



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Schlussbericht 31. Mai 2010

Vereisungskarte der Schweiz

Auftraggeber:

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

Auftragnehmer:

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

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz
Krähbühlstrasse 58
CH-8044 Zürich
www.meteoschweiz.ch

WSL - Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF
Flüelastrasse 11
CH-7260 Davos Dorf
www.slf.ch

Autoren:

Silke Dierer, Meteotest, silke.dierer@meteotest.ch
René Cattin, Meteotest, rene.cattin@meteotest.ch
Philippe Steiner, MeteoSchweiz, philippe.steiner@meteoswiss.ch
Thomas Grünewald, SLF, gruenewald@slf.ch
Walter Steinkogler, SLF, steinkogler@slf.ch
Michael Lehning, SLF, lehning@slf.ch

BFE-Bereichsleiter: Katja Maus

BFE-Programmleiter: Katja Maus

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 154221 / 103203

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

Zusammenfassung

Im vorliegenden Projekt wurde eine Karte der meteorologischen Vereisungshäufigkeit in der Schweiz erstellt. Flächendeckende Informationen über Wolkenwasser, Temperatur und Wind aus Analysen des operationellen Wettervorhersagemodells COSMO-2 der MeteoSchweiz dienten als Eingabedaten für einen Vereisungsalgorithmus, der die Eislast an einer zylindrischen, frei rotierenden Struktur berechnet. Die berechneten Vereisungshäufigkeiten wurden auf Grundlage von Messungen des Interkantonalen Mess- und Informationssystems in den Alpen und von Windmessungen im Jura verifiziert.

Die im Projekt berechneten Karten der meteorologischen Vereisungshäufigkeit in 10 m und 100 m Höhe für den Zeitraum August 2007 bis Juli 2009 zeigen ein detaillierteres Bild der Vereisung als bisher vorliegende Karten. Die räumliche Verteilung ist plausibel: im Mittelland ist die meteorologische Vereisungshäufigkeit in 10 m Höhe mit etwa 4 Tagen/Jahr gering. Höhere Werte von 10-20 Tagen/Jahr treten im Jura und in den Voralpen auf. Im Bereich der Zentralalpen ist die meteorologische Vereisung am häufigsten (50 Tagen). Die maximale, simulierte Vereisungshäufigkeit in 10 m Höhe liegt im Bereich von 100 Tagen/Jahr, aber auch die aus IMIS-Messungen abgeleitete Häufigkeit zeigt hohe Werte bis 65 Tage/Jahr. Es wurde abgeschätzt, dass die aus IMIS Messungen abgeleitete Vereisungshäufigkeit die reale Häufigkeit um 5-10% unterschätzt.

Die Evaluation der meteorologischen Vereisungshäufigkeit in 10 m Höhe im Bereich der Alpen zeigt, dass der simulierte Mittelwert für alle Stationen von 9.7 Tagen/Jahr gut mit dem aus Messungen abgeleiteten Wert von 9.4 Tagen/Jahr übereinstimmt. Auch die räumlichen Muster sind ähnlich. In Regionen mit ausgeprägt lokaler Geländecharakteristik ist die Übereinstimmung an einzelnen Stationen weniger gut, da das sehr komplexe Gelände und seine Wirkung auf Vereisung im Wettervorhersagemodell mit 2.2 km Gitterweite nicht beschrieben werden kann. So wird die Vereisungshäufigkeit in der Karte für die sehr exponierten Windstationen systematisch unter- und für die geschützten Schneestationen systematisch überschätzt. In Gebieten, die für Windenergieprojekte von Interesse sind (z.B. Jura, Passlagen) ergibt sich dagegen eine gute Übereinstimmung von simulierter und gemessener Vereisungshäufigkeit. Die Vereisungshäufigkeit im Verifikationszeitraum liegt etwa 5% über der im Zehnjahresmittel.

Die meteorologische Vereisungshäufigkeit in 100 m Höhe über Grund zeigt eine ähnliche räumliche Verteilung wie in 10 m Höhe, ist aber im Mittel um einen Faktor 2.2 höher. Eine Messung im Jura in 80 m Höhe zeigt 9 Tagen meteorologischer Vereisung im Winter 2009 / 2010. Dieser Wert stimmt gut mit dem mittleren Winterwert von 9 Tagen in der Vereisungskarte in 100 m Höhe überein.

Bei der Interpretation der Vereisungskarte ist zu berücksichtigen:

- Es ist die meteorologische Vereisung dargestellt, die Perioden instrumenteller Vereisung sind in der Regel länger (für den Jura wurde ein Verhältnis von 1:4 abgeschätzt)
- die Häufigkeitsangaben sind nicht als exakte Werte zu interpretieren. Sie geben einen Hinweis darauf, ob das geplante Projekt in einer Region mit häufiger Vereisung liegt, so dass dies bei der Standortplanung berücksichtigt werden kann.
- Ist der Standort durch kleinräumige Geländecharakteristika geprägt, kann er nicht durch den Wert der Vereisungskarte repräsentiert werden. Die Vereisungshäufigkeit wird bei exponierter Lage über und bei abgeschatteter Lage unter dem Wert in der Karte liegen.

Die Karte der meteorologischen Vereisungshäufigkeit wird auf der wind-data.ch-Seite visualisiert.

1. Einleitung

1.1. Klimatologie der Vereisungshäufigkeit in der Schweiz

Immer mehr Windparks liegen in Gebieten, die von Vereisung betroffen sind, z.B. in Skandinavien, Nordamerika oder in den Alpen. Vereisung kann sich negativ auf den Betrieb von Windkraftanlagen auswirken: verringerte Energieproduktion, erhöhtes Risiko (z.B. durch Eiswurf), frühzeitige Materialermüdung oder die Notwendigkeit der Installation speziell ausgerüsteter Windturbinen. In Gebieten mit häufiger Vereisung ist es daher notwendig, bereits während der Planung eines Windparks Vereisung zu berücksichtigen.

Die Windenergienutzung in der Schweiz hat sich in den letzten Jahren stark entwickelt. Wurden im Jahr 2008 noch 18.5 GWh produziert, so werden bis 2015 Windenergieanlagen jährlich 400 GWh liefern, wenn alle zur Zeit in Realisation oder Planung befindlichen Windenergieprojekte (> 500 MW) umgesetzt werden. Viele dieser Projekte befinden sich in vereisungsgefährdeten Gebieten und erste Informationen über die Vereisungsbedingungen am Standort sind bereits in der Planungsphase von Interesse.

Da Vereisung stark durch lokale Geländeeigenschaften beeinflusst wird und ein engmaschiges Messnetz fehlt, sind Informationen über Vereisungsbedingungen in der Schweiz bisher limitiert. Die für die Schweiz vorliegenden Vereisungsklimatologien [1, 2] beruhen auf Messungen an meteorologischen Stationen. Für die Höhen 1000 m.ü.M., 1500 m.ü.M und 2000 m.ü.M wurde mit einem einfachen Verfahren die Anzahl Tage mit Vereisungsrisiko pro Jahr abgeschätzt. Die Karten basieren auf Informationen über Wolkenhöhe, Bedeckungsgrad, Windgeschwindigkeit und Temperatur von 20 Messstationen der MeteoSchweiz (Mittelwerte der Jahre 1993-97). Sie geben daher nur einen groben Überblick und können insbesondere lokale Verhältnisse nicht berücksichtigen [1]. Ein Beispiel für die Vereisungshäufigkeit in 1000 m.ü.M. ist in Abb. 1 dargestellt. Im Rahmen des Projekts WECO wurde das Risiko der Vereisung europaweit abgeschätzt [2]. Die in dieser Karte abgeschätzte Vereisungshäufigkeit unterscheidet sich von der in [1] insbesondere in den Gebieten ausserhalb der Alpen.

Das Ziel des hier vorliegenden Projektes ist es, eine Klimatologie der Vereisungshäufigkeit in der Schweiz zu erstellen, die im Gegensatz zu den bestehenden Karten mehr Einzelheiten zeigt und die anhand von zur Verfügung stehenden Messungen geprüft ist.

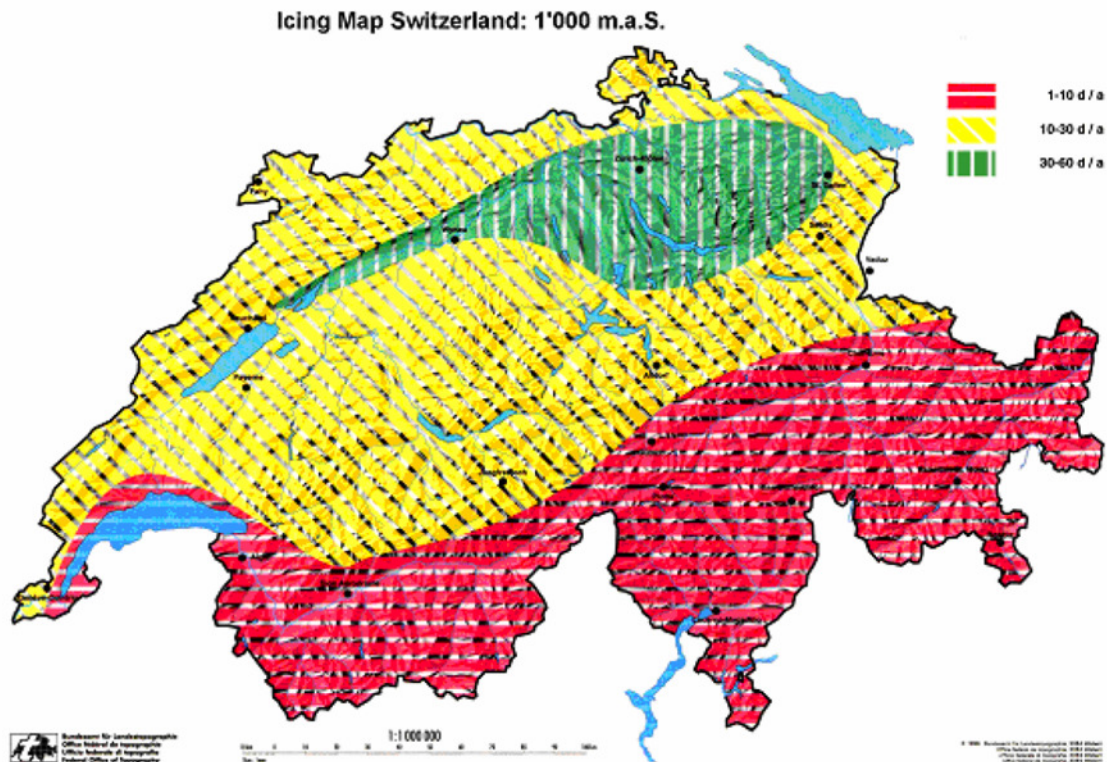


Abb. 1: Karte der Häufigkeit meteorologischer Vereisung in der Schweiz (Tage/Jahr) in 1000 m.ü.M. für die Jahre 1993-1997 [1].

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wird die Vereisungsklimatologie auf der Grundlage von Analysen des Wettervorhersagemodells COSMO-2 [6] und des Vereisungsalgorithmus von Makkonen [5] berechnet. Der Vereisungsalgorithmus berechnet die Eisanlagerung unterkühlter Wolkenwassertröpfchen an einer Struktur, die häufigste Art von Vereisung in der Schweiz. Messungen des Interkantonalen Mess- und Informationssystems (IMIS) im Bereich der Alpen und einzelne Messungen im Bereich des Juras werden für die Evaluation herangezogen. Die Verbesserungen gegenüber bestehenden Klimatologien sind

- flächendeckende Informationen aus Wettermodellen
- höhere räumliche Auflösung
- die Nutzung von Informationen über Wolkenwasser aus Wettermodellen
- die Beurteilung der Qualität durch Verifikation anhand von Messungen

Die IMIS-Messungen erlauben zusätzlich eine Einschätzung, wie sich die Vereisung im simulierten Zeitraum August 2007 bis Juli 2009 im Vergleich zum 10-Jahresmittelwert verhält.

1.2. 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. 2).



Abb. 2: 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. 3):

- **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. 3: Verschiedene Arten der Vereisung. Links: Raureif, Mitte: Klareis, Rechts: Nassschnee

In der Schweiz sind Raureif und Klareisbildung die wichtigsten Prozesse, die bei Vereisung an Strukturen eine Rolle spielen. Vereisung aufgrund von Nassschnee und Eisregen wurde für die Vereisungskarte vernachlässigt.

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: beschreibt die Dauer der technischen Störung eines Instruments oder einer WKA durch Vereisung, der Zeitraum, während dessen Eis am Instrument vorhanden ist. Im Gegensatz zur meteorologischen Vereisung muss in diesem Zeitraum die Eismasse nicht zunehmen.
- 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

Abb. 4 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. Bei der Berechnung der Vereisungskarte lag der Schwerpunkt auf der meteorologischen Vereisung. Es wurde aber auch die Häufigkeit der instrumentellen Vereisung berechnet.

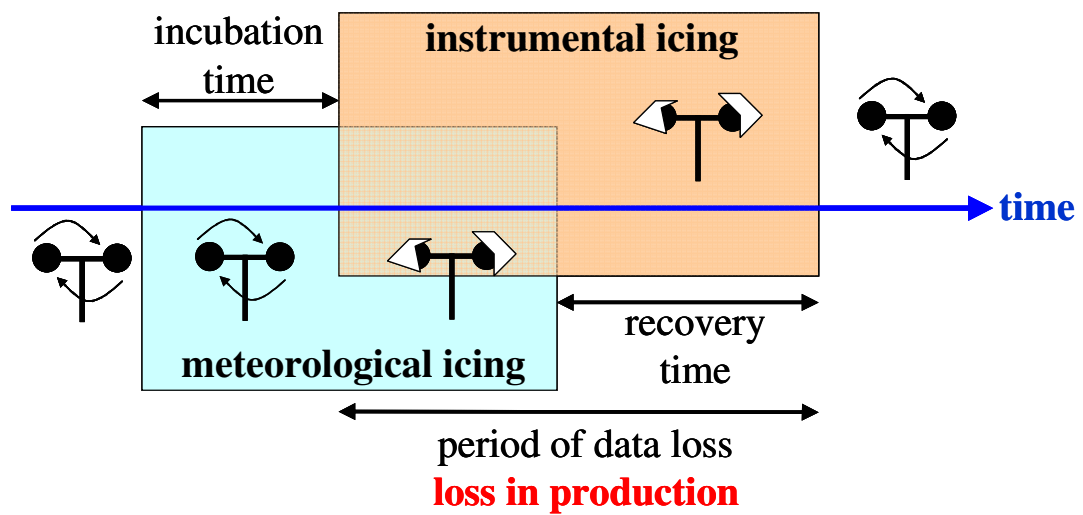


Abb. 4: Beschreibung der Vereisung von meteorologischen Instrumenten oder von einer WKA durch die Begriffe meteorologische Vereisung, instrumentelle Vereisung, Inkubationszeit und Erholungsphase.

2. Beschreibung der Methodik

2.1. Grundlagen für die Vereisungskarte

Die Vereisungshäufigkeit wird mit Hilfe einer von Makkonen entwickelten Formel [5] berechnet (Abschnitt 2.3). Diese nutzt Informationen über Temperatur, Windgeschwindigkeit und Wolkenwassergehalt der Atmosphäre, um den Eisansatz an einer zylindrischen, frei rotierenden Struktur zu berechnen. Im vorliegenden Projekt werden hierfür meteorologische Daten aus einer bereits existierenden zweijährigen Analyse (August 2007 – Juli 2009) des operationellen Wettervorhersagemodells der MeteoSchweiz COSMO-2 genutzt (Abschnitt 2.2). Der Vorteil der COSMO-2 Analyse liegt darin, dass Messdaten in einem ununterbrochenen Prozess assimiliert werden. So nutzt das Modell in optimaler Weise die vorhandenen Messdaten. Die Evaluation der COSMO-2 Analysen ist in Abschnitt 2.2 beschrieben.

Das Modellsystem wurde im Rahmen des Schweizer Projekts „Measuring, modelling and forecasting ice load on structures“ (MEMFIS) aufgebaut, getestet und für Fallstudien eingesetzt. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass COSMO-2 gekoppelt mit dem Vereisungsalgorithmus erfolgreich das Auftreten und die Dauer von Vereisungsereignissen simulieren kann. Die Simulation der Eislast ist mit grösserer Unsicherheit behaftet. Mit einer horizontalen Gitterweite von 2.2 km liefert COSMO-2 für Standorte in den Voralpen und im Jura, wo die meisten der zukünftigen Windparks geplant sind, gute Ergebnisse. Lediglich in Regionen mit sehr komplexer Orographie, wie z.B. am Standort Gütsch, scheint die Gitterweite von COSMO-2 teilweise nicht auszureichen, um alle Vereisungsereignisse zu erfassen. In solchem Gelände sind Gitterweiten von einigen 100 m notwendig. Die im Gebiet der Alpen geplanten Standorte befinden sich aber meist in weniger komplexer Topographie, z.B. in Passlagen, so dass die Gitterweite als ausreichend erachtet wird.

Das Ergebnis des vorliegenden Projekts ist eine flächendeckende Karte der Vereisungshäufigkeit in der Schweiz in 10 m und 100 m Höhe über Grund auf einem 2.2 km-Raster. Die simulierten Vereisungshäufigkeiten werden mit Hilfe von Messungen des Interkantonalen Mess- und Informationssystems (IMIS, Abschnitt 2.4) und weiteren Messungen im Jura evaluiert. Die IMIS Messungen werden ausserdem für einen langjährigen Abgleich der Karte genutzt.

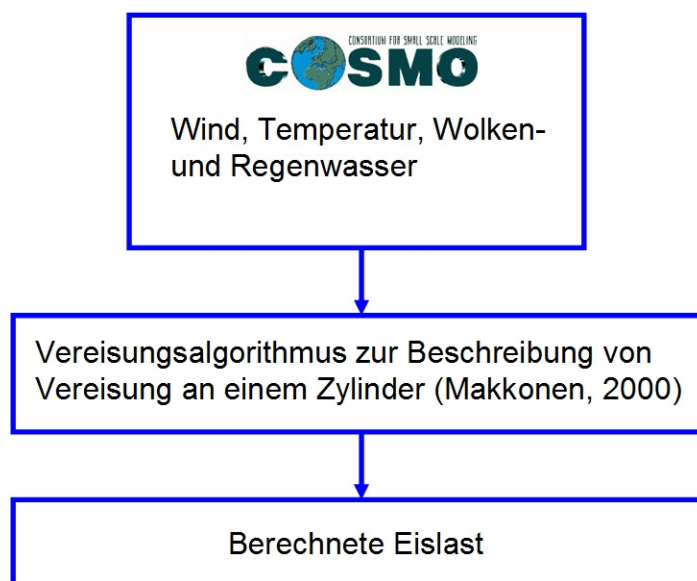


Abb. 5: Schematische Darstellung des Modellsystems zur Berechnung der Vereisungskarte.

2.2. COSMO-2 Analyse

Einleitung

Das numerische Vorhersagemodell des Consortiums for Small Scale Modelling COSMO [6] wird von MeteoSchweiz für die Produktion von Vorhersagen im Alpenraum benutzt und stetig weiter entwickelt. Zwei Varianten von COSMO werden operationell eingesetzt: COSMO-7 mit einer horizontalen Gitterweite von 6.6 km und einem Vorhersagezeitraum von 72 Stunden und das feinmaschigere COSMO-2 mit 2.2 km Gitterweite und einem Vorhersagezeitraum von 24 Stunden. Grundvoraussetzung für eine präzise Vorhersage dieser Modelle sind gute Anfangsbedingungen, d.h. eine möglichst genaue Darstellung des aktuellen Zustands der Atmosphäre und des Bodens zu Beginn eines jeden Modelllaufs. Diese geschieht im Analysezyklus, in dem Beobachtungsdaten in den Modelllauf eingebunden werden. Eine Analyse ist somit die best mögliche Repräsentation des aktuellen Zustands der Atmosphäre. Die Qualität der Analyse des COSMO-2 Modells wird im Folgenden untersucht. Die Analysen des COSMO-2 Modells werden gegenüber SYNOP Beobachtungen in der Schweiz (Abb. 6) verifiziert. Es stehen je nach Parameter bis zu 100 Beobachtungen in stündlicher Auflösung zur Verfügung. Im Folgenden wird ein Überblick über die Qualität der Analyse in Bezug auf verschiedene Parameter und saisonale Unterschiede sowie den Vergleich von Analyse und Vorhersage gegeben. Es werden die Verifikationsergebnisse für Temperatur-, Windrichtung-, Windgeschwindigkeit-, und Bewölkung präsentiert und interpretiert und ein Vergleich zur COSMO-2 Vorhersage erstellt.

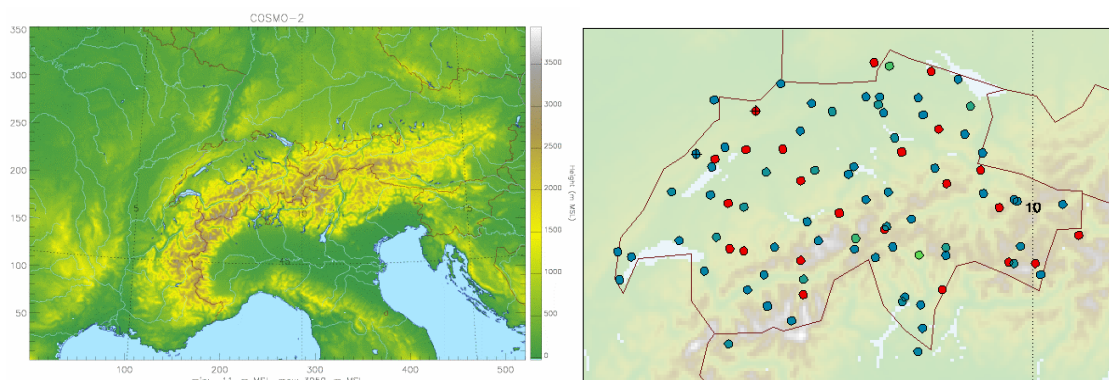


Abb. 6: COSMO-2 Modellgebiet mit Topographie (links) und Standorte der zur Verifikation benutzten SYNOP Beobachtungsstandorte in der Schweiz (rechts).

Das von COSMO-2 abgedeckte Gebiet besteht, in horizontaler Richtung, aus 520x350 Gitterpunkten mit einer Maschenweite von 2.2 km (0.02°). Es umfasst den Alpenbogen mit der Schweiz im Zentrum des Modellgebiets. Die Eckpunkte des Modellgebiets sind: NW: (49.66 N, 1.19 O), NO: (49.76 N, 17.25 O), SW: (42.72 N, 2.25 O), und SO: (42.81 N, 16.37 O). COSMO-2 Analysen und Vorhersagen werden mit 60 vertikalen Schichten berechnet. Seit Beginn der operationellen Phase des COSMO-2 Modells kam es zu mehreren Versionsänderungen. Zu den bedeutendsten gehört die im April 2008 stattgefundene Implementierung des sogenannten „Latent Heat Nudgings“, des Einbezugs von Regenradarinformationen in den Assimilationszyklus. Es ist zu erwarten, dass diese Aufnahme der Radardaten einen signifikanten Einfluss auf die Qualität der Analyse hat.

Verifikation

i) 1. Juni 2007 – 31. August 2009

Zunächst werden die Ergebnisse einer saisonübergreifenden Verifikation präsentiert. Es werden die Parameter

- Temperatur (T2M) in 2 m Höhe,
- Windgeschwindigkeit (FF) in 10m Höhe,
- Windrichtung (DD) in 10 m Höhe,
- Bewölkung (CLCT)

verifiziert. Dabei wird jede SYNOP-Station im Gebiet der Schweiz, für die genügend Beobachtungsdaten zur Verfügung stehen (80% verfügbare Werte), verwendet. Die Ergebnisse werden wie folgt stratifiziert:

- Regional: nach Station als Mittel über die Verifikationsperiode und alle Tageszeiten
- Im Tagesverlauf: als Mittel über alle Stationen und die gesamte Verifikationsperiode

Die verwendeten Verifikationsmasse sind

- Mittlerer Fehler (ME) als Differenz von Modell und Beobachtung
- Standardabweichung (STDE) als Streuung des Modellfehlers

ii) Saisonal

- Hier erfolgt die graphische Darstellung des ME und der STDE separat für die verschiedenen Saisons: Winter (S1: DJF), Frühling (S2: MAM), Sommer (S3: JJA), Herbst (S4: SON). Dies soll die saisonale Abhängigkeit der Analysequalität verdeutlichen. Eine Auflistung weiterer Verifikationsmasse nach der Saison erfolgt dann für jeden Parameter in tabellarischer Form in Anhang A1.

iii) Analyse-Vorhersage Vergleich

Um eine qualitative Einschätzung der Analysen vornehmen zu können, wird die COSMO-2 Analyse mit der anschliessenden Vorhersage verglichen. Dazu werden relative Unterschiede in ME, STDE und Root Mean Square Error (RMSE) gezeigt.

i) 1. Juni 2007 – 31. August 2009

2m Temperatur

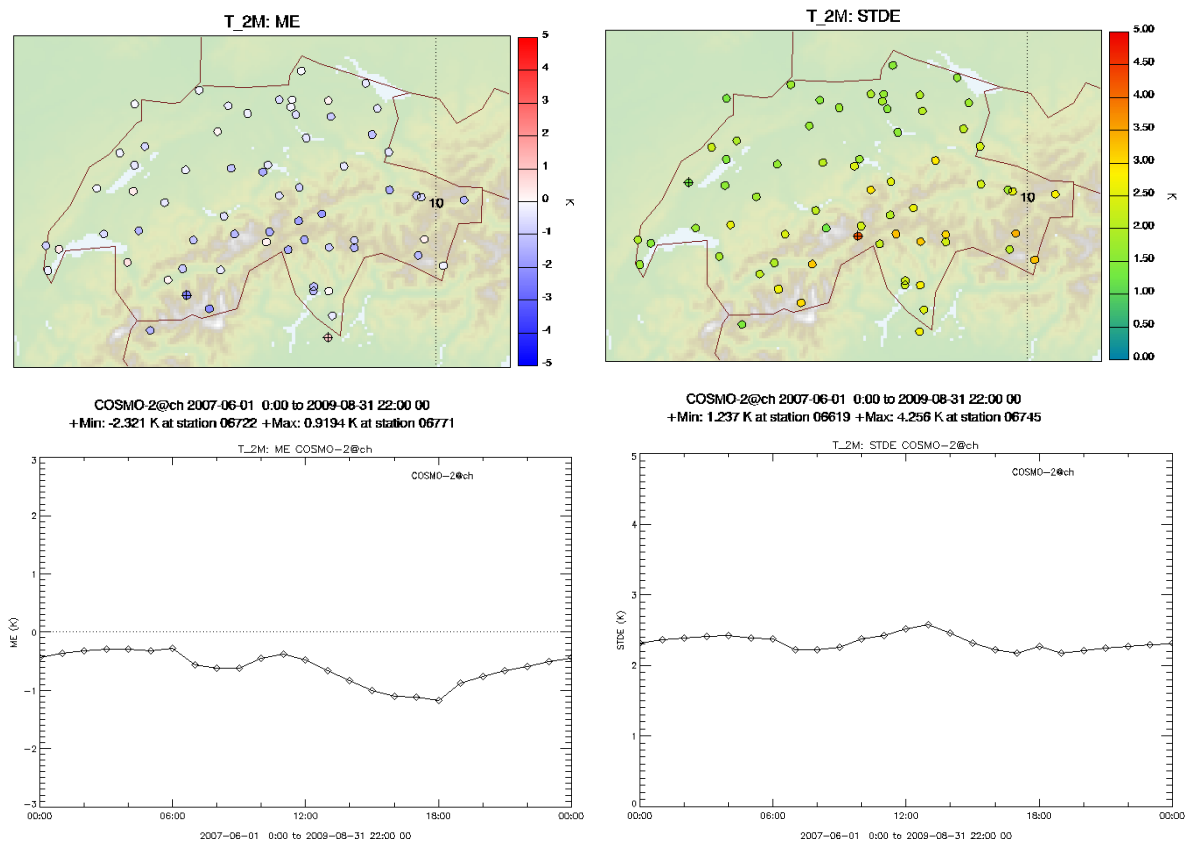


Abb. 7: ME [K] (links) und STDE [K] (rechts) der 2m Temperatur im Mittel vom 1. Juni 2007 bis 31. August 2009. Oben für jede Station deren Daten zur Verifikation benutzt wurden, unten im Tagesverlauf als Mittel über alle Stationen.

Im Mittel über die gesamte Verifikationsperiode lässt sich ein leicht negativer Temperaturbias erkennen. Dieser ist stärker ausgeprägt an Stationen im Bereich der zentralen Alpen und kaum vorhanden im Mittelland. Die Tendenz einer zu niedrigen Temperaturanalyse ist besonders gegen Abend zu erkennen. Der maximale Bias beträgt ca. 1.2 K um 18 UTC und verringert sich im Verlauf der Nacht auf -0.3 K. Die Standardabweichung des Analysefehlers zeigt eine ähnliche räumliche Struktur wie der mittlere Fehler. An Stationen im Mittelland ist eine geringere Standardabweichung zu erkennen als an Stationen in den Alpen. Der Tagesverlauf der Standardabweichung ist weniger stark ausgeprägt bei ca. 2.3 K mit einem Maximum von ca. 2.6 K um 13 UTC.

Windgeschwindigkeit

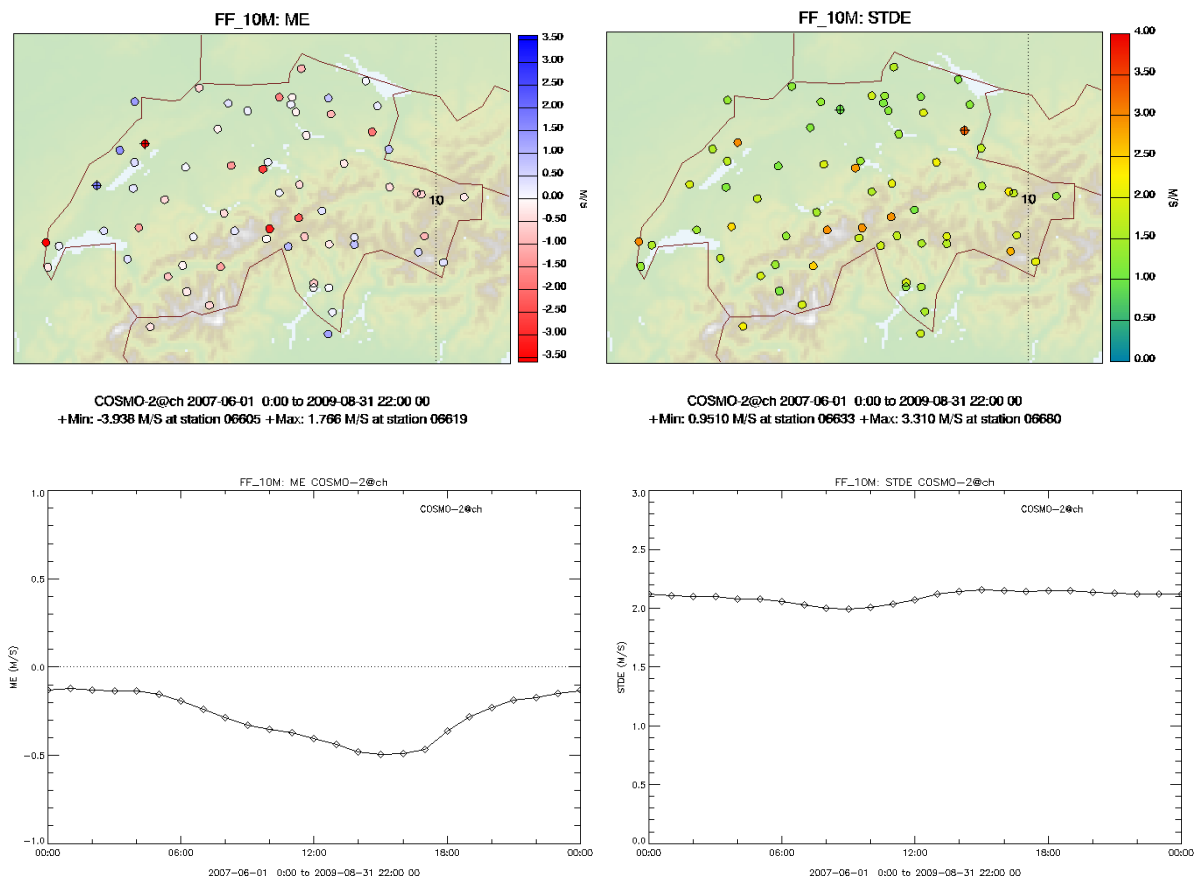


Abb. 8: wie Abb. 7 für die Windgeschwindigkeit (Einheit: m/s).

Für die meisten Stationen schwankt der Analysefehler zwischen 2 m/s und -2 m/s. Im Mittel über alle Stationen ist der Bias leicht negativ mit -0.5 m/s um 16 UTC am grössten. Die Standardabweichung des Analysefehlers liegt bei den meisten Stationen unter 2.5 m/s, im Mittel bei 2.2 m/s ohne deutlichen Tagesgang.

Windrichtung

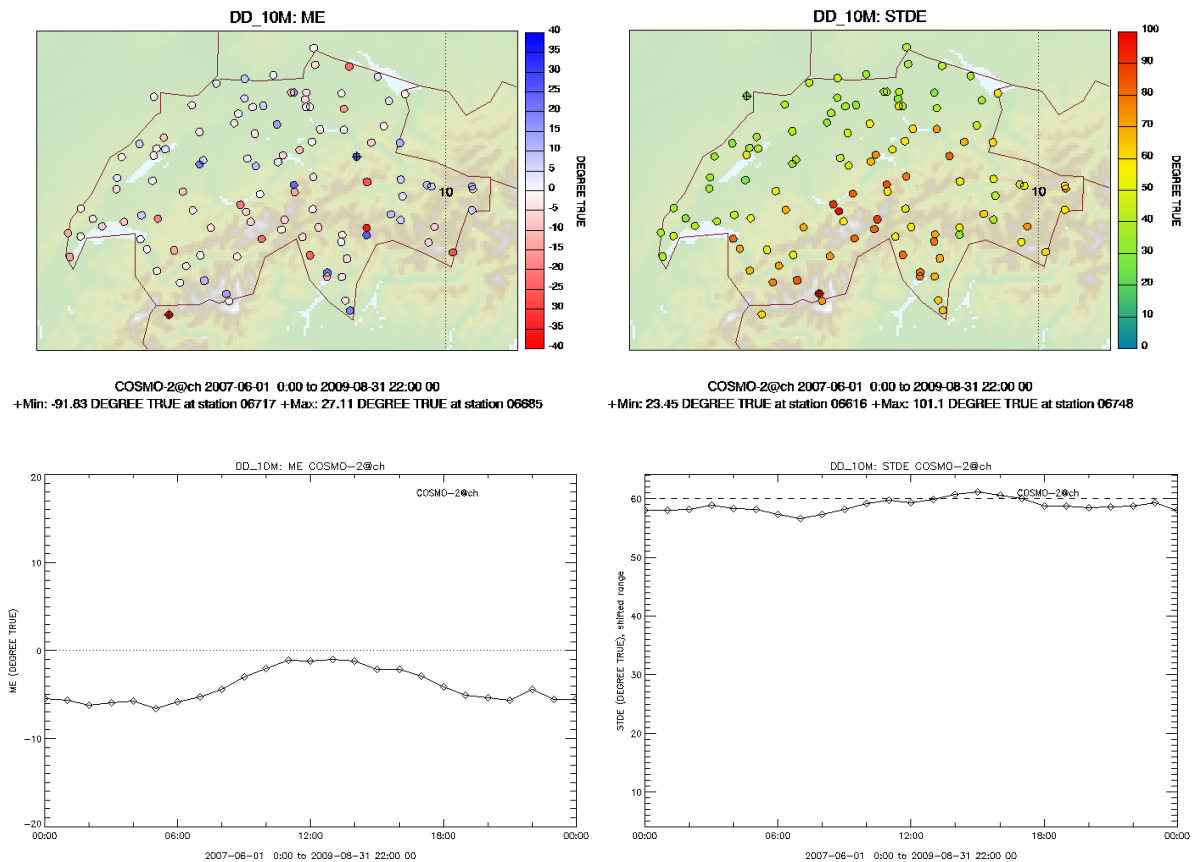


Abb. 9: wie Abb. 7 für die Windrichtung¹ (Einheit: Grad).

Der mittlere Fehler der Windrichtung lässt keine räumliche Struktur erkennen. Im Mittel über alle Stationen ist er negativ (ca. -5 Grad) wobei es eine grosse Anzahl von Stationen gibt die einen positiven mittleren Fehler aufweisen. Vermutlich besteht eine Abhängigkeit des Analysefehlers von der geographischen Lage der Station die zu diesem uneinheitlichen Resultat führt. Im Tagesverlauf ist der mittlere Fehler nachts am grössten (ca. 7 Grad um 05 UTC), er verschwindet nahezu vollständig gegen Mittag. Die Standardabweichung des Analysefehlers ist sehr hoch bei knapp 60 Grad. Dies ist besonders den Stationen in den Alpen zuzuordnen, Stationen im Mittelland zeigen eine wesentlich geringere Standardabweichung. Der Tagesverlauf der Standardabweichung zeigt ein leichtes Maximum gegen 15 UTC.

¹ für die Windrichtung wurde die Bedingung „Windstärke > 3 m/s“ genommen

Bewölkung

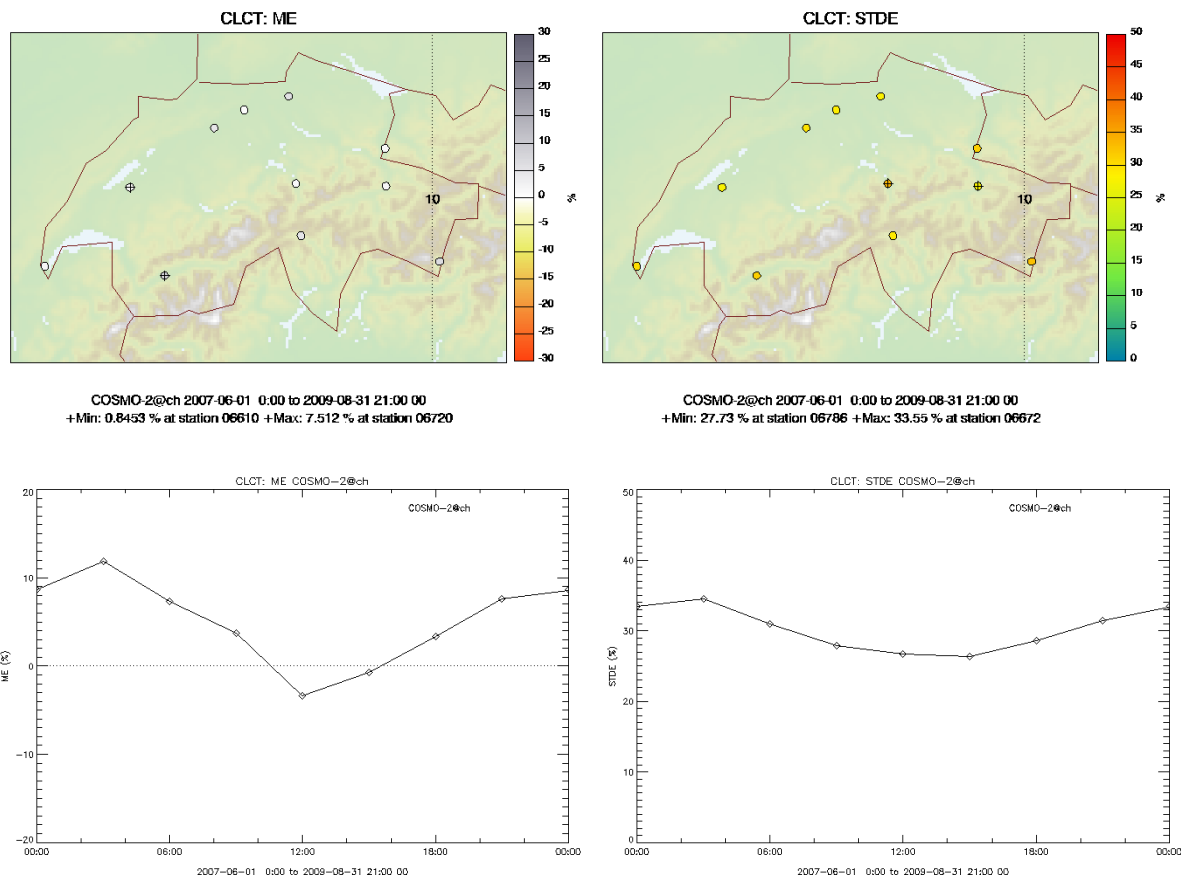


Abb. 10: wie Abb. 7 für die Bewölkung (Einheit: %).

Eine Verifikation der Bewölkung konnte aufgrund der limitierten Verfügbarkeit von Beobachtungen in 3-stündiger Auflösung nur an wenigen Stationen durchgeführt werden. An den vorliegenden Stationen ist nur ein leicht positiver Bias der Bewölkung erkennbar. Im Tagesverlauf schwankt der Bias von 12% nachts, bis -4% mittags. Auch die Standardabweichung liegt bei allen Stationen auf einem ähnlichen Niveau. Sie beträgt im Mittel 30% mit einem Minimum um 16 UTC.

ii) Saisonal

Vergleicht man die mittleren Fehler und die Standardabweichungen der COSMO-2 Analysen für die einzelnen Saisons seit Beginn des (prä-)operationellen Betriebs erkennt man für die meisten Parameter einerseits ein zyklisches Verhalten, das die Vorhersagbarkeit in den Saisons widerspiegelt, andererseits können überlagerte Veränderungen auf die Auswirkungen von Modellrevisionen hinweisen.

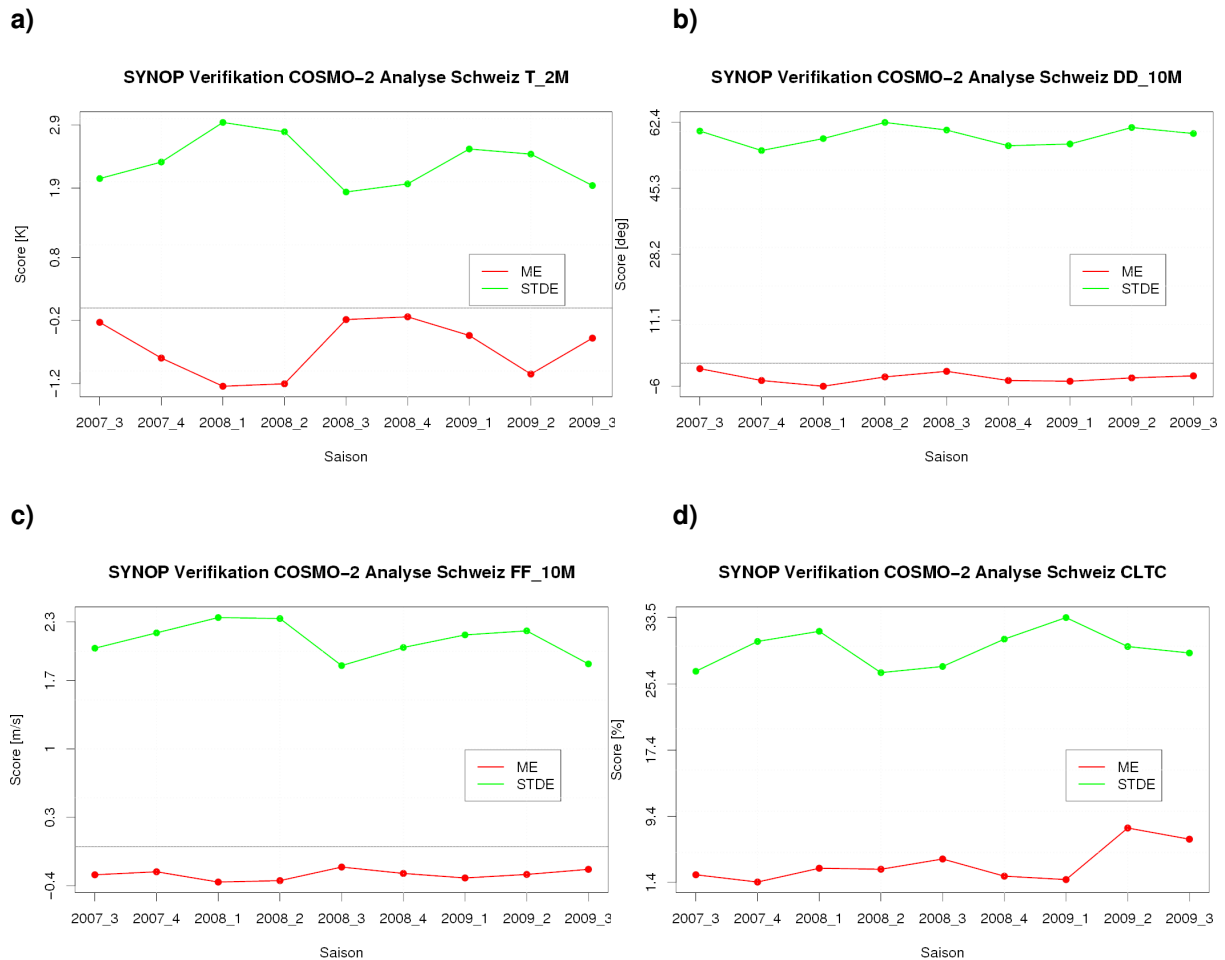


Abb. 11: ME und STDE der COSMO-2 Analyse im saisonalen Verlauf von Sommer 2007 bis Sommer 2009. Gezeigt werden a) 2m Temperatur, b) Windrichtung und c) Windgeschwindigkeit auf 10m und d) Bewölkung. Die Zahl nach dem Jahr ist 3 für Sommer, 4 für Herbst, 1 für Winter und 2 für Frühling.

Für die Temperatur (Abb. 11a) ist ein deutlicher saisonaler Zyklus zu erkennen. Die Temperatur wird in Sommer und Herbst besser vorhergesagt als in Winter und Frühling. Während der mittlere Fehler in den warmen Monaten bei -0.2 K liegt, kann er in Wintermonaten auf bis zu -1.2 K anwachsen. Die Standardabweichung des Analysefehlers schwankt ebenso zwischen 1.8 und 2.9 K.

Die saisonale Verifikation der Windrichtungsanalysen (Abb. 11b) zeigt ebenfalls einen geringeren Bias in den warmen Saisons, dies geht jedoch einher mit einer grösseren Standardabweichung. Ein Trend im Verifikationszeitraum ist nicht erkennbar.

Auch COSMO-2 Windgeschwindigkeitsanalysen (Abb. 11c) zeigen einen geringeren Bias in warmen Monaten, zu dieser Zeit ist jedoch auch die Standardabweichung geringer.

Der mittlere Fehler der Analysen der Bewölkung (Abb. 11d) zeigt keinen deutlichen saisonalen Zyklus. Im Gegensatz dazu ist die Standardabweichung in Frühling und Sommer deutlich geringer als in Herbst oder Winter. Auffällig ist ein deutlich höherer mittlerer Fehler im Frühling und Sommer 2009.

Zusammenfassend kann man für alle hier verifizierten Parameter eine saisonale Abhängigkeit der COSMO-2 Analyse feststellen, die auf die mehr oder weniger gute Vorhersagbarkeit des jeweiligen Parameters zu einer bestimmten Jahreszeit zurückzuführen sein dürfte. Eine qualitative Beurteilung der COSMO-2 Analysen ist ohne den Vergleich zu einer Referenzvorhersage (z.B. eine klimatologische Vorhersage oder ein anderes Modell) nicht machbar, ein Versuch die Qualität der COSMO-2 Analyse einzuordnen erfolgt im letzten Abschnitt durch einen Vergleich mit COSMO-2 Vorhersagen. Die quantitativen Eigenschaften der Analysen, unter Verwendung weiterer Verifikationsmasse, sind in Tabellen im Anhang A1 erfasst.

Die Verifikation der COSMO-2 Analysen zeigt, dass das COSMO Modell für die für die Vereisungsmodellierung wichtigen Parameter Bewölkung, Temperatur und Wind gute Ergebnisse zeigt. Die mittleren Fehler für Wind und Bewölkung sind gering. Lediglich der negative Temperaturbias in den Wintermonaten (v.a. in den Alpen) kann zu einer Überschätzung der Länge oder Häufigkeit von Vereisungsereignissen beitragen.

iii) Analyse-Vorhersage Vergleich

Im Anhang A2 sind die relativen Differenzen (%) der oben aufgeführten COSMO-2 Analyse und Vorhersage gemittelt über eine Vorhersagezeit von 13-24 Stunden dargestellt. Positive (negative) Werte weisen auf ein besseres (schlechteres) Abschneiden der Vorhersage hin gegenüber der Analyse hin. Es zeigt sich in der überwiegenden Zahl der Fälle eine schlechtere Qualität der Vorhersage als der Analyse. Der Unterschied ist jedoch sehr gering und bewegt sich im Bereich von <5% in allen hier verwendeten Verifikationsmassen.

2.3. 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 Tröpfchendurchmesser zu einem starken Wachstum der Eisanlagerung. Der Algorithmus ist an der Eisanlagerung an Stromleitungen orientiert und geht von einem frei rotierenden Zylinder aus, so dass die Eisanlagerung symmetrisch stattfindet. Der Anfangsdurchmesser des Zylinders beträgt 3 cm.

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

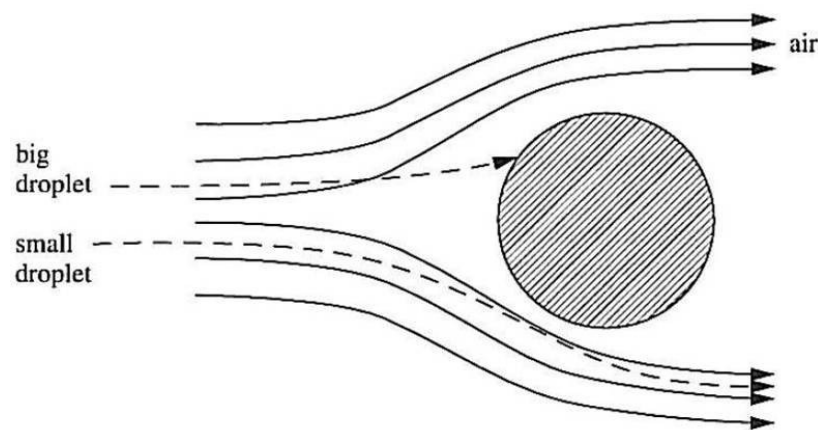


Abb. 12: Trajektorien von Tröpfchen bei Umströmung des Zylinders (Schematische Darstellung aus [5]).

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. 12).
- 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.

2.4. IMIS-Messungen

IMIS Netzwerk und Datenverfügbarkeit

Für die Evaluation der Vereisungskarte steht mit dem Interkantonalen Mess- und Informationssystem (IMIS, [4]) ein dichtes Messnetz von meteorologischen Stationen zur

Verfügung. Die Stationen sind über den gesamten Schweizer Alpenraum verteilt und weisen eine gute Abdeckung verschiedener Höhenstufen bis in die Gipfelregionen auf. IMIS-Stationen bilden immer ein Stationspaar, wobei jeweils eine Station (Windstation) in einer exponierten Grat- oder Gipfellege 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 sechs Metern über Grund (ohne Schnee) angebracht sind, sowie mit Sensoren zur Messung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte ausgestattet. Die Messdaten werden automatisch auf halbstündliche Intervalle gemittelt.

In Abb. 13 ist das IMIS-Stationsnetz abgebildet, wobei rote Punkte Stationen mit Datenreihen von mindestens zwei Jahren und blaue Punkte die Stationen, die seit mindestens zehn Jahren in Betrieb sind, zeigen. Für die Analyse der Jahre 2007/08 und 2008/09 stehen somit 165 IMIS-Stationen zur Verfügung. Für den Vergleich dieser Jahre mit dem langjährigen Mittel (10 Jahre) konnten 76 Stationen verwendet werden.

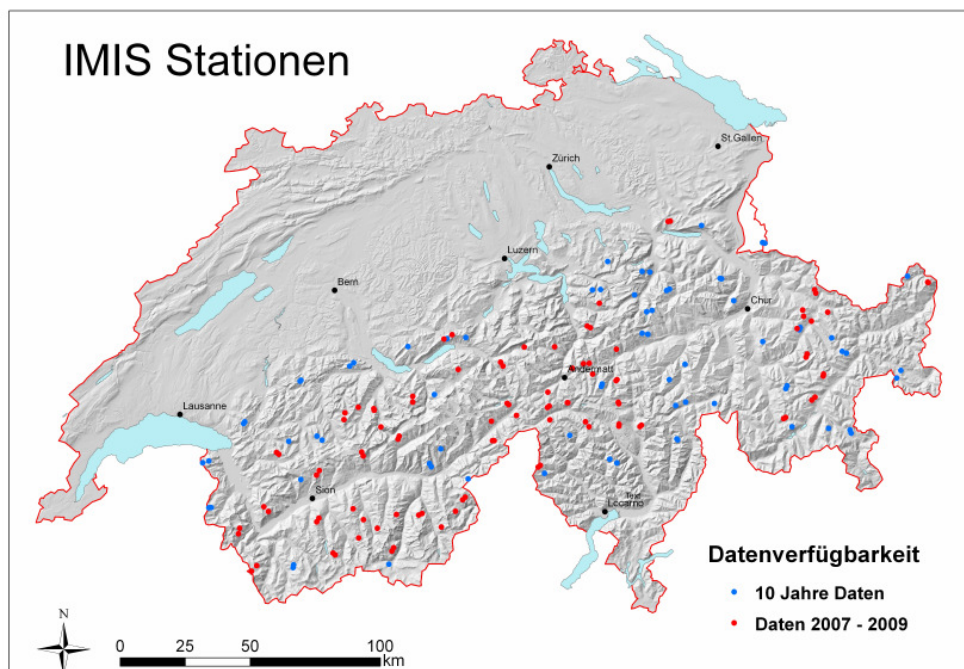


Abb. 13: IMIS Stationen und ihre Datenverfügbarkeit

IMIS Vereisungsalgorithmus

Ob an einer Station zum jeweiligen Zeitpunkt Vereisung des Windmessers auftritt, wird über eine Dreifachbeziehung ermittelt, wobei die Bedingungen zeitgleich erfüllt sein müssen:

- Lufttemperatur $T < 1^{\circ}\text{C}$
- Relative Luftfeuchte $RH > 90\%$
- Standardabweichung der Windrichtung über die letzten 30 min < 0.1

Dieses Kriterium leitet sich daraus ab, dass sich Eis erst unter den beiden ersten angegebenen Schwellenwerten bilden kann. Das dritte Kriterium gibt Auskunft darüber, ob auch tatsächlich eine Vereisung vorliegt. Hierbei gilt die Annahme, dass eine Vereisung den Windsensor in seiner Bewegung in alle Richtungen so stark blockiert, dass die Bewegung gegenüber dem unvereisten Zustand stark reduziert ist. Abb. 14 zeigt eine extreme Vereisungssituation.



Abb. 14: Vereisung an einer IMIS Station

Durch dieses Kriterium werden nur die Phasen meteorologischer Vereisung abgedeckt, also solche in denen die äusseren Verhältnisse Eisbildung zulassen. Erfasst wird also die meteorologische Vereisung ab dem Zeitpunkt, wo genug Eislast am Windsensor angesetzt hat, um diesen zu blockieren. Nicht berücksichtigt wird die Zeit, die es bis zur Blockierung braucht, sowie die Zeit der Enteisung, wenn also der Sensor noch verreift ist, aber eines der beiden anderen Kriterien nicht mehr erfüllt ist. Die Enteisungsphase kann nicht abgeschätzt werden, da die Situation, sobald beispielsweise die Temperatur steigt, nicht mehr als Vereisung erkannt wird, auch wenn der Sensor noch durch Eis blockiert ist. Umgekehrt können aber auch Zeitpunkte als Vereisung erkannt werden, obwohl sie keine sind. Dies wäre z.B. der Fall wenn über einen längeren Zeitraum absolute Windstille herrscht. Die Erfahrung zeigt jedoch dass dieser Fall eher selten ist. Die Genauigkeit dieses Vereisungskriterium lässt sich kaum quantifizieren, da Vergleichsmessungen (z.B. Photos) nicht zur Verfügung stehen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Methode eher zur Unterschätzung der Vereisung führt. Qualitative Vergleiche mit beheizten Windsensoren deuten darauf hin, dass die Unterschätzung im Bereich von etwa 5 bis 10 % liegen dürfte.

3. Vereisungskarte für die Schweiz

Die Vereisungskarte für die Schweiz wird auf der Grundlage der COSMO-2 Analysen von August 2007 bis Juli 2009 berechnet. Für jede Gitterbox des COSMO-2-Gitters stehen stündliche Informationen über Windgeschwindigkeit, Temperatur und Wolken- und Regenwasser zur Verfügung. Diese Informationen nutzt der Vereisungsalgorithmus als Eingabedaten und berechnet für jede Gitterbox eine Zeitreihe der an den Zylinder angelagerten Eismasse. Aus der Zeitreihe der Eismasse an jedem Gitterpunkt wird berechnet, während wie vieler Stunden die Eismasse zunimmt bzw. die Eismasse grösser Null ist. Diese Anzahl der Stunden wird ins Verhältnis zur Stundenzahl der Gesamtperiode gesetzt. So erhält man für jede Gitterbox einen Wert für die meteorologische und die instrumentelle Vereisung (Abschnitt 1.2).

Die Vereisungskarte wird in 10 m und in 100 m Höhe über Grund berechnet. Die Berechnung auf 10 m Höhe über Grund wurde durchgeführt, da die zur Evaluation zur Verfügung stehenden IMIS Messungen in 6 m über Grund vorliegen. Für die Berechnung der Vereisung in 10 m Höhe werden die Werte auf der untersten Modellfläche genutzt, die in 500 m Höhe ca. 9.5 m Höhe über Grund, bzw. in 3000 m Höhe bei ca. 7.5 m Höhe über Grund liegt. Die Vereisungskarte in 100 m Höhe über Grund wurde berechnet, da diese Höhe im Bereich heute üblicher Nabenhöhen liegt und daher für die Windenergie von Interesse ist. Für die Berechnung der Vereisungskarte in 100 m über Grund werden die Werte auf der viertuntersten Modellfläche genutzt, die in 500 m Höhe in ca. 107 m Höhe über Grund liegt, bzw. in 3000 m Höhe ca. 82 m Höhe über Grund (Höhe und Dicke der Modellschichten variieren leicht in Abhängigkeit von der Orographie).

Das Ergebnis sind zweidimensionale Karten der meteorologischen bzw. instrumentellen Vereisungshäufigkeit in Tagen/Jahr auf einem Raster von 2.2 km x 2.2 km in 10 m bzw. 100 m Höhe über Grund.

Abb. 15 zeigt die Häufigkeit meteorologischer Vereisung in der Schweiz im 10 m Höhe über Grund. Die räumliche Verteilung der Vereisungshäufigkeit entspricht den Erwartungen: im Mittelland ist die Vereisungshäufigkeit mit bis zu 4 Tagen/Jahr gering. Höhere Werte von 10-20 Tagen/Jahr treten im Jura und in den Voralpen auf, im Bereich der Zentralalpen treten Werte in der Grössenordnung von 50 Tagen auf. Die simulierten, maximalen Vereisungshäufigkeiten treten in den Alpen auf und betragen etwa 100 Tage/Jahr. Eine detaillierte Evaluation der simulierten, meteorologischen Vereisung findet sich in Abschnitt 4.

Die Vereisungshäufigkeit wurde auch in 100 m Höhe über Grund berechnet (Abb. 17). Die Vereisungshäufigkeit nimmt wie erwartet mit der Höhe zu. 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 von mehr als 30 Tagen/Jahr auf. Im Mittel über die betrachteten Stationen liegt die Häufigkeit der meteorologischen 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. An diesem Standort wurden im Winter 2009 / 2010 etwa 9 Tage meteorologischer Vereisung beobachtet. Die Vereisungskarte in 100 m Höhe zeigt für diesen Standort im Mittel 9 Tage meteorologische Vereisung im Winter und stimmt so gut mit den aus Messungen abgeleiteten Werten überein.

In

Abb. 16 und Abb. 18 ist die Häufigkeiten instrumenteller Vereisung in 10 m und 100 m Höhe dargestellt. Es ist zu beachten, dass die Skalen der

Abb. 15 und

Abb. 16 (bzw. Abb. 17 und Abb. 18) unterschiedlich sind. Die instrumentelle Vereisung scheint vom Modell überschätzt zu werden. Dies ist besonders auffällig im Bereich der Zentralalpen. Hier gibt es zahlreiche Regionen, in denen laut Karte fast das gesamte Jahr instrumentelle Vereisung auftreten müsste. Ein Beispiel ist der Standort Gütsch, wo

vorliegende Messungen und Kamerabeobachtungen zeigen, dass die instrumentelle Vereisung deutlich geringer ist als es die Vereisungssimulation zeigt. Für einen Standort im Jura wurde in 80 m Höhe auf der Grundlage von Kamerabildern ein Verhältnis von 1:4 zwischen meteorologischer und instrumenteller Vereisung abgeschätzt. Die Vereisungskarte in 100 m Höhe zeigt für den Standort ein Verhältnis von 1:6 und somit eine insgesamt gute Übereinstimmung mit leichter Überschätzung der gemessenen, instrumentellen Vereisung.

Die Überschätzung der instrumentellen Vereisung, insbesondere im Bereich der Zentralalpen, ist darauf zurückzuführen, dass die Prozesse, die zum Abbau der Eismasse beitragen (Schmelzen, Sublimation, Abfallen) im Vereisungsmodell nicht vollständig beschrieben sind. Im Vereisungsalgorithmus nimmt die Eismasse ab, wenn die Umgebungstemperatur grösser Null und die Energiebilanz für das Eis positiv ist. Der Beitrag der kurzwelligen Strahlung wird bei der Berechnung der Energiebilanz vernachlässigt, lediglich langwellige Strahlung geht in die Berechnung ein. Dadurch fehlt ein wichtiger Beitrag, der insbesondere in Bergregionen, in denen die Umgebungstemperatur über lange Zeiträume unter Null bleibt, von Bedeutung ist. Auch Sublimation, die insbesondere bei trockener Luft und tiefen Temperaturen eine Rolle spielen kann, wird im Modell nicht berücksichtigt. Ein weiterer wichtiger Einfluss wird im Modell nur ungenügend betrachtet: zahlreiche Feldmessungen haben gezeigt, dass Wind und Erschütterungen der vereisten Struktur einen starken Einfluss auf das Abfallen von Eis haben. Dieser Einfluss ist im Modell lediglich durch einen konstanten Faktor in der Energiebilanz berücksichtigt. Auch die idealisierte Annahme, dass sich Eis als rotationssymmetrische Struktur an dem Zylinder anlagert, ist nicht erfüllt, so dass angreifende Kräfte durch den Wind stärker zu einem Abfallen von Eis beitragen. Ein Beispiel, wie die Abnahme der Eisanlagerung in Realität stattfinden kann, ist in Abb. 19 gezeigt. Die Beschreibung solcher Vorgänge in einem Modell ist sehr komplex.

Um realistische Aussagen zur instrumentellen Vereisung zu erhalten, müsste der Teil des Modells, der die Abnahme der Eislast beschreibt, um die oben beschriebenen Prozesse erweitert werden. Allerdings ist die ausreichend genaue Beschreibung dieser Prozesse sehr schwierig [5]. Bis dahin wird die Dauer der Vereisung insbesondere in Gebieten, die nicht durch das ‚klassische‘ Schmelzen beeinflusst sind, überschätzt. Dagegen kann z.B. im Bereich des Juras mit halbwegs realistischen (wenn auch leicht überschätzten) Angaben zur instrumentellen Vereisung gerechnet werden. Aufgrund der eingeschränkten Gültigkeit sollten die Karten der instrumentellen Vereisung nicht veröffentlicht werden.

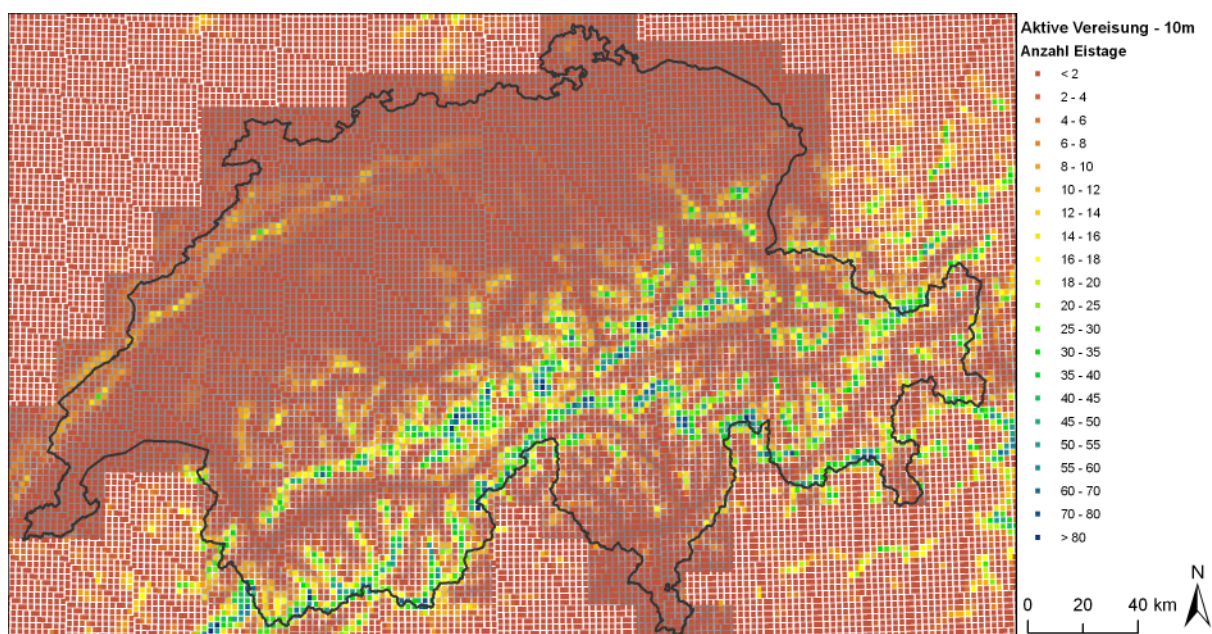


Abb. 15: Karte der Häufigkeit meteorologischer Vereisung in 10 m Höhe in der Schweiz [Tage/Jahr] für den Zeitraum August 2007 – Juli 2009.

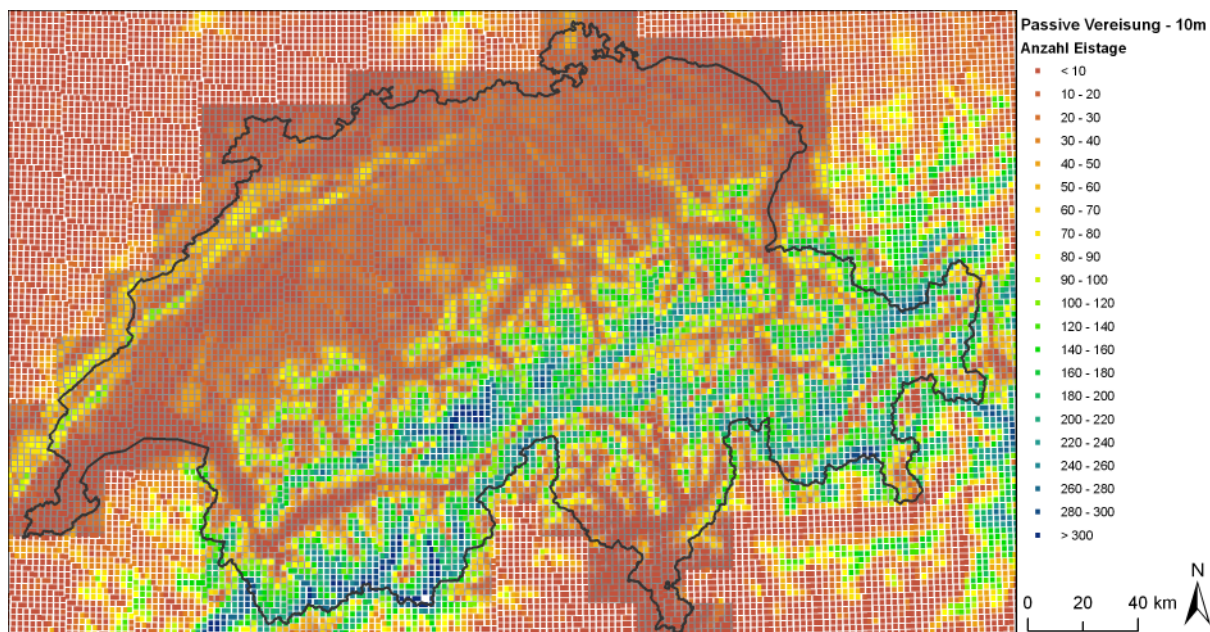


Abb. 16: Karte der Häufigkeit instrumenteller Vereisung in 10 m Höhe in der Schweiz [Tage/Jahr] für den Zeitraum August 2007 – Juli 2009.

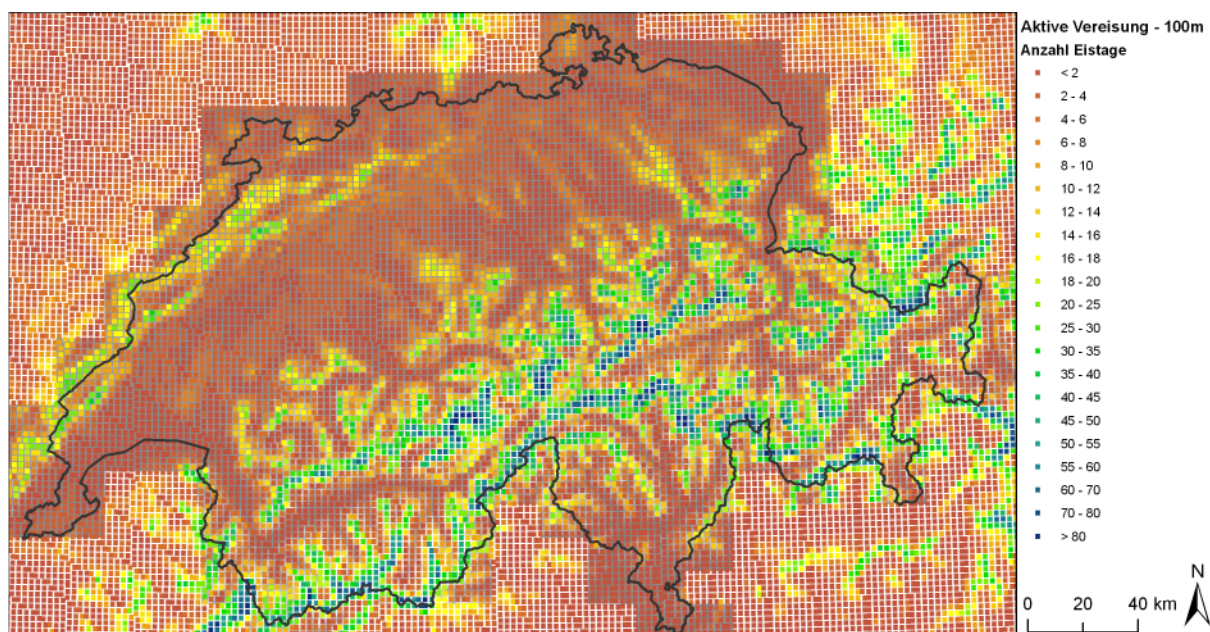


Abb. 17: Karte der Häufigkeit meteorologischer Vereisung in 100 m Höhe in der Schweiz [Tage/Jahr] für den Zeitraum August 2007 – Juli 2009.

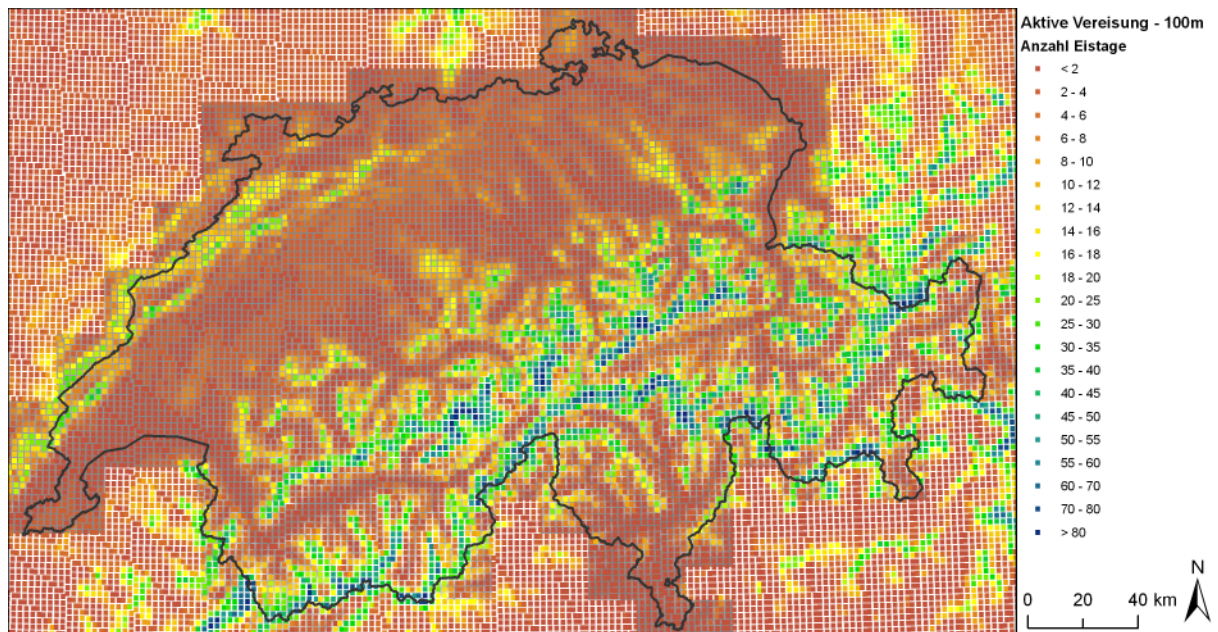


Abb. 18: Karte der Häufigkeit instrumenteller Vereisung in 100 m Höhe in der Schweiz [Tage/Jahr] für den Zeitraum August 2007 – Juli 2009.

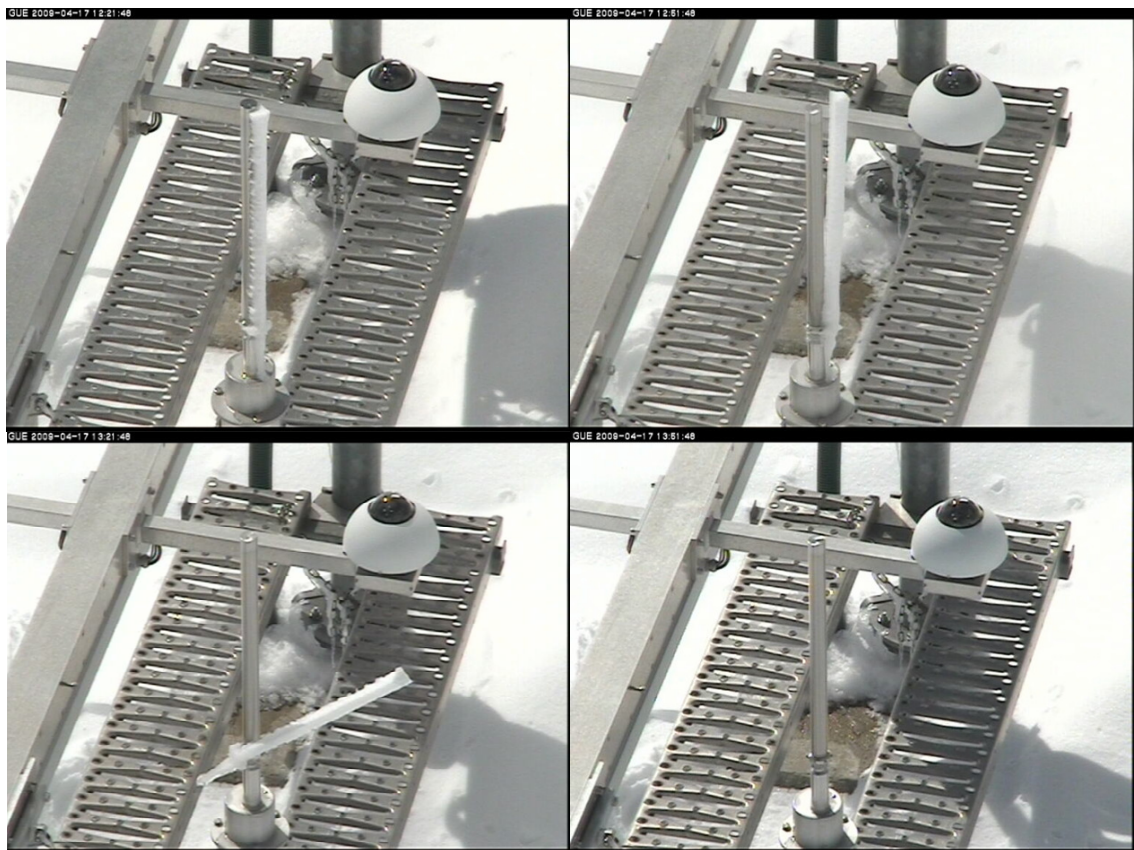


Abb. 19: Beispiel für das Abfallen des angelagerten Eises vom Zylinder des Saab IceMonitors am Standort Gütsch.

4. Evaluation der Vereisungskarte

4.1. Evaluationsmethode

Für jede IMIS-Station wurde für die beiden Analysejahre die Anzahl an Vereisungstagen pro Jahr berechnet. Es wurde für jeden Zeitschritt (halbe Stunde) festgestellt, ob die Station vereist war oder nicht. Die ermittelten Vereisungsstunden wurden im Anschluss auf Tage Vereisung pro Jahr umgerechnet. Um einordnen zu können, wie weit die beiden Analysejahre die langjährigen Verhältnisse widerspiegeln, wurde zusätzlich ein Vergleich mit den 10-Jahresmitteln der Vereisungstage durchgeführt.

Für den Vergleich der IMIS Daten mit der berechneten, meteorologischen Vereisungshäufigkeit musste für jeden IMIS-Standort die entsprechende Gitterzelle der Vereisungskarte ermittelt werden. Folgende Gegenüberstellungen wurden durchgeführt:

- Mittlere Vereisungshäufigkeit pro Jahr für alle Stationen
- Mittlere Vereisungshäufigkeit pro Jahr für alle Windstationen
- Mittlere Vereisungshäufigkeit pro Jahr für alle Schneestationen

Diese Unterscheidung wurde durchgeführt, da davon auszugehen ist, dass die Exponiertheit einer Station einen klaren Einfluss auf die Vereisungswahrscheinlichkeit hat.

Zusätzlich wurden die Häufigkeitsverteilungen der Abweichungen zwischen Vereisungstagen an IMIS Stationen und Vereisungsmodellierung graphisch dargestellt. Darüber hinaus wurden zehn Stationen ausgewählt um exemplarisch zu analysieren, wieweit eine zeitliche Konsistenz von Modellierung und Vereisungsmessung besteht und um Abweichungen zu interpretieren. Die Auswahl der Stationen erfolgte unter dem Kriterium, dass eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen Modelltopographie und realer Topographie besteht. Berücksichtigt wurden dabei der absolute Höhenunterschied zwischen Modelltopographie und realer Höhe und die relative Exponiertheit (z.B. Passlage, Kessellage, Gratlage) der Stationen in der Modelltopographie. Die Vereisungsdauer der Stationen spielte bei der Auswahl keine Rolle. Die Auswertung erfolgte durch graphische Gegenüberstellung.

Wie bereits erwähnt wird mit der vorgestellten Methode im Wesentlichen die meteorologische Vereisung ermittelt. Um eine Vorstellung davon zu erhalten, wie weit diese Zahlen die tatsächliche Gesamtvereisung unterschätzen, wurde eine genaue Analyse von vier Stationen durchgeführt, in deren Nähe Vergleichsmessungen anhand beheizter Windsensoren vorhanden sind. So konnte jeweils das Verhalten der unbeheizten im Vergleich zur beheizten Windmessung unmittelbar vor bzw. nach Vereisungsphasen ausgewertet werden. Aus der Analyse wurde abgeschätzt, dass die auf Grundlage der IMIS Messungen bestimmte Vereisungshäufigkeit um ca. 5-10 % zu niedrig ist. Allerdings ist diese Einschätzung wohl nicht repräsentativ für die gesamte Schweiz.

4.2. Evaluation in den Alpen anhand von IMIS-Messungen

Abb. 20 und Abb. 21 zeigen die aus den IMIS-Daten ermittelten Vereisungstage pro Jahr. Neben den beiden Jahren 2007/08 (grün) und 2008/09 (rot) sind die mittleren Vereisungstage über die letzten zehn Jahre (blau) dargestellt und zwar für die Stationen, die genügend lange Daten aufweisen. Abbildung Abb. 20 beschränkt sich auf die exponierten Windstationen wogegen Abbildung Abb. 21 die Ergebnisse für die geschützten Schneestationen zeigt. In beiden Karten sind klare räumliche Unterschiede zu erkennen. So sind z.B. die Zentralschweizer Alpen oder das nördliche Tessin stark von Vereisung betroffen. Klar ersichtlich ist auch, dass zum Teil auf kleinstem Raum deutliche Schwankungen in der Vereisungshäufigkeit auftreten können. Dies lässt sich durch den

Einfluss der lokal sehr unterschiedlichen Lage der einzelnen Stationen begründen. So ist beim Vergleich von Abb. 20 und Abb. 21 auch klar ersichtlich, dass die exponierten Windstationen durch deutlich höhere Vereisungswahrscheinlichkeiten gekennzeichnet sind als die eher geschützten und zumeist auch tiefer liegenden Schneestationen. Dieser Zusammenhang wird auch aus Tab. 1 und in Abb. 22 ersichtlich, in der die mittleren Vereisungstage für Windstationen, Schneestationen und alle Stationen dargestellt ist. Die Repräsentativität der Einzeljahre im Vergleich zu den Zehnjahresmitteln ist gegeben.

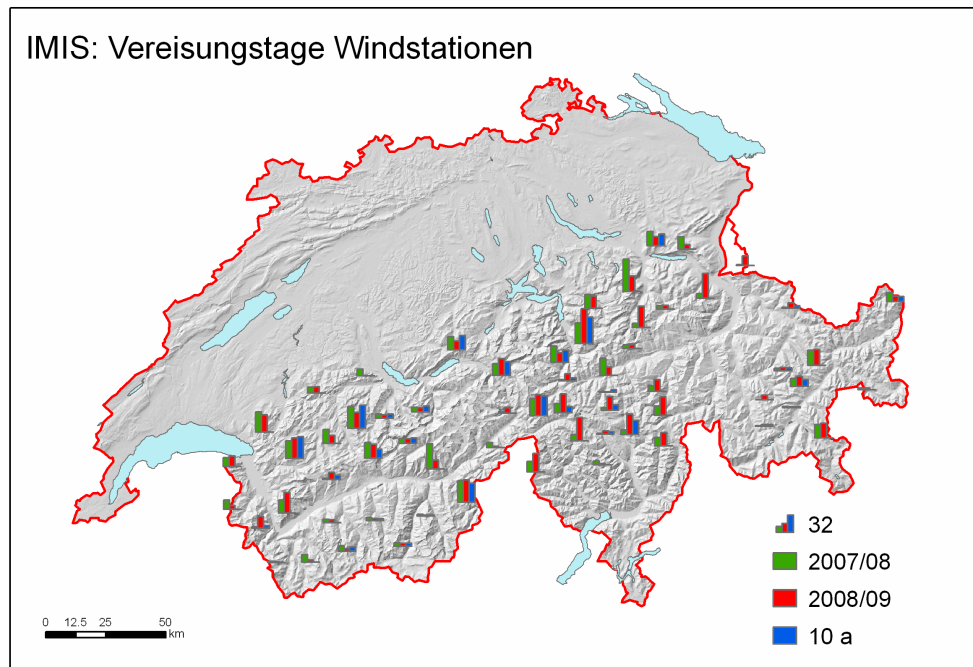


Abb. 20: Vereisungstage an IMIS-Windstationen

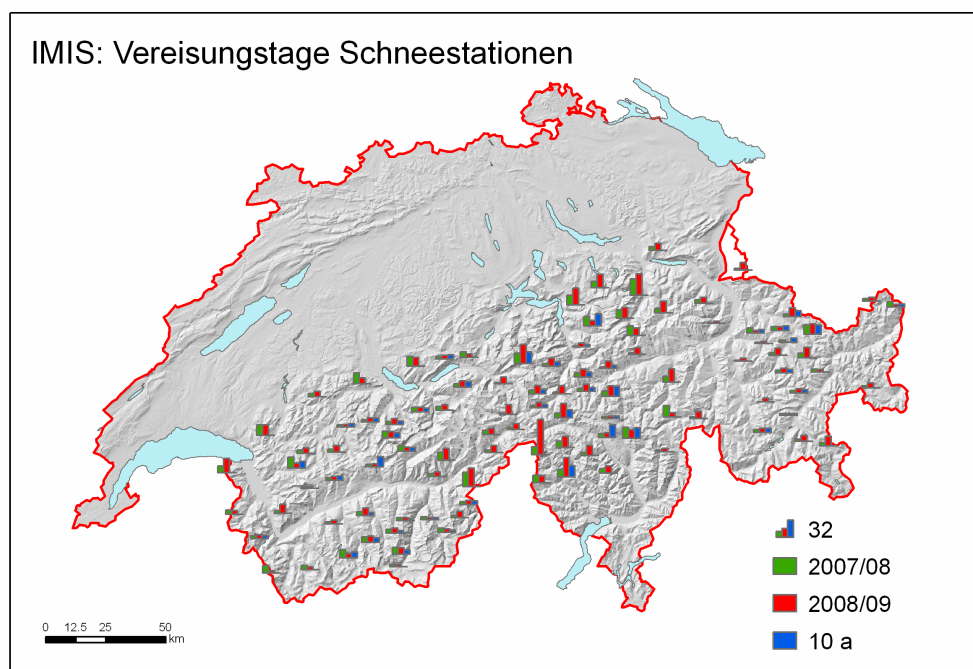


Abb. 21: Vereisungstage an IMIS-Schneestationen

Tab. 1: Vergleich der über die Stationen gemittelten, aus IMIS-Messungen abgeleiteten und simulierten Vereisungstage.

	Alle Stationen (165)	Schnee- stationen (102)	Wind- stationen (63)
IMIS 07/08	8.3	3.7	15.6
IMIS 08/09	10.5	5.8	18.1
IMIS 10a (76)	8.8	4.3	15.2
Karte 07/08	9.7	9.2	10.5
Karte 08/09	9.6	9.0	16.6

Im Vergleich mit den aus IMIS-Daten abgeleiteten Werten zeigt die Vereisungskarte höhere Werte für die Schneestationen, bzw. tiefere für die Windstationen. Betrachtet man die Gesamtheit aller Stationen kommt man zu einer recht guten Übereinstimmung der Mittelwerte. Die simulierte maximale Vereisungshäufigkeit liegt mit etwa 100 Tagen/Jahr recht hoch, aber auch der IMIS-Vereisungsalgorithmus ergibt einen Maximalwert von 65 Tagen/Jahr.

In Abb. 23 ist die Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen den simulierten und gemessenen Vereisungshäufigkeiten dargestellt. Mehr als 50% der Stationen weisen eine Abweichung von weniger als fünf Tage Vereisung pro Jahr zwischen Modell und Messung auf. Werden die Ergebnisse in Klassen eingeteilt, wie sie für die Windenergie üblich sind (>10, 10-30, 30-60, >60 d/a) liegt die Übereinstimmung für Windstationen bei 53%, für Schneestationen bei 70% und für die Gesamtheit aller Stationen bei 65%.

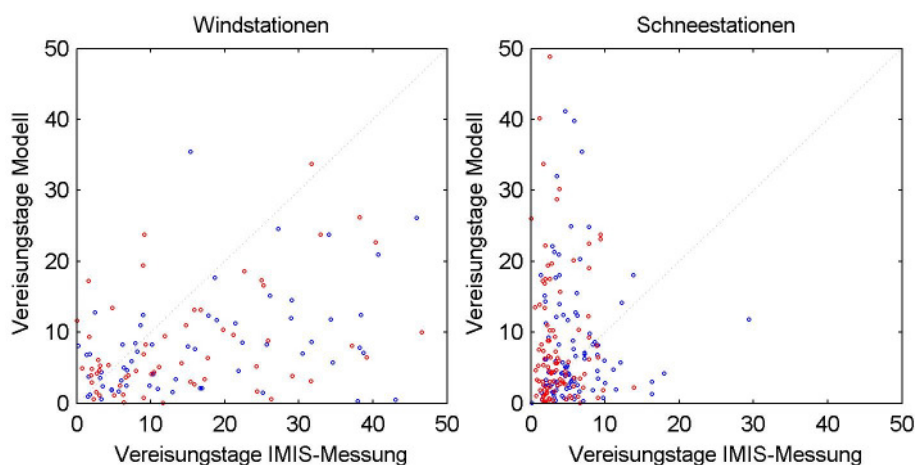


Abb. 22: Vergleich der mittleren Vereisungstage zwischen aus IMIS-Messungen abgeleiteter und simulierter Vereisung. Rote Kreise beziehen sich auf das Jahr 2007/08, blaue Kreise auf 2008/09.

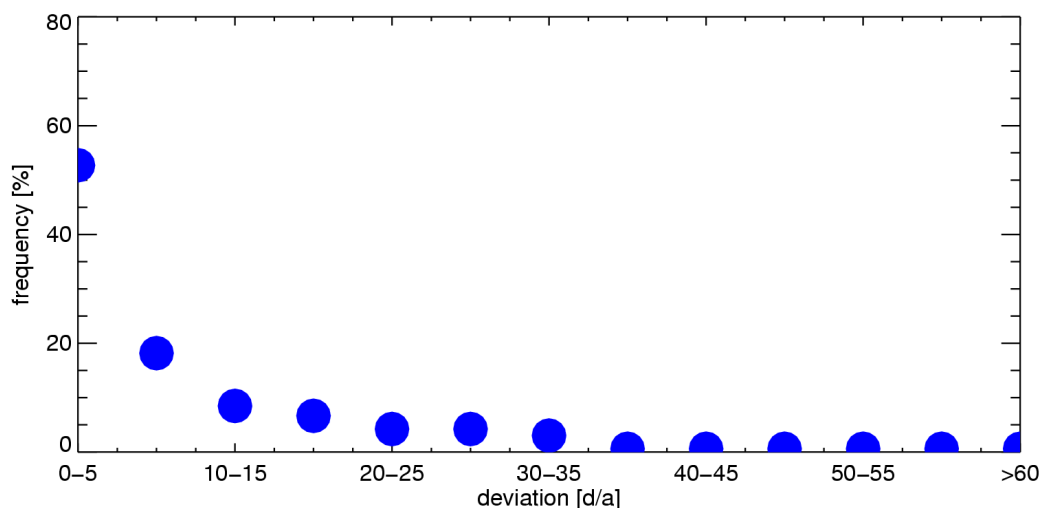


Abb. 23: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen aus IMIS Messungen abgeleiteten und simulierten (Vereisungskarte) Vereisungshäufigkeiten.

Es wurden zehn Stationen ausgewählt, um die Vereisungskarte mit den Messungen auf zeitliche Übereinstimmung zu untersuchen. Eine Auswertung erfolgt hier qualitativ. In Abb. 24 ist für das Beispiel der IMIS Station Taminertal Wildseehorn (Graubünden, TAM1) eine solche Auswertung dargestellt. Im Analysezeitraum zeigt die Station eine überwiegend gute Übereinstimmung mit der Modellierung, auch wenn teilweise die Dauer oder der exakte Zeitpunkt der Vereisungsphasen nicht übereinstimmt. Ein ähnliches Bild zeigen auch die anderen analysierten Stationen, wobei einige deutlich stärkere Abweichungen aufweisen. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die gegebenen Abweichungen sowohl auf lokale Gegebenheiten, die das Modell nicht repräsentieren kann, als auch mögliche Fehler in den Messungen zurückzuführen sind.

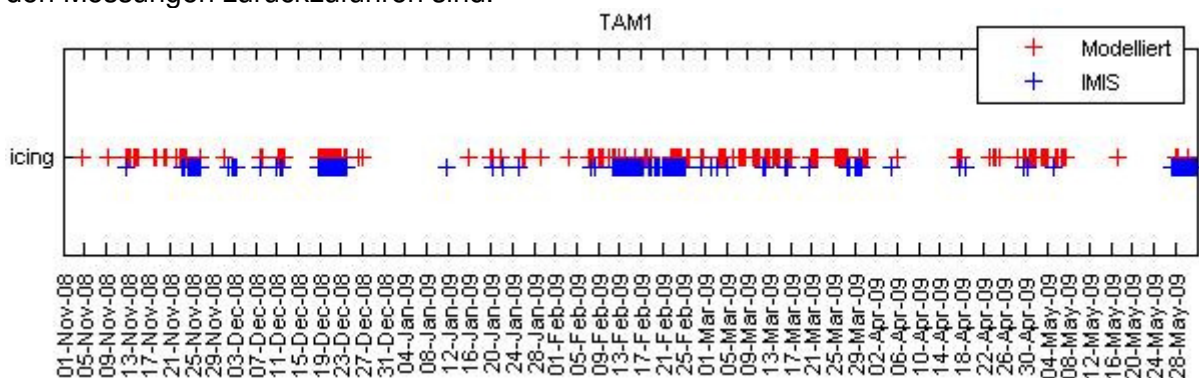


Abb. 24: Vergleich der mit dem IMIS-Algorithmus berechneten und der simulierten Vereisung an der IMIS-Station Taminertal Wildseehorn (Graubünden) für den Zeitraum 1. November 2007 bis 31. Mai 2008

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Messungen der IMIS-Stationen eine gute Grundlage für die Verifikation der Vereisungskarte darstellen. Der Vergleich der aus IMIS Messungen abgeleiteten und simulierten Vereisungshäufigkeiten zeigt eine gute Übereinstimmung. Neben ähnlichen mittleren Vereisungen konnten auch ähnliche räumliche Muster festgestellt werden. Im Vergleich zu exponierten Windstationen unterschätzt die Vereisungskarte die Vereisungshäufigkeit wogegen sie für geschützte Stationen eher zu niedrige Werte angibt. Dies liegt daran, dass die Modelltopographie (2.2 km) lokale Gegebenheiten nicht genügend abdecken kann. Bei der Analyse von Einzelstationen zeigen sich zum Teil deutliche Abweichungen in den Mittelwerten und im zeitlichen Verlauf. Es muss auch noch einmal darauf hingewiesen werden, dass der Vereisungsalgorithmus über IMIS-Stationen mit einem schwer abzuschätzenden Fehler behaftet ist, den wir auf Grundlage des

oben beschriebenen qualitativen Vergleichs mit beheizten Stationen mit 5-10% Unterschätzung der Vereisungszeiten abschätzen.

Die Standorte, die in den Alpen für die Windenergie interessant sind, liegen in der Regel in nicht so komplexem Gelände wie die IMIS Stationen für die Lawinenwarnung. Es handelt sich häufig um Passlagen, die oft eine exponierte Lage besitzen und gut zugänglich sind. Drei IMIS Stationen liegen in oder nahe zu Pässen: am Flüelapass, am Julierpass und am Ofenpass. Die gemessenen und simulierten Werte für diese Stationen sind in Tab. 2 dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass an diesen Stationen die Häufigkeit meteorologischer Vereisung in der Vereisungskarte recht gut wiedergegeben wird. Für den Julier- und den Ofenpass ist die gemessene und simulierte Vereisungshäufigkeit gering, während Messung und Vereisungskarte am Flüelapass eine höhere Häufigkeit zeigen.

Tab. 2: Gemessene und simulierte meteorologische Vereisungshäufigkeit für die IMIS Stationen in der Nähe von Passlagen.

	aus IMIS Messungen [Tage/Jahr]	Vereisungskarte [Tage/Jahr]
Flüelapass	7	12
Julierpass	2	4
Ofenpass	3	1

4.3. Evaluation für den Jura

Der Bereich der Alpen ist durch IMIS Stationen gut abgedeckt, dagegen stehen im Jura nur wenige Messungen zur Verfügung: eine Eislastmessung in 10 m Höhe am Matzendörfer Stierenberg aus dem MEMFIS Projekt und Messungen in 50 m Höhe für Windenergieprojekte an den Standorten Grenchenberg und Matzendörfer Stierenberg, sowie an zwei weiteren Standorten im Jura, die im Folgenden mit Jura1 und Jura2 bezeichnet werden. Voraussetzung für die Bestimmung von Vereisungsperioden aus Messungen im Zusammenhang mit Windenergieprojekten war, dass parallel beheizte und unbeheizte Sensoren für die Windmessung verwendet wurden. Die Vereisungsperioden wurden aufgrund folgender Kriterien bestimmt:

- Windgeschwindigkeit ≥ 2 m/s
- Verhältnis der Windgeschwindigkeiten am beheizten und unbeheizten Sensor > 2
- Temperatur $< 0^{\circ}\text{C}$
- Relative Feuchte $> 99\%$

Die Feuchtemessung an den Masten war unbeheizt, was zu einer Überschätzung der meteorologischen Vereisungshäufigkeit führt. Ein Indiz dafür, dass die meteorologische Vereisung überschätzt wird, ist die Tatsache, dass die Häufigkeit von meteorologischer und instrumenteller Vereisung nahezu identisch ist, während man aufgrund von Untersuchungen mit besser kontrollierbaren Messungen im Bereich des Juras (80 m Höhe) ein Verhältnis im Bereich 1:4 abschätzt. Für denselben Standort zeigt die Vereisungskarte ein Verhältnis von meteorologischer und instrumenteller Vereisung in 100 m Höhe von 1:6 und zeigt somit eine rechte gute Übereinstimmung, wobei die instrumentelle Vereisung etwas überschätzt wird. Die aus den Messungen abgeleitete Anzahl der Tage mit meteorologischer Vereisung ist tendenziell eher zu hoch.

In Tab. 3 sind die gemessenen und simulierten Werte für meteorologische Vereisung für verschiedene Standorte im Jura dargestellt. Insgesamt zeigt sich eine gute Übereinstimmung von gemessener und simulierter Vereisungshäufigkeit, insbesondere wenn man in Betracht zieht, dass die aus den Messungen in 50 m abgeleiteten Werte vermutlich eher zu hoch sind. So ergibt sich am Matzendörfer Stierenberg, wo auf 10 m Eislastmessungen zur Verfügung

stehen, für den Winter 2008/2009 eine gute Übereinstimmung, während die gemessene Vereisung auf 50 m Höhe im Winter 2007/2008 höher war. Ein direkter Vergleich ist aufgrund fehlender, gleichzeitiger Messungen nicht möglich. Einzig am Standort Grenchenberg kommt es zu einer deutlichen Abweichung zwischen der gemessenen Vereisungshäufigkeit von 50 Tagen und der simulierten Vereisungshäufigkeit von 14 Tagen. Die Abweichung erklärt sich möglicherweise aus den lokalen Geländegegebenheiten: der Messmast stand sehr nah (etwa 100 m Abstand) an einer Felswand, die nahezu senkrecht abfällt. Die Modelltopographie erfasst solche lokalen Details bei einer Gitterweite von 2.2 km nicht, so dass auch der Effekt für Anströmung und Wolkenbildung am Messstandort nicht in der Simulation wiedergegeben wird.

Tab. 3: Gemessene und simulierte Werte der meteorologischen Vereisungshäufigkeit für verschiedene Standorte im Jura. Die Höhe und der Zeitraum der Messung und der simulierten Werte sind in Klammern gegeben.

Standort	Gemessene Vereisungstage [d] (Zeitperiode)	Simulierte Vereisungstage [d] (Zeitperiode)
Grenchenberg (50 m Höhe)	50 (Wi 08/09)	14 (Wi 08/09)
Matzendörfer Stierenberg (50 m Höhe)	20 (Wi 07/08)	13 (Wi 07/08)
Matzendörfer Stierenberg (10 m Höhe)	14 (Wi08/09)	15 (Wi 08/09)
Jura1 (50 m Höhe)	18 (Wi 09/10)	14 (Wi 08/09)
Jura2 (50 m Höhe)	20 (Wi 09/10)	12 (Wi 08/09)

5. Zusammenfassung und Diskussion

Im vorliegenden 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 einen Vereisungsalgorithmus, der die Eislast an einer zylindrischen, frei rotierenden Struktur berechnet. Die berechneten Häufigkeiten wurden anhand von IMIS-Messungen und Windmessungen im Jura verifiziert.

Die Karte der Häufigkeit von meteorologischer Vereisung in der Schweiz zeigt eine plausible räumliche Verteilung: 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, im Bereich der Zentralalpen treten Werte im Bereich von 50 Tagen auf. Maximale Vereisungshäufigkeiten in 10 m Höhe liegen bei 100 Tagen/Jahr. Dieser Wert wirkt zu hoch, aber auch die aus IMIS-Messungen abgeleitete Häufigkeit zeigt Werte bis zu 65 Tage/Jahr. Die Vereisungshäufigkeit auf Grundlage von IMIS-Messungen ist mit einem Fehler behaftet, der schwer abzuschätzen ist, aber im Bereich von 5-10% Unterschätzung angenommen wird.

Die Evaluation der Vereisungskarte in 10 m Höhe im Bereich der Alpen anhand von IMIS-Messungen 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 in den Mittelwerten und im zeitlichen Verlauf. So wird die Vereisungshäufigkeit in der Karte für die sehr exponierten Windstationen systematisch unter- und für die geschützten Schneestationen systematisch überschätzt. Der Grund hierfür ist, dass die Vereisungskarte wie auch die meteorologischen Daten auf einem Raster von 2.2 km Gitterweite vorliegt. Dies ist eine hohe räumliche Auflösung für ein Wettervorhersagemodell, aber sehr lokale Geländecharakteristika können nicht erfasst werden. Dies ist eine Einschränkung, deren man sich bei der Interpretation der Karte bewusst sein muss.

Auf der anderen Seite sind sehr exponierte Grat- oder Gipfelposition oder sehr abgeschattete Standorte für Windenergieprojekte in der Regel nicht interessant. Vergleicht man die simulierten und aus Messungen abgeleiteten Vereisungshäufigkeiten in Passlagen und im Jura, dann ergibt sich eine gute Übereinstimmung. Lediglich die Vereisungshäufigkeit am Standort Grenchenberg wird in der Karte deutlich unterschätzt. Die Ursache hierfür liegt in sehr lokalen Gegebenheiten, die mit einer Gitterweite von 2.2 km nicht beschrieben werden: der Messmast stand sehr nah an einer Felswand, die nahezu senkrecht abfällt.

Die Karte der meteorologischen Vereisungshäufigkeit in 100 m Höhe über Grund zeigt eine ähnliche räumliche Verteilung wie in 10 m Höhe. Die Häufigkeit meteorologischer Vereisung ist, wie erwartet, in 100 m Höhe über Grund höher als in 10 m Höhe über Grund. Im Mittel ist die Anzahl von Tagen mit Vereisung in 100m Höhe etwa doppelt so hoch wie in 10 m. Der Vergleich einer Messung im Jura in 80 m Höhe zeigt mit 9 Tagen meteorologischer Vereisung im Winter 2009 / 2010 eine gute Übereinstimmung mit der Häufigkeit meteorologischer Vereisung von 9 Tagen im Winter in der Vereisungskarte in 100 m Höhe.

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. Das aus Kamerabildern abgeleitete Verhältnis beträgt 1:4, während das aus der Vereisungskarte in 100 m Höhe abgeleitete Verhältnis 1:6 beträgt.

Die IMIS-Messungen sind an 76 Stationen als zehnjährige Zeitreihe vorhanden. Diese Daten werden genutzt, um abzuschätzen, wie repräsentativ die Vereisungsverhältnisse im Zeitraum August 2007 bis Juli 2009 für den Zeitraum von 10 Jahren sind. An den 76 Stationen ergibt sich ein 10jähriger Mittelwert von 8.8 Vereisungstagen/Jahr. Im Vergleich dazu ist das Mittel über den Zeitraum August 2007 bis Juli 2009 für die entsprechenden Stationen 9.2 Tage/Jahr. Damit liegt die mittlere Vereisung etwa 5% über dem 10jährigen Mittel.

Die im vorliegenden Projekt erstellte Karte der Vereisungshäufigkeit ergibt ein detaillierteres Bild der Vereisung in der Schweiz als die bisher vorliegenden Karten. In Gebieten, die für Windenergieprojekte von Interesse sind, z.B. Jura oder Passlagen in den Alpen, ergibt sich eine gute Übereinstimmung simulierter und gemessener Vereisungshäufigkeit. In Regionen mit ausgeprägt lokaler Geländecharakteristik ist die Übereinstimmung weniger gut, da das sehr komplexe Gelände und seine Wirkung auf Vereisung im Wettervorhersagemodell mit 2.2 km Gitterweite nicht beschrieben werden kann. Bei der Interpretation der Karte der Vereisungshäufigkeiten sind daher einige Punkte zu berücksichtigen:

- dargestellt ist die meteorologische Vereisung, 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 Verreisungshäufigkeit zu bestimmen.
- Ist der Standort durch kleinräumige Geländecharakteristika geprägt (stark exponiert oder abgeschattet), kann er nicht durch den Wert der Vereisungskarte repräsentiert werden. Er wird bei exponierter Lage höher und bei abgeschatteter Lage unter dem Wert in der Karte liegen.

Die Karte bildet eine gute Grundlage, um die Vereisungsgefährdung qualitativ einzuschätzen und gegebenenfalls bei der Planung von Windenergieprojekten entsprechende Massnahmen zu ergreifen.

Die Visualisierung der Karten mit der Darstellung der Häufigkeit meteorologischer Vereisung wird im Rahmen der Aktualisierung der wind-data-Seite, die im Sommer (spätestens aber bis Ende des Jahres) durchgeführt wird, umgesetzt.

Kommunikation

Konferenzen:

Dierer, S.; Grünewald, T.; Cattin, R.; Steiner, P. und M. Lehning: Atmospheric icing – a challenge in site assessment. European Wind Energy Conference, 20.-23.4.2010, Warschau, Polen.

Grünewald, T.; Steinkogler, W.; Dierer, S.; Cattin, R.; Steiner, P. und Lehning, M.: A new map of the icing potential for Switzerland. International Symposium on snow, ice and humanity in a changing climate. 21 - 25 June 2010. Sapporo, Japan.

Fachpresse:

Dierer, S.; Cattin, R.; Grünewald, 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.

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] Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Russi, T., Stockli, U., and Zimmerli, M.: SNOWPACK model calculations for avalanche warning based upon a new network of weather and snow stations, Cold Regions Science and Technology, 30, 145-157, 1999.
- [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] Schättler, U., C. Barbu [editors] 2010: COSMO-Newsletter 10. 81 pp.
Available through: www.cosmo-model.org > Documentation > Newsletters.

Anhang

A1 Statistische Masszahlen der Verifikation der COSMO-2 Analyse (1. Juni 2007 – 31. August 2009)

Folgende Masse werden gezeigt:

- NMOD, NOBS, N: Anzahl Modellvorhersagen, Beobachtungen, Verifikationssample.
- ME: Mittlerer Fehler
- MAE: Mittlerer absoluter Fehler
- STDE: Standardabweichung des Fehlers
- RMSE: Root Mean Square Error
- MINE, MAXE: Minimum/Maximum des Fehlers
- COR: Korrelation
- COV: Kovarianz
- MMOD: Mittelwert des Modells
- MOBS: Mittelwert der Beobachtungen
- STDMOD: Standardabweichung Modell
- STDOBS: Standardabweichung Beobachtungen
- MINMOD, MAXMOD: Minimum/Maximum Modell
- MINOBS, MAXOBS: Minimum/Maximum Beobachtungen

Temperatur

Score	2007s3	2007s4	2008s1	2008s2	2008s3	2008s4	2009s1	2009s2	2009s3
NMOD	193308	194109	196470	289248	320160	316680	317520	320160	320160
NOBS	145954	148643	149788	159345	206097	214600	211609	219696	221660
N	143720	148443	149722	159344	206097	214600	211609	219696	221659
ME	-0.23	-0.80	-1.24	-1.20	-0.18	-0.14	-0.44	-1.05	-0.48
MAE	1.56	1.84	2.40	2.21	1.36	1.45	1.79	1.90	1.47
STDE	2.05	2.31	2.94	2.79	1.84	1.97	2.52	2.44	1.94
RMSE	2.06	2.45	3.19	3.04	1.85	1.97	2.56	2.65	2.00
MINE	-19.20	-23.00	-24.90	-21.50	-28.80	-18.80	-24.30	-23.40	-21.30
MAXE	18.50	20.00	16.30	17.30	11.20	21.40	29.00	16.20	24.10
COR	0.95	0.95	0.85	0.94	0.96	0.96	0.89	0.95	0.96
COV	38.80	50.23	24.42	59.45	43.48	48.69	24.78	60.77	43.16
MMOD	287.46	278.68	272.22	278.26	287.48	279.43	270.16	278.99	287.83
MOBS	287.69	279.47	273.47	279.46	287.66	279.57	270.60	280.03	288.31
STDMOD	6.45	7.43	5.30	8.19	6.84	7.27	5.18	7.92	6.73
STDOBS	6.34	7.11	5.42	7.73	6.60	6.96	5.40	8.05	6.69
MINMOD	261.90	245.40	249.30	247.00	262.00	248.60	245.20	249.20	262.00
MINOBS	262.80	248.80	249.20	248.40	262.60	248.80	240.70	250.10	262.70
MAXMOD	314.10	302.60	290.50	306.80	306.20	302.50	286.40	309.80	308.10
MAXOBS	307.60	301.40	296.20	304.10	312.10	301.80	292.80	308.30	312.20

Windgeschwindigkeit

Score	2007s3	2007s4	2008s1	2008s2	2008s3	2008s4	2009s1	2009s2	2009s3
NMOD	193308	194109	196470	289248	320160	316680	317520	320160	320160
NOBS	142581	142200	143649	165440	244544	256211	252370	260517	261276
N	140305	142002	143583	165440	244544	256211	252370	260517	261276
ME	-0.29	-0.26	-0.36	-0.35	-0.21	-0.27	-0.32	-0.28	-0.23
MAE	1.46	1.50	1.61	1.66	1.32	1.40	1.49	1.58	1.34
STDE	2.03	2.19	2.34	2.33	1.85	2.04	2.17	2.21	1.87
RMSE	2.05	2.20	2.37	2.36	1.86	2.06	2.19	2.23	1.88
MINE	-19.80	-22.00	-27.90	-23.80	-23.60	-28.00	-29.10	-19.90	-17.80
MAXE	12.40	11.90	14.00	14.10	11.40	13.60	15.60	14.30	15.40
COR	0.51	0.59	0.64	0.59	0.50	0.62	0.65	0.55	0.52
COV	1.95	3.16	4.05	3.56	1.57	3.08	3.82	2.76	1.72
MMOD	2.45	2.54	2.63	2.84	2.29	2.40	2.47	2.70	2.38
MOBS	2.74	2.80	2.99	3.19	2.50	2.67	2.79	2.98	2.61
STDMOD	1.69	2.01	2.10	2.12	1.53	1.94	2.10	1.93	1.55
STDOBS	2.27	2.66	3.03	2.84	2.05	2.56	2.82	2.58	2.13
MINMOD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MINOBS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MAXMOD	18.40	21.60	25.90	28.30	16.10	30.10	24.10	20.50	21.50
MAXOBS	24.00	31.00	37.00	31.00	25.00	31.00	40.00	30.00	23.00

Windrichtung

Score	2007s3	2007s4	2008s1	2008s2	2008s3	2008s4	2009s1	2009s2	2009s3
NMOD	193308	194109	196470	289248	320160	316680	317520	320160	320160
NOBS	142587	142200	143649	165440	244544	256211	252370	260517	261276
N	56407	54887	56138	76968	88162	93121	93179	114117	100848
ME	-1.41	-4.48	-5.97	-3.55	-2.10	-4.48	-4.68	-3.80	-3.28
MAE	42.72	38.71	40.49	43.84	43.01	39.13	39.39	43.00	42.45
STDE	60.14	55.09	58.19	62.37	60.40	56.33	56.79	61.06	59.49
RMSE	60.16	55.27	58.49	62.47	60.43	56.51	56.98	61.18	59.58
MINE	-180.00	-180.00	-180.00	-180.00	-180.00	-180.00	-180.00	-180.00	-180.00
MAXE	179.90	179.90	180.00	180.00	180.00	180.00	180.00	180.00	180.00
COR	0.51	0.55	0.54	0.51	0.48	0.57	0.51	0.51	0.50
COV	4742.73	7050.16	4736.03	4903.28	4869.83	5616.41	5561.53	5415.18	5435.53
MMOD	203.26	175.08	187.73	189.21	202.79	177.61	174.31	179.07	190.99
MOBS	205.33	179.84	194.06	194.76	209.02	185.16	180.38	187.28	202.90
STDMOD	98.47	115.26	94.11	97.88	102.85	100.40	104.94	102.57	105.93
STDOBS	94.81	110.44	93.31	97.38	99.52	98.90	104.78	103.95	103.30
MINMOD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MINOBS	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
MAXMOD	360.00	360.00	360.00	360.00	360.00	360.00	360.00	360.00	360.00
MAXOBS	360.00	360.00	360.00	360.00	360.00	360.00	360.00	360.00	360.00

Bewölkung

Score	2007s3	2007s4	2008s1	2008s2	2008s3	2008s4	2009s1	2009s2	2009s3
NMOD	64614	64703	65520	96416	106720	105560	105840	106720	106720
NOBS	20878	20274	19879	19655	20054	19058	19248	20164	20414
N	20602	20262	19879	19655	20054	19058	19248	20164	20414
ME	2.31	1.42	3.10	2.97	4.21	2.14	1.72	7.97	6.61
MAE	18.52	21.28	20.32	17.54	19.25	21.02	21.14	20.97	21.43
STDE	26.95	30.56	31.79	26.78	27.53	30.84	33.45	29.94	29.16
RMSE	27.05	30.59	31.94	26.95	27.85	30.91	33.50	30.99	29.90
MINE	-99.50	-100.00	-100.00	-99.90	-99.90	-100.00	-100.00	-96.80	-99.30
MAXE	100.00	100.00	100.00	100.00	99.90	100.00	100.00	100.00	100.00
COR	0.72	0.67	0.70	0.69	0.70	0.62	0.63	0.64	0.65
COV	915.24	948.76	1159.21	796.39	887.13	786.79	966.95	787.05	771.02
MMOD	63.54	56.60	54.37	72.43	62.98	66.07	66.20	69.94	62.10
MOBS	61.23	55.17	51.27	69.46	58.76	63.93	64.48	61.97	55.49
STDMOD	36.38	36.17	39.75	34.22	35.61	34.53	38.06	34.13	33.79
STDOBS	35.12	39.03	41.82	33.75	35.56	36.50	40.06	36.14	35.37
MINMOD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MINOBS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MAXMOD	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
MAXOBS	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

A2 Verifikation für die COSMO-2 Analyse und Vorhersage im Vergleich

Temperatur

Score	2007s3	2007s4	2008s1	2008s2	2008s3	2008s4	2009s1	2009s2	2009s3
N				-0.46	0.00	-0.06	-0.03	0.00	0.00
MAE				2.42	-7.19	-4.53	-2.75	-0.38	-3.87
STDE				2.25	-5.36	-3.53	-2.69	3.25	-3.52
RMSE				3.95	-5.06	-3.29	-2.02	2.53	-1.07

Windgeschwindigkeit

Score	2007s3	2007s4	2008s1	2008s2	2008s3	2008s4	2009s1	2009s2	2009s3
N				-0.44	0.00	-0.07	-0.05	0.00	0.00
MAE				-1.25	-2.49	-1.83	-0.83	0.43	-2.35
STDE				-0.89	-2.27	-1.50	-0.69	0.45	-2.04
RMSE				-0.64	-2.23	-1.17	-0.21	0.69	-1.69

Windrichtung

Score	2007s3	2007s4	2008s1	2008s2	2008s3	2008s4	2009s1	2009s2	2009s3
N				-0.71	0.00	-0.06	-0.05	0.00	0.00
MAE				-1.84	-4.86	-2.07	-0.38	-1.25	-5.62
STDE				-1.24	-3.88	-1.84	-0.99	-1.25	-4.73
RMSE				-1.17	-3.85	-1.76	-1.05	-1.24	-4.73

Bewölkung

Score	2007s3	2007s4	2008s1	2008s2	2008s3	2008s4	2009s1	2009s2	2009s3
N				-0.38	0.00	-0.07	-0.03	0.00	0.00
MAE				0.46	-0.52	-0.97	-2.31	4.29	-3.65
STDE				1.65	-1.44	-2.08	-4.03	3.25	-5.14
RMSE				-0.03	-0.40	-2.00	-3.95	4.36	-3.02