



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

Jahresbericht 23.11.2012

---

# **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](http://www.bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer:**

Meteodat GmbH  
Technoparkstrasse 1  
CH-8005 Zürich  
[www.meteodat.ch](http://www.meteodat.ch)

**Autoren:**

Urs Steinegger, Meteodat GmbH, [steinegger@meteodat.ch](mailto:steinegger@meteodat.ch)  
Silke Dierer, Meteotest, [silke.dierer@meteodat.ch](mailto:silke.dierer@meteodat.ch)

<b>BFE-Bereichsleiter:</b>	Dr. Michael Moser
<b>BFE-Programmleiter:</b>	Dr. Michael Moser
<b>BFE-Vertragsnummer:</b>	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 Berninalleitung  
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“. An der Berninalleitung zwischen La Punt im Engadin und Campocologno im Puschlav wurden drei neue Messstellen errichtet. An der Lukmanierleitung wurden die geplanten Modifikationen umgesetzt. Auch die Installation der Web-Kameras konnte erfolgreich abgeschlossen werden.

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

An der Fachhochschule in Freiburg wurden im Juli zwei projektnahe Bachelor Arbeiten erfolgreich abgeschlossen.

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. Zu den drei Messstellen an der Lukmanierleitung konnten noch zwei Messstellen an der 220 kV-Habsburgleitung zwischen Beznau und Regensdorf, drei Messstellen an der 380 kV-Berninalleitung und neue Standorte mit Web-Kameras eingerichtet werden.

### **Neue Messstellen an der Berninalleitung**

Im Rahmen dieses Projektes wurde der Aufbau von drei neuen Messstellen an der Berninalleitung realisiert (Abb. 1). Bereits im Laufe des Jahres 2011 konnte ein Grundsatzentscheid zwischen der Swissgrid und der Repower über das Bedürfnis nach Verbesserung der Leiterseil-Überwachung erzielt werden. Gegen Jahresende zeichnete sich dann auch eine Lösung für die Finanzierung ab.

Ende Juni stand mit dem Eintreffen der Bewilligung des Eidgenössischen Starkstrom Inspektorats der Installation der Messstellen nichts mehr im Wege.

Die drei realisierten Messstellen wurden aus Mitteln der Repower finanziert. Mit dem Besitzwechsel der Leitungen von der Repower zur Swissgrid werden auch die Messstellen durch die Swissgrid abgegolten. Es wurden etwa 180'000.- CHF für die Beschaffung sowie etwa 30'000.- CHF für die Planung und Installation investiert.

Die Geräte liefern seit Anfang August Daten. Seit dem 17. August ist die Datenqualität wie erwünscht. Davor waren mehrere Interventionen beim Lieferanten notwendig um festgestellte Probleme beseitigen zu lassen (Anhang Mess-Standorte).

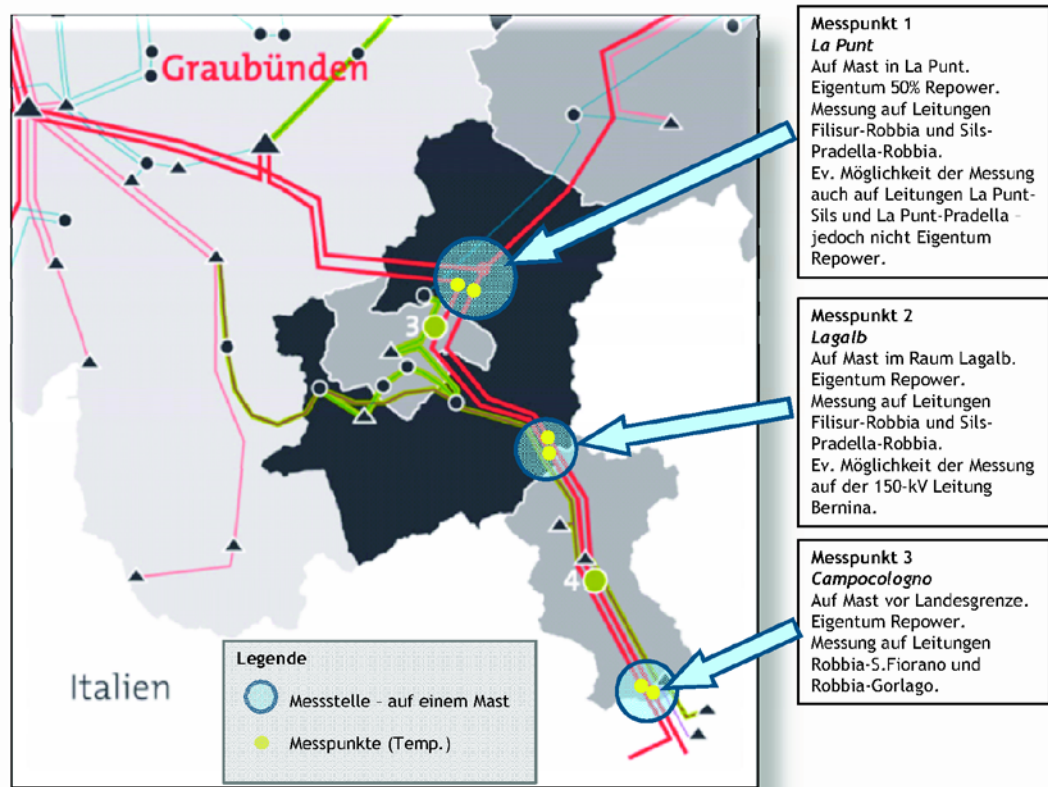


Abb. 1: Realisierte Messpunkte an der Berninalleitung

An allen drei Standorten wurden zwei Seil-Temperaturmessfühler (Abb. 2, links) sowie eine Meteostation eingerichtet. Die Meteostationen umfassen jeweils folgende Sensoren: Temperatur- und Feuchte, 3D-Wind sowie Globalstrahlung. Die Energieversorgung der Stationen erfolgt über Solarpanel und Windgeneratoren (Abb. 2, rechts).



Abb. 2 Messstandort in La Punt. Auf Höhe des zweiten Auslegers wird gerade der Leiterseil-Temperatur-Sensor (kleines Bild) am äusseren Leitungsstrang in Richtung Robbia montiert (links). Das Bild rechts zeigt die Montage der Basisstationen sowie die Geräte zur Energielieferung.

## Standorte mit Eismonitoring

Das Teilprojekt Vereisungsmonitoring hat das Ziel, das Wissen über Vereisungshäufigkeit und Eislasten in verschiedenen Regionen der Schweiz zu erweitern. Es wurden in den vergangenen Jahren

verschiedene Methoden und Messinstrumente zur Bestimmung von Vereisung getestet (z.B. im Rahmen der COST Action 727<sup>1</sup>). Allerdings hat sich keines der Instrumente im operationellen Betrieb im Feld als zuverlässig erwiesen. Aus diesem Grund wurde entschieden, dass das Monitoring von Vereisung an Freileitungen auf der Grundlage von Webcam-Bildern durchgeführt werden soll. Der Nachteil dieser Methode ist, dass keine quantitativen Informationen zur Eislast zur Verfügung stehen. Der Vorteil ist, dass sie eine gute Einschätzung der Vereisungssituation erlauben, während andere Vereisungsmessungen häufig ohne zusätzliche Bildinformation nicht interpretiert werden können. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Installation von Webcams mit relativ geringem Aufwand und geringen Kosten verbunden ist. An einigen Freileitungen sind zusätzlich Zugkraftmessungen und meteorologische Messungen verfügbar, so dass die Kombination der Messungen eine gute Beschreibung der Vereisungssituationen erlaubt.

An fünf Freileitungen in der Schweiz wurden 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 (Abb. 3). Für die Nachtaufnahmen wird ein Infrarotscheinwerfer eingesetzt. Die Stromversorgung erfolgt durch ein Solarpanel und eine Batterie. Die Kameras wurden mit einem Metaldach versehen (Abb. 4), um die Vereisungsgefahr zu minimieren und um die Kamera gegen Beschädigungen z.B. durch Eisschlag zu schützen. Die Bilder werden zurzeit mit stündlicher Auflösung gespeichert.

Die Kameras blicken jeweils auf den Isolator und die Leitung (Abb. 6). Sie sind unbeheizt, so dass bei ungünstigen Windverhältnissen mit einer Vereisung des Objektivs gerechnet werden muss. Um die Vereisungsgefahr so gering wie möglich zu halten, wurde versucht, die Blickrichtung der Kamera gegen die Windrichtung auszurichten, die während Vereisungssituationen hauptsächlich auftritt. Die Informationen zu den Windrichtungen während Vereisungssituationen wurden aus Eislastmessungen, Windmessungen und Klimainformationen abgeleitet.

Die Kameras arbeiten bisher sehr zuverlässig. Lediglich am Standort Mittelplatte ist die Qualität der Nachtaufnahmen schlecht, da der Infrarotscheinwerfer bei der Installation beeinträchtigt wurde. An den meisten Standorten wurden seit der Installation noch keine signifikanten Vereisungsereignisse beobachtet. Am Standort Grimsel trat aber bereits während mehrerer Perioden Vereisung auf. Eine Vereisungsepisode am 6. November 2012 ist in Abbildung 5 dargestellt.

Zur Detektion von Eisanlagerungen wurden an den in Tab. 1 gelisteten Stellen Web-Kameras installiert. Verwendet werden Mobotix Kameras (Abb. 3), welche basierend auf zwei separaten Bildsensoren sowohl am Tag als auch bei Dunkelheit Bilder liefern.



Abb. 3: Web-Kamera vor der Installation (links) und Aufnahme der Leitungen und Isolatoren (rechts) auf der Lagalb.

<sup>1</sup> [http://www.cost.eu/domains\\_actions/essem/Actions/727](http://www.cost.eu/domains_actions/essem/Actions/727)



Abb. 4 Webcam des Typs Mobotix M12 mit Schutzdach am Mast installiert.

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	Mittelplatten	15. November 2012



Abb. 5: Webcam-Bilder während eines Vereisungsereignisses am Standort Grimsel am 6. November 2012, um 6 Uhr (links), 12 Uhr (Mitte) und 18 Uhr (rechts).



Abb. 6: Aufnahmen der Webcams von Leitungen und Isolatoren an den Standorten Lagalb (oben, links), Scheltenpass (oben, rechts), Chrinde (Mitte, links), Grimsel (Mitte, rechts) und Mittelplatte (unten).

## Modifikationen an der Lukmanierleitung

Die Messstelle auf der Alp Caschlé oberhalb von Rueras wurde demontiert. Die Messungen der vergangenen Jahre haben gezeigt, dass dieser Standort keine wichtigen Informationen für den Betrieb der Leitung liefert. Die Meteostation wurde nach deren Überprüfung auf der Mittelplatten wieder montiert und am 15. November 2012 in Betrieb genommen. Dieser neue Standort liegt am höchsten Punkt der Leitung auf 2510 m ü. M. und damit rund 370 m höher als der alte Standort. Die Messungen werden neu an einem sehr exponierten Standort durchgeführt. Neben speziellen Windverhältnissen erwarten wir auch Fälle mit Vereisung dokumentieren zu können. Wie die Bilder vom Januar 2012 (Abb. 7) belegen, traten hier schon massive Eisanlagerungen auf. Tage nach dem eigentlichen Ereignis wurden Eisgebilde von bis zu einem Meter Länge festgestellt. In Kombination mit den Bildern der Web-Kamera sollten in Zukunft entsprechende Witterungssituationen optimal dokumentiert werden können.

Wie geplant wurden die drei Meteostationen (Cugnasco, Mittelplatte, Erstfeld) an der Lukmanierleitung mit Globalstrahlungssensoren ergänzt. Neben der Installation der Sensoren die mit der Unterstützung der Alpiq Enertrans erfolgte, mussten auch die Programme der Datenlogger erweitert werden. Diese

Arbeiten wurden durch die Meteotest und die Meteodat GmbH durchgeführt. In Erstfeld wurde zum vorhandenen Windmesser ein zweites Gerät installiert. Das Ziel dieser Parallelmessung ist es, die vorhandenen Zweifel an den gesammelten Daten auszuräumen oder bestätigt zu finden.



Abb. 7: Dokumentation von Eisanlagerungen an Infrastrukturanlagen der Lukmanierleitung nach dem Sturm Andrea vom Januar 2012 auf der Mittelplatte (Bilder: Alpiq Enertrans AG).

## **Neue Messstellen an der Habsburg-Leitung**

Im Rahmen des Swisselectric research Projektes „TeKaF“ wurden zwischen Beznau und Regensdorf an der Habsburgleitung zwei neue Messstationen eingerichtet. Daten werden seit Ende März 2012 gesammelt und stehen dem hier beschriebenen Projekt über das Web-Portal für Auswertungen zur Verfügung. Die Meteodat GmbH konnte bei der Wahl der Messgeräte für diese Messstellen ihre Erfahrungen einbringen. Aus der Zusammenarbeit mit einem Projektmitarbeiter des Institutes für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik der ETH Zürich resultierte ein Messkonzept, das sowohl wissenschaftlichen als auch operationellen Bedürfnissen standhalten sollte. Für die Messstellen an der Berninalleitung wurde dieselbe Instrumentierung übernommen.

## **Datenportal Leiterseilprojekt**

Im Rahmen eines Auftrages der Swissgrid an die Meteodat GmbH wurden 2009 eine Test-Datenbank und ein Webportal erstellt. Diese Testumgebung wurde aktualisiert und mit den Daten der neuen Messstellen erweitert.

Über das Webinterface steht die gesamte Datenbasis für das BFE-Projekt und das benachbarte Projekt TeKaF zur Verfügung. Der Zugriff auf die teilweise sensitiven Daten kann nach Unterzeichnung einer Vertraulichkeitserklärung mit der Swissgrid persönlich und passwortgeschützt ermöglicht werden.

Die Stromdaten der Lukmanierleitung liegen (mit Lücken) im Datenportal seit Mai 2004 vor. Die zeitliche Auflösung beträgt eine Minute. Für kurze Perioden im September bis Oktober 2012 konnten auch Stromdaten der Habsburg-Leitungen sowie der Bernina-Leitungen in das Datenportal aufgenommen werden. Daten von weiteren im Projekt untersuchten Leitungsabschnitten sollen integriert werden. Wie bei allen anderen Daten wird eine laufende Aktualisierung angestrebt.

## ***Vorhersagen***

### **Vereisungsvorhersagen**

Für die fünf, mit Webcams ausgerüsteten Leitungen werden quasi-operationelle Vereisungsvorhersa-

gen durchgeführt (Tab. 1). Das Potential für die Vorhersage von Vereisungsbeginn und -ende und eine qualitative Vorhersage der Eislast soll abgeschätzt werden. Die besondere Herausforderung liegt dabei in der Vorhersage des sehr kleinräumigen Phänomens Vereisung im komplexen Gelände der Alpen und des Juras. Zudem ist die Modellierung der Eislast noch mit grossen Unsicherheiten behaftet.

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 verdrillen können.

Die ursprünglich geplanten Modellgebiete des Wettervorhersagemodells sind in Abbildung 8 dargestellt. Tests mit dem Modellgebiet mit 1 km Gitterweite haben gezeigt, dass einzelne Episoden gut simuliert werden können, dass aber im quasi-operationellen Betrieb regelmässig Instabilitäten auftreten. Diese sind vor allem durch die starken Geländesteigungen bedingt, die bei kleinen Gitterweiten im Modell auftreten. Verschiedene Tests mit numerischen Verfahren und physikalischen Schemata wurden durchgeführt. Bisher wurde aber noch keine Modellkonfiguration für einen stabilen, täglichen Betrieb gefunden. Die Untersuchungen werden weitergeführt.

Für die aktuellen Vereisungsvorhersagen wurde eine Konfiguration der Modellgebiete gewählt, wie sie für die operationellen Wettervorhersagen bei Meteotest verwendet wird (Abb. 9). Die kleinste Gitterweite beträgt 2 km. Dies ist eine recht hohe horizontale Auflösung und in den meisten Regionen wird sich die Ergebnisqualität durch eine Gitterweite von 1 km statt 2 km nicht signifikant verbessern. Diese Modellkonfiguration wird täglich gerechnet, so dass die meteorologischen Eingabedaten für den Vereisungsalgorithmus zur Verfügung stehen.

In Abbildung 10 ist beispielhaft die simulierte Eislast für das Vereisungsereignis am 6. November 2012 am Grimselpass (Abb. 5) zu sehen. Es ist zu erkennen, dass das Modell die Eiszunahme über den Tag, die auch in den Kamerabildern zu beobachten ist, gut wiedergibt.

Das Vorhersagesystem für Vereisungsvorhersagen ist aufgebaut worden. Und Vergleiche für einzelne Vereisungsepisoden zeigen gute Ergebnisse. Die nächsten Schritte im Teilprojekt Vereisungsvorhersage werden sein, die Vereisungsvorhersage entlang den Freileitungen aufzubauen und diese auf einer Website zu visualisieren. Zusätzlich wird weiter am quasi-operationellen Betrieb der Modellkonfiguration mit 1 km Gitterweite gearbeitet.

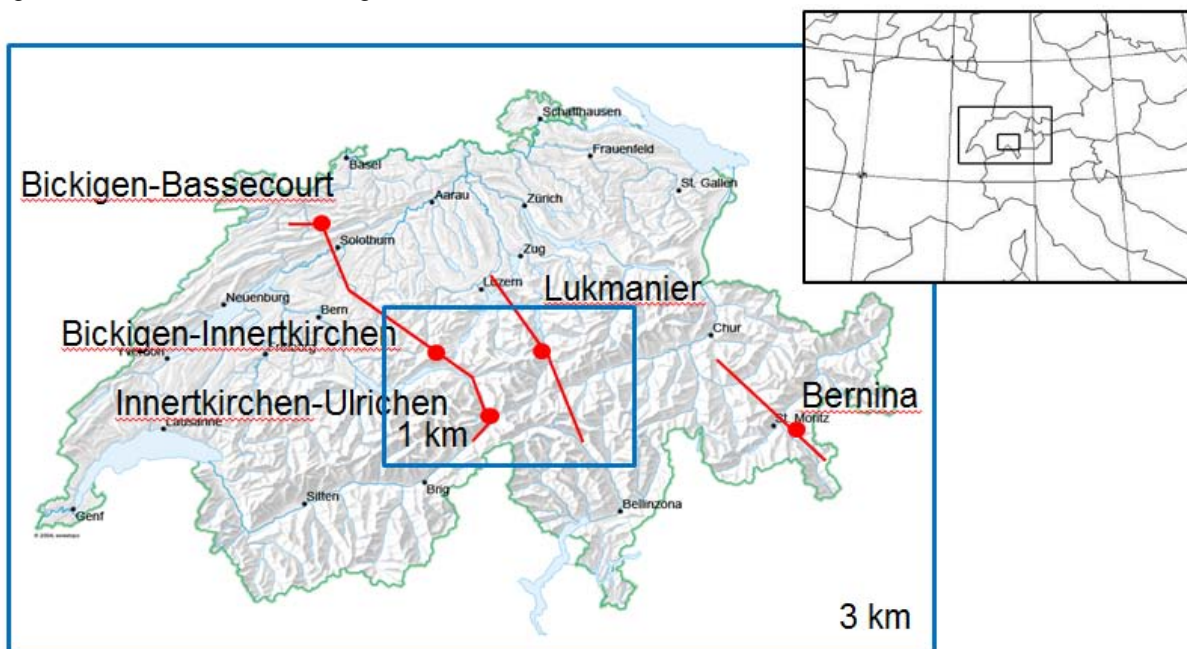


Abb. 8: Ursprünglich geplante Konfiguration der Modellgebiete für die Vorhersagen des Wettermodells WRF mit 1 km, Gitterweite als höchste Auflösung. Die roten Linien markieren den ungefähren Verlauf der Freileitungen und die roten Punkte markieren die ungefähren Standorte der Webcams.

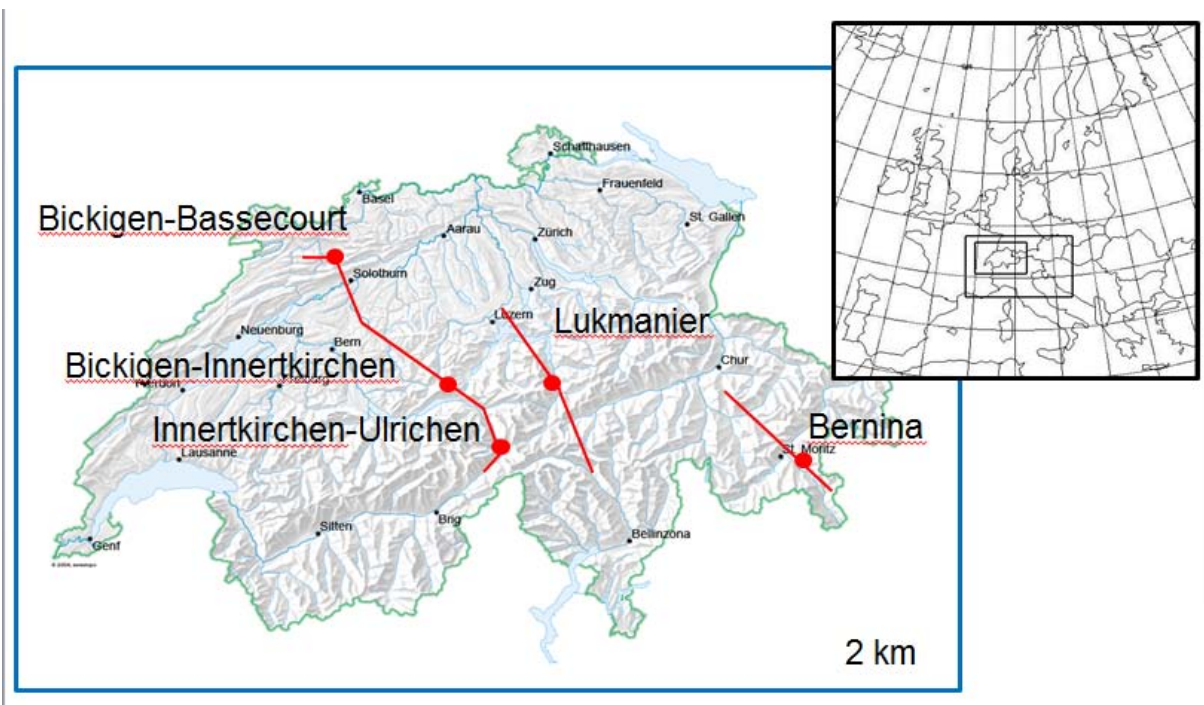


Abb. 9: Zurzeit quasi-operationell betriebene Konfiguration der Modellgebiete für die Vorhersagen des Wettermodells WRF mit 2 km, Gitterweite als höchste Auflösung. Die roten Linien markieren den ungefähren Verlauf der Freileitungen und die roten Punkte markieren die ungefähren Standorte der Webcams.

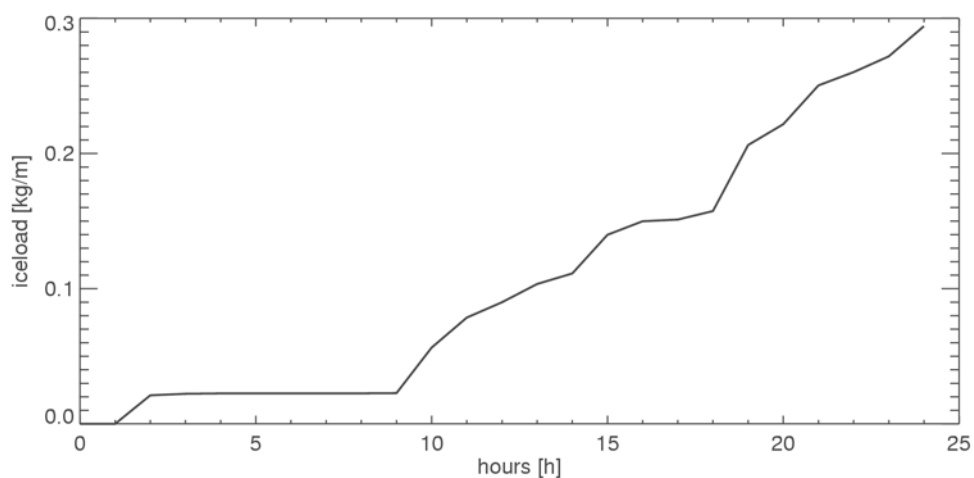


Abb. 10: Zeitreihe der vom Vereisungsmodell vorhergesagten Eislast für das Vereisungsereignis am 6. November 2012 am Grimselpass.

## Nationale Zusammenarbeit

Am 4. Oktober 2012 wurde an der ETH Zürich ein TeKaF Projekt-Meeting durchgeführt. Als Mitglied des Steering Committee Mitglied stellt Walter Sattinger die Zusammenarbeit zwischen den beiden Projekten sicher. Urs Steinegger orientierte das Projektteam und die Mitglieder des Steering Committee über das BFE-Projekt und den Stand der neuen Messstellen.

Das Steering Committee konnte die Unklarheiten betreffend den Zugriff auf die Meteorologische Datenbank klären. Walter Sattinger von der Swissgrid bekräftigte zudem, dass die Stromdaten bereitgestellt werden und in die Datenbank integriert werden können.

Michael Strobach (Doktorant) der das Teilprojekt Elektro-Thermische Seileigenschaften im TeKaF bisher bearbeitet hat, verlässt das High Voltage Laboratory der ETH per November 2012. Ein Nachfolger für die Doktorarbeit konnte mit Moonjo Kang gefunden werden. Erste interessante Modellierungen

gen und Laborresultate liegen vor. Der Projektstand im Teilbereich Materialeigenschaften wurde von Marco Frigerio (Doktorand an der EMPA) präsentiert. Von beiden Arbeiten liegen Progress Reports vor [1,2].

Im Rahmen des hier beschriebenen Projektes wurden an der Fachhochschule für Technik und Architektur Freiburg unter Prof. Sauvain zwei Bachelor Arbeiten abgeschlossen. Herr Michael Aeberhard verfasste eine Arbeit mit dem Titel „Einfluss des Wetters auf die Leiterseiltemperatur und die Verhinderung von Vereisung durch Lastflussregelung“ [3].

Die beiden Studenten P. Auderset und R. Daoud verfassten eine Arbeit zum Thema „Relais de protection et interface CEI 61850“. Dieses Projekt wurde von der ABB initiiert. Diese Arbeit steht nur am Rande mit dem vorliegenden Projekt in Beziehung.

Am power system laboratory der ETH Zürich wurde im Februar 2012 die Master-Arbeit von Frau E. Stoumpi abgeschlossen. In der Arbeit mit dem Titel „Adjustment of loading limits in the transmission grid based on temperature forecasts“ [4] werden die von der Swissgrid verwendeten Temperatur-Prognosen der Meteodat GmbH beschrieben. Zudem werden Methoden und Probleme im Zusammenhang mit der Bewirtschaftung von Freileitungen aufgezeigt. Die Autorin zeigt auf, dass eine wichtige Grundlage dafür die Verknüpfung der regionalen Prognosen mit konkreten Leiterabschnitten darstellt. Die Belastbarkeit eines Leiterabschnitts wird durch die Seileigenschaften, den Durchhang, die geographische Lage aber auch durch Transformatoren beschränkt. Für die Bestimmung der maximal möglichen Durchleitung sind neben den variablen Wetterbedingungen auch alle technischen Beschränkungen der Installationen zu berücksichtigen. Speziell im Winter sind es offenbar oft die Transformatoren welche die maximale Durchleitung beschränken.

Es wird angestrebt eine von Frau Stoumpi verwendete Liste (ursprünglich von der Swissgrid) dahingehend zu bearbeiten, dass eine Zuweisung zu Prognoseregionen und kritische technische Belegungen für alle Leiterabschnitte dokumentiert werden.

## Internationale Zusammenarbeit

Im Rahmen der COST Aktion ES1002 wurde von der Meteotest vom 24. bis 26. September 2012 ein Workshop zu den Themen Dynamische Bewirtschaftung von Freileitungen und Vereisung an Freileitungen organisiert. Die Projekt-Mitarbeiterin Slike Dirrer von der Meteotest hielt einen Vortrag zum Thema „Icing observations and icing forecasts at power lines in Switzerland“. Urs Steinegger orientierte über die Messstellen in der Schweiz und das laufende BFE-Projekt.

## Bewertung 2012 und Ausblick 2013

Das vorliegende Projekt wurde im April 2012 begonnen. Die Ziele für 2012 konnten erreicht werden. Insbesondere im Bereich Monitoring konnte ein grosser Schritt gemacht werden. Damit ist für den weiteren Projektverlauf eine ideale Basis gelegt.

## Referenzen

- 1 Frigerio, M. and Holdsworth, S.R.: 2012, TeKaF Projekt „Material Properties“, Progress Report, EMPA Dübendorf, August
- 2 Strobach, M. and Franck, Ch.: 2012, TeKaF Projekt „Temperaturabhängige Kapazitätsausnutzung für Freileitungsnetze“, EEH ETH Zürich, August
- 3 Aeberhard, M.: 2012, Einfluss des Wetters auf die Leiterseiltemperatur und die Verhinderung von Vereisung durch Lastflussregelung, Bachelorarbeit,
- 4 Stoumpi, E.: 2012, Adjustment of loading limits in the transmission grid based on temperature forecasts, Masterarbeit EEH ETH Zürich, Februar

# Anhang

## ***Dokumentationen***

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.