatverbesserung erzielt.

Im Projekt TeKaF konnte gezeigt werden, dass die gebräuchlichen Modellannahmen bei fehlendem Wind (natural convective cooling) im Labor zu brauchbaren Resultaten führen (Rodriguez, Franck (2015).

Die Prognose der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung für Leiterseilabschnitte stellt im schweizerischen Umfeld eine grosse Herausforderung dar. Ursache dafür sind häufige Richtungswechsel der Trassen sowie Änderungen der Windexposition infolge des Verlaufs durch Wald-, Agrar- und Stadtgebiete aber auch durch Senken oder Täler und Hügel und Berge. Da solche Prognosen mit grossen Unsicherheiten behaftet sind, macht es aus heutiger Sicht mehr Sinn die Vorhersagen von Leiterseiltemperaturen mit Annahmen bezüglich minimaler Windgeschwindigkeit zu berechnen. Aus Sicherheitsgründen erscheint es sinnvoll für Leiterseilprognosen nur die Kühlung durch natürliche Konvektion zu berücksichtigen (Windgeschwindigkeit = 0 m/s).

Resultate der Analysen von Strahlungsdaten

Der Einfluss der Strahlung auf die Erwärmung der Leiterseile kann bei geringen Stromflüssen gross sein. Ist die Joulsche Erwärmung jedoch ausgeprägt, tritt der Einfluss der Einstrahlung in den Hintergrund. Die Unsicherheiten bei der Berechnung der Leiter-Erwärmung durch kurzwellige Einstrahlung sind gross. Einerseits wegen der unbekannten Albedo der Leiterseile und andererseits wegen der konkreten Strahlungsmenge, welche das Seil erwärmt.

Uns liegen aus dem Projekt nur Globalstrahlungsmessungen auf die horizontale Fläche vor. Das Leiterseil kann aufgrund der Ausrichtung zur Sonne aber mehr Strahlung erhalten als eine horizontale Fläche. Richtungsabhängig ist aber nur die direkte Globalstrahlung, daher wurde versucht unter zu Hilfenahme von Daten der MeteoSchweiz ein Algorithmus zur Bestimmung des direkten und diffusen Anteiles der gemessenen Globalstrahlung zu entwickeln. Die Abbildung 18 zeigt, dass sowohl der Anteil der diffusen Komponente als auch jener der direkten Komponente sehr unterschiedlich sein

kann. Für die Station Buchs-Aarau und die Periode 1. Januar 2012 bis 13. Dezember 2013 schwankte der Anteil der direkten Globalstrahlung zwischen 0 und 90.7 %, wenn die Globalstrahlung über 50 W/m² betragen hat. Wobei der Mittelwert bei lediglich 35 % lag. Der Anteil an diffuser Strahlung lag zwischen 0.1 und 100 %.

Weder mit gemessenen Grössen noch mit Resultaten aus Prognosemodellen konnte ein befriedigender Ansatz für eine Parametrierung dieser Anteile gefunden werden. Bei der Modellberechnung wird daher behelfsmässig mit einem konservativen multiplen Regressionsansatz gearbeitet um den Anteil der direkten Einstrahlung abzuschätzen. Dieser Anteil wird dann auf das Leiterseil hochgerechnet und mit dem diffusen Anteil addiert.

Wie beim Wind sind Strahlungsprognosen mit grossen Unsicherheiten behaftet. Insbesondere Nebellagen führen oft zu sehr grossen Abweichungen zwischen Prognose und Realität. Die Verwendung von berechneten maximalen Strahlungswerten abhängig von Jahres- und Tageszeit stellt bei der Voraussage von Leiterseiltemperaturen einen gangbaren Weg dar. Damit kann ohne wesentliches Risiko eine Berücksichtigung von an der Oberfläche reflektierter Strahlung vernachlässigt werden.

Vom Modell Cosmo 7 wurden Strahlungs-Prognosen von 6 Monaten mit Messungen von Kloten verglichen. Wie erwartet gab es Situationen mit sehr grossen Abweichungen bei den Globalstrahlungswerten (Abb. 19). Bei potentiellen Nebellagen unterschätzte das Modell die wahre Strahlung um bis zu 830 W/m². Die maximale Überschätzung betrug 590 W/m². Ein entsprechender Vergleich zwischen gemessener und prognostizierter diffuser Strahlung würde Klarheit über den Prognosefehler und die Unsicherheit bei der Umrechnung auf das Leiterseil schaffen.

Die Verlässlichkeit dieser Strahlungsprognosen kann aus heutiger Sicht nicht als genügend für die Berechnung der Leiterseilttemperatur betrachtet werden.

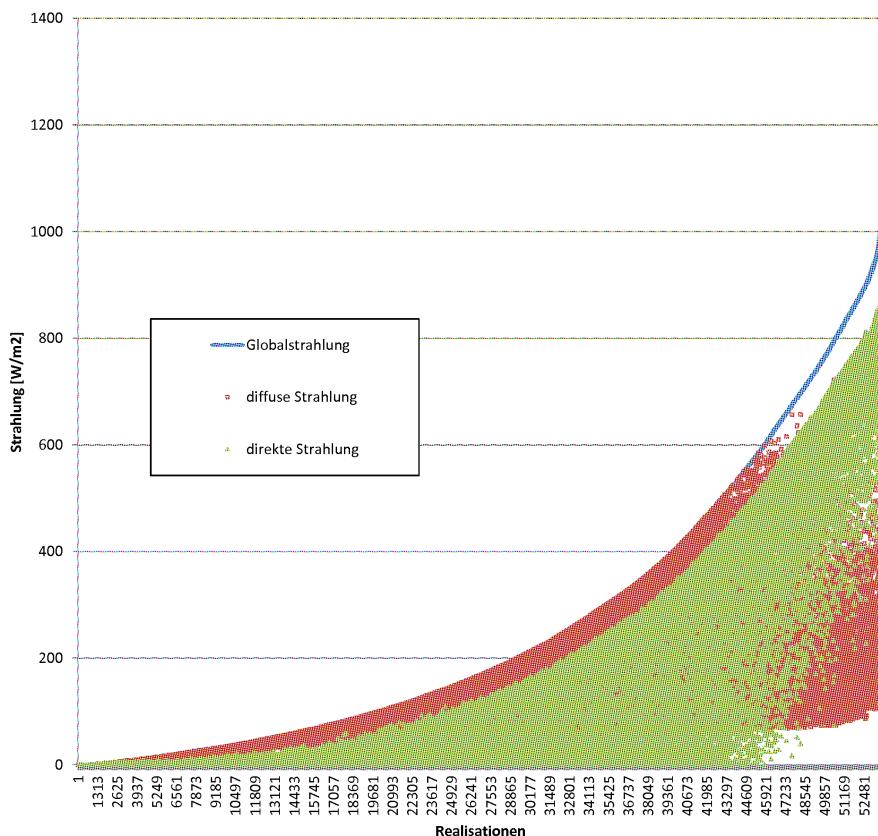


Abb. 18: Konkrete Werte der kurzweligen Strahlung an der Station Buchs-Aarau in der Periode 1. Januar 2012 bis 13. Dezember 2013 sortiert nach den Globalstrahlungswerten (blau). Zu jedem Globalstrahlungswert ist der diffuse (braun) und der direkte (grün) Strahlungswert geplottet (Daten Meteo-Schweiz).

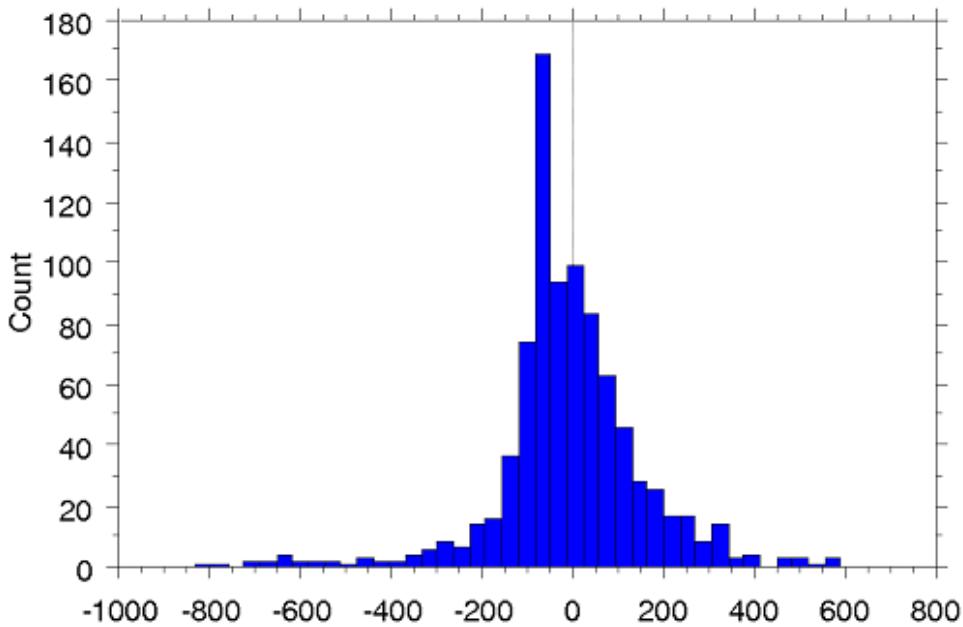


Abb. 19: Histogramm der Abweichungen zwischen prognostizierten und gemessenen Globalstrahlungswerten [W/m^2] für die Perioden 1.12.2014 – 3.3.2015 sowie 3.7. – 20.9.2015 (Cosmo 7 versus Messung Kloten).

Auswirkungen auf die Leiterseil-Kapazität

Die Kapazität der Leiterseile wird in der Schweiz unter Zuhilfenahme von Grenztemperaturen festgelegt. Je nach Jahreszeit wird davon ausgegangen, dass die Lufttemperatur nicht über 10, 20 respektive 40 °C liegt. Zusätzlich wird mit fixen Werten für die Windgeschwindigkeit und die Globalstrahlung gerechnet. Diese Annahmen führen zum in Abbildung 20 dargestellten treppenförmigen Verlauf (blaue Linie) der berechneten maximalen Durchleitungskapazität. Werden bei der Berechnung die statischen Lufttemperaturwerte durch gemessene maximale Tageswerte ersetzt, kann aufgezeigt werden, wo die statischen Annahmen zu zu tiefen oder zu hohen Durchleitungskapazitäten führen. Die in Abbildung 19 dargestellten Kurven basieren zusätzlich zur variablen Lufttemperatur auf Annahmen zu minimalen Windgeschwindigkeiten und maximalen Strahlungswerten. Tiefe Windgeschwindigkeiten führen zu geringer Kühlung der Leiterseile und damit reduzierter Durchleitungskapazität. Hohe Globalstrahlungswerte führen zu Erwärmung der Leiterseile, was ebenfalls zu einer Reduktion der Durchleitungskapazitäten führt. Hohe Strahlungswerte und geringe Windgeschwindigkeiten führen bei der dynamischen Bestimmung der Durchleitungskapazitäten oft zu tieferen Werten als die statische Methode. Durch die sich aufdrängende Vernachlässigung der Globalstrahlung während der Nacht resultieren hingegen im Sommer durchwegs massiv höhere Durchleitungskapazitäten. Nachts könnte auch im Winter unter den getroffenen Annahmen meist mehr Strom durchgeleitet werden.

Die Abbildung 21 zeigt die Beziehung zwischen gemessener Leitererwärmung und dem Stromfluss an der Messstelle in Lagalb für das Jahr 2013 (Daten in 2-Minuten Auflösung). Die Farben bezeichnen den Zeitpunkt der Messungen in 6-Stundenintervallen über den Tag. Die grosse Variation der Leitererwärmung wird durch die Kühlung (Wind, Abstrahlung) und die zusätzliche Erwärmung durch die Globalstrahlung verursacht. Die orangefarbene Linie zeigt die berechnete Beziehung zwischen Leitererwärmung und Stromfluss für ein Tagesszenario mit 0.25 m/s Windgeschwindigkeit rechtwinklig zum Leiterseil und einer Globalstrahlung von 1500 W/m^2 . Die gemessenen Punkte über diesem Szenario resultieren aus noch schlechterer Kühlleistung durch den Wind. Die blaue Linie in Abbildung 16 steht für ein Nacht-Szenario ohne Sonneneinstrahlung. Blaue Punkte welche über dieser berechneten Linie liegen weisen auf Unschärfe bei der Klasseneinteilung hin (z. B. Sonnenuntergang nach 18 Uhr) oder haben ebenfalls schlechtere Kühlungsverhältnisse als angenommen.

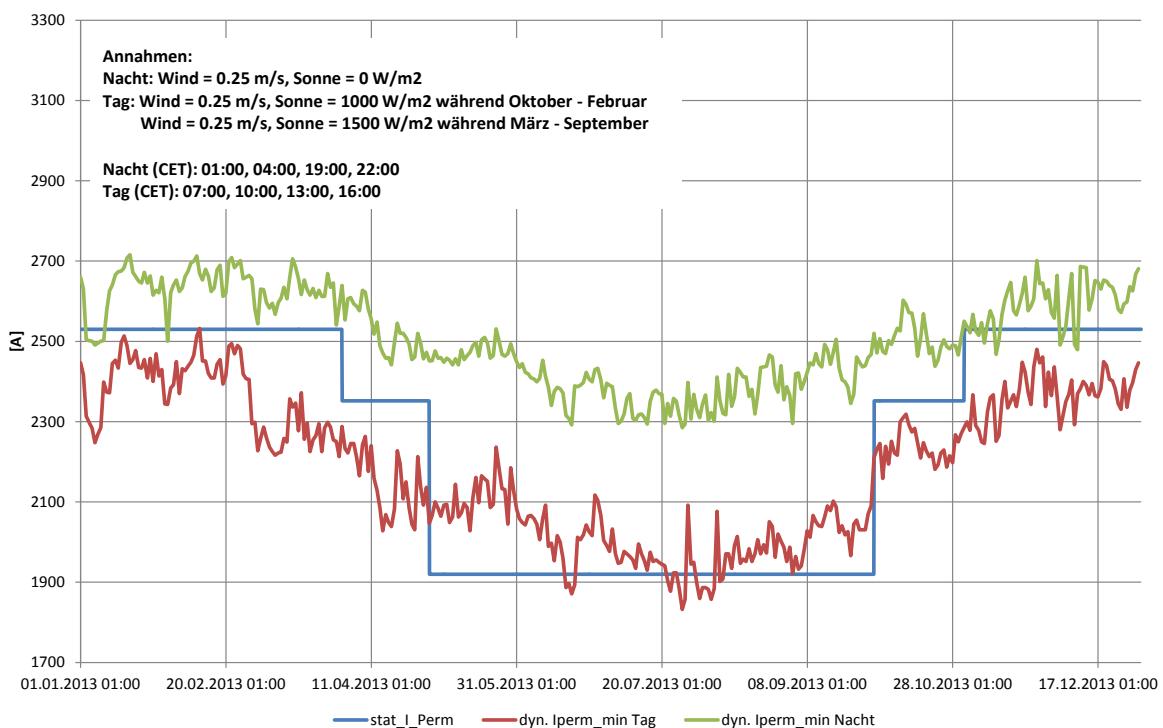


Abb. 20: Vergleich statischer (blau) und dynamischer Grenzwerte (rot: Tag; grün: Nacht) für die Berninaleitung für das Jahr 2013.

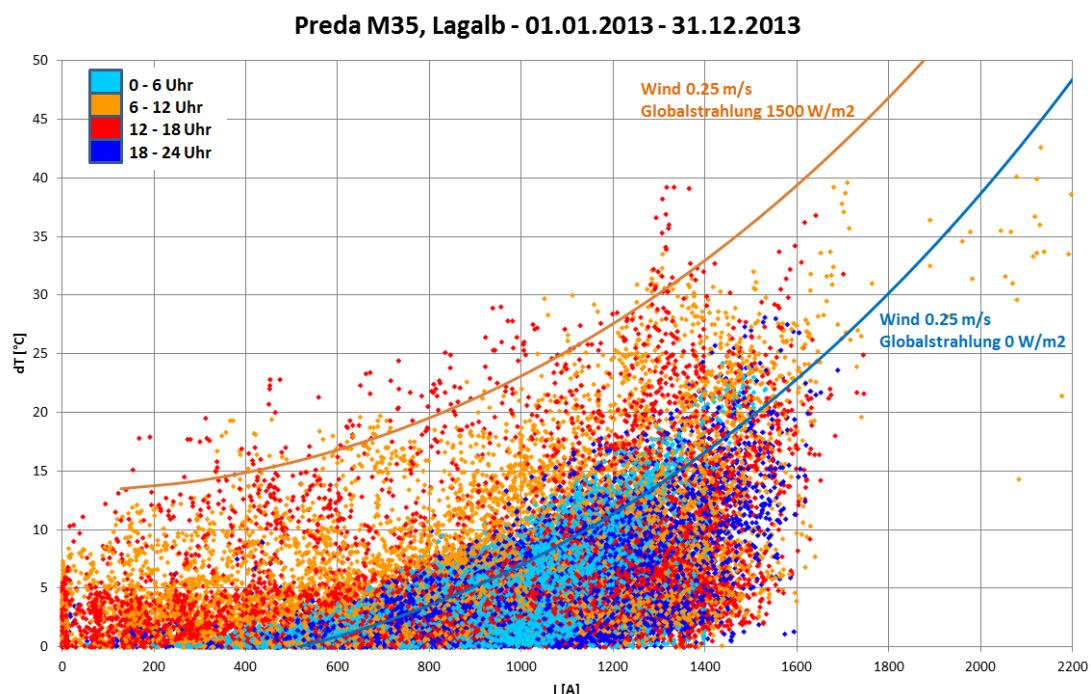


Abb. 21: Beziehung zwischen Stromfluss und gemessener Leitererwärmung an der 380 kV-Predaleitung La Punt – Robbia in Lagalb. Die Linien entsprechen berechneten Leitererwärmungen für ein Szenario am Tag (orange) und ein Szenario während der Nacht (blau).

Wird die Leiterseil-Temperatur berechnet unter der Annahme, dass immer der Nennstrom fliesst (Tab. 3.1 und 3.2), sollten die maximalen Seiltemperaturen nicht über die Limite von 80 °C steigen. Wird mit den gemessenen meteorologischen Grössen gerechnet, wird die 80 °C - Limite jedoch oft überschritten. Der Hauptgrund dafür liegt daran, dass die Kühlung durch den Wind oft überschätzt wird.

Weitere Gründe dafür können bei einer Unterschätzung der Erwärmung durch die Strahlung und in Unsicherheiten der Berechnungen der Leiterseil-Temperatur mit dem IEEE Modell liegen. Wird zum Beispiel die Emissivität von 0.35 auf 0.5 geändert, sinkt die modellierte mittlere Tagesspitze der Seil-

temperaturen in La Punt um 8.5 °C (Periode 1.1.2014 bis 31.12.2014). Bei hohen Temperaturen spielt dieser Parameter also eine wichtige Rolle.

Tabelle 3.1: Thermischer Grenzstrom (Nennstrom) der Habsburgleitung bei Standardbedingungen (Beseilung einfach; 400 mm²; Aldrey; Wind 0.6 m/s rechtwinklig; Globalstrahlung 950 W/m²; Lufttemperatur saisonal definiert), sowie Abweichungen in Prozent des Nennstroms bei vorgegebenen meteorologischen Änderungen.

Lufttemperatur	Nennstrom	Nacht	1500 W/m ²	0.25 m/s	0.25 m/s; 1500 W/m ²	Jahreszyklus
10 °C	975 A	+ 5.9%	- 3.7%	- 17.4%	- 21.8%	Winter
20 °C	912 A	+ 6.9%	- 4.3%	- 17.4%	- 22.6%	April & Oktober
35 °C	790 A	+ 9.3%	- 5.8%	- 17.5%	- 24.5%	Sommer (Test)
40 °C	790 A	+ 10.4%	- 6.6%	- 17.7%	- 25.7%	Sommer

Tabelle 3.2: Thermischer Grenzstrom (Nennstrom) der Predaleitung bei Standardbedingungen (doppelte Beseilung; 600 mm²; Aldrey; Wind 0.6 m/s rechtwinklig; Globalstrahlung 950 W/m²; Lufttemperatur saisonal definiert), sowie Abweichungen in Prozent des Nennstroms bei vorgegebenen meteorologischen Änderungen.

Lufttemperatur	Nennstrom	Nacht	1500 W/m ²	0.25 m/s	0.25 m/s; 1500 W/m ²	Jahreszyklus
10 °C	2530 A	+ 6.5%	- 4.0%	- 17.2%	- 22.0%	Winter
20 °C	2352 A	+ 7.5%	- 4.7%	- 17.2%	- 22.9%	April & Oktober
35 °C	2040 A	+ 10.1%	- 6.3%	- 17.3%	- 25.1%	Sommer (Test)
40 °C	1920 A	+ 11.3%	- 7.2%	- 17.4%	- 26.3%	Sommer

Diskussion

Die Projektziele konnten erreicht werden. Resultate der Analysen der meteorologischen Einflussgrössen sowie der Abschätzung der Durchleitungskapazitäten konnten in einem Beitrag zum VSE-Bulletin publiziert werden. Eine weitere Publikation zum Thema „Meteorological based power system management“ wurde erstellt, konnte aber noch nicht publiziert werden.

Die Schwachstellen der Standards für die Berechnung der Leiterseiltemperatur wurden erkannt. Die konkreten Werte der Emissivität und der Reflektivität der Leiterseile sind nicht bekannt. Insbesondere die Emissivität hat aber bei hohen Leiterseiltemperaturen einen wesentlichen Einfluss auf die Resultate. Im operationellen Betrieb sind sehr hohe Leiterseiltemperaturen aber sehr selten. Daher ist eine Eichung anhand gemessener Daten kaum möglich. Die beiden Grössen sollten daher in Versuchsanlagen bestimmt werden.

Der Einfluss der meteorologischen Grössen auf die Leiterseiltemperatur konnte aufgezeigt werden. Grosse Unterschiede bei der Windexposition führen zu Unterschieden bei der Kühlung der Leiterseile. Stark abgeschattete Trassenabschnitte weisen sehr schlechte Kühlungsbedingungen aus. Dies führt zu hohen Seiltemperaturen an diesen Abschnitten. Weder durch Interpolation von benachbarten Messstellen noch durch Prognosen lassen sich diese Verhältnisse mit ausreichender Verlässlichkeit bestimmen. Die Strahlung und die Temperatur können durch Messungen an benachbarten Stationen hinlänglich abgeschätzt werden. Prognosen der Strahlung weisen aber eine grosse Unsicherheit auf. Die Lufttemperatur lässt sich mit der erforderlichen Qualität prognostizieren.

Konkrete Vorschläge für eine dynamische Bestimmung der Durchleitungskapazitäten basierend auf Temperaturprognosen sowie Vorschläge für Vereisungsprognosen wurden ausgearbeitet. Bei Bedarf können diese Systeme einem operationellen Einsatz zugeführt werden. Schwächen des heutigen Systems konnten aufgezeigt und im Rahmen einer Weiterbildung bei der Swissgrid diskutiert werden.

Für die Strahlung wurde eine Methodik zusammengestellt, welche maximal mögliche Werte für eine prognostische, dynamische Bestimmung der maximalen Stromdurchleitung ermöglicht.

Aus dem Projekt TeKaF liegt ein Vorschlag zum Umgang mit geringer Windkühlung vor. Dieser Ansatz kann aus den in unserem Projekt gewonnenen Erkenntnissen voll unterstützt werden.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Gesamtprojekt konnte wie geplant durchgeführt werden. Die Ziele wurden erreicht. Die über das Webportal www.leiterseil.ch zur Verfügung stehenden Daten wurden und werden intensiv durch Forschende benutzt. Eine Vielzahl von Publikationen des Institutes für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik der ETH Zürich konnte auf diesen Daten aufbauen. Insbesondere das Projekt Temperaturabhängige Kapazitätsausnutzung für Freileitungen am High Voltage Laboratory konnte von der bereitgestellten Infrastruktur und den Daten profitieren. Die Weiterführung der Datensammlung und -Bereitstellung ist durch die Swissgrid finanziell abgesichert.

Leider ist die Zukunft der Messeinrichtungen mittelfristig noch nicht gesichert.

Es wird noch versucht eine deutschsprachige und eine englischsprachige Publikation zu den Projektresultaten zu platzieren. Entwürfe der beiden Publikationen liegen vor.

Der Einführung einer dynamischen Berechnung der maximalen Durchleitungskapazitäten steht basierend auf den Resultaten dieses Projektes nichts im Wege. Aus Sicherheitsüberlegungen sollte aber für die Windkühlung und die Strahlung nicht auf Prognosen abgestützt werden. Mit dem vorgeschlagenen Vorgehen muss damit gerechnet werden, dass über ein Jahr gesehen keine höheren Durchleitungs Mengen im Vergleich zu heute resultieren werden. Dieser Umstand steht im Widerspruch zu gewissen Publikationen aus dem Nord- und Ostseeraum. Die Ursache liegt bei den Unterschieden in der Topographie. Im Umfeld der Alpen und Voralpen muss für die meisten Trassenverläufe von örtlich sehr schlechten Kühlungsbedingungen infolge Windabschattung ausgegangen werden.

Der Aufbau des Testbetriebs zum Monitoring der Vereisung an Freileitungen mittels Webcams verlief sehr erfolgreich. Es konnte eine gute Datenverfügbarkeit erzielt werden. Die Webcams ermöglichen einerseits die Erhebung der Vereisungshäufigkeit an den Standorten. Diese Information lag zu Projektbeginn noch nicht vor. Andererseits wurden die Livebilder der Webcams von der Swissgrid im operationellen Betrieb eingesetzt. Verbesserungspotenzial liegt bei der Stromversorgung und dem Einsatz von Heizplatten zur Verbesserung der Datenverfügbarkeit.

Die Vereisungsvorhersagen liefen sehr zuverlässig und lieferten eine gute Trefferquote. Die Fehlalarmrate war noch relativ hoch, hier konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der Leiterseiltemperatur in die Vorhersagen einbezogen werden muss. Diese Funktionalität wurde im Projekt nicht entwickelt. Bei Bedarf können via Web Service auch nach Projektende Vereisungsvorhersagen bezogen werden.

Referenzen (chronologisch)

- 1 Sattinger, W.: 2004, Einführung von Zwischengrenzwerten für maximale Leiterseilbelastungen; Etrans, interner Bericht
- 2 Projekt Temperaturabhängige Kapazitätsausnutzung von Freileitungen „TeKaF“; ETH Zürich 2012, Projekt-/Systembeschreibung
- 3 Strobach, M., Franck Ch.M.; 2012, TeKaF Project Report WP A.2, ETH Zürich
- 4 Steinegger, U.:2012, BFE Projekt: Optimierung des Betriebes von Freileitungen aus meteorologischer Sicht; Präsentationsunterlagen für „TeKaF“-Meeting,
- 5 Vogel, B.: 2013(1), Wetterföhliche Stromleitungen, energieia 01.07.2013
- 6 Vogel, B.: 2013(2), Wetterföhliche Stromleitungen, Et – Elektrotechnik, Juni 2013
- 7 Sattinger, W.: 2004, Einführung von Zwischengrenzwerten für maximale Leiterseilbelastungen; Etrans, interner Bericht
- 8 Hinder, M.: 2013; Analyse der direkten Leiterseiltemperaturmessungen auf einer 220- und einer 380-kV-Leitung; Bachelorarbeit, HSR
- 9 Steinegger, U., Notter, R. und Sattinger, W.: 2014, Der Weg zur temperaturbasierten Netzführung; Wetterinformationen ermöglichen optimale Ausnutzung des Netzes; Bulletin SEV/VSE 5/2014
- 10 Alvarez, J.R.,Franck, Ch.M.: 2015, Dynamic Line Rating of Overhead Transmission Lines under Natural Convective Cooling, Powertech Eindhoven, Netherlands
- 11 Alvarez, J.R.,Franck, Ch.M.: 2015, Final Report WP A; TeKaF project report, ETH, High Voltage Laboratory
- 12 Bader, K., Golle, I., Holderegger, M., Hopitzan, H., Steinegger, U., Zesiger, R.: 2015, Leiteratemperaturmessung am befahrenen Fahrleitungssystem, Elektrische Bahnen, Elektrotechnik im Verkehrswesen, Ausgabe 10-2015
- 13 Golle, I., Holderegger, M., Steinegger, U.: 2015, Thermische Modelle des Fahrleitungssystems und dessen Validierung, Elektrische Bahnen, Elektrotechnik im Verkehrswesen, Ausgabe 10-2015
- 14 Andrea Michiorri, Huu-Minh Nguyen, Stefano Alessandrini, John Bjørnar Bremnes, Silke Dierer, Enrico Ferrero, Bjørn-Egil Nygaard, Pierre Pinson, Nikolaos Thomaidis, Sanna Uski, Forecasting for dynamic line rating, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 52, December 2015, Pages 1713-1730, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.134>.