



swisselectric
research

Abschlussbericht

MEMFIS

MEASURING, MODELLING AND FORECASTING ICE
LOADS ON STRUCTURES

Autor, Koautor: René Cattin, Silke Dierer

Institution: Meteotest

Adresse: Fabrikstrasse 14, 3012 Bern

Telefon: +41 31 307 26 26

Email: rene.cattin@meteotest.ch

Dauer des Projekts: 01.05.2008 – 30.04.2010

Datum: 31.05.2010

1. Management Summary

Die Vereisung von Strukturen ist ein Schlüsselfaktor bei der Planung von Infrastrukturanlagen wie Freileitungen, Windturbinen oder Seilbahnen in gebirgigen oder arktischen Regionen. Im Rahmen dieses Projekts wurden Messungen der Eislasten an drei Standorten in der Schweiz durchgeführt. Zur Simulation und Prognose von Eislasten wurden neue Methoden auf der Basis von numerischen Wettermodellen entwickelt und validiert.

An den drei Standorten Gütsch (inneralpin), Schwyberg (Voralpen) und Matzendörfer Stierenberg (Jura) wurden während der Winter 2008/09 und 2009/10 Messungen der Eislast mit dem Saab/Combitech IceMonitor Mk1 durchgeführt. Der Sensor besteht aus einem vertikal montierten, frei rotierenden Zylinder, dessen Gewicht laufend gewogen wird. Zusätzlich wurden die meteorologischen Parameter Wind, Temperatur, relative Feuchte und landwellige einfallende Strahlung gemessen. Die Messungen konnten planmässig im Herbst 2008 gestartet werden. Die Messkampagnen verliefen ohne grössere Pannen, es konnte eine hohe Datenverfügbarkeit erreicht werden. Die Messungen auf dem Gütsch wurden von MeteoSchweiz an Ihrer SwissMetNet Teststation durchgeführt. Der Sensor auf dem Gütsch wurde zusätzlich durch eine automatische Kamera überwacht.

Die Auswertung der Messdaten des IceMonitors zeigte verschiedene Mankos auf. Einerseits führten die Temperaturabhängigkeit der Lastzelle sowie die schlechte Lagerung des Vertikalstabs zu Instabilitäten im Signal. Zusätzlich konnte eine Drift des Nullpunkts festgestellt werden. Schliesslich war die freie Rotation des Vertikalstabs nicht in allen Fällen gegeben. Der IceMonitor ist demnach im momentanen Zustand nicht in der Lage, die Vereisung automatisch und zuverlässig zu messen. Erschwerend kam hinzu, dass der Hersteller des IceMonitors von der Finanzkrise schwer betroffen war und deshalb nicht in der Lage war, die nötigen Verbesserungen des Sensors durchzuführen.

Dies hatte zur Folge, dass eine automatische Identifizierung der Vereisungsereignisse aus den Messdaten nicht möglich war. Somit konnten nur starke Vereisungsereignisse erfasst werden, wobei der Wert für die gesamte Eislast mit einer grossen Unsicherheit behaftet war. Auf dem Gütsch konnten dank der Kamerabilder die Vereisungsereignisse identifiziert werden. Damit war es trotzdem möglich, eine gute Datenbasis für den Vergleich mit den Simulationen zu Verfügung zu stellen.

Die innerhalb des Projekts geplanten Resultate zur Vereisungshäufigkeit an den drei Standorten konnten nicht vollständig erreicht werden. Es zeigte sich aber, dass starke Vereisungsereignisse eher Einzelereignisse innerhalb eines Winters sind. Es können zudem Aussagen zu den maximalen Eislasten an den Messstandortengemacht werden, wenn auch diese mit einer gewissen Vorsicht zu behandeln sind. Aus der Datenanalyse konnten folgende Maximallasten bestimmt werden:

- Matzendörfer Stierenberg: 6.2 kg/m (auf 10 m ü.G.)
- Schwyberg: 5.6 kg/m (auf 10 m ü.G.)

- Gütsch: ca. 6 kg/m (auf 2 m ü.G., Schätzung aus Kamerabildern)

Eine weitere Einschränkung besteht darin, dass die Messungen auf 10 m durchgeführt wurden, während in der Höhe von Überlandleitungen oder Windkraftanlagen mit wesentlich stärkerer Vereisung gerechnet werden muss.

Neben Messungen wurde im Rahmen des Projekts ein Modellsystem zur Simulation von Vereisungsereignissen erfolgreich implementiert. Dieses besteht aus einem dem Vereisungsalgorithmus, der die Eisanlagerung an einem vertikalen, frei rotierenden Zylinder beschreibt, sowie den Wettervorhersagemodellen WRF und COSMO-2. Elf Vereisungsereignisse an den Standorten Matzendörfer Stierenberg, Schwyberg und Gütsch wurden simuliert. Der Vergleich mit Messungen zeigte, dass das Auftreten und die Dauer der Vereisungsereignisse gut erfasst wurden. Mit beiden Wettermodellen wurde während neun von elf Ereignissen Vereisung simuliert und die Dauer der Vereisung mit einem mittleren Fehler von 18% (WRF) bzw. 20% (COSMO-2) vorhergesagt. Nur in Gebieten mit sehr komplexer Orographie, z.B. am Gütsch, scheint teilweise die COSMO-2 Gitterweite von 2.2 km nicht auszureichen, um ein Vereisungsereignis zu erfassen. In solchem Gelände sind Gitterweiten von einigen 100 m notwendig. Sensitivitätsstudien mit verschiedenen Mikrophysik- und Turbulenzschemata haben gezeigt, dass die Ergebnisse robust gegenüber Änderungen der Modellphysik sind, solange die Modellphysik ausreichend komplex ist.

Der Vergleich von gemessener und simulierter Eislast ist aufgrund der Ungenauigkeit der gemessenen Eislast eher als qualitativer Vergleich zu betrachten. Der Bias der simulierten maximalen Eislast lag für die Simulationen mit WRF bei -44% während die Simulationen mit COSMO-2 die Eislast um 150% überschätzten. Beurteilt man die Simulation der Eislast in grosszügigen, qualitativen Kategorien, so werden mit dem WRF Modell sieben von neun und mit dem COSMO-2 Modell vier von neun Ereignissen erfasst. Insgesamt ist die Simulation der maximalen Eislast nicht sehr befriedigend. Zwei Faktoren tragen zur Ungenauigkeit der simulierten Eislast bei. Die Teilchenzahldichte, welche eine Eingangsgrösse für den Vereisungsalgorithmus ist, hat einen sehr starken Einfluss auf die simulierte Eislast und ist gleichzeitig mit grosser Unsicherheit behaftet. Die Verwendung von typischen, maritimen Werten (100 cm^{-3}) und typischen, kontinentalen Werten (300 cm^{-3}) verursacht Unterschiede im Bereich von 70% der maximalen simulierten Eislast. Es liegen wenige Messungen zu Teilchenzahldichten, bzw. mittleren Tropfengrössen vor. Zusätzliche Messungen der Teilchenzahldichte bzw. der Tropfengrösse und, eventuell mittelfristig, die Verwendung von in Wettervorhersagemodellen prognostisch berechneten Teilchenzahldichten können zu einer verbesserten Simulation der maximalen Eislast beitragen.

Die Simulation der Eislast wird auch dadurch beeinträchtigt, dass der Abbau der Eislast im Vereisungsalgorithmus unvollständig und recht einfach beschrieben ist. Es wird für den Abbau der angelagerten Eislast vor allem der ‚klassische‘ Abschmelzvorgang simuliert. Tatsächlich aber spielen gerade im Bereich der Zentralalpen Prozesse wie kurzweilige Strahlung, Sublimation sowie Wind und Erschütterung der Struktur eine wichtige Rolle bei der Abnahme der Eismasse. Diese Prozesse sind im Vereisungsalgorithmus aber nicht oder nur stark vereinfacht enthalten. Durch die Vernachlässigung dieser Prozesse wird der Abbau der Eislast

tendenziell unterschätzt, was sich auf die Simulation der maximalen Eislast auswirken kann, wenn mehrere Vereisungsereignisse nacheinander stattfinden.

Auf Grundlage der im vorliegenden Projekt erzielten Ergebnisse wurde im Auftrag des Bundesamtes für Energie eine Karte der Häufigkeit meteorologischer Vereisung in der Schweiz berechnet. Die Grundlage bildeten COSMO-2 Analysen für August 2007 bis Juli 2009. Die Ergebnisse wurden anhand von Messungen evaluiert. Die Anwendung des Modells in der Praxis bestätigte, dass das Modellsystem geeignet ist, das Auftreten von Vereisung realistisch zu simulieren. In moderat komplexem Gelände (z.B. Jura, Passlagen) wurde eine gute Übereinstimmung zwischen simulierten und aus Messungen abgeleiteten Vereisungshäufigkeiten gefunden. In sehr komplexem Gelände konnte zwar das klimatologische Mittel über alle Stationen gut vorhergesagt werden, aber sehr exponierte Stationen wurden systematisch unter- und abgeschattete Stationen systematisch überschätzt. Diese Ergebnisse bestätigen die im MEMFIS Projekt gewonnenen Erkenntnisse.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mit der heutigen Generation der Wettermodelle das Potential zur Vorhersage von Vereisungsereignissen besteht. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass für bestimmte Gebiete kleinere als die heute üblichen Gitterweiten notwendig sind, um die Vereisung zu simulieren und dass in komplexem Gelände nicht unbedingt mit einer punktgenauen Vorhersage zu rechnen ist. Weitere Verbesserungen sind in Bezug auf die Vorhersage der maximalen Eislast notwendig.

2. Abschlussbericht

2.1. Einleitung

In vielen Regionen der Erde ist Vereisung ein häufiges Phänomen, z.B. in Skandinavien, Nordamerika und der Alpenregion. Informationen über Vereisung sind hier wichtig bei der Planung von neuen Anlagen wie Freileitungen, Windturbinen oder Seilbahnen. Eisanlagerung an Strukturen erhöht die Belastung von Anlagen, was zum Kollaps von Stromleitungen oder –masten, Produktionsverlusten von Windkraftanlagen oder Betriebsausfällen von Seilbahnen führen kann. Um ökonomische Verlust und das Risiko möglichst gering zu halten, sind Informationen über die Vereisungsverhältnisse wichtig, um den Standort und die Ausstattung der geplanten Anlage anzupassen. Abhängig von der Art der geplanten Anlage sind Vereisungshäufigkeit und / oder die zu erwartende maximale Eislast die entscheidenden Grössen.

Die Kenntnisse über Vereisungsbedingungen sind in der Regel limitiert. Ein engmaschiges Messnetz fehlt und Vereisung ist ein sehr lokales Phänomen. Informationen über Vereisungshäufigkeiten liegen hauptsächlich auf der Grundlage von meteorologischen Messungen von Wind und Temperatur und Beobachtungen von Wolken und Sichtweite vor, die durch das relative grobe Beobachtungsnetz dem sehr lokalen Charakter von Vereisung nicht gerecht werden [1, 2]. Informationen über maximale Eislasten sind noch schwieriger zu erhalten. Messungen der Eislast sind selten und die Ableitung aus meteorologischen Messungen oder Beobachtungen nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich.

Um die Datengrundlage zu verbessern, wurden im Rahmen des hier vorliegenden Projekts zusätzlich zu den bestehenden Vereisungsmessungen am Gütsch (Zentralalpen) zwei weitere Messungen der Eislast installiert. Diese befinden sich am Matzendörfer Stierenberg (Jura) und am Schwyberg (Voralpen). Auf der Grundlage dieser drei Messungen wurden Informationen über Vereisungshäufigkeit und maximale Eislasten in verschiedenen Regionen der Schweiz gewonnen.

Eine Möglichkeit für eine flächendeckende Darstellung von meteorologischen Grössen sind Wettervorhersagemodelle. Neben der Erstellung flächendeckender klimatologischer Information besitzen Wettervorhersagemodelle auch das Potential zur Prognose von Vereisungsbedingungen. Dennoch war ihr Einsatz im Bereich Vereisung bis vor kurzem nicht realistisch, da die Modelle nicht in genügend hoher Auflösung betrieben wurden und die Wolkenbildungsprozesse in den Modellen noch nicht komplex genug dargestellt wurden. Dank zunehmender Rechnerkapazitäten wurden auf beiden Gebieten deutliche Fortschritte gemacht und seit wenigen Jahren mit Gitterweiten im Bereich von 1 bis 3 km betrieben. Am Norwegischen Meteorologischen Institut wurden im Rahmen der COST Action 727 erste Simulationen mit dem Wettervorhersagemodell WRF gekoppelt mit einem Vereisungsalgorithmus durchgeführt, die viel versprechende Resultate zeigten. Ein Ziel des Projekts war es, das Modellsystem für die komplexe Orographie der Schweiz zu implementieren und an einer Reihe von Fallstudien zu testen.

2.2. Projektziele

Das Projekt MEMFIS soll dazu beitragen, eine bessere Beschreibung der Vereisungsverhältnisse in der Schweiz zu erhalten und so die mit Vereisung verbundenen Risiken und ökonomischen Verluste zu reduzieren. Hierfür werden zwei Ansätze verfolgt:

- Messungen an drei Standorten in der Schweiz sollen Informationen über die Vereisungsverhältnisse in verschiedenen Regionen liefern.
- Die Implementierung von Vereisungsmodellen für die Schweiz und deren Evaluation soll Aufschluss darüber liefern, in welchem Umfang sie einen Beitrag bei der Erstellung von Vereisungsklimatologien und zur Eisvorhersage liefern können.

Entsprechend gliedern sich die Arbeiten im Projekt in die Bereiche Messungen und Modellierung. Die Teilziele im Bereich Messungen sind folgende:

- Weiterführung der Vereisungsmessungen an der Gütsch Station, um eine Referenzdatenreihe von Eislastmessungen in den Alpen zu erhalten.
- Zwei weitere Eislastmessungen im Bereich der Voralpen und des Jura, Regionen, die ebenfalls von Vereisung betroffen sind und in denen bisher keine Eislastmessungen existieren.

Im Bereich Modellierung sollen folgende Teilziele erreicht werden:

- Sehr hoch auflösende Simulationen von ausgewählten Vereisungsereignissen in der Schweiz mit dem Wettervorhersagemodell WRF
- Untersuchung der Eignung des operationellen Wettervorhersagemodells COSMO-2 für die Vereisungsmodellierung

2.3. Projektfortschritt

2.3.1. Grundlagen der Vereisung

Vereisung an Strukturen ist definiert als Eis- oder Schneeansatz an Objekten, welche der Atmosphäre ausgesetzt sind, zum Beispiel an Windkraftanlagen (WKA), Überlandleitungen, Seilbahnen, meteorologischen Instrumenten oder Telekommunikationsmasten (Abb. 1).

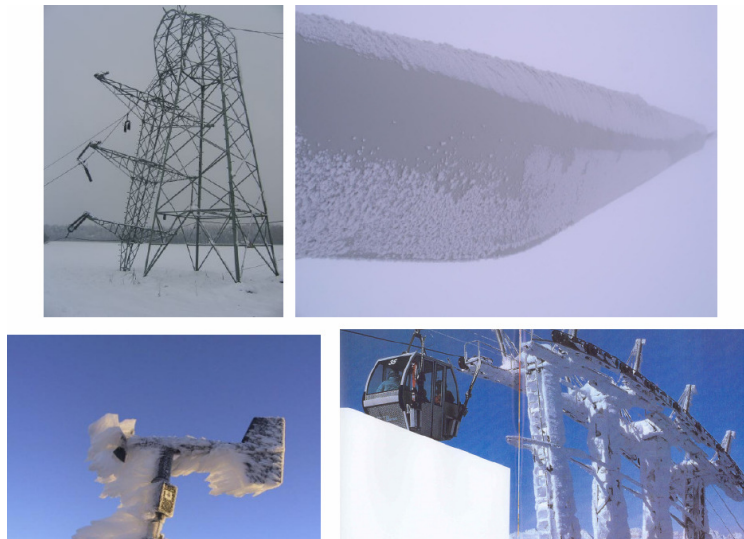


Abb. 1: Die Vereisung an Strukturen betrifft viele Bereiche. Oben links: Wegen Vereisung eingestürzter Mast einer Hochspannungsleitung. Oben rechts: Vereisung am Rotorblatt einer WKA. Unter links: Vereistes Propelleranemometer. Unter rechts: Vereisung am Mast einer Seilbahn.

Es wird zwischen zwei Formen von Vereisung an Strukturen unterschieden: einerseits der Eisbildung aus Wolken und Nebel (Raureif und Klareis), andererseits der Eisbildung aus Niederschlag (Nassschnee und Eisregen). Die verschiedenen Auftretensformen können wie folgt charakterisiert werden (Abb. 2):

- **Raureif:** Unterkühlte Wassertropfen aus Wolken oder Nebel werden vom Wind auf eine Struktur getragen und gefrieren dort sofort, ohne dass dabei flüssiges Wasser entsteht. Wenn die Wassertropfen in der Luft eher klein sind, entsteht weicher Raureif, sind die Tropfen grösser, entsteht harter Raureif. Raureif hat eine geringere Dichte als Klareis (weicher Raureif: 200 bis 600 kg/m³, harter Raureif: 600 bis 900 kg/m³) und bildet sich asymmetrisch (oft nadelförmig) auf der dem Wind zugewandten Seite einer Struktur. Er ist opak bis weiss und tritt bei Temperaturen von 0 bis zu -20 °C auf. Dieser Prozess findet häufig an exponierten Lagen mit Hebung von feuchter Luft statt.
- **Klareis:** Wenn sich die Oberflächentemperatur einer Struktur nahe bei 0 °C befindet, gefrieren die auf einer Struktur auftreffenden Wassertropfen aus Wolken oder Nebel nicht vollständig. Es bildet sich eine Schicht mit flüssigem Wasser auf der Oberfläche, welche vom Wind auf der Struktur verteilt wird und erst nach und nach gefriert. So entsteht eine glatte, gleichmässig verteilte durchsichtige Eisschicht. Klareis hat eine hohe Dichte (900 kg/m³), tritt

meistens bei Temperaturen zwischen 0 und -4 °C auf und haftet viel stärker an einer Oberfläche als Raureif.

- **Nassschnee:** Teilweise geschmolzene Schneeflocken bleiben an einer Struktur kleben und bilden so eine Schicht von Nassschnee. Nassschnee tritt typischerweise bei Temperaturen zwischen 0 und 3 °C auf und hat eine Dichte von 300 bis 600 kg/m³. Sinkt die Temperatur später unter den Gefrierpunkt, kann der Nassschnee einfrieren.
- **Eisregen:** Diese Form der Vereisung entsteht typischerweise, wenn Schnee durch eine wärmere Inversionsschicht fällt und dabei auftauft. Diese Wassertropfen gefrieren beim Auftreffen auf eine Struktur mit einer Oberflächentemperatur unter dem Gefrierpunkt und bilden so eine gleichmässige Klareisschicht.



Abb. 2: Verschiedene Arten der Vereisung. Links: Raureif, Mitte: Klareis, Rechts: Nassschnee

Der Fokus des MEMFIS-Projekt liegt auf der Vereisung aus Wolken, Nassschnee und Eisregen waren nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Die Vereisung von meteorologischen Instrumenten oder anderen Strukturen kann durch folgende Begriffe beschrieben werden [3]:

- **Meteorologische Vereisung:** Zeitraum während dessen die meteorologischen Bedingungen für Eisansatz gegeben sind, das heisst aktiv Eis gebildet wird
- **Instrumentelle Vereisung:** Dauer der technischen Störung eines Instruments oder einer WKA durch Vereisung, der Zeitraum während dessen Eis am Instrument vorhanden ist
- **Inkubationszeit:** Verzögerung zwischen dem Beginn der meteorologischen Vereisung und dem Beginn der instrumentellen Vereisung.
- **Erholungsphase:** Verzögerung zwischen dem Ende der meteorologischen Vereisung und der Wiederaufnahme des normalen, eisfreien Betriebs eines Instruments oder einer WKA

Abbildung 3 illustriert die obigen Definitionen am Beispiel einer Windmessung.

Zu Beginn liegt keine Vereisung vor und das Instrument arbeitet normal (links). Ab einem bestimmten Zeitpunkt (linke Seite der blauen Box) sind die meteorologischen

Bedingungen für Eisbildung gegeben, die meteorologische Vereisung beginnt. Nach einer gewissen Verzögerung, der Inkubationszeit, beginnt der Eisansatz am Anemometer, die instrumentelle Vereisung (linke Seite der orangen Box). Die Dauer der Inkubationszeit ist abhängig von Faktoren wie der Oberflächenbeschaffenheit (gegebenenfalls beeinflusst durch Anti-Icing Massnahmen), der Form sowie der Temperatur der Struktur. Ab dem Beginn der instrumentellen Vereisung sind die Messwerte des Anemometers fehlerhaft. Sobald die meteorologischen Bedingungen für die Eisbildung nicht mehr gegeben sind, ist die meteorologische Vereisung zu Ende (rechte Seite der blauen Box). Der Eisansatz am Instrument bleibt jedoch weiter bestehen, bis das Eis entweder von selber verschwindet (schmilzt, sublimiert, abfällt) oder mit geeigneten Massnahmen entfernt wird (manuelle Entfernung, Beheizung, andere De-icing Methoden). Erst dann ist das Ende der instrumentellen Vereisung erreicht (rechte Seite der orangen Box) und das Instrument bzw. die WKA arbeitet wieder normal.

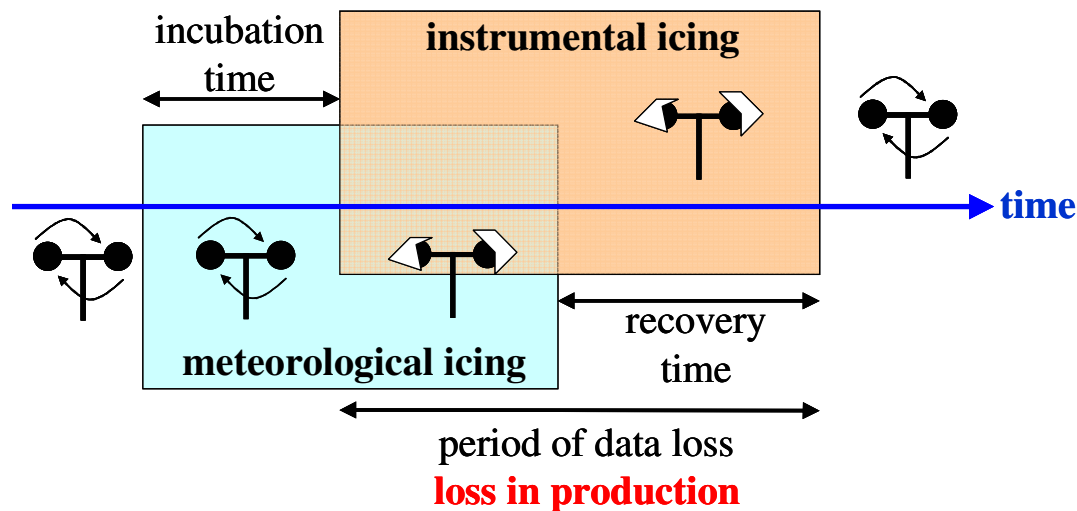


Abb. 3: Beschreibung der Vereisung von meteorologischen Instrumenten oder von einer WKA durch die Begriffe meteorologische Vereisung, instrumentelle Vereisung, Inkubationszeit und Erholungsphase.

2.3.1. Messung von Vereisung

2.3.1.1. Grundlagen

Die Messung der Vereisung ist bis heute ein schwieriges Unterfangen und es gibt zurzeit auf dem Markt kein Instrument, welches in der Lage ist die Vereisung automatisch, zuverlässig und genau zu messen. Untenstehend eine Übersicht über einige momentan auf dem Markt erhältliche Instrumente zur Messung der Vereisung (kein Anspruch auf Vollständigkeit):

- **Rosemount/Goodrich 0871LH1 Eisdetektor (USA):** Dieser Sensor basiert auf einem mit 40 kHz vibrierenden kleinen Finger. Setzt sich Eis an, ändert die Frequenz, was vom Sensor erkannt wird. Das Instrument wird daraufhin beheizt, bis die Frequenz sich wieder normalisiert hat. Auf diese Weise kann ein Ja/Nein Signal zum Vorhandensein von Vereisung (meteorologische Vereisung) gemessen werden.

- **Combitech IceMonitor Mk1 (SWE):** Dieser Sensor besteht aus einem vertikal montierten, frei rotierenden Zylinder (gemäss ISO 12494, [4]). Sobald Vereisung auftritt, beginnt der Sensor auf Grund des unsymmetrischen Eisansatzes zu rotieren, so dass sich ein Eiszyylinder bildet, dessen Gewicht laufend gewogen wird. Dieser Sensor wurde im MEMFIS-Projekt eingesetzt und wird später im Bericht noch genauer beschrieben.
- **Holooptics (SWE):** Dieser Sensor bestimmt die Vereisung aus der Reflektion eines infraroten Lichtstrahls von einem Reflektor. Auf diese Weise kann ein Ja/Nein Signal zum Vorhandensein von Vereisung (meteorologische Vereisung) gemessen werden.
- **IceMeter (CZ):** Dieses Instrument aus Tschechien misst die Eislast an einem Zylinder.
- **Infralytic (D):** Dieser Sensor basiert auf dem Prinzip der Reflektion von infrarotem Licht welches durch ein Glasfaserkabel an die Oberfläche der Struktur geführt wird. So kann das Auftreten von Eis am Ende des Lichtleiters detektiert werden.
- **Labko (FIN):** Der Sensor nutzt ein Ultraschallverfahren. Ein Draht schwingt ohne Eis mit einer gewissen Frequenz. Setzt sich Eis an, ändert die Frequenz, was vom Sensor erkannt wird. Das Instrument wird daraufhin beheizt, bis die Frequenz sich wieder normalisiert hat. Auf diese Weise kann ein Ja/Nein Signal zum Vorhandensein von Vereisung (meteorologische Vereisung) gemessen werden.

2.3.1.2. Messstandorte

Als Messstandort für die inneralpine Eismessung wurde der Gütsch ob Andermatt ausgewählt, weil dort im Rahmen des Projekts „Alpine Test Site Gütsch“ schon seit 2006 die Vereisung und alle meteorologischen Standardparameter gemessen werden. Diese Messungen wurden während der Winter 2008/09 und 2009/10 weitergeführt. Die Messungen wurden vom Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz an deren Teststation installiert und betrieben.

Um Informationen über die Charakteristika der Vereisung in anderen Regionen der Schweiz zu erhalten, wurden im Rahmen des MEMFIS-Projekts zwei weitere Standorte für Eismessungen definiert:

- In den Voralpen wurde der Schwyberg ausgewählt. An diesem Standort wird ein Windenergie-Projekt entwickelt und der Kollaps von zwei 100-m-Masten für Windmessungen während eines Vereisungsereignisses im November 2007 weist auf ein Vorhandensein starker Vereisung hin. Somit ist der praktische Nutzen der Resultate gegeben. Der Messmast steht gut exponiert auf einer Anhöhe und ist von allen Seiten her frei anströmbar.
- Im Jura wurde der Matzendörfer Stierenberg ausgewählt. Auch hier wird ein Windenergieprojekt entwickelt und die Windmessungen zeigten das Vorhandensein von starker und häufiger Vereisung. Zudem war an diesem Standort im Dezember 2000 eine Hochspannungsleistung wegen Vereisung eingestürzt. Am Matzendörfer Stierenberg musste ein Kompromiss gefunden werden, um den Mast an einer für den Landwirt optimalen Position und

gleichzeitig nahe genug am Restaurant (Stromversorgung) installieren zu können. Der Messmast ist deshalb nicht optimal positioniert, sondern leicht unterhalb des höchsten Punkts des Jurarückens installiert und damit von Westen nicht frei angeströmt.

Die zusätzlichen Messstationen auf dem Schwyberg und auf dem Matzendörfer Stierenberg wurden gemäss Zeitplan im November 2008 installiert und in Betrieb genommen. Abbildung 4 zeigt alle 3 Messstationen, Abbildung 5 und Tabelle 1 deren Lage in der Schweiz.



Abb. 4: Die drei Messtationen Guetsch (links), Schwyberg (Mitte) und Matzendörfer Stierenberg (rechts).



Abb. 5: Die Position der drei Messtationen Guetsch, Schwyberg und Matzendörfer Stierenberg.

Tab. 1: Lage der Messstationen in der Schweiz.

Station	Koordinaten Swiss Grid	Höhe [m.ü.M.]
Gütsch	690'140 / 167'590	2'287
Schwyberg	587'096 / 172'502	1'600
Matzendörfer Stierenberg	610'112 / 241'889	1'180

2.3.1.3. Eingesetzte Sensorik

Als Referenzgerät für die Vereisungsmessungen im MEMFIS-Projekt wurde der Combitech IceMonitor Mk1 ausgewählt. Ein Grund für die Wahl war, dass dieser Sensor die Eislast messen kann, eine wichtige Planungsgrösse für Überlandleitungen. Weiterhin entspricht der Sensor der ISO-Norm 12494 [4] und zeigte im Rahmen der COST Action 727 viel versprechende Resultate. Zum Zeitpunkt der Entscheidung war auch ein spürbares Engagement des Herstellers (zu diesem Zeitpunkt Saab) für Verbesserungen da.

Der Sensor besteht aus einem vertikal montierten, frei rotierenden Zylinder mit einem Durchmesser von 3 cm und einer Länge von 50 cm. Sobald Vereisung auftritt, beginnt der Sensor auf Grund des unsymmetrischen Eisansatzes zu rotieren, so dass sich ein Eiszylinder bildet, dessen Gewicht laufend gewogen wird. Abbildung 6 zeigt den Sensor einmal mit und einmal ohne Eis.



Abb. 6: Der Saab/Combitech IceMonitor Mk1 einmal ohne (links) und einmal mit (rechts) Eisansatz.

Zusätzlich wurden an allen Stationen die folgenden Parameter gemessen:

- Windgeschwindigkeit
- Windrichtung
- Temperatur
- Relative Feuchte
- Langwellige einfallende Strahlung

Diese Parameter wurden verwendet, um die vom Modell simulierten meteorologischen Bedingungen während der Vereisungsereignisse zu validieren und um die Resultate besser interpretieren zu können.

Auf dem Gütsch wurde der IceMonitor zusätzlich durch eine von MeteoSchweiz betriebene automatische Kamera überwacht. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die an den einzelnen Stationen eingesetzten Messgeräte. Alle drei Messstationen funktionierten während des gesamten Projekts stabil und zuverlässig. Kleinere Stromausfälle führten zu kurzen Datenlücken (< 2 Wochen).

Tab. 2: Gemessene Parameter und verwendete Instrumente an den drei Stationen.

Parameter	Gütsch	Schwyberg	Matzendörfer Stierenberg
Eislast	Saab/Combitech IceMeter Mk1 Gütsch auf 2 m.ü.G. Schwyberg und Matzendörfer Stierenberg auf 10 m.ü.G		
Windgeschwindigkeit	Rosemount Pitot Tube 10 m.ü.G.	Vaisala WAA 252 (beheizt) 10 m.ü.G.	
Windrichtung		Vaisala WAV 252 (beheizt) 10 m.ü.G.	
Temperatur und relative Feuchte	Meteolabor THYGAN 2 m.ü.G.	Rotronic 101MPA 2 m.ü.G.	
Einfallende langwellige Strahlung	Kipp und Zonen CGR3 2 m.ü.G. (belüftet)	Kipp und Zonen CG4 2 m.ü.G. (nicht belüftet)	

2.3.1.4. Verhalten des Eismonitors

Die Auswertung der Messdaten des IceMonitors zeigte verschiedene Mankos auf. Der Nullpunkt des Geräts wies eine deutliche Drift auf und führte zu einem Offset in der Eismessung. Dieser Umstand erschwerte eine automatische Bestimmung der Vereisungsereignisse nur aus den Messdaten. In Abbildung 7 ist das gleitende Tagesmittel der Eislast auf dem Schwyberg über die gesamte Messkampagne dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass das Signal zuerst einen negativen Offset von ca. 100 g, ab Mai 2009 eine positive Drift und ab Herbst 2009 einen positiven Offset von ca. 200 g aufweist. Abbildung 8 zeigt die gleiche Information für den Matzendörfer Stierenberg. Hier liegt ab Beginn der Messkampagne eine negative Drift vor, welche sich im Herbst 2009 bei ca. -400 g stabilisiert.

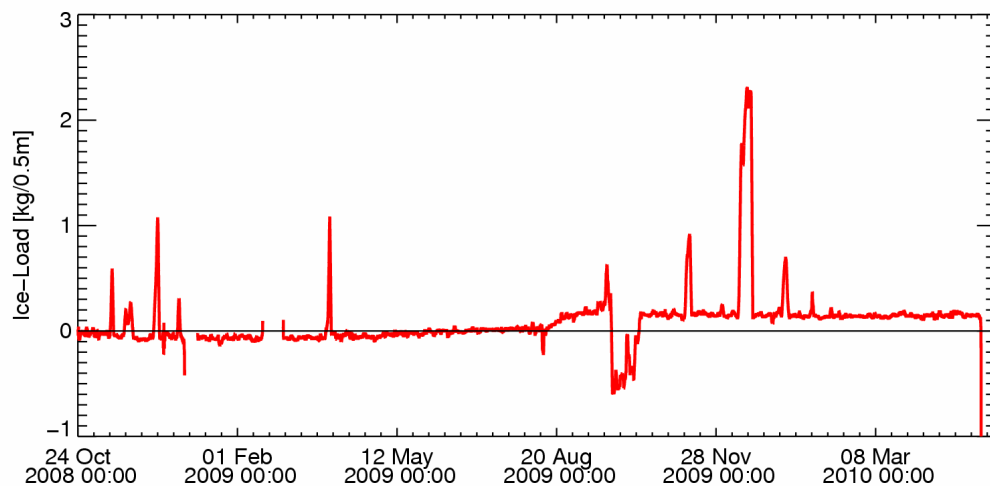


Abb. 7: Zeitreihe gleitender Tagesmittel der Eislastmessung während der gesamten Messkampagne auf dem Schwyberg.

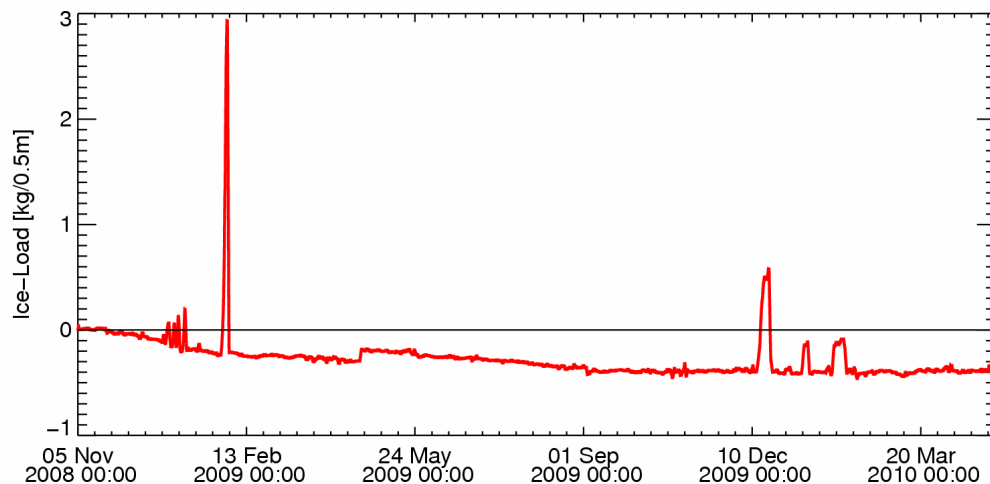


Abb. 8: Zeitreihe gleitender Tagesmittel der Eislastmessung während der gesamten Messkampagne auf dem Matzendörfer Stierenberg.

Tests beim Hersteller zeigten, dass einerseits die Lastzelle des Sensors auf Temperaturschwankungen, andererseits der vertikal gelagerte Stab auf seitlich anfallende Kräfte durch den Wind reagiert. Dies äussert sich in erster Linie in einem signifikanten Rauschen im Signal, welches die automatische Identifikation von Vereisung stark erschwert. Bei Vereisungsereignissen mit grossen Eislasten trat dieser Umstand in den Hintergrund, so dass diese Ereignisse genügend gut für einen Vergleich mit den Simulationen erfasst werden konnte, insbesondere, was die Dauer des Ereignisses angeht. Bezüglich der Auswertung der maximalen Eislasten, sowie einer Auswertung der Vereisungshäufigkeit bestehen jedoch Vorbehalte.

Auf dem Schwyberg und dem Matzendörfer Stierenberg lagen diese Schwankungen im Bereich von ca. ± 250 g. Damit konnten zumindest grössere Vereisungsereignisse aufgezeichnet und zum Vergleich mit den Simulationen verwendet werden.

Abbildung 9 zeigt den Verlauf eines stärkeren Vereisungsereignisses vom Matzendörfer Stierenberg. Der Anstieg der Eislast ab dem 29. Januar ist deutlich zu erkennen. Die Lücke am Ende des 31. Januars ist auf einen Stromausfall

zurückzuführen. In der Mitte des 2. Februars schmilzt bzw. fällt das Eis schnell ab und das Signal ist wieder konstant mit einem kleinen negativen Offset. Abbildung 10 zeigt das Verhalten des Signals ohne Eisansatz. Die Schwankung des Signals ist deutlich zu erkennen.

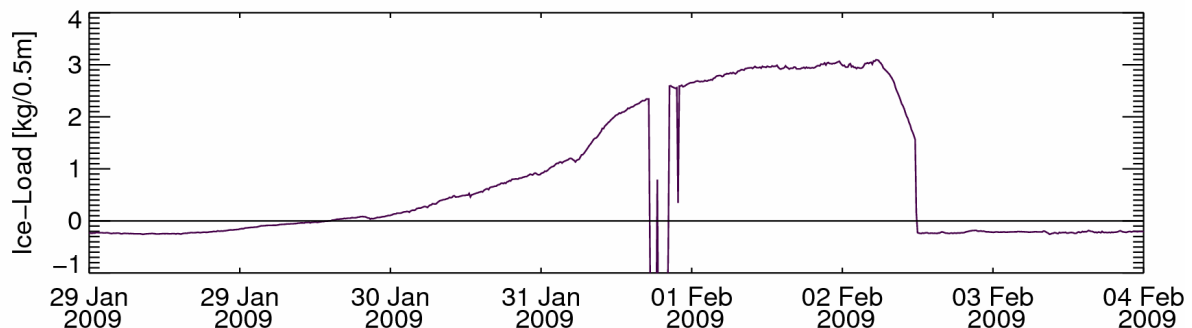


Abb. 9: Verlauf eines starken Vereisungsereignisses am Matzendörfer Stierenberg.

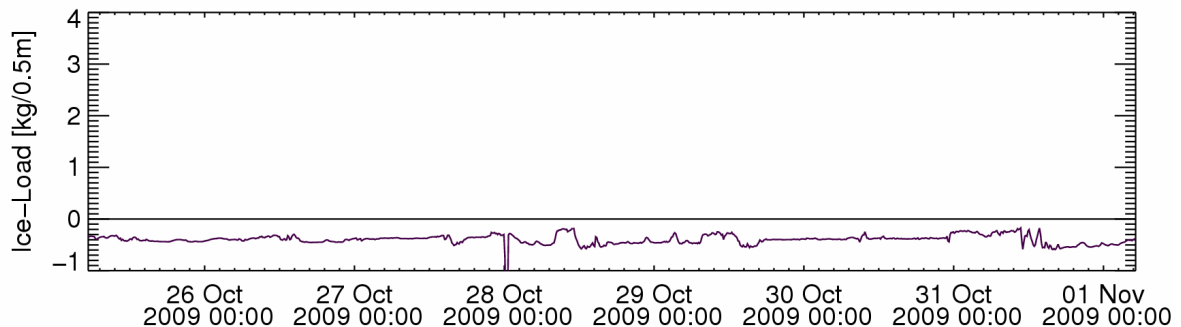


Abb. 10: Rauschen des Signals des Saab/Combitech IceMonitors (Matzendörfer Stierenberg).

Auf dem Gütsch hingegen zeigten die Messwerte deutlich höhere Schwankungen im Bereich ± 1 kg, welche in keiner Weise mit den tatsächlichen Ereignissen korrelierten. Abbildung 11 zeigt ein Beispiel für ein derartiges Ereignis. Zu Beginn schwankt das Signal des eisfreien Sensors mit. ca ± 250 g. Am 13. November beginnt ein Vereisungsereignis und das Signal zeigt eine erhöhte Eislast.

Auf dem Kamerabild ist aber deutlich zu erkennen, dass der Vertikalstab nicht rotierte und deshalb das Eis nur auf einer Seite ansetzte. Somit ist die gemessene Eislast niedriger als die tatsächliche. Die Auswertung der Kamerabilder auf dem Gütsch zeigte, dass die freie Rotation des Sensors in vielen Fällen nicht gewährleistet war, d.h. dass die am Drehpunkt des vertikalen Stabs eingesetzte Heizung zu schwach war. Dadurch bildete sich das Eis nur an einer Seite des Stabs und das Resultat entsprach somit nicht der Eislast, wie sie vom Modell simuliert wird. Zusätzlich führte dieser Umstand dazu, dass der Stab durch die Eisbildung angehoben wurde, was zu negativen Eislast-Werten führte.

In der Mitte des 14. Novembers schmilzt das Eis ab und der Sensor ist wieder eisfrei. Das Signal bleibt jedoch auf ca. 400 g stehen. In den folgenden Tagen schwankt das Signal zwischen +400 und -200 g, ohne das jemals Eisansatz aufgetreten wäre. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass das vom Sensor gemessene Signal ohne

Kamerabilder nicht zu einer zweifelsfreien Bestimmung der Vereisung herbeigezogen werden kann.

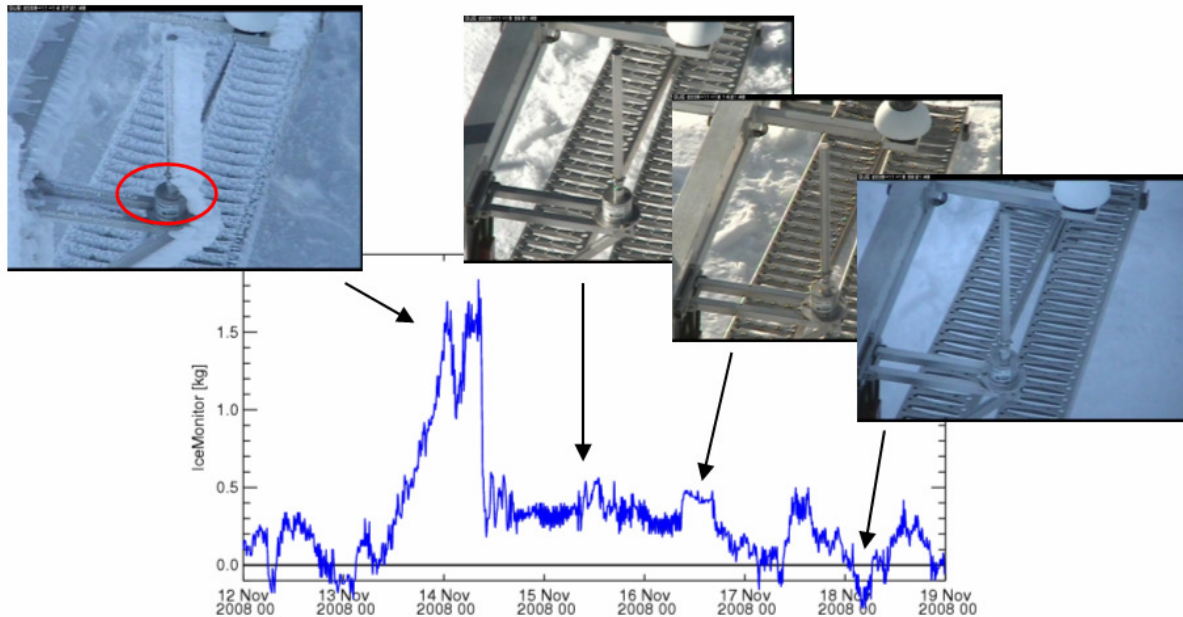


Abb. 11: Verlauf eines Vereisungsereignisses am Gütsch mit fehlerhaften Messwerten im Vergleich mit den Kamerabildern.

Der IceMonitor auf dem Gütsch wurde im März 2009 mit einer neueren Version ersetzt, bei welcher eine verbesserte Lastzelle sowie eine bessere Lagerung des Vertikalstabs eingeführt wurde. Die Schwankungen des Signals waren zu Beginn deutlich kleiner und Vereisungsereignisse konnten korrekt gemessen werden (Abb. 12). Ab Juni 2009 zeigt der Sensor jedoch ein chaotisches Verhalten, welches ab da nicht mehr behoben werden konnte (Abb. 13). Somit zeigt die Grafik des gleitenden Tagesmittels der Eislast für den Gütsch über die gesamte Messkampagne ab Sommer 2009 ein chaotisches Bild ohne Möglichkeit auf eine sinnvolle Auswertung der Messdaten (Abb. 14).

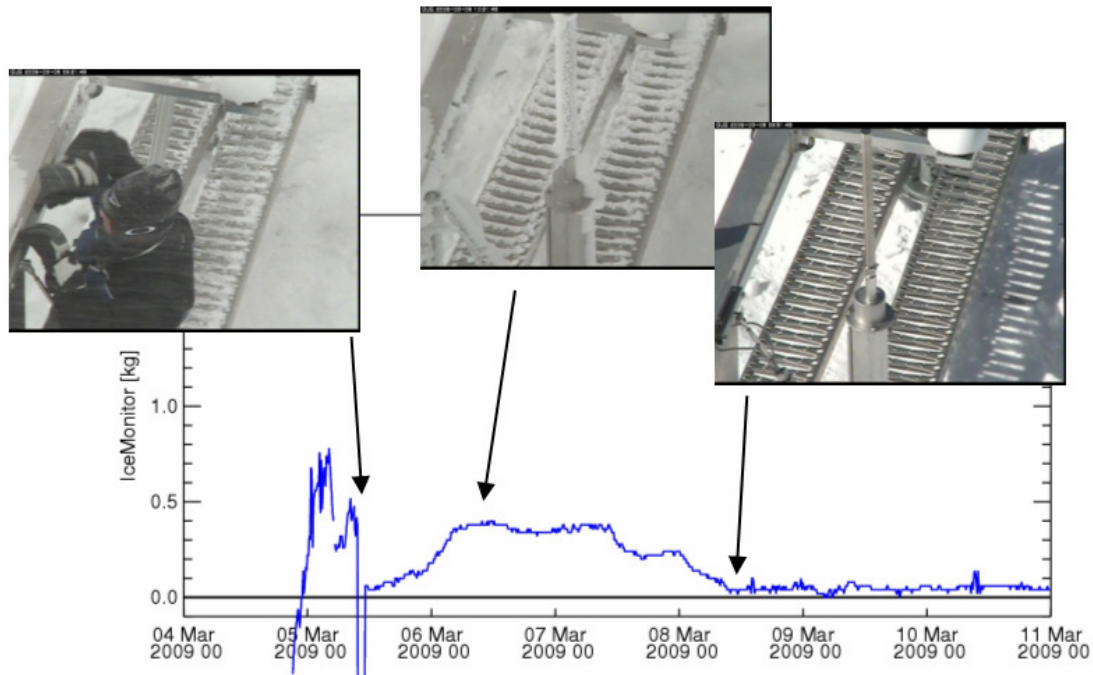


Abb. 12: Installation eines neuen IceMonitors am 5. März 2009.

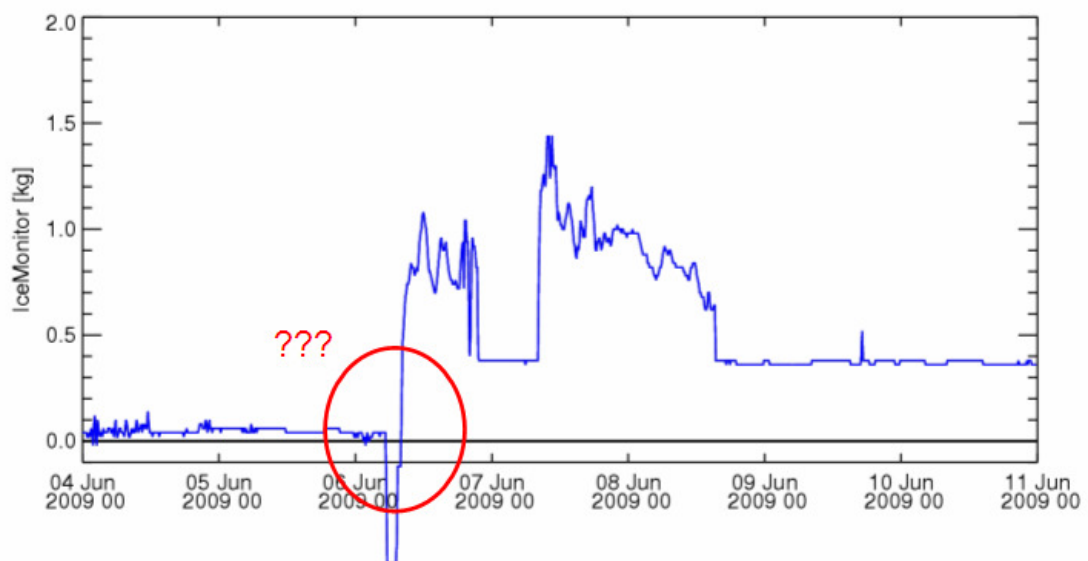


Abb. 13: Versagen des IceMonitors auf dem Gütsch am 5. Juni 2009.

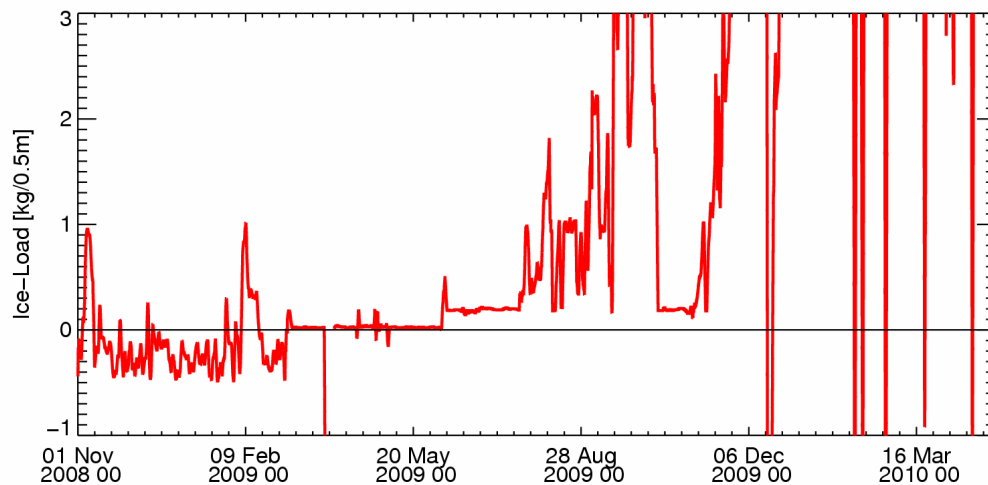


Abb. 14: Zeitreihe gleitender Tagesmittel der Eislastmessung während der gesamten Messkampagne auf dem Gütsch.

Erschwerend kam im Frühjahr 2009 hinzu, dass Saab, der Hersteller des IceMonitors, von der Finanzkrise schwer betroffen war und sich dafür entschied, den Standort, an welchem der IceMonitor hergestellt wird, zu schliessen. Deshalb wurde die Vorgängerfirma Combitech wieder ins Leben gerufen. Die Umstrukturierungen sind nach wie vor im Gang, brachten aber die weiteren Entwicklungen am IceMonitor zum Stillstand. Bis heute wurde der Sensor nicht weiterentwickelt. Aus diesem Grund war es auch nicht möglich, für den Winter 2009/10 eine Messkampagne mit verbesserten Geräten durchzuführen.

Aus den oben genannten Gründen muss der Schluss gezogen werden, dass der Saab/Combitech IceMonitor Mk1 in der momentanen Ausführung nicht in der Lage ist, die Vereisung automatisch und zuverlässig zu erfassen. Technische Verbesserungen wurden vorgeschlagen, konnten aber vom Hersteller wegen finanzieller Probleme nicht umgesetzt werden. Deshalb war es innerhalb dieses Projekts mit den vorliegenden Messdaten nicht möglich, eine handfeste Aussage über die Vereisungshäufigkeit und –stärke an den Messstandorten zu machen. Für den Vergleich mit den Modellsimulationen konnten aber genügend gute Ereignisse identifiziert werden.

Es können zudem Aussagen zu den maximalen Eislasten an den Messstandortengemacht werden, wenn auch diese mit einer gewissen Vorsicht zu geniessen sind. Aus der Datenanalyse konnten folgende Maximallasten bestimmt werden:

- Matzendörfer Stierenberg: 6.2 kg/m (auf 10 m ü.G.)
- Schwyberg: 5.6 kg/m (auf 10 m ü.G.)
- Gütsch: ca. 6 kg/m (auf 2 m ü.G., Schätzung aus Kamerabildern)

Interessant ist im Zusammenhang mit der Interpretation der Resultate eine Grafik aus einem schwedischen Projekt bei welchem insgesamt sechs Saab/Combitech

IceMonitors auf einem 155 m hohe Mast in verschiedenen Höhen angebracht wurde (Abb. 15). Es ist deutlich zu erkennen wie die Eislast mit zunehmender Höhe über Grund zunimmt. Dies ist dadurch zu erklären dass mit zunehmender Höhe über Grund die Struktur weiter in die Wolke dringt und deshalb mehr Vereisung ansetzen kann. In diesem Sinn muss damit gerechnet werden, dass in grösserer Höhe an den drei CH-Standorten noch grösserer Eislasten vorliegen.

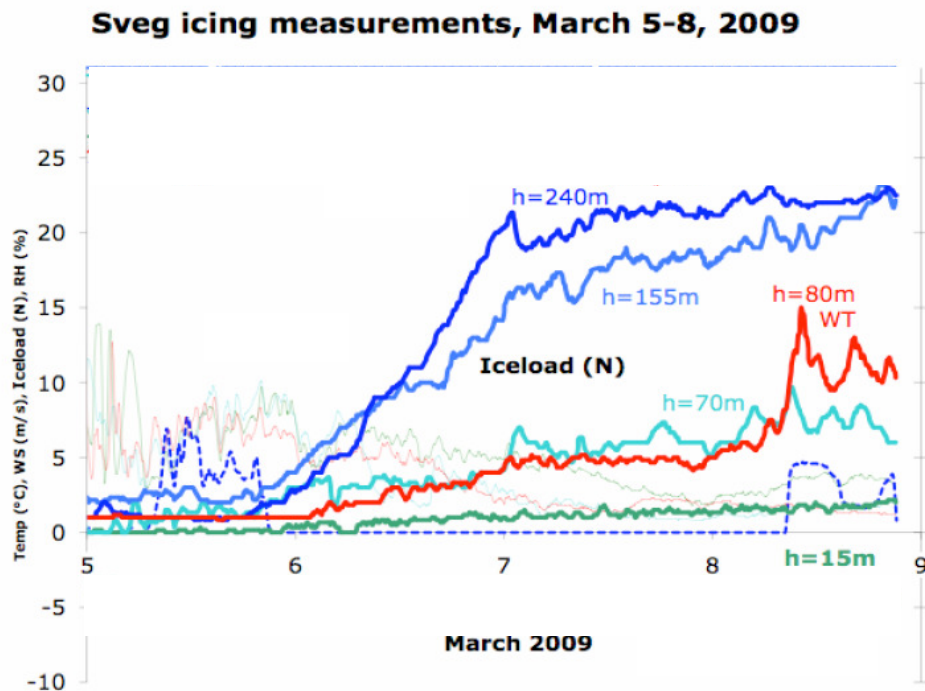


Abb. 15: Eislastmessungen auf verschiedenen Höhen über Grund (Quelle: Ronsten et al, EWEC 2009)

2.3.1.5. Messungen von Temperatur und relativer Feuchte

Innerhalb des Projekts MEMFIS wurden an allen drei Stationen auch die Temperatur und die relative Feuchte gemessen, um die meteorologischen Bedingungen während der Vereisungsereignisse besser interpretieren zu können. Wegen der schlechten Datenqualität des IceMonitors wurde diese Daten auch herbeigezogen, um diese Messwerte besser interpretieren zu können.

Die relative Feuchte RH bezeichnet das prozentuale Verhältnis zwischen dem momentanen Dampfdruck und dem Sättigungsdampfdruck der Atmosphäre bei der aktuellen Lufttemperatur. Die relative Feuchte lässt also erkennen, in welchem Grad die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist.

Gemäss den Richtlinien der World Meteorological Organisation WMO [9] muss eine Messung der relativen Feuchte immer vom Sättigungsdampfdruck in Bezug auf Wasser ausgehen. Dieses Vorgehen ist aber bei Temperaturen unter 0°C nicht korrekt, da der Sättigungsdampfdruck über Eis kleiner ist als über Wasser. Dies führt dazu, dass bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt von einem zu hohen Sättigungsdampfdruck ausgegangen wird und somit eine gesättigte Luft mit einer

relativen Feuchte von 100% nicht mehr erreicht werden kann. Abbildung 16 zeigt das Verhältnis zwischen relativer Feuchte und der Temperatur, gemessen mit einem Standardsensor. Es ist deutlich zu erkennen, dass unter dem Gefrierpunkt keine Sättigung der Luft mehr auftritt.

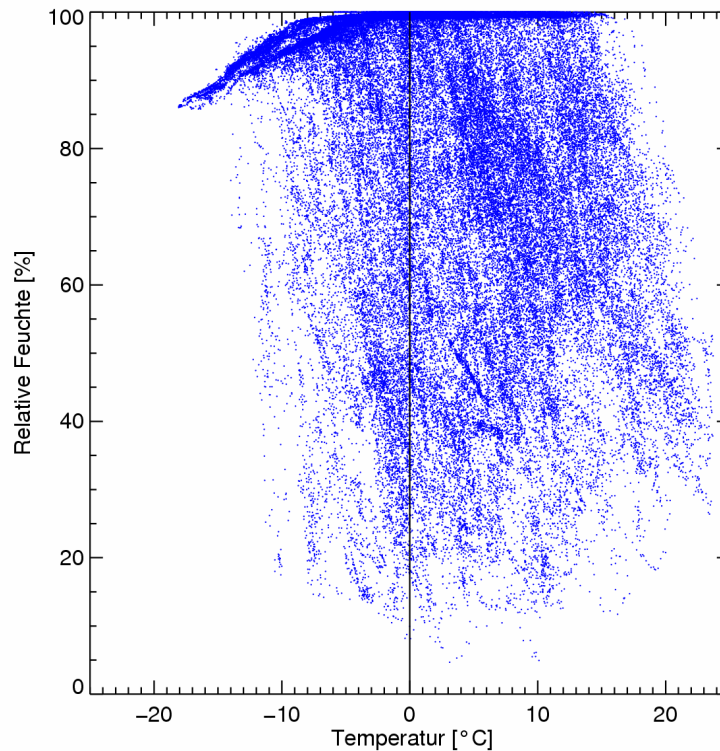


Abb. 16: Zusammenhang zwischen Temperatur und relativer Feuchte. Bei Temperaturen unter ca. -7°C wird die Sättigung mit herkömmlichen Messgeräten nicht mehr erreicht.

In diesem Sinne ist eine Kombination aus Temperatur und relativer Feuchte schlecht geeignet um Vereisung bestimmen zu können. Damit können diese Parameter auch nur bedingt für die Interpretation der Eislastmessungen beigezogen werden.

2.3.2. Simulation von Vereisung

2.3.2.1. Beschreibung des Vereisungsmodells

Die Vereisung wird anhand eines von Makkonen [5] entwickelten Vereisungsalgorithmus berechnet. Dieser nutzt Informationen über Temperatur, Windgeschwindigkeit, Wolken- und Regenwassergehalt der Atmosphäre, um den Eisansatz an einer zylindrischen Struktur zu berechnen. Im vorliegenden Projekt werden die meteorologischen Eingabegrößen mit den Wettervorhersagemodellen WRF oder COSMO berechnet (Abb. 17). Die einzelnen Komponenten des Modellsystems werden im Folgenden kurz beschrieben. Das Modellsystem wurde im Rahmen des Projekts aufgebaut und anhand von Fallstudien getestet.

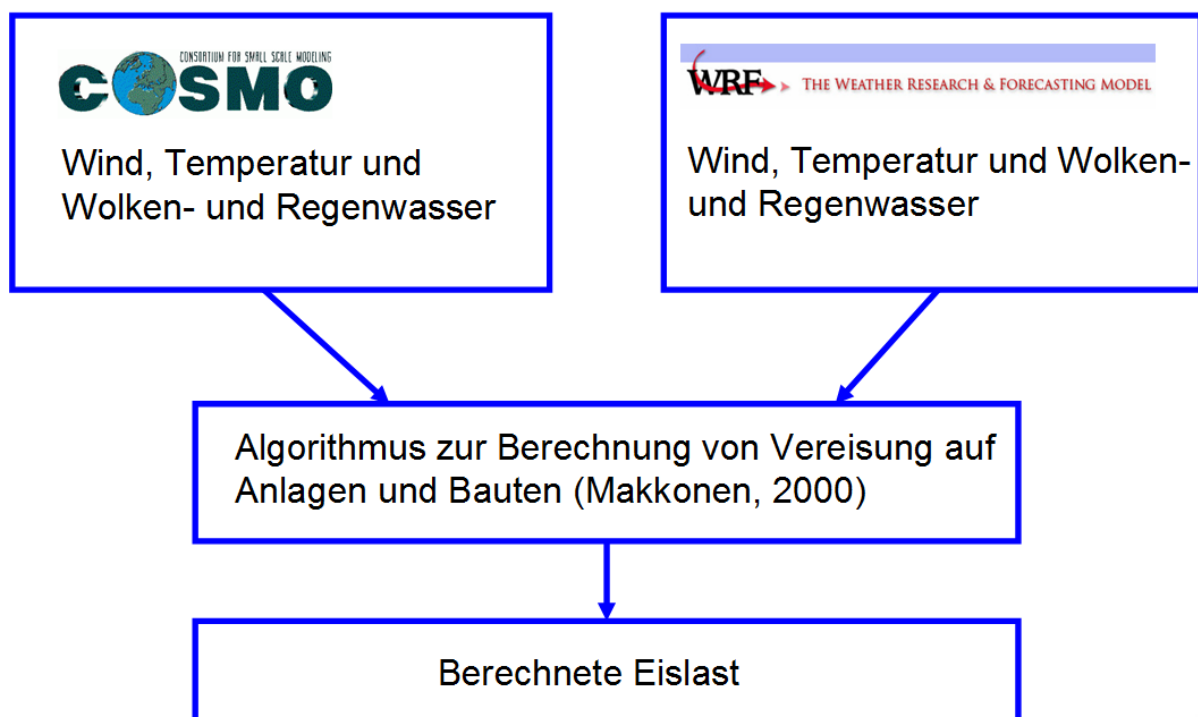


Abb. 17: Schematische Darstellung des Modellsystems zur Simulation von Vereisung.

Der Vereisungsalgorithmus

Der von Makkonen [5] entwickelte Vereisungsalgorithmus beschreibt die Eisanlagerung an einem Zylinder durch Raueis und Klareis. Neben Wolken- und Nebeltröpfchen können auch Nieseltröpfchen zur Eisanlagerung beitragen. Gefrierender Niesel tritt selten auf, führt aber aufgrund grosser Tröpfchengrößen 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 näherungsweise rotationssymmetrisch stattfindet. Der Anfangsdurchmesser des Zylinders beträgt 3 cm. Dies entspricht gleichzeitig dem Messprinzip des Saab IceMonitors, des Sensors zur

Eislastmessung, der in diesem Projekt verwendet wird (Abschnitt 2.3.1.3). Somit ist ein direkter Vergleich von gemessener und simulierter Eislast möglich.

Eingabeparameter für den Vereisungsalgorithmus sind Informationen über Windgeschwindigkeit, Temperatur, Wolken- und Regenwasser aus Messungen oder Modellsimulationen. Zusätzlich wird eine Information über die Teilchenzahldichte der Wolkentropfen benötigt. Da hierzu wenige Messungen vorliegen, ist die Angabe sehr unsicher. Aus der Teilchenzahldichte wird eine mittlere Tropfengrösse berechnet, die vor allem auf die Masse des angelagerten Eises wirkt.

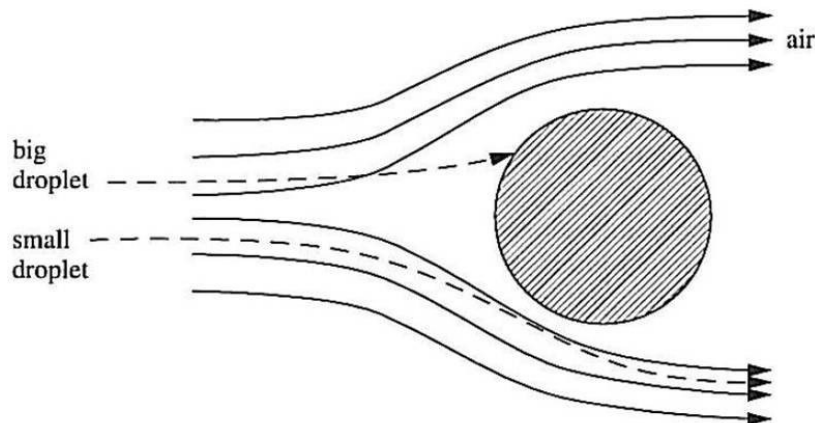


Abb. 18: Trajektorien von Tröpfchen bei An- und Umströmung des Zylinders (Schematische Darstellung aus [5]).

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. 18).
- **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.

Das Wettervorhersagemodell WRF

Das WRF Modell ist ein hochaufgelöstes, numerisches Wettervorhersagemodell, das in erster Linie am NCAR, NOAA und NCEP (USA) entwickelt wird. Es ist nicht-hydrostatisch und wird sowohl für Forschungszwecke als auch für operationelle Wettervorhersagen entwickelt. Das Anwendungsgebiet reicht von Grobstruktur (Large-eddy)-Simulationen mit Gitterweiten von 100 m bis zu regionalen Klimasimulationen mit Gitterweiten von 100 km. Die prognostischen Variablen sind horizontale und vertikale Windkomponenten, Stördruck, Temperatur, spezifische Feuchte, Wolkenwasser und -eis, Regen- und Schneewassergehalt und turbulent-kinetische Energie. Eine ausführliche Modellbeschreibung findet sich in [6]. Innerhalb

des MEMFIS Projekts wurde mit drei ineinander-genesteten Modellgebieten mit Gitterweiten von 12.8 km, 3.2 km und 800 m gerechnet. Die sehr hohe Auflösung im innersten Modellgebiet führt dazu, dass mit sehr kleinen Zeitschritten gerechnet werden muss (~etwa 2s im inneren Modellgebiet) und eine entsprechend lange Rechenzeit benötigt wird. Anfangs- und Randdaten werden aus GFS 0.5° Daten berechnet.

Das Wettervorhersagemodell COSMO-2

Das COSMO Modell ist ein nicht-hydrostatisches, numerisches Wettervorhersagemodell, das vom Consortium for Small-Scale Modelling (COSMO) für Anwendungen im Meso- β und γ - Bereich entwickelt wird. Die prognostischen Variablen sind horizontale und vertikale Windkomponenten, Stödruck, Temperatur, spezifische Feuchte, Wolkenwasser und -eis, Regen- und Schneewassergehalt und turbulent-kinetische Energie. Eine Modellbeschreibung findet sich in [7]. Im vorliegenden Projekt werden die operationellen COSMO-2 Vorhersagen des Bundesamts für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz mit einer Gitterweite von 2.2 km verwendet. Anfangs- und Randbedingungen aus ECMWF Vorhersagen werden für eine Modellrechnung mit COSMO mit 6.6 km Gitterweite benutzt, mit der die COSMO-2 Simulation angetrieben wird.

Beide Atmosphärenmodelle rechnen mit komplexen Mikrophysiksschemata, die eine gute Beschreibung des Flüssigwassergehalts der Atmosphäre ermöglichen.

2.3.2.2. Fallstudien mit den Modellen WRF und COSMO-2

Vereisungsereignisse an den Standorten Matzendörfer Stierenberg, Schwyberg und Gütsch

Aus den an den Standorten Matzendörfer Stierenberg (Jura), Schwyberg (Voralpen) und Gütsch (Alpen) durchgeführten Vereisungsmessungen wurden 11 Episoden ausgewählt (Tab. 2). Diese wurden mit dem Vereisungsalgorithmus, angetrieben durch Ergebnisse der Atmosphärenmodelle WRF und COSMO, simuliert.

Die Atmosphärenmodelle werden mit dem Vereisungsalgorithmus gekoppelt, indem die simulierten Werte für Wind, Temperatur und Flüssigwasser an dem der Messposition nächstgelegenen Modell-Gitterpunkt in der untersten Modellschicht als Eingabewerte dienen. Zusätzlich muss ein Wert für die Wolkentröpfchenkonzentration vorgegeben werden.

Die Evaluation konzentriert sich auf die Dauer der Vereisungsereignisse und die maximale Eislast während des Ereignisses. Die Eislastmessungen sind mit einer recht hohen Unsicherheit von ± 0.5 kg/m belastet (Abschnitt 2.3.1.4), wodurch ein quantitativer Vergleich der Eislast insbesondere für schwache Vereisungsereignisse schwierig ist.

In Abb. 19 bis Abb. 21 sind Beispiele für Simulationen von Vereisungsereignissen mit den Modellen WRF und COSMO für die drei Standorte gezeigt.

Die Vereisungsepisode am Matzendörfer Stierenberg wird in den Simulationen mit WRF und COSMO-2 erfasst. Der Beginn des Vereisungsereignisses am Matzendörfer Stierenberg wird allerdings mit WRF 20 Stunden und mit COSMO-2 10 Stunden zu früh simuliert. Die Dauer des Vereisungsereignisses wird von beiden Modellen überschätzt. Die maximale, gemessene Eislast beträgt 0.75 kg/m. Sie wird in der Simulation mit WRF mit 0.15 kg/m unterschätzt und in der Simulation mit COSMO-2 mit 2.5 kg/m überschätzt.

Der zeitliche Ablauf des Vereisungsereignisses am Schwyberg ist besser wiedergegeben: die mit WRF simulierte Vereisung beginnt 5 Stunden zu früh, während die mit COSMO simulierte Vereisung etwa 10 Stunden zu früh beginnt. Die Simulation mit WRF überschätzt die Dauer des Vereisungsereignisses, während die Simulation mit COSMO-2 die Dauer des Ereignisses gut erfasst. Beide Ergebnisse überschätzen mit 2.5 kg/m (WRF) und 4.5 kg/m (COSMO-2) die maximale, gemessene Eislast von 1.75 kg/m.

Das Vereisungsereignis am Gütsch wird mit WRF sehr gut wiedergegeben, es tritt lediglich eine leichte, zeitliche Verschiebung von 3 Stunden auf. Die Simulation mit COSMO-2 verpasst das Ergebnis, es wird keine Vereisung simuliert. Der Grund hierfür liegt vermutlich darin, dass in der sehr komplexen Orographie am Standort Gütsch eine Gitterweite von 2.2 km nicht ausreicht, um die Geländecharakteristika ausreichend genau zu beschreiben (siehe auch Abschnitt 2.3.2.3).

Tab. 2: Übersicht über die Vereisungsperioden an den Standorten Gütsch, Schwyberg und Matzendörfer Stierenberg, die mit dem Vereisungsmodell simuliert wurden.

Standort	Startdatum	Dauer [h]	Max. Eislast [kg/m]
Guetsch	13.11.2008	20	1.4
Guetsch	25.11.2008	10	1.0
Guetsch	11.12.2008	20	1.2
Schwyberg	13.11.2008	35	2.0
Schwyberg	21.11.2008	130	1.0
Schwyberg	10.12.2008	65	3.0
Schwyberg	25.12.2008	48	1.3
Matzen	13.12.2008	6	0.1
Matzen	27.12.2008	110	0.5
Matzen	06.01.2009	20	1.0
Matzen	29.01.2009	60	6.0

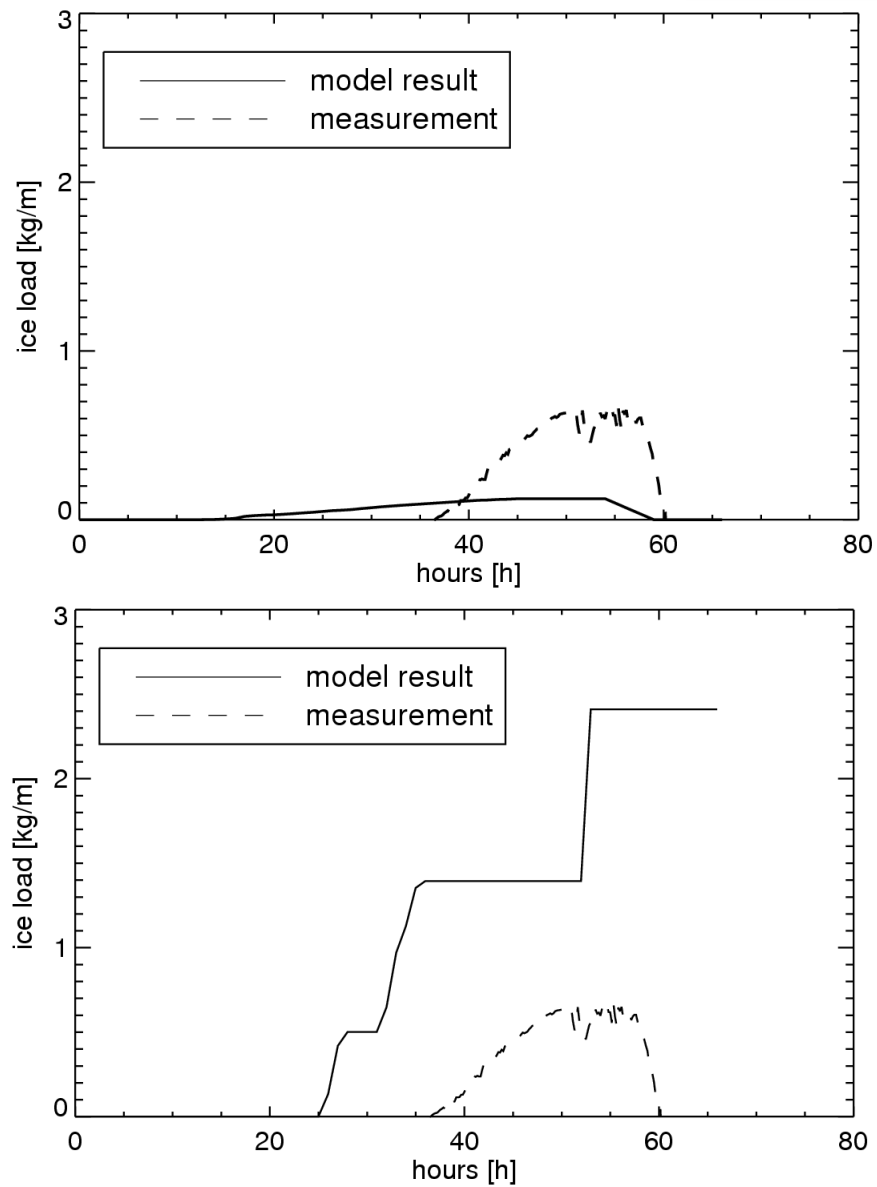


Abb. 19: Zeitreihe der gemessenen (- - -) und der mit WRF (oben) und COSMO (unten) simulierten (—) Eislast am Standort Matzendörfer Stierenberg für eine am 5.1.2009, 12 UTC beginnende Vereisungsperiode.

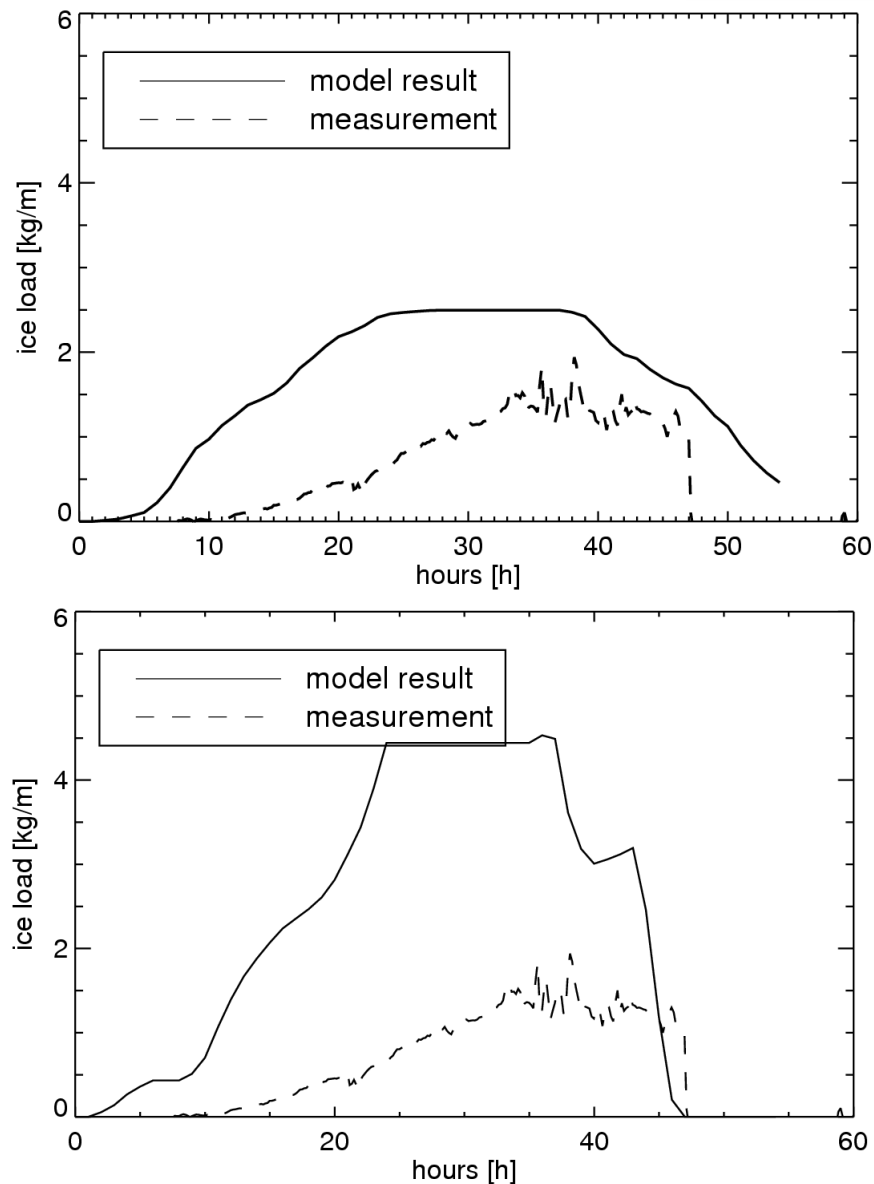


Abb. 20: Zeitreihe der gemessenen (- - -) und der mit WRF (oben) und COSMO (unten) simulierten (—) Eislast am Standort Schwyberg für eine am 13.11.2008, 00 UTC beginnende Vereisungsperiode.

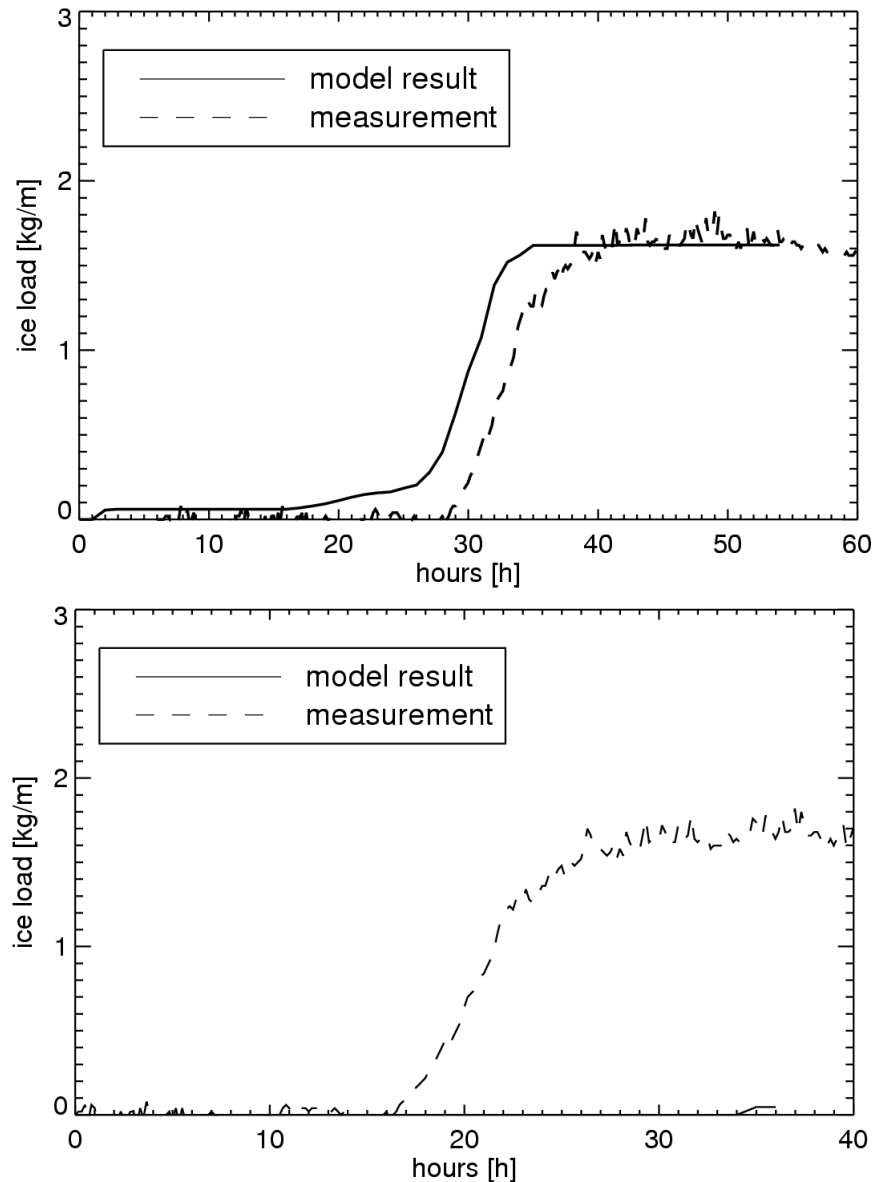


Abb. 21: Zeitreihe der gemessenen (- - -) und der mit WRF (oben) und COSMO (unten) simulierten (—) Eislast am Standort Gütsch für eine am 22.11.2007, 00 UTC beginnende Vereisungsperiode.

In Bezug auf Vereisung sind je nach Anwendungsbereich zwei Grössen von besonderem Interesse: die Häufigkeit bzw. Dauer von Vereisung (z.B. in der Windenergie) und die maximale Eislast (z.B. für Stromleitungen). Die Auswertung der durchgeführten Fallstudien erfolgt daher im Hinblick auf die Dauer des Vereisungsereignisses und die maximale Eislast. Der Vergleich von gemessener und simulierter Vereisungsdauer und maximaler Eislast ist Abb. 22 dargestellt. Ein Ereignis gilt als erfasst, wenn der Beginn des simulierten Ereignisses nicht mehr als 12 Stunden vom Beginn des gemessenen Ereignisses abweicht. Für die meisten Simulationen liegt die Abweichung im Bereich von 6 Stunden.

Die Auswertung der Simulationen zeigt, dass nahezu alle Vereisungsergebnisse von den Modellen erfasst werden. Beide Modelle simulieren je neun Ereignisse. Die Simulationen mit WRF verpassen je ein Ereignis am Gütsch und am Matzendörfer Stierenberg. Die Simulationen mit COSMO-2 verpassen zwei Ereignisse am Gütsch.

Sensitivitätsstudien zeigen, dass die Gitterweite von 2.2 km vermutlich nicht ausreicht, um die dynamischen Vorgänge in komplexer Orographie (z.B. Gütsch) im Detail zu erfassen (Abschnitt 2.3.2.3).

Die Dauer der Vereisungsereignisse wird in den Simulationen in der Regel gut beschrieben (Abb. 22, oben). Die mittlere Dauer der Vereisungsereignisse beträgt 50 h. Die Simulationen mit WRF (COSMO) haben einen Bias von +9 (+10) Stunden und der mittlere, absolute Fehler beträgt jeweils 20 Stunden.

Weniger genau ist die Simulation der maximalen Eislast. Die mittlere, gemessene Eislast beträgt 1.6 kg/m. Der Bias der Simulation mit WRF (COSMO) für die Eislast beträgt -0.7 (+2.4) kg/m und der mittlere absolute Fehler 1.2 (3.7) kg/m. Es fällt auf, dass mit dem COSMO Modell insbesondere am Matzendörfer Stierenberg sehr hohe Eislasten simuliert werden, die auch für den starken Bias verantwortlich sind. Die Abweichungen zwischen simulierter und gemessener Eislast sind hoch und erlauben häufig auf Grundlage der Simulationen keine korrekte Klassifizierung in leichte, mittlere und starke Vereisung. Eine mögliche Erklärung für die Differenzen ist, dass die simulierte maximale Eislast stark von der Teilchenzahldichte abhängt, welche aufgrund fehlender Messungen ein sehr unsicherer Parameter ist.

In Bezug auf die Vorhersage von Vereisungsereignissen sind die Ergebnisse der Vereisungssimulationen viel versprechend und zeigen, dass die neue Generation hoch auflösender Wettermodelle das Potential für zuverlässige Vereisungsvorhersagen hat. Im Hinblick auf die Vorhersage der maximalen Eislast sind weitere Untersuchungen notwendig. Es wäre in diesem Zusammenhang notwendig Messungen der Teilchenzahldichte der Wolkentröpfchen oder deren Durchmesser zu haben, um diesen wichtigen Parameter im Modell besser kontrollieren zu können.

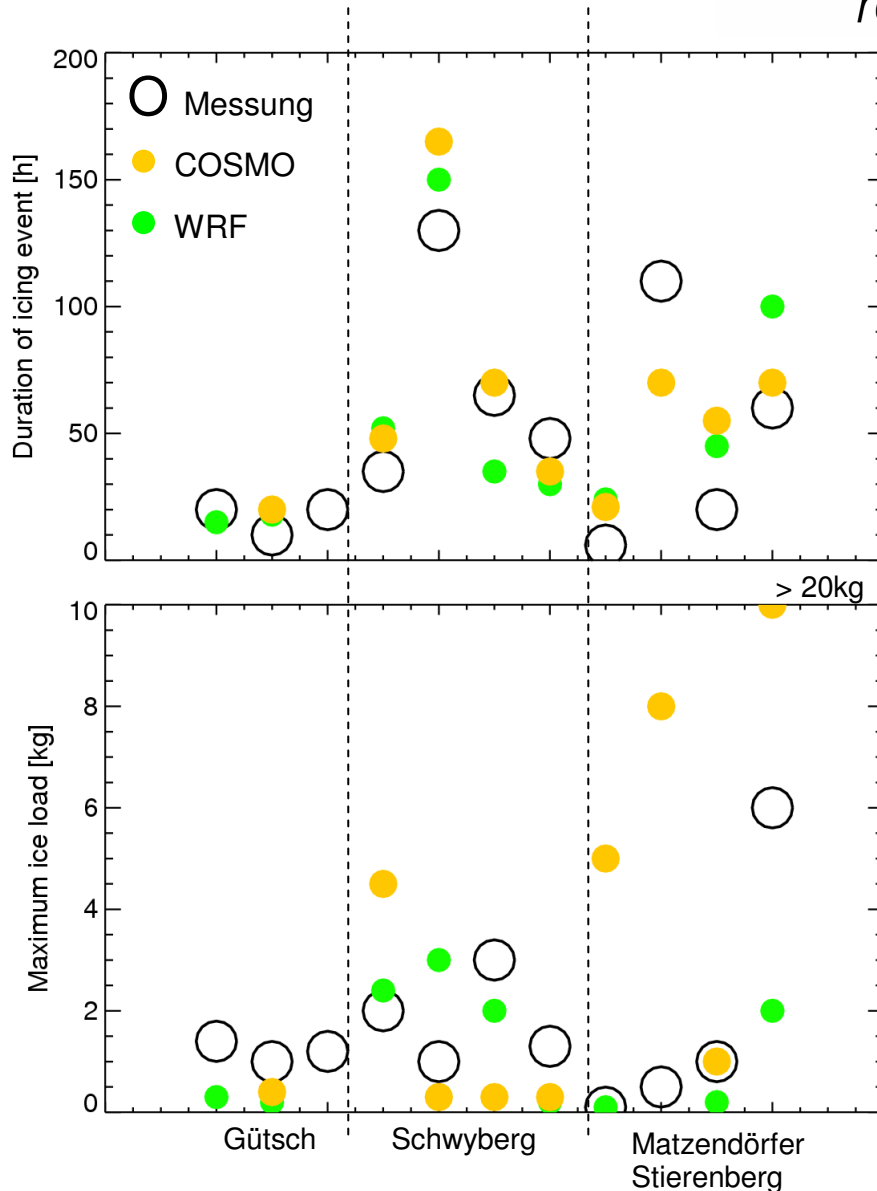


Abb. 22: Überblick der gemessenen und simulierten Vereisungsdauern (oben) und maximalen Eislasten (unten) für 11 Vereisungsperioden im Winter 2008 / 2009 an den Standorten Gütsch, Schwyberg und Matzendörfer Stierenberg.

Vereisungsereignis am Grimselpass

Es war im Rahmen des Projekts ursprünglich geplant, ein Vereisungsereignis zu simulieren, bei dem es zu Schwierigkeiten mit Hochspannungsleitungen kam. Da es sich als schwierig erwies, die genauen Daten solcher Ereignisse in Erfahrung zu bringen, wurde stattdessen eine Episode simuliert, während der die Eislastmessung am Grimselpass Vereisung anzeigte.

Herr Egli (Betriebsingenieur, Betrieb Netze, BKW) hat freundlicherweise die Zeitreihe der Eislastmessung am Grimselpass für den Zeitraum von 22.9.2009 bis 20.4.2010 zur Verfügung gestellt (Abb. 23). Die Selektion eines Vereisungsereignisses ist schwierig, da ein Anstieg der Zugkraft nicht nur durch Vereisung sondern auch durch Temperaturabfall verursacht werden kann. Erst ab einer Zugkraft von 47 kN wird

angenommen, dass die Vereisung so stark ist, dass die Leitung beheizt wird. In der zur Verfügung stehenden Zeitreihe findet sich nur ein Ereignis, das relativ sicher mit Vereisung verbunden ist. Es handelt sich um einen Anstieg der Zugkraft von etwa 22 kN auf etwa 40 kN im Zeitraum vom 8.11.2009, 22 MEZ bis 10.11.2009, 00 MEZ. Die angelagerte Eismenge konnte nicht bestimmt werden, da es aufgrund z.B. des Temperatureinflusses keine Faustformel zur Berechnung gibt. Es war auch bisher nicht zu klären, auf welcher Strecke die Leitung verläuft, deren Zug gemessen wird. Es ist ein Treffen mit Herrn Egli und Herrn Stocker (Leiter Bau und Beschaffung Netze / Leitungsbau, BKW FMB Energie AG) vereinbart, um die offenen Fragen zu besprechen.

Um abzusichern, dass es sich um ein Vereisungsereignis handelt, wurden die Augenbeobachtungen am Grimsel-Hospiz herangezogen. Diese zeigten für den Zeitraum geringe Sichtweiten und der Wolkenbedeckungsgrad konnte nicht angegeben werden, da der Himmel aufgrund von Nebel oder Schnee oder anderen meteorologischen Phänomenen nicht sichtbar war. Da die gemessenen Niederschlagsmengen in dem Zeitraum gering waren, spricht dies dafür, dass die Station im Nebel lag. Eine Anlagerung von Nassschnee ist aufgrund der Temperaturen um -5°C unwahrscheinlich. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Bedingungen für Raureif- bzw. Klareisbildung gegeben waren. Die Schweiz lag in dem Zeitraum im Einfluss einer Genua-Zyklone, die in einer nordöstlichen Strömung feuchte Luft aus dem Mittelmeerraum in den Alpenraum transportierte.

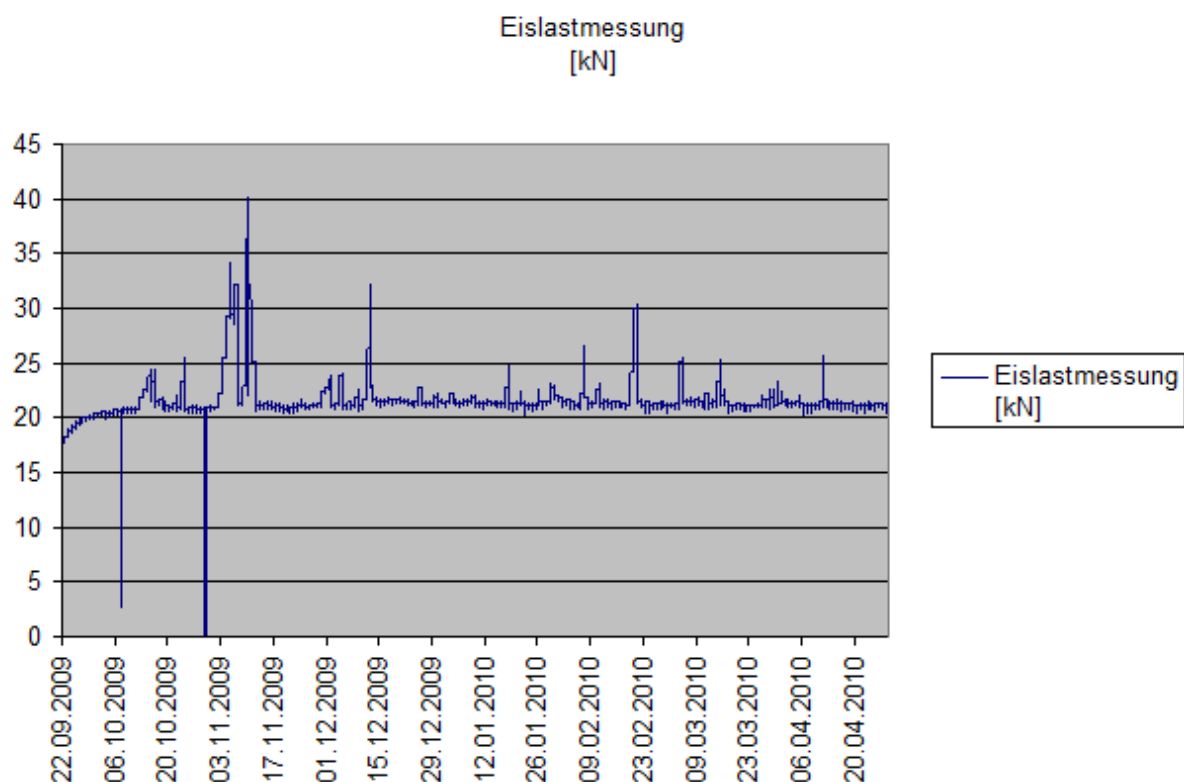


Abb. 23: Zeitreihe der Eislastmessung am Grimselpass.

Die Situation wurde mit WRF mit 750 m Gitterweite im innersten Modellgebiet simuliert. Die Konfiguration der Basisrechnung entsprach der für die anderen Fallstudien. In Abb. 31 ist der Zeit-Höhen-Verlauf von Wolkenwasser am Standort

der Eislastmessung dargestellt. In der ersten Hälfte der Simulation trat Schneefall auf, den auch die Beobachtungen am Grimsel-Hospiz zeigen. Es ist zu erkennen, dass keine bodennahe Wolkenbildung simuliert wurde. Dieses Ergebnis ist zunächst enttäuschend. Schaut man sich aber am Standort einen Vertikalschnitt in Ost-West-Richtung an, erkennt man, dass sich in unmittelbarer Nähe (1.5 km Abstand, etwa 2 Gitterboxen) im Westen des Standorts bodennah Wolkenwasser gebildet hat (Abb. 25, Abb. 26). Der Vereisungsalgorithmus berechnet eine maximale Eisanlagerung von 0.8 kg/m (Abb. 27). Dies ist im Vergleich zu anderen, z.B. am Gütsch gemessenen Eisanlagerungen ein Ereignis mit mittelstarker Eisanlagerung. Da der Schwellwert der Zugkraft für das Heizen der Leitung nicht erreicht wurde (47kN), war das Ereignis vermutlich nicht sehr stark. Eine abschliessende Beurteilung der simulierten Eislast ist nicht möglich. Das Ergebnis zeigt, dass – auch wenn die punktgenaue Prognose nicht korrekt ist – das Modell in der Region Vereisung simuliert und so einen Hinweis auf die erwartete Vereisung liefert.

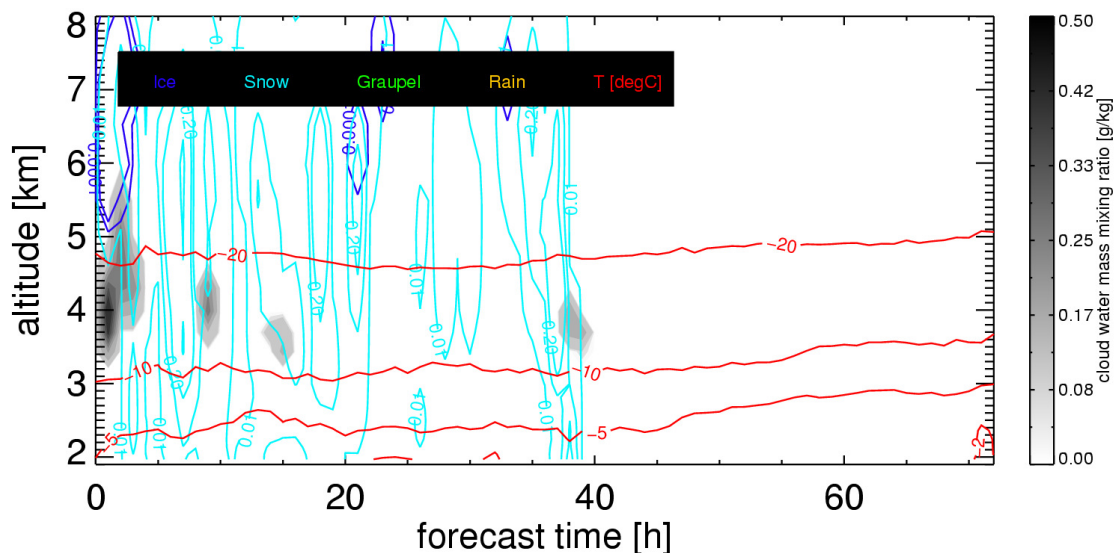


Abb. 24: Höhen-Zeit-Verlauf von Wolkenwasser und Hydrometeoren am Standort Grimselpass für eine am 8.11.2009, 12 UTC beginnende Vereisungsperiode.

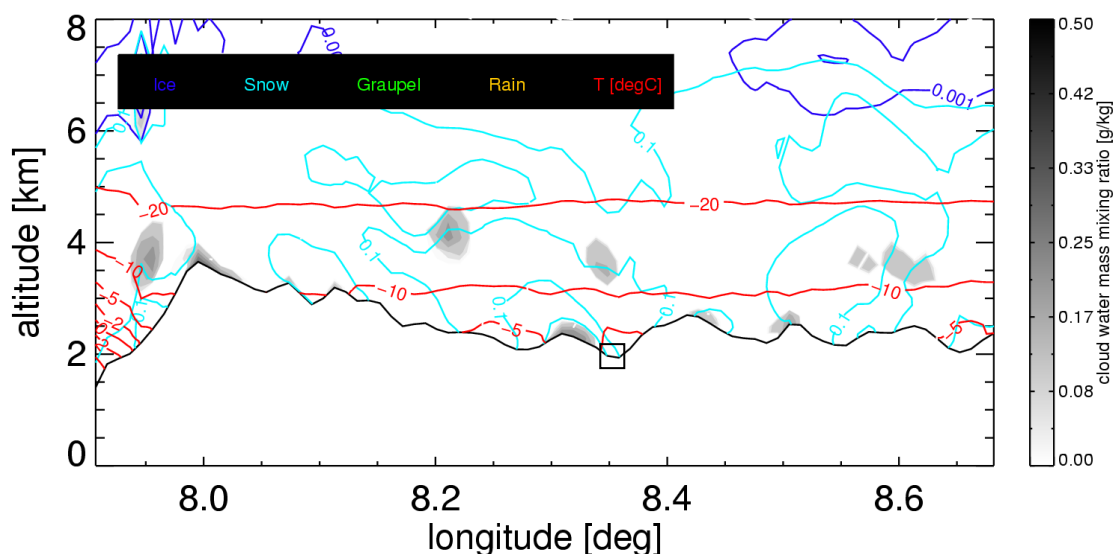


Abb. 25: Vertikalschnitt in Ost-West-Richtung nach 15 Stunden Simulationszeit am Standort Grimselpass für eine am 08.11.2009, 12 UTC beginnende Vereisungsperiode.

Vereisungsperiode. Der Standort ist mit einem schwarzen Rechteck markiert. Die schwarze Schattierung zeigt den Wolkenwassergehalt, die farbigen Linien Temperatur und weitere Hydrometeore, die in der Abbildung beschrieben sind.

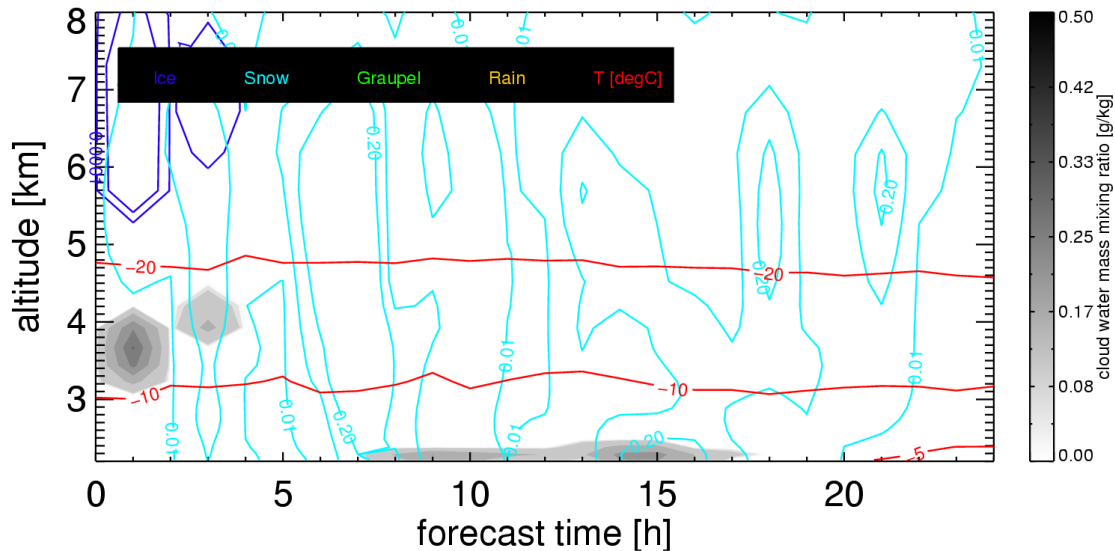


Abb. 26: Höhen-Zeit-Verlauf von Wolkenwasser und Hydrometeoren etwa 1.5 km westlich des Standorts Grimselpass für eine am 8.11.2009, 12 UTC beginnende Vereisungsperiode.

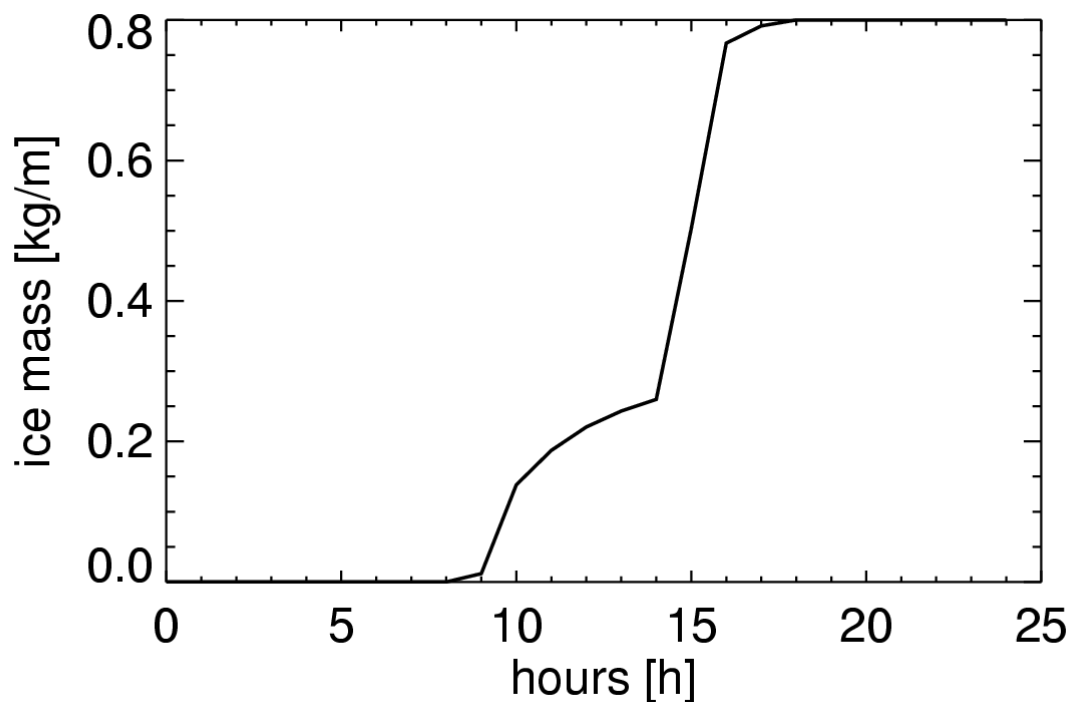


Abb. 27: Zeitreihe der simulierten Eismasse [kg/m] für den Standort etwa 1.5 km westlich des Standorts Grimselpass für eine am 8.11.2009, 12 UTC beginnende Vereisungsperiode.

2.3.2.3. Sensitivitätsuntersuchungen

Der Einfluss verschiedener Parameter auf die Simulation von Vereisungsereignissen wurde mit Hilfe von Sensitivitätsstudien untersucht. Die Untersuchungen wurden mit dem WRF Modell durchgeführt, da es eine Vielzahl physikalischer und numerischer Schemata enthält und als nicht-operationelles Modell flexibel zu ändern ist.

Der Einfluss der horizontalen Gitterweite

Die Unterschiede der Simulationen mit WRF und COSMO-2 für den Standort Gütsch lassen vermuten, dass 2.2 km Gitterweite in manchen Regionen der Schweiz mit sehr komplexer Orographie nicht ausreichen, um alle wichtigen Geländecharakteristika zu beschreiben. Dies wird untersucht, indem die Vereisungssimulationen angetrieben mit WRF Ergebnissen mit 800m Gitterweite und mit 3.2 km Gitterweite verglichen werden. Exemplarisch sind hier die Ergebnisse für die bereits in Abschnitt 2.3.2.2 gezeigten Simulationen für die Standorte Gütsch und Schwyberg dargestellt (Abb. 28 und Abb. 29). Der Vergleich zeigt, dass für den Standort Schwyberg Gitterweiten von etwa 3 km ausreichen, um die Geländecharakteristika und meteorologischen Prozesse zu beschreiben, die wichtig sind, um ein Vereisungsereignis zu erfassen. Dies war aufgrund der Ergebnisse der Fallstudien (Abschnitt 2.3.2.2) zu erwarten, da die Ereignisse mit dem COSMO Modell erfasst wurden, auch wenn die Eismasse zu gering vorhergesagt wurde. Gleiches gilt für den Jura-Standort Matzendörfer Stierenberg. Am Standort Gütsch dagegen, in sehr komplexem Gelände, sind Gitterweiten von 3 km nicht ausreichend: die WRF Simulation mit 3.2 km Gitterweite erfasst das Vereisungsereignis am Gütsch nicht (Abb. 29). Die Ergebnisse zeigen, dass in sehr komplexem Gelände Gitterweiten von unter 1 km notwendig sind, um alle wichtigen Einflüsse zu beschreiben.

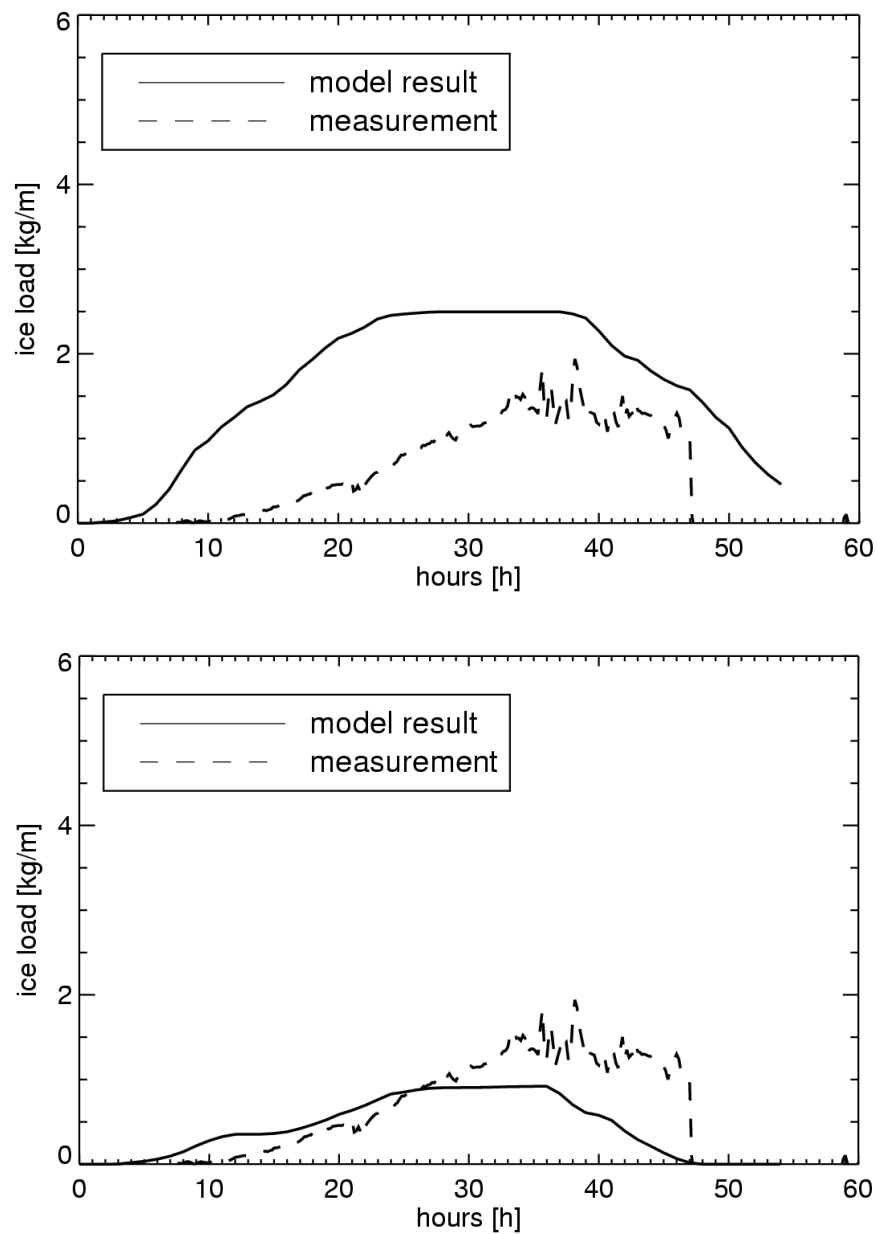


Abb. 28: Zeitreihe der gemessenen (- - -) und der mit WRF mit 800 m Gitterweite (oben) und 3.2 km Gitterweite (unten) simulierten (—) Eislast am Standort am Standort Schwyberg für eine am 13.11.2008, 00 UTC beginnende Vereisungsperiode.

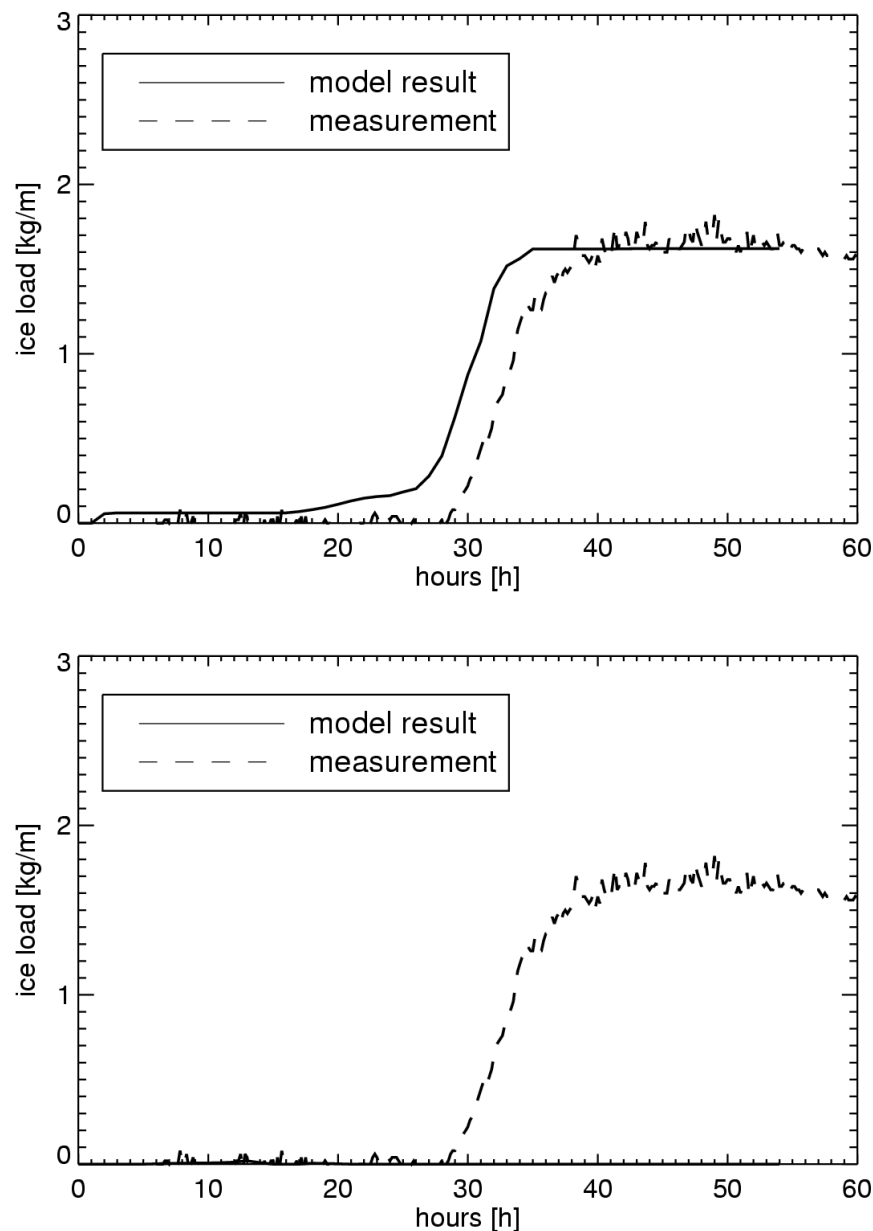


Abb. 29: Zeitreihe der gemessenen (- - -) und der mit WRF mit 800 m Gitterweite (oben) und 3.2 km Gitterweite (unten) simulierten (—) am Standort Gütsch für eine am 22.11.2007, 00 UTC beginnende Vereisungsperiode.

Der Einfluss physikalischer Parameterisierungen in WRF

Die Simulationen im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden mit dem WRF Modell, Version 3.1 durchgeführt. Eine ausführliche Modellbeschreibung findet sich in Skamarock et al. (2008). Die Turbulenz wird in der Basissimulation mit dem Yonsei University Schema berechnet, das eine K-Schliessung mit sogenannten counter gradienten Termen benutzt. Die laminare Grenzschicht wird entsprechend Monin-Obukov-Ähnlichkeitstheorie parameterisiert. Die Parameterisierung der Wolken- und Niederschlagsbildung wird mit dem komplexen Mikrophysikschema von Thompson et al. (2004) berechnet. Es handelt sich um ein Zwei-Momente-Schema (Masse und

Teilchenzahldichte), was für die Vorhersage von unterkühltem Wasser in der Atmosphäre als bedeutsam betrachtet wird.

Die grösste Herausforderung bei der Simulation von Vereisung ist die korrekte Simulation der Wolkenbildung. Neben der korrekten Simulation der synoptischen Situation sind hierfür insbesondere das Mikrophysikschema und das Turbulenzschema von Bedeutung. Das Mikrophysikschema ist der Teil des Modells, der die Wolken- und Niederschlagsbildungsprozesse beschreibt. Das Turbulenzschema ist von Bedeutung, da die Turbulenz einen starken Einfluss auf die Struktur und Dynamik der atmosphärischen Grenzschicht hat und somit die Wolkenbildung stark beeinflussen kann. In der Sensitivitätsstudie bezüglich des Mikrophysikschemas wird das Morrison-Schema statt des Thompson-Schemas verwendet und in der Studie bezüglich der Turbulenz wird ein TKE-Schema statt des Yonsei University Schemas verwendet. Beide geänderten Schemata sind ebenfalls komplexe Parameterisierungen. In Bezug auf die Mikrophysik haben Untersuchungen gezeigt, dass zu einfache Parameterisierungen, die für Vereisung wichtigen Prozesse nicht erfassen können.

Die Sensitivitätsstudie wird für den Standort Schwyberg für eine am 13.11.2008, 00 UTC beginnende Vereisungsperiode durchgeführt (Abschnitt 2.3.2.2). Der zeitliche Verlauf von Temperatur und Windgeschwindigkeit wird in allen drei Studien sehr ähnlich simuliert und stimmt gut mit den Messungen überein (Abb. 30). Lediglich der Anstieg der Temperatur am Ende der Simulationsperiode wird im Modell etwa 6 Stunden zu früh vorhergesagt. Dies hat zur Folge, dass auch das Abschmelzen der Eismasse etwa 6 Stunden zu früh einsetzt (Abb. 31, rechts). Der Unterschied des am Standort simulierten Wolkenwassers ist zwischen Basissimulation und Simulation mit verändertem Mikrophysikschema gering.

Grössere Unterschiede ergeben sich zwischen Basissimulation und verändertem Turbulenzschema. Mit verändertem Turbulenzschema ist die Bewölkung mit maximal 2.5 km Höhe weniger hoch reichend als in der Basissimulation mit maximal 3 km Höhe. Der grösste Unterschied zwischen den Simulationen ergibt sich im Niederschlag. In der Basissimulation werden Schnee, Graupel und Regen simuliert, während mit verändertem Mikrophysikschema kein Niederschlag simuliert wird. Die Änderung des Turbulenzschemas führt dazu, dass überwiegend Regen und ein geringer Betrag Schnee simuliert wird. Graupel wird in vernachlässigbarer Menge produziert. Diese Änderung des Niederschlags kann sich auf die simulierte Vereisung auswirken. Entsprechend dem ähnlichen zeitlichen Verlauf von Temperatur, Wind und Wolkenwasser am Standort ist auch der zeitliche Verlauf der simulierten Vereisung in den drei Simulationen sehr ähnlich. Dagegen zeigt die maximal simulierte Eislast Unterschiede zwischen den Simulationen: sie beträgt in der Basissimulation etwa 2.6 kg/m, in der Simulation mit geändertem Mikrophysikschema etwa 3.2 kg/m und in der Simulation mit geändertem Turbulenzschema etwa 2.9 kg/m. Diese Unterschiede sind in erster Linie auf die geänderte Simulation des Niederschlags zurückzuführen.

In der hier durchgeführten Fallstudie wirken sich Änderungen von Turbulenz- und Mikrophysikschemaschemata nicht auf den Beginn und die Dauer des Vereisungsereignisses aus. Dagegen führt das geänderte Mikrophysikschema zu einer um 25% höheren maximalen Eislast, während das geänderte

Turbulenzschema die maximale Eislast nur um etwa 8% erhöht. Es ist als positiv zu betrachten, dass sich die Simulationsergebnisse bei Verwendung verschiedener, ausreichend komplexer Schemata robust verhalten. Die Ergebnisse werden durch Sensitivitätsstudien für den Grimsel-Fall bestätigt (Abschnitt 2.3.2.2). Inwieweit dies Ergebnis für andere Situationen gilt, müsste in weiteren Fallstudien geklärt werden.

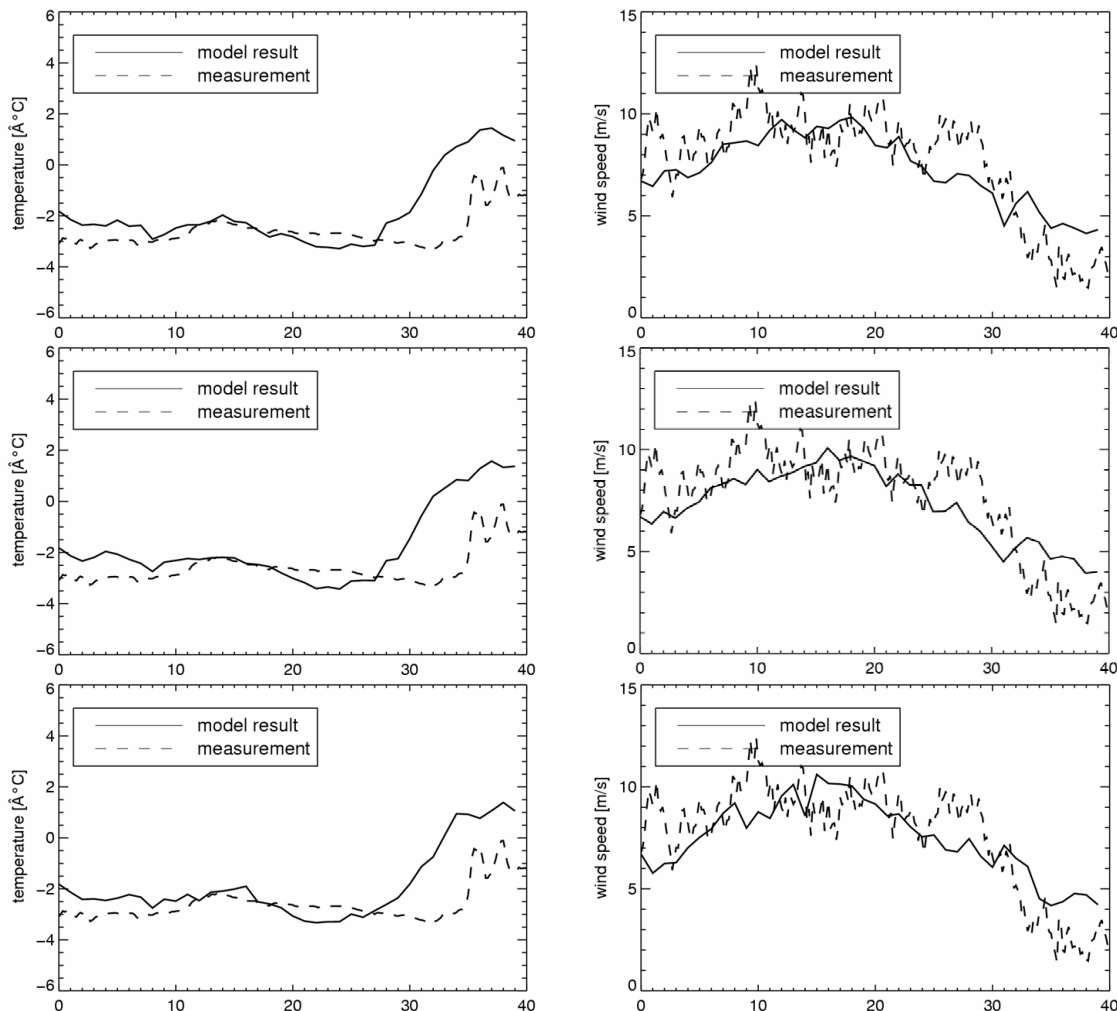


Abb. 30: Zeitreihe der gemessenen (- - -) und der mit WRF simulierten (—) Temperatur (links) und des Windes (rechts) in der Simulation mit Yonsei University und Thompson Schema (oben), mit Yonsei University und Morrison Schema (Mitte) und mit TKE Schema und Thompson Schema (unten) am Standort Schwyberg für eine am 13.11.2008, 00 UTC beginnende Vereisungsperiode.

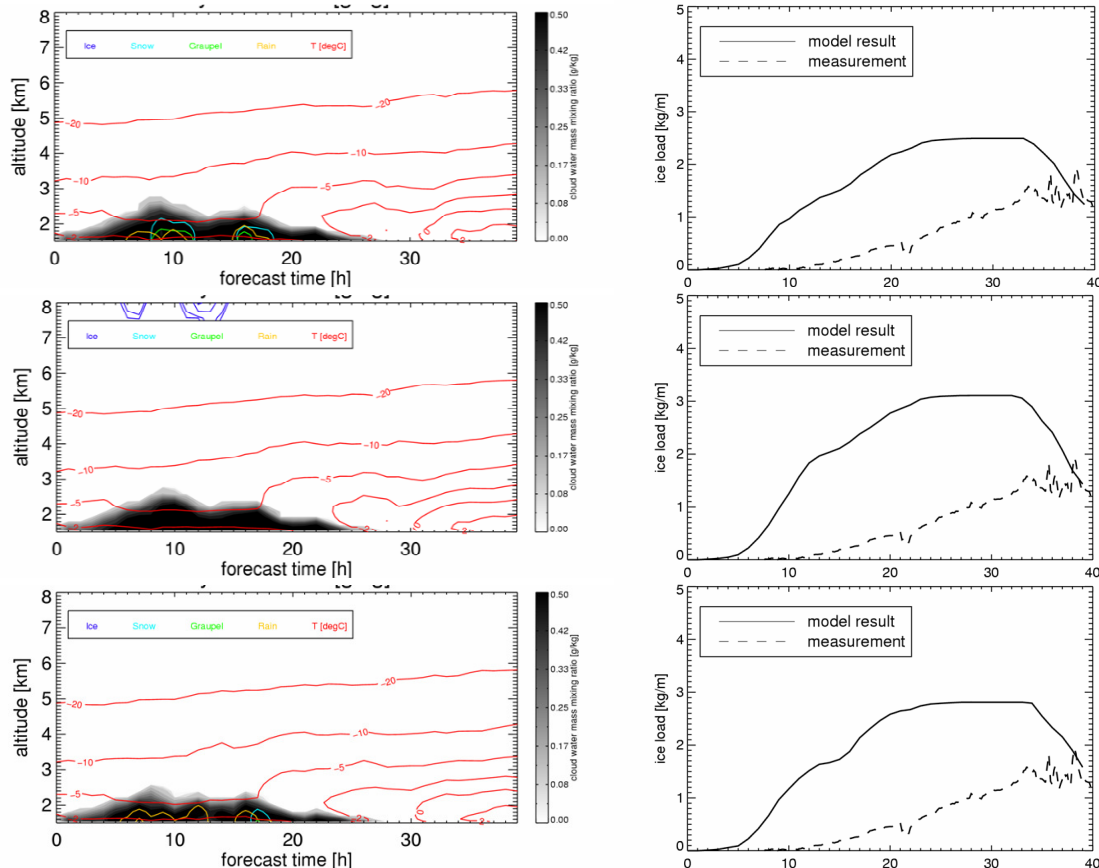


Abb. 31: Höhen-Zeit-Verlauf von Wolkenwasser und Hydrometeoren (links) und Zeitreihe der gemessenen (---) und der mit WRF simulierten (—) Eismasse (rechts) in der Simulation mit Yonsei University und Thompson Schema (oben), mit Yonsei University und Morrison Schema (Mitte) und mit TKE Schema und Thompson Schema (unten) am Standort Schwyberg für eine am 13.11.2008, 00 UTC beginnende Vereisungsperiode.

Der Einfluss der Teilchenzahldichte im Vereisungsalgorithmus und in WRF

Eine der Eingangsgrößen in den Vereisungsalgorithmus ist die Teilchenzahldichte, aus der im Modell ein Tröpfchendurchmesser bestimmt wird. Erhöht sich bei gleich bleibendem Flüssigwassergehalt der Atmosphäre die Teilchenzahldichte, so verringert sich der Tröpfchendurchmesser. Die Tröpfchengröße wirkt im Vereisungsalgorithmus in erster Linie auf den Aufprall-Koeffizient, also den Anteil der Tröpfchen, der auf den Zylinder trifft. Es wird erwartet, dass bei einem verringerten Tröpfchendurchmesser mehr Teilchen um den Zylinder transportiert werden und sich daher die angelagerte Eismasse verringert.

Informationen über die Teilchenzahldichte sind limitiert, da der Parameter räumlich und zeitlich variabel ist und nur wenige Messungen vorliegen. Da es sich um eine sehr unsichere Eingangsgröße handelt, wird in einer Sensitivitätsstudie untersucht, wie stark der Einfluss des Parameters auf das Modellergebnis ist. Hierfür wird die Teilchenzahldichte von 300 cm^{-3} auf 100 cm^{-3} reduziert. Eine Teilchenzahldichte von 300 cm^{-3} ist typisch für einen kontinentalen Standort während 100 cm^{-3} ein typischer Wert für maritime Standorte ist.

In Abb. 32 ist exemplarisch der zeitliche Verlauf der Eismasse für eine Fallstudie am Schwyberg darstellt. Das Ergebnis zeigt, dass die maximale Eislast in der Sensitivitätsstudie mit 100 cm^{-3} mit 4.25 kg/m gegenüber der Simulation mit 300 cm^{-3} mit 2.5 kg/m um 70% erhöht ist. Die Sensitivitätsstudie, deren Ergebnis auch durch andere Fallstudien bestätigt wird, bestätigt die Erwartung, dass eine geringere Teilchenzahldichte und ein damit erhöhter Tröpfchenradius zu einer verstärkten Anlagerung von Tröpfchen führen. Das Ergebnis wird durch weitere Fallstudien bestätigt. Die Untersuchung zeigt, dass bessere Informationen über die Teilchendichte ein wichtiger Schritt sind, um die Simulation von Eislasten zu verbessern.

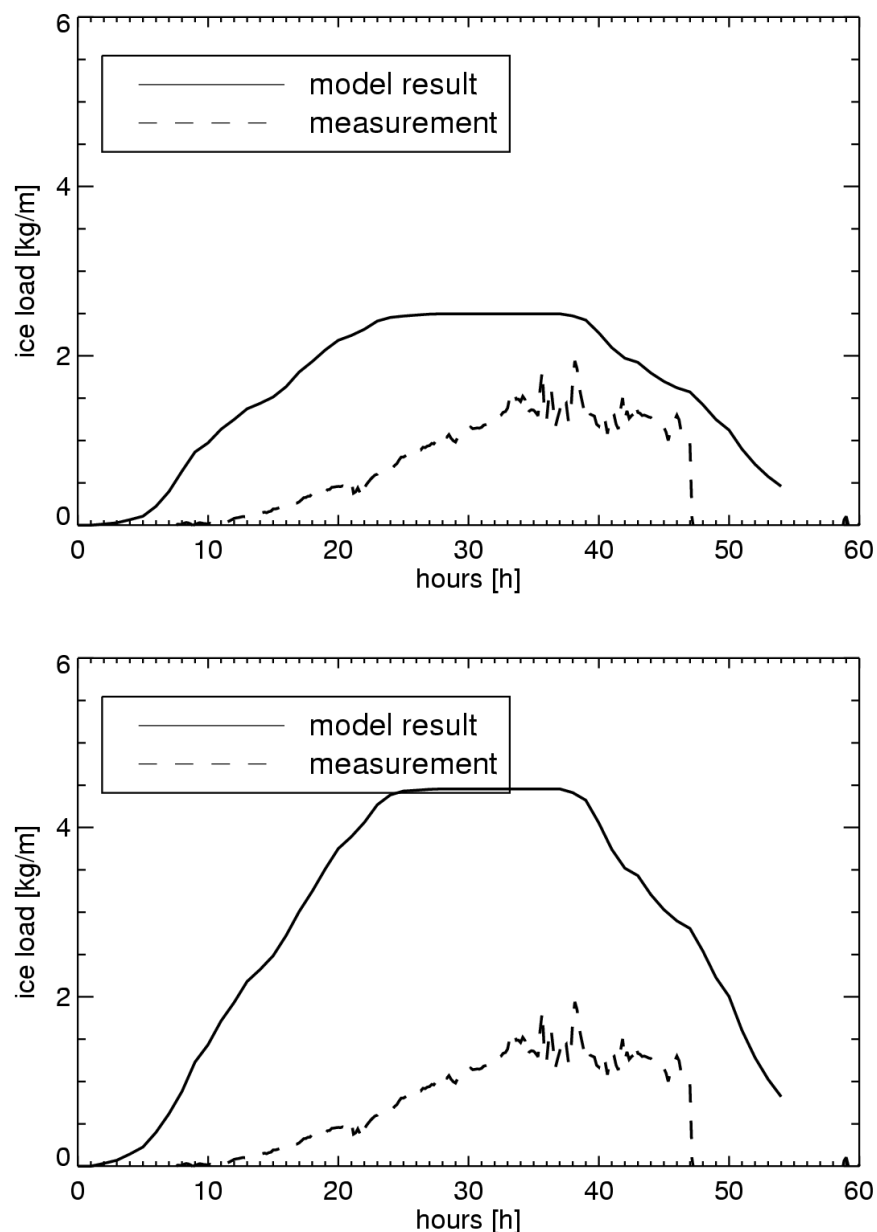


Abb. 32: Zeitreihe der gemessenen (- - -) und der mit WRF und einer Teilchenzahldichte von 300 cm^{-3} (oben) und 100 cm^{-3} (unten) im Vereisungsalgorithmus simulierten (—) Eislast am Standort Schwyberg für eine am 13.11.2008, 00 UTC beginnende Vereisungsperiode.

Die Teilchenzahldichte ist nicht nur im Vereisungsalgorithmus von Bedeutung. Im Mikrophysikschema beeinflusst sie das Wachstum von Wolkentröpfchen und deren Umwandlung in Regen. Dadurch kann sich die Teilchenzahldichte auf den Flüssigwassergehalt und die Lebensdauer von Wolken auswirken. Die Standardeinstellung für die Teilchenzahldichte im Modell ist 100 cm^{-3} , ein Wert, der für maritime Bedingungen charakteristisch ist. Alle Simulationen wurden mit dieser Standardeinstellung durchgeführt. In einer Sensitivitätsstudie wird nun untersucht, welchen Einfluss die Verwendung eines für kontinentale Bedingungen realistischeren Wertes von 300 cm^{-3} für die Vereisungssimulationen hat. Die Sensitivitätsstudie wurde anhand eines Vereisungsereignisses am Schwyberg durchgeführt.

In Abb. 33 ist exemplarisch der Vertikalschnitt der simulierten Hydrometeore nach 17 Stunden Simulationszeit dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit höherer Teilchenzahldichte weniger Niederschlag produziert wird und dagegen der Flüssigwassergehalt in der Wolke höher ist. Das Ergebnis passt zur theoretischen Erwartung: eine höhere Teilchenzahldichte führt dazu, dass die Tröpfchen kleiner sind. Dadurch wächst ein geringerer Anteil der Tröpfchen so, dass es zu einer Umwandlung in Regentropfen kommt. Damit verringert sich der Niederschlag und der Flüssigwassergehalt bleibt im Wolkenwasser erhalten. Auf die Simulation der Eismasse hat diese Änderung nur einen geringen Einfluss: der zeitliche Verlauf der Eismasse ist sehr ähnlich, lediglich die maximale Eislast wird um 10% reduziert (Abb. 34). Ob es Situationen gibt, in denen der Einfluss stärker ist, müsste anhand weiterer Fallstudien untersucht werden. Insgesamt scheint der Effekt gegenüber anderen Einflüssen allerdings vernachlässigbar und wurde daher nicht weiter untersucht.

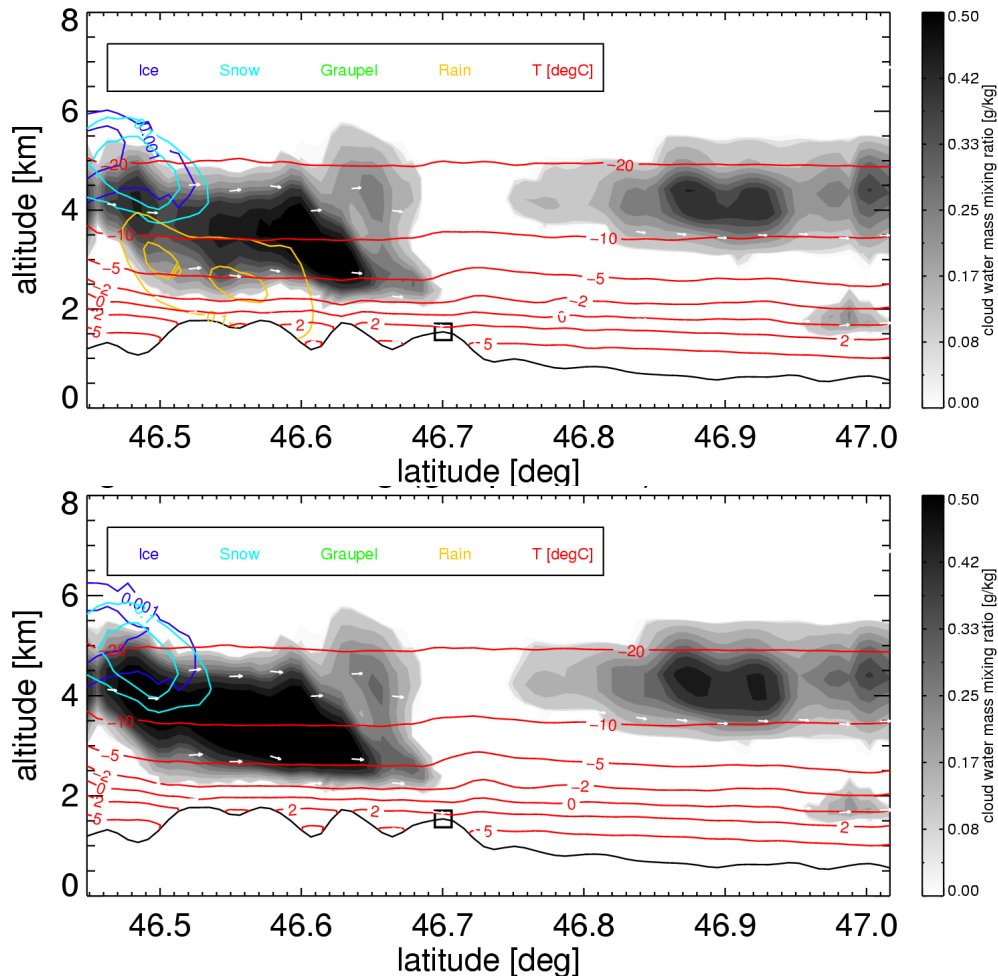


Abb. 33: Vertikalschnitt in Nord-Süd-Richtung nach 17 Stunden Simulationszeit am Standort Schwyberg für eine am 27.03.2009, 12 UTC beginnende Vereisungsperiode. Dargestellt ist die Simulation mit einer Teilchenzahldichte von 100 cm⁻³ im Mikrophysikschema (oben) und mit einer Teilchenzahldichte von 300 cm⁻³ im Mikrophysikschema (unten). Der Standort Schwyberg ist mit einem schwarzen Rechteck markiert. Die schwarze Schattierung zeigt den Wolkenwassergehalt, die farbigen Linien Temperatur und weitere Hydrometeore, die in der Abbildung beschrieben sind.

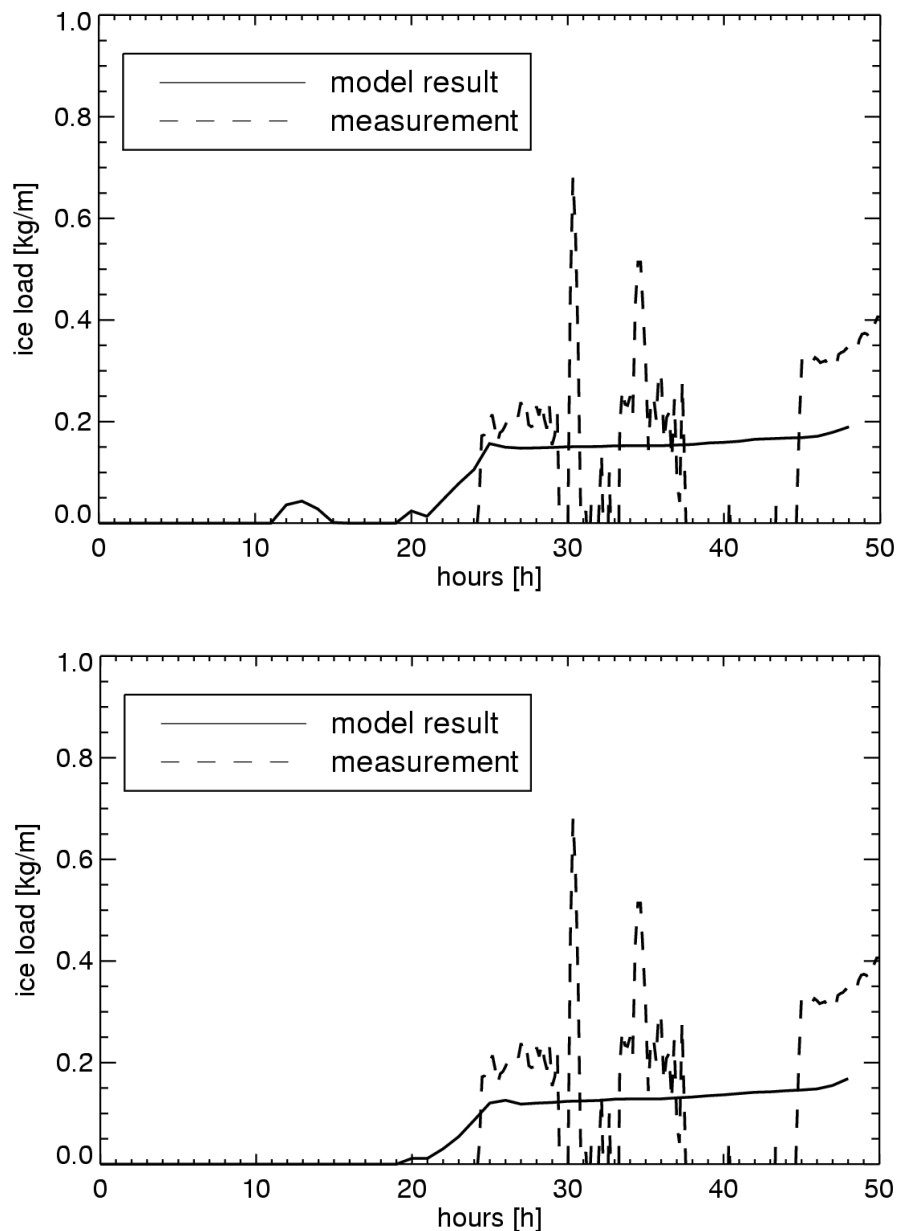


Abb. 34: Zeitreihe der gemessenen (- - -) und der mit WRF und einer Teilchenzahldichte von 100cm⁻³ (oben) und 300cm⁻³ (unten) im Mikrophysikschema simulierten (—) Eislast am Standort Schwyberg für eine am 27.03.2009, 12 UTC beginnende Vereisungsperiode.

2.3.2.4. Ergebnisse aus dem Projekt ‚Vereisungskarte der Schweiz‘

Die im vorliegenden Projekt gewonnenen Erkenntnisse bildeten die Grundlage für ein vom BFE finanziertes Projekts, welches die Erstellung einer Karte der Vereisungshäufigkeit für die Schweiz zum Ziel hatte. Die Vereisungskarte soll zur Unterstützung bei der Planung von Windenergieprojekten dienen. Das Projekt begann im September 2009. Es wird von Meteotest koordiniert, Projektpartner sind das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz und das WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF. Das Projekt dauert bis Ende Mai 2010.

In dem Projekt wurde eine Karte der Häufigkeit meteorologischer Vereisung in der Schweiz erstellt. Hierfür wurden flächendeckende Informationen über Wolkenwasser, Temperatur und Wind aus der Analyse des operationellen Wettervorhersagemodells COSMO-2 der MeteoSchweiz genutzt. Diese Informationen dienen als Eingabedaten für den Vereisungsalgorithmus nach Makkonen [5]. Die berechneten Häufigkeiten wurden anhand von Messungen des Interkantonalen Mess- und Informationssystems (IMIS) und Windmessungen im Jura verifiziert. IMIS-Stationen bilden immer ein Stationspaar, wobei jeweils eine Station (Windstation) in einer exponierten Grat- oder Gipfelage und eine Station (Schneestation) möglichst nahe an der Windstation aber in geschützter, ebener Lage aufgestellt ist. Alle Stationen sind mit unbeheizten Windmessern (Youngflieger), die auf einer Höhe von 6 Metern über Grund (ohne Schnee) angebracht sind, sowie mit Sensoren zur Messung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte ausgestattet. Im Folgenden wird ein Überblick über die Resultate gegeben. Weitere Einzelheiten zu diesem Projekt finden sich im Abschlussbericht für das BFE, der vermutlich ab Mitte 2010 öffentlich zur Verfügung stehen wird.

Die berechnete Karte der Häufigkeit meteorologischer Vereisung in der Schweiz zeigt eine plausible räumliche Verteilung (Abb. 35): im Mittelland ist die Vereisungshäufigkeit in 10 m Höhe mit bis zu 4 Tagen/Jahr gering. Höhere Werte im Bereich von 10-20 Tagen/Jahr treten im Jura und in den Voralpen auf, am häufigsten ist Vereisung in den Zentralalpen (50 Tagen). Maximale Vereisungshäufigkeiten in 10 m Höhe liegen im Bereich von 100 Tagen/Jahr. Dieser Wert wirkt hoch, doch auch die aus IMIS-Messungen abgeleitete Häufigkeit beträgt bis 65 Tage/Jahr. Die Unsicherheit der aus IMIS Messungen abgeleiteten Vereisungshäufigkeit ist schwer abzuschätzen. Es wird angenommen, dass der Fehler im Bereich von 5-10% Unterschätzung liegt. Ein Vergleich mit 10jährigen Messreihen zeigt, dass die Vereisungshäufigkeit im Zeitraum August 2007 bis Juli 2009 für die 10jährige Periode repräsentativ ist.

Die Evaluation der Vereisungskarte in 10m Höhe im Bereich der Alpen anhand von aus IMIS-Messungen abgeleiteten Vereisungshäufigkeiten zeigt, dass die mittlere Vereisung von 9.4 Tagen/Jahr im Zeitraum August 2007 bis Juli 2009 in der Karte mit 9.7 Tagen/Jahr gut wiedergegeben wird. Auch die räumlichen Muster sind ähnlich. Bei der Analyse von Einzelstationen ergeben sich dagegen zum Teil deutliche Abweichungen, sowohl in den Mittelwerten als auch im zeitlichen Verlauf. So wird die Vereisungshäufigkeit für die sehr exponierten Windstationen in der Karte systematisch unter- und für die geschützten Schneestationen systematisch überschätzt. Der Grund hierfür ist, dass die meteorologischen Daten und damit die Vereisungskarte auf einem Raster von 2.2 km Gitterweite vorliegen. Dies ist eine hohe räumliche Auflösung für ein Wettervorhersagemodell, aber sehr lokale Geländecharakteristika können nicht erfasst werden. Dies bestätigt, die in Abschnitt 2.3.2.3 gefundenen Resultate, dass an Standorten mit sehr komplexer Orographie Gitterweiten von weniger als 1 km notwendig sind, um die wichtigen Prozesse zu erfassen. Vergleicht man die simulierten und aus Messungen abgeleiteten Vereisungshäufigkeiten in weniger komplexer Orographie, z.B. Passlagen oder im Jura, dann ergibt sich eine gute Übereinstimmung.

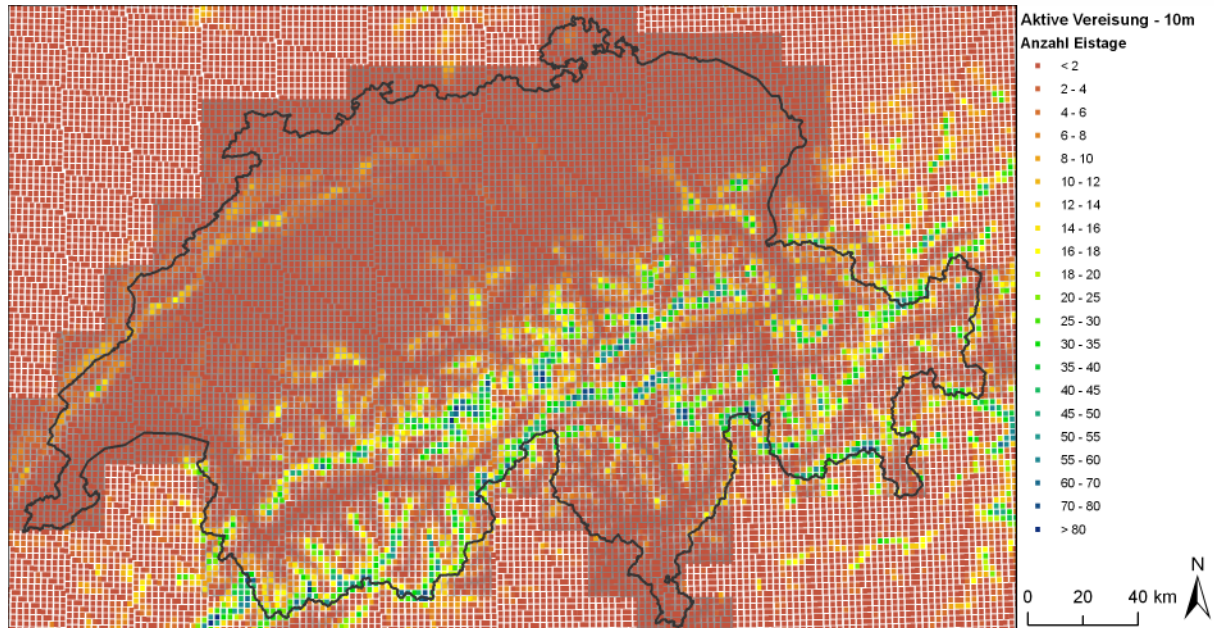


Abb. 35: Karte der Häufigkeit meteorologischer Vereisung [Tage/Jahr] in 10 m über Grund in der Schweiz für den Zeitraum August 2007 – Juli 2009.

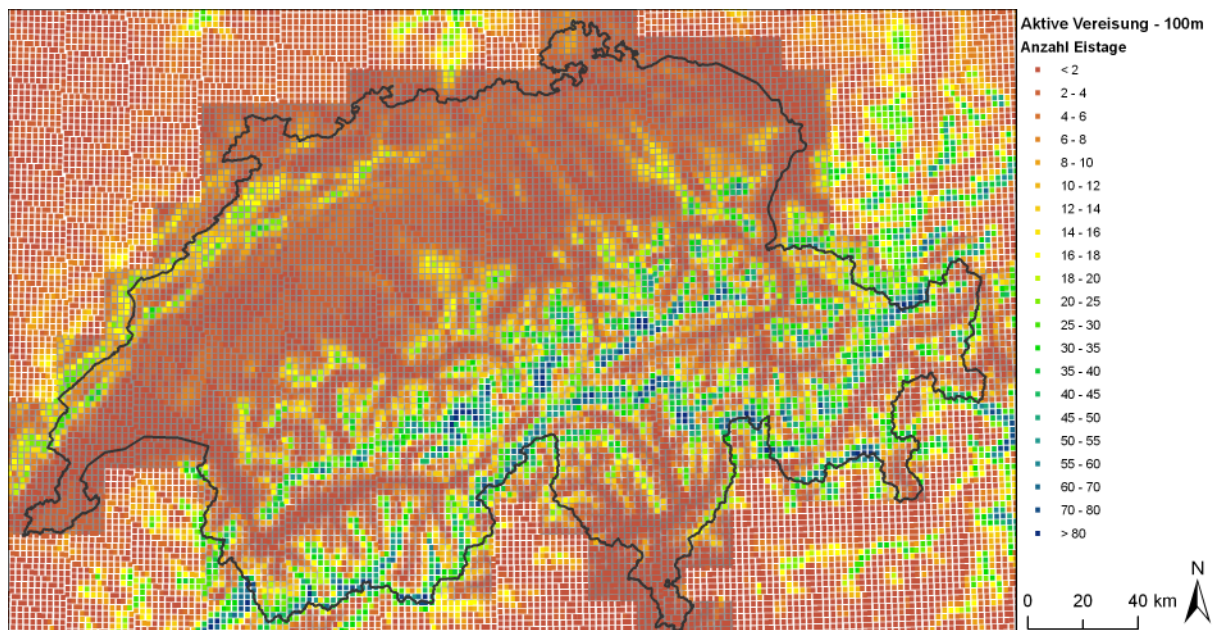


Abb. 36: Karte der Häufigkeit meteorologischer Vereisung [Tage/Jahr] in 100 m über Grund in der Schweiz für den Zeitraum August 2007 – Juli 2009.

Die Vereisungshäufigkeit wurde auch in 100 m Höhe über Grund berechnet (Abb. 36). In 10 m Höhe über Grund liegt die Vereisungshäufigkeit im Jura in weiten Teilen bei etwa 10 Tagen/Jahr, während sie in 100 m Höhe über Grund verbreitet bei 20 Tagen/Jahr liegt. Im Bereich der Alpen und Voralpen treten vermehrt Gebiete mit Vereisungshäufigkeiten mit mehr als 30 Tage/Jahr auf. Im Mittel ist die Häufigkeit meteorologischer Vereisung in 100 m Höhe um einen Faktor 2.2 höher als in 10 m Höhe. Nur eine Messung im Jura in 80 m Höhe lässt eine Abschätzung der simulierten Werte zu und an diesem Standort ergibt sich eine gute Übereinstimmung.

Mit dem Modellsystem wurden auch Karten der instrumentellen Vereisung berechnet, das bedeutet der Zeiträume, in denen Eisansatz vorliegt, unabhängig von einer

Zunahme der Eislast. Das Modellsystem überschätzt die Zeiträume instrumenteller Vereisung. Dies gilt insbesondere im Gebiet der Alpen. Hier spielen kurzweilige Strahlung, Sublimation sowie Wind und Erschütterung der Struktur eine wichtige Rolle bei der Abnahme der Eismasse, während der ‚klassische‘ Schmelzvorgang weniger bedeutend ist. Kurzweilige Strahlung, Sublimation sowie Wind- und Erschütterungseinflüsse sind im Vereisungsalgorithmus aber nicht oder nur stark vereinfacht enthalten. Realistischere Verhältnisse für das Verhältnis von meteorologischer und instrumenteller Vereisung werden im z.B. Jura erreicht.

Die Karte der Vereisungshäufigkeit stellt die meteorologische Vereisung dar. Die Perioden instrumenteller Vereisung sind in der Regel länger (für den Jura wurde ein Verhältnis von 1:4 abgeschätzt). Die Häufigkeitsangaben sind nicht als punktgenaue, exakte Werte zu interpretieren. Vielmehr geben sie einen Hinweis darauf, ob das geplante Projekt in einer Region liegt, in der mit häufiger Vereisung zu rechnen ist. In diesem Fall sollten für das Standortgutachten entsprechende Zusatzmessungen geplant werden, z.B. beheizte/unbeheizte Anemometer, um die Vereisungshäufigkeit zu bestimmen. Ist der Standort durch kleinräumige Geländecharakteristika geprägt (stark exponiert oder abgeschattet), kann der Wert in der Vereisungskarte nicht mehr als repräsentativ betrachtet werden. Er wird bei exponierter Lage höher und bei abgeschatteter Lage unter dem Wert in der Karte liegen.

Die Evaluation der Karte der Vereisungshäufigkeit in der Schweiz bestätigt die Eignung des Modellsystems zur Simulation der Vereisungshäufigkeit. Es bestätigt sich aber auch die Einschränkung, dass für Standorte in sehr komplexem Gelände Gitterweiten im Bereich von 2-3 km die Details noch nicht ausreichend genau abbilden. Die mittlere Vereisungshäufigkeit und auch die regionale Verteilung werden gut wiedergegeben. Und die gemessene und simulierte Vereisungshäufigkeit für Standorte in weniger komplexem Gelände stimmt gut überein.

2.4. Bewertung der Resultate

2.4.1. Messung von Vereisung

Alle drei Messstationen konnten plangemäss in Betrieb genommen werden und die Messkampagnen verliefen ohne grössere Pannen. Es konnte somit eine hohe Datenverfügbarkeit erreicht werden. Wegen der beschriebenen technischen Probleme mit dem Instrument zur Eislastmessung Saab/Combitech IceMonitor sind jedoch die erhaltenen Werte für die Eislast an den drei Standorten mit einer grossen Unsicherheit behaftet. Schwankungen und Drifts im gemessenen Signal sowie die fehlende freie Rotation des Vertikalstabs machten es unmöglich, Vereisungsereignisse automatisch zu identifizieren. Insbesondere schwache Vereisungsereignisse konnten nicht erfasst werden. Die im Bericht genannten Mankos des Sensors wurden dem Hersteller mitgeteilt. Der vermutlich grösste Fortschritt könnte mit dem Einbau einer forcierten Rotation des Vertikalstabs erreicht werden. Die schlechte finanzielle Lage des Herstellers ermöglicht aber im Moment keine Weiterentwicklung des Sensors.

Auf dem Gütsch standen zusätzlich die Bilder der von MeteoSchweiz betriebenen automatischen Kamera zu Verfügung. Mit Hilfe dieser Bilder konnten die Signale des Sensors interpretiert und für den Vergleich mit der Simulation brauchbare Ereignisse extrahiert werden. An den beiden anderen Stationen standen keine Kamerabilder zu Verfügung. Dafür lieferte der Eislastsensor die besseren Resultate. Damit war es möglich, zumindest starke Vereisungsereignisse zu extrahieren und für den Vergleich mit den Simulationen aufzubereiten.

Auf diese Weise konnten genügend Ereignisse für den Vergleich mit den Simulationen innerhalb von Fallstudien bereitgestellt werden. Insbesondere die Zeitdauer der Ereignisse konnte anhand der verfügbaren Daten gut verifiziert werden. Bei der Eislast hingegen ist die Unsicherheit grösser, hier konnten nur die qualitativen Grössenordnungen verglichen werden.

Die innerhalb des Projekts geplanten Resultate zur Vereisungshäufigkeit an den drei Standorten konnten nicht vollständig erreicht werden. Es zeigte sich aber, dass starke Vereisungsereignisse eher Einzelereignisse innerhalb eines Winters sind. Es konnten auch Angaben zu Maximallasten eruiert werden. Die Einschränkung hierbei besteht darin, dass die Messungen auf 10 m durchgeführt wurden, während in der Höhe von Überlandleitungen oder Windkraftanlagen mit wesentlich stärkerer Vereisung gerechnet werden muss.

Zusammengefasst konnten im Bereich der Messung von Vereisung nicht alle Projektziele erreicht werden. Die Gründe dafür lagen ausserhalb des Einflussbereiches der Projektpartner. Der Projektfortschritt, insbesondere in Bezug auf die Simulation der Vereisung war aber zu keiner Zeit gefährdet.

Da mit dem an den drei Stationen installierten Sensor keine zuverlässigen Messungen der Vereisungshäufigkeit durchgeführt werden können, werden die Eislast-Messungen nicht weitergeführt. Die Messstationen Schwyberg und Matzendörfer Stierenberg wurden vollständig demontiert. Die Messstation Gütsch

bleibt als Teststation der MeteoSchweiz bestehen, die Eislast-Messungen werden aber nicht weitergeführt.

2.4.2. Simulation von Vereisung

Im Rahmen des hier vorliegenden Projekts wurde ein Modellsystem zur Simulation von Vereisungsereignissen bestehend aus einem dem Vereisungsalgorithmus nach Makkonen und den Wettervorhersagemodellen WRF und COSMO-2 für die Schweiz erfolgreich implementiert. Die Simulation von elf Vereisungsereignissen, die an den Standorten Matzendörfer Stierenberg, Schwyberg und Gütsch gemessen wurden, zeigte, dass das Auftreten und die Dauer der Vereisungsereignisse gut erfasst wurden. Mit beiden Wettermodellen wurde während neun von elf Ereignissen Vereisung simuliert und die Dauer der Vereisung mit einem Bias von 18% (WRF) bzw. 20% (COSMO-2) vorhergesagt.

Mit dem COSMO-2 Modell wurden zwei der drei Vereisungsereignisse am Standort Gütsch verpasst. Anhand von Sensitivitätsstudien mit dem WRF Modell wurde untersucht, ob die Ursache in der grösseren horizontalen Gitterweite des COSMO-Modells begründet sein kann. Die Ergebnisse der Sensitivitätsstudien zeigten, dass an Standorten mit sehr komplexer Topographie horizontale Gitterweiten unter 1 km notwendig sind, um Vereisung darstellen zu können. Dieses Ergebnis wird auch von den Ergebnissen der Berechnung einer Vereisungskarte für die Schweiz gestützt. Hier konnten die Vereisungshäufigkeiten an Standorten mit moderat komplexer Orographie sehr gut simuliert werden. Dagegen wurde im Bereich der Zentralalpen die mittlere Vereisungshäufigkeit gut simuliert, aber an sehr exponierten Standorten wurde die Vereisungshäufigkeit systematisch unter- und an abgeschatteten Standorten systematisch überschätzt. Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass mit den heutigen hochaufgelösten Wettermodellen ein gutes Potential besteht, das Auftreten von Vereisung zu simulieren.

Die maximale Eislast während eines Vereisungsereignisses wird vom Modell weniger gut erfasst. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Evaluation der Eislast nur eingeschränkt möglich ist, da auch die gemessene Eislast mit hoher Unsicherheit belastet ist. Aus diesem Grund ist der Vergleich von gemessener und simulierter Eislast eher als qualitativer Vergleich zu betrachten. Der Bias der simulierten maximalen Eislast lag für die Simulationen mit WRF bei -44% während die Simulationen mit COSMO-2 die Eislast um 150% überschätzten. Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell die maximale Eislast auch im Rahmen eines qualitativen Vergleichs nur wenig befriedigend erfasst: mit dem WRF Modell werden sieben von neun und mit dem COSMO-2 Modell vier von neun Ereignissen im Rahmen eines sehr groben, qualitativen Vergleichs erfasst. Dabei scheint das WRF Modell tendenziell zur Unter- das COSMO-2 Modell tendenziell zur Überschätzung der maximalen Eislast zu neigen.

Neben der Ungenauigkeit der Eislastmessungen, die zur Verfügung stehen, sind es vor allem zwei weitere Faktoren, die zur Ungenauigkeit der simulierten Eislast beitragen. Sensitivitätsstudien haben gezeigt, dass die Teilchenzahldichte, welche eine Eingangsgrösse für den Vereisungsalgorithmus ist, einen sehr starken Einfluss auf die simulierte Eislast hat. Angaben über die Teilchenzahldichte sind aber mit grosser Unsicherheit behaftet, da über diese räumlich und zeitlich variable Grösse

wenige Informationen vorliegen. So kann der Wert nur grob abgeschätzt werden: der Unterschied zwischen typischen maritimen Werten von 100 cm^{-3} und typischen kontinentalen Werten von 300 cm^{-3} verursacht aber Unterschiede im Bereich von 70% der maximalen simulierten Eislast. Bisher liegen wenige Messungen zu Teilchenzahldichten, bzw. mittleren Tropfengrößen vor. Eine breite Datengrundlage insbesondere in der Nähe von Standorten mit Eislastmessungen würde eine bessere Kontrolle der Eismodellierung und damit der möglichen Ursachen für die Abweichungen erlauben. Zur Zeit ist die Teilchenzahldichte in Wettervorhersagemodellen eine konstante Grösse. Es sind aber Mikrophysik-Schemata in Entwicklung, die räumlich und zeitlich variable Teilchenzahldichten berücksichtigen und in denen die Teilchenzahldichte eine prognostische Variable ist. Diese Entwicklung ist eher im mittelfristigen Bereich zu sehen, dennoch würde dies erlauben, die Teilchenzahldichte für den Vereisungsalgorithmus aus dem Wettervorhersagemodell zu entnehmen und so die Genauigkeit dieses Eingangsparameters zu erhöhen.

Ein weiterer Punkt, der die Simulation der Eislast unsicher macht, ist der unvollständig und recht einfach beschriebene Abbau der Eislast. Im Zusammenhang mit der Berechnung der instrumentellen Vereisung im Rahmen des Projekts ‚Vereisungskarte der Schweiz‘ wurde deutlich, dass diese vom Modellsystem überschätzt wird. Während das Verhältnis zwischen meteorologischer und instrumenteller Vereisung im Jura mit 1:6 noch relativ gut mit dem aus Messungen abgeleiteten Verhältnis von 1:4 übereinstimmt, wird die instrumentelle Vereisung im Bereich der Zentralalpen stark überschätzt. So gibt es einige Gebiete, in denen quasi das ganze Jahr instrumentelle Vereisung simuliert wird. Im Vereisungsalgorithmus wird für den Abbau der angelagerten Eislast der ‚klassische‘ Abschmelzvorgang simuliert. Tatsächlich aber spielen gerade im Bereich der Zentralalpen Prozesse wie kurzweilige Strahlung, Sublimation sowie Wind und Erschütterung der Struktur eine wichtige Rolle bei der Abnahme der Eismasse. Diese Prozesse sind im Vereisungsalgorithmus aber nicht oder nur stark vereinfacht enthalten. Auch kommt es in Realität häufig zu einem Stop der freien Rotation des Zylinders, so dass auch die Anlagerung an den Zylinder nicht mehr rotationssymmetrisch verläuft. In diesem Fall bilden sich Eisfahnen, die insbesondere unter dem Einfluss von Wind leicht abfallen. Durch die Vernachlässigung dieser Prozesse wird der Abbau der Eislast tendenziell unterschätzt, was sich auch auf die Simulation der maximalen Eislast auswirken kann.

Mit dem Modell WRF wurden verschiedene Sensitivitätsstudien durchgeführt, um zu untersuchen, wie stark die Modellergebnisse von der gewählten Modellkonfiguration abhängen. Aufgrund der langen Rechenzeiten für die hoch aufgelösten Rechnungen mussten die Untersuchungen auf wenige Einzelfälle beschränkt werden, so dass die Aussagekraft der Studien limitiert ist. Es wurden in erster Linie das Mikrophysik-Schema, das die Wolken- und Niederschlagsbildung beeinflusst, und das Turbulenzschema, das die Grenzschichtstruktur und -dynamik beeinflusst, durch andere, ebenfalls komplexe Schemata ersetzt. Die Sensitivitätsstudien zeigten quasi keine Unterschiede in der Simulation von Windgeschwindigkeit und Temperatur am Standort. Die Wolkenhöhe war bei Verwendung des TKE-Turbulenzschemas etwas geringer als in der Basissimulation. Der grösste Unterschied zwischen den Simulationen lag im simulierten Niederschlag, der sowohl durch die geänderte Mikrophysik als auch durch die geänderte Turbulenz deutlich beeinflusst wurde. Auf die Simulation von Vereisung hatte diese Änderung aber nur einen geringen Einfluss:

der zeitliche Verlauf der simulierten Eismasse bleibt in allen Simulationen sehr ähnlich, es ergibt sich lediglich ein Einfluss auf die simulierte maximale Eislast. Dieser liegt bei Änderung des Mikrophysik-Schemas im Bereich von 20%. Obwohl die Aussagekraft aufgrund der geringen Fallzahl beschränkt ist, kann das bisherige Ergebnis als positiv gewertet werden. Es zeigt, dass sich die Ergebnisse der Vereisungssimulation bei Wahl ausreichend komplexer Schemata robust gegenüber Modelländerungen verhalten, was das Vertrauen in die Ergebnisse stärkt.

Die im vorliegenden Projekt durchgeführten Untersuchungen bildeten die Grundlagen, um im Auftrag des Bundesamtes für Energie eine Karte der Häufigkeit meteorologischer Vereisung in der Schweiz zu berechnen. Die Grundlage bildeten COSMO-2 Analysen für August 2007 bis Juli 2009. Diese Anwendung des Modells in der Praxis bestätigte die Fähigkeit des Modells das Auftreten von Vereisung realistisch zu simulieren: in moderat komplexem Gelände (z.B. Jura, Passlagen) wurde eine gute Übereinstimmung zwischen simulierten und aus Messungen abgeleiteten Vereisungshäufigkeiten gefunden. Die Evaluation der Karte bestätigte aber auch die beschränkte Genauigkeit des Modells in sehr komplexem Gelände wie den Zentralalpen. Hier konnte das klimatologische Mittel über alle Stationen gut vorhergesagt werden, aber sehr exponierte Stationen wurden systematisch unter- und abgeschattete Stationen wurden systematisch überschätzt. Bei der Berechnung der instrumentellen Vereisung wurden die Schwächen des Vereisungsalgorithmus in Bezug auf die Vorhersage des Abbaus der Eismasse sichtbar. Die Berechnung der Vereisungskarte für die Schweiz hat dazu beigetragen, das Potential aber auch die Limitierung des Modellsystems in Bezug auf die Simulation von Vereisung besser zu verstehen und die Ergebnisse, die im MEMFIS Projekt gewonnen wurden, auf einer breiteren Datengrundlage zu bestätigen.

Die quasi-operationelle Vorhersage von Vereisung wurde nicht untersucht. Es wurde eine weitere Einzelfallstudie für den Standort Grimsel durchgeführt, wo eine Eislastmessung vorliegt, die aber leider keinen direkten Rückschluss auf die angelagerte Eismasse zulässt. Direkt am Ort der Eislastmessung, sagt das Modellsystem keine Vereisung voraus. Allerdings zeigt eine nähere Betrachtung, dass etwa 1.5 km westlich des Standorts bodennah Wolkenwasser bei negativen Temperaturen simuliert wird und somit die Bedingungen für Raureif- und Klareisbildung herrschen. Die simulierte Eisanlagerung erreicht 0.8 kg/m, was im Vergleich zu gemessenen Ereignissen am Gütsch einer mittleren Stärke entspricht. Da in der Situation der Schwellwert für das Heizen der Stromleitung noch nicht erreicht wurde, handelte es sich vermutlich auch um kein starkes Ereignis. Das Ergebnis zeigt, dass vom Modellsystem nicht unbedingt eine punktgenaue Information zu den Vereisungsbedingungen erwartet werden kann. Es zeigt aber auch, dass das Modell die Bedingungen im Prinzip richtig erfasst und Indizien liefert, dass im Gebiet mit Vereisung zu rechnen ist.

Um das Modellsystem für eine operationelle Vereisungsvorhersage zu nutzen, sind weitere Tests und Untersuchungen notwendig. Einen Beitrag dazu wird eine Masterarbeit an der Universität Innsbruck liefern, die von Meteotest betreut wird. In dieser Arbeit wird die Vorhersage von Windleistung unter Vereisungsbedingungen untersucht. Mit dem Modell WRF werden Vorhersagen für den Standort St. Brais im Jura berechnet, die durch Postprozessierung mit dem Vereisungsalgorithmus und einem Kalman-Filter verbessert werden sollen.

Weitere Arbeiten am Modellsystem sollten in Bezug auf die Simulation von Eislasten durchgeführt werden. Hier ist notwendig, die Unsicherheit in Bezug auf den wichtigen Parameter Teilchenzahldichte zu reduzieren. In nächster Zeit werden hierfür besonders zusätzliche Messungen der Teilchenzahldichte bzw. der Tropfengrösse notwendig. Mittelfristig besteht eventuell die Möglichkeit diesen Parameter aus Wettervorhersagemodellen zu erhalten. Ein weiterer wichtiger Punkt ist es, die Darstellung der Abnahme der Eislast zu verbessern. Hier müssen weitere physikalische Prozesse mit einbezogen werden und berücksichtigt werden, dass je nach Struktur die Anlagerung nicht optimal rotationssymmetrisch erfolgt. Dieser Punkt ist sowohl für die Vorhersage der maximalen Eislast als auch für die Dauer der instrumentellen Vereisung von Bedeutung. Die Simulationen haben gezeigt, dass mit der heutigen Generation der Wettermodelle das Potential zur Vorhersage von Vereisungsereignissen besteht. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass für bestimmte Gebiete kleinere als die heute üblichen Gitterweiten notwendig sind, um die Vereisung zu simulieren und dass in komplexem Gelände nicht unbedingt mit einer punktgenauen Vorhersage zu rechnen ist. Auswertungen auf einer grösseren Datengrundlage sind notwendig, um abschätzen zu können, welche Modellkonfiguration für welche Standorte die geeignete ist und in welcher Form die Ergebnisse des Modells interpretiert werden können.

Die im Rahmen des Projekts geplanten Arbeiten wurden vollständig durchgeführt. Lediglich die Simulation für ein Ereignis mit extremer Eislast konnte aufgrund fehlender Angaben über solche Ereignisse nicht in der vorgesehenen Form umgesetzt werden.

2.5. Kommunikation

Präsentation der Ergebnisse auf Konferenzen

- Dierer Silke, Cattin René, Heimo Alain, Nygaard Bjørn Egil, Sääntti Kristiina, 2009: Modelling the risk of icing, Extended abstract, EWEC 2009, 16.-19. März 2009, Marseille, Frankreich.
www.meteotest.ch/img/am/publikationen/dierer_ewec2009_20090302.pdf
- Dierer Silke, Cattin René, Müller Stefan, Nygaard Bjørn Egil, Steiner Philippe, Calpini Bertrand, 2009: Modeling the risk of icing in Switzerland, Extended abstract, IWAIS 2009, 8.-11. September 2009, Andermatt, Schweiz.
- Seminar der Modellgruppe der MeteoSchweiz, 21.9.2009, Zürich, Schweiz
- WRF Workshop, 28.9.2009, Cambridge, England
- Cattin, R.; Dierer, S.; Nygaard, B.; Sääntti, K.; Wareing, B.: COST-727 Action: measurements and simulations. TECO 2008, St. Petersburg, Russia.
- Dierer, S.; Grünwald, T.; Cattin, R.; Steiner, P. und M. Lehning: Amospheric icing – a challenge in site assessment. Extended abstract, European Wind Energy Conference, 20.-23.4.2010, Warschau, Polen.

Präsentation in der Fachpresse

- Dierer, S.; Cattin, R.; Grünwald, T.; Lehning, M. und P. Steiner: Modelling the Risk of Icing - Mapping and forecasting icing on structures. Windtech International, wird erscheinen in der Juni Ausgabe 2010.

Sonstiger Austausch

- Kickoff Meeting vom 21. August 2008 bei Meteotest, Bern
- Erstes Status Meeting vom 24. Februar 2009, bei Meteotest, Bern
- Zweites Status Meeting vom 03. November 2009, bei Meteotest, Bern
- Fachgespräch mit Walter Stocker (Leiter Bau und Beschaffung Netze / Leitungsbau, BKW FMB Energie AG) und Peter Burri (Betriebsingenieur Betrieb Netze, BKW FMB Energie AG) vom 20. Mai 2009
- Treffen mit Walter Stocker (Leiter Bau und Beschaffung Netze / Leitungsbau, BKW FMB Energie AG) und Kasimir Egli (Betriebsingenieur Betrieb Netze, BKW FMB Energie AG) im Zusammenhang mit den Eislastmessungen am Grimselpass am 02. Juni 2010.

2.6. Referenzen

- [1] ADEV Liestal, K. Mertens: Schlussbericht WECO (Wind Energy Production in Cold Climates), 1998.
- [2] Finish Meteorological Institute: WECO Projects, Wind Energy Production in Cold Climates, 1996 (www.fmi.fi).
- [3] Heimo A., Cattin R., Calpini B., 2009, Recommendations for Meteorological Measurements under Icing Conditions, Proceedings of IWAIS 2009.
- [4] ISO 12494: Atmospheric icing of structures. ISO/TC 98/SC 3, 2000-07-20.
- [5] 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.
- [6] Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang and J. G. Powers, 2008: "A Description of the Advanced Research WRF Version 3", NCAR Technical Note, 113.
- [7] Steppeler, J., Hess, R., Doms, G., Schättler, U. and L. Bonaventura, 2003: "Review of numerical methods for nonhydrostatic weather prediction models". Meteorology and Atmospheric Physics, 82, 287—301.
- [8] Thompson, G., Rasmussen, R.M. and K. Manning, 2004: "Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part I: Description and Sensitivity Analysis", Monthly Weather Review, vol. 132, pp. 519-542.
- [9] WMO/CIMO: Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, Chapter 4, Annex 4.A, Item 17