

CSC Report 5

# Schneelast an Stromleitungen

Heute und in Zukunft



**Coverfoto:** © dpa

**Zitierhinweis:**

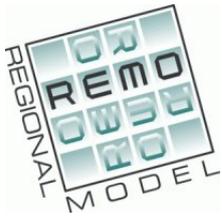
Schmitt, R. (2012): Schneelast an Stromleitungen – Heute und in Zukunft, CSC Report 5, Climate Service Center, Germany

## Vorwort

Extremereignisse treten eher selten auf, sind dann aber mit weit reichenden Folgen für den Menschen, die Natur und die Wirtschaft verbunden. Dies gilt zum Beispiel auch für das Auftreten von starken Schneefällen, die zu einer Schneelast führen, unter der Strommasten zusammenbrechen können.

Ausgehend von dem Starkschneefall-Ereignis im November 2005, durch das mehr als 600 000 Menschen von der Stromversorgung abgeschnitten waren, wurde in dieser Masterarbeit für das regionale Klimamodell REMO eine Methode entwickelt, mit der vergleichbare, meteorologische Ereignisse erkannt werden können. Damit sind sowohl Aussagen zur räumlichen Verteilung von Schneelastereignissen möglich als auch mittels einer statistischen Analyse die Identifikation von Regionen in Deutschland, in denen gehäuft extreme Schneelastereignisse auftreten könnten.

Diese Arbeit wurde als Masterarbeit am Meteorologischen Institut der Fakultät MIN der Universität Hamburg am 30. September 2011 eingereicht.



**Climate Service Center**



# Schneelast an Stromleitungen - Heute und in Zukunft

## **Masterarbeit**

am Fachgebiet Meteorologie

Jun-Prof. Dr. Felix Ament

Institut für Meteorologie

Fakultät MIN

Universität Hamburg

vorgelegt von

**Richard Schmitt**

Betreuer: Prof. Dr. Daniela Jacob, Jun-Prof. Dr. Felix Ament

---

Richard Schmitt

Matrikelnummer: 5864074

Sillemstraße 52

20257 Hamburg

---

## Zusammenfassung

Stromleitungen, die unter Schneelasten zusammenbrechen, sind in Deutschland ein seltenes Problem. Dennoch kommt es in unregelmäßigen Abständen, wie zuletzt im Münsterland Ende November 2005, immer wieder zu meteorologischen Situationen, die solche extreme Ereignisse nach sich ziehen. Da es für Deutschland zwar statistische Berechnungen für die Wiederkehrdauer solcher Ereignisse an einzelnen Stationen gibt, jedoch keine flächendeckende Aussage über die Gefährdung der Infrastruktur in den verschiedenen Landesteilen, wird in dieser Arbeit nach einer Methode gesucht, die solche meteorologischen Situationen in Klimamodelldaten detektiert und somit Aussagen zur räumlichen Verteilung ermöglicht.

Dazu werden zunächst aus Untersuchungsberichten zum Ereignis im Münsterland sowie weiterer Literatur die Bedingungen herausgefiltert, bei denen die Bildung von Schneelasten wahrscheinlich ist. Daraus werden zwei Methoden entwickelt, welche anhand eines mit Reanalysedaten angetriebenen REMO-Laufes zum Münsterlandereignis getestet werden. Als besonders sinnvoll stellt sich eine auf den drei Variablen Schneefall, 2m-Temperatur und 10m-Windgeschwindigkeit basierende Methode heraus. Diese dient als Grundlage für eine statistische Auswertung von Schneelastereignissen in Deutschland auf Basis diverser hochauflösender Klimäläufe des Regionalen Klimamodells REMO. Eine

---

zweite Methode, die Schneelast in Abhängigkeit von Schneefall und der Feuchttemperatur berechnet, kann das Münsterlandereignis nicht detektieren und wird im weiteren Verlauf der Arbeit nicht mehr verwendet.

Bei der statistischen Analyse kristallisieren sich die deutschen Mittelgebirge und vor allem das östliche Bayern sowie das Erzgebirge samt Vorland als Regionen heraus, die besonders oft von solchen Ereignissen betroffen sind. Diese Verteilung kann sowohl im Kontrollklima des 20. Jahrhunderts als auch in verschiedenen Klimaprojektionsläufen für das 21. Jahrhundert gefunden werden. Allerdings nimmt die Gesamtzahl der modellierten Ereignisse sowohl in den beschriebenen Regionen als auch in Gesamtdeutschland vor allem in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts stark ab. So treten im Klima des 20. Jahrhunderts in Gesamtdeutschland etwa zwei Ereignisse pro Jahr auf, während diese Zahl gegen Ende des 21. Jahrhunderts auf weniger als ein Ereignis pro Jahr abnimmt. Letztendlich kann noch festgestellt werden, dass es in verschiedenen Versionen des REMO-Modells trotz gleicher Initialisierungs- und Randwerte zu teilweise deutlichen Unterschieden für die Anzahl von Schneelastereignissen pro Jahr kommt. Dies lässt sich vermutlich durch statistische Variabilität als Folge unterschiedlicher Niederschlagsbildungsprozesse erklären.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen zu Schneelastereignissen</b>	<b>3</b>
2.1	Wetterlage am 25./26. 11. 2005 . . . . .	3
2.2	Schneelast an Stromleitungen . . . . .	6
2.2.1	Trockenschneeablagerung . . . . .	7
2.2.2	Nassschneeablagerung . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Modell- und Datenbeschreibung</b>	<b>15</b>
3.1	Das Regionale Klimamodell REMO . . . . .	15
3.1.1	Allgemeines . . . . .	15
3.1.2	Schneefall in REMO . . . . .	18
3.2	Verwendete Daten . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Methodenentwicklung</b>	<b>25</b>
4.1	ISO-Norm-Methode . . . . .	26
4.1.1	Theorie . . . . .	26
4.1.2	Fuzzy-Logik . . . . .	27
4.1.3	Methodentest . . . . .	28
4.2	3-Variablen-Methode . . . . .	35
4.2.1	Theorie . . . . .	35

## Inhaltsverzeichnis

---

4.2.2	Methodentest . . . . .	37
4.3	Fazit . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Statistische Auswertung</b>	<b>44</b>
5.1	Häufigkeit des Auftretens von Schneelastereignissen in Deutschland im 20. Jahrhundert . . . . .	45
5.1.1	Gesamtdeutschland . . . . .	46
5.1.2	Regionale Unterschiede . . . . .	49
5.1.3	Unterschiede nach Modellversion . . . . .	51
5.2	Entwicklung der Häufigkeit von Schneelastereignissen in Deutschland im 21. Jahrhundert . . . . .	55
5.2.1	Die Emissionsszenarien . . . . .	55
5.2.2	Prognostizierte Änderungen . . . . .	56
5.2.3	Unterschiede nach Modellversion . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>68</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>VI</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>X</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XV</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>XVI</b>
<b>B</b>	<b>Danksagung</b>	<b>XXIX</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

Am ersten Adventswochenende 2005 kam es im Raum Münster in Westfalen zu starken Schneefällen in deren Folge in den Kreisen Steinfurt und Borken 50 Strommasten unter der Schneelast zusammenbrachen (Abb. 1.1). Zwischenzeitlich waren dadurch bis zu 600.000 Menschen von der Stromversorgung abgeschnitten (Bundesnetzagentur, 2006).



Abbildung 1.1: Zusammengebrochene Strommasten im Münsterland nach dem Starkschneefallereignis vom 25./26. November 2005 (Foto ©Münstersche Zeitung, 2005).

## Kapitel 1 Einleitung

---

Wetterereignisse wie dieses fallen in die Kategorie der Extremwetterereignisse und treten in Deutschland nur selten auf. So berechneten Makkonen und Wichura (2010) die Wiederkehrdauer eines Schneelastereignisses für das Münsterland auf etwa 60 Jahre, Deuschländer und Wichura (2005) unterstreichen diesen Zeitraum und gehen von mindestens 50 Jahren aus. Diese Zahlen lassen sich durch regionalklimatische Besonderheiten allerdings nicht auf ganz Deutschland übertragen. So gibt beispielsweise der Untersuchungsbericht der Bundesnetzagentur (2006) eine Übersicht über “Großstörungen durch Eislasten im Hochspannungsnetz“ von 1956-2005: Demnach kam es im südlichen und östlichen Bayern in diesem 50-Jahres-Zeitraum viermal zum Ausfall von jeweils mindestens 40 Hochspannungsmasten. Dalle und Admirat (2011) zeigen anhand der Auflistung aller Ereignisse seit 1980 in Frankreich, dass Schneelastereignisse mit kleineren Schadensmengen vor allem an alten Masten sogar im Abstand von zwei bis drei Jahren auftreten.

Dem Autor liegen dennoch leider keine Forschungsergebnisse vor, welche die Häufigkeit des Auftretens solcher Schneelastereignisse in ganz Deutschland und seinen verschiedenen Regionen darstellen und bewerten. Deshalb ist es Ziel dieser Arbeit, zunächst eine geeignete Methode zu finden, um Schneelastereignisse in Klimamodellen wie dem hier verwendeten regionalen Klimamodell REMO (Regional Model) zu detektieren. Anschließend wird anhand von hochauflösenden (10 km Gitterweite) REMO-Modellläufen die Häufigkeit solcher Ereignisse in Deutschland unter verschiedenen Gesichtspunkten in einem Kontrollzeitraum (1950-2000) und in verschiedenen Szenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001-2100) untersucht.

Die Arbeit gliedert sich wie folgt: In Kapitel 2 werden theoretische Grundlagen zu Schneelast an Stromleitungen vorgestellt, Kapitel 3 beschreibt das Modell REMO sowie verwendete Daten, Kapitel 4 Verfahren zur Detektion und ihre Validierung. In Kapitel 5 wird die Häufigkeit von Schneelastereignissen in Deutschland statistisch anhand von hochauflösenden REMO-Klimaläufen für das 20. und 21. Jahrhundert für verschiedene IPCC-Szenarien ausgewertet, bevor die Arbeit in Kapitel 6 durch eine Zusammenfassung sowie einen Ausblick abgeschlossen wird.

# Kapitel 2

## Grundlagen zu Schneelastereignissen

Erstes Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methode zu finden, um Schneelastereignisse in Klimamodellen zu detektieren. Dazu wird zunächst die Wetterlage des gut dokumentierten Ereignisses im Münsterland am 25./26.11.2005 vorgestellt. Die dabei auffälligen Besonderheiten werden anschließend mit Literaturergebnissen verglichen, um die Bedingungen hervorzustellen, unter denen es zu Schneeablagerungen an Stromleitungen kommen kann.

### 2.1 Wetterlage am 25./26. 11. 2005

Wie in Abbildung 2.1 ersichtlich lag Deutschland am 23. und teilweise noch am 24. November 2005 unter einer ausgedehnten Hochdruckbrücke mit östlicher Anströmung sowie in höhen- und bodenkalter Luft. Am 24.11. begann eine sehr rasche Austrogung über dem Nordatlantik, wodurch Bodentief “Thorsten“ mit feuchten Luftmassen polar-maritimen Ursprungs Richtung Mitteleuropa geführt wurde. Bereits in den Abendstunden des 24.11. setzte im Nordwesten Deutschlands Niederschlag ein, der in der Nacht

---

<sup>1</sup><http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsreaeur.html>, betrachtet am 8.7.2011

# Kapitel 2 Grundlagen zu Schneelastereignissen

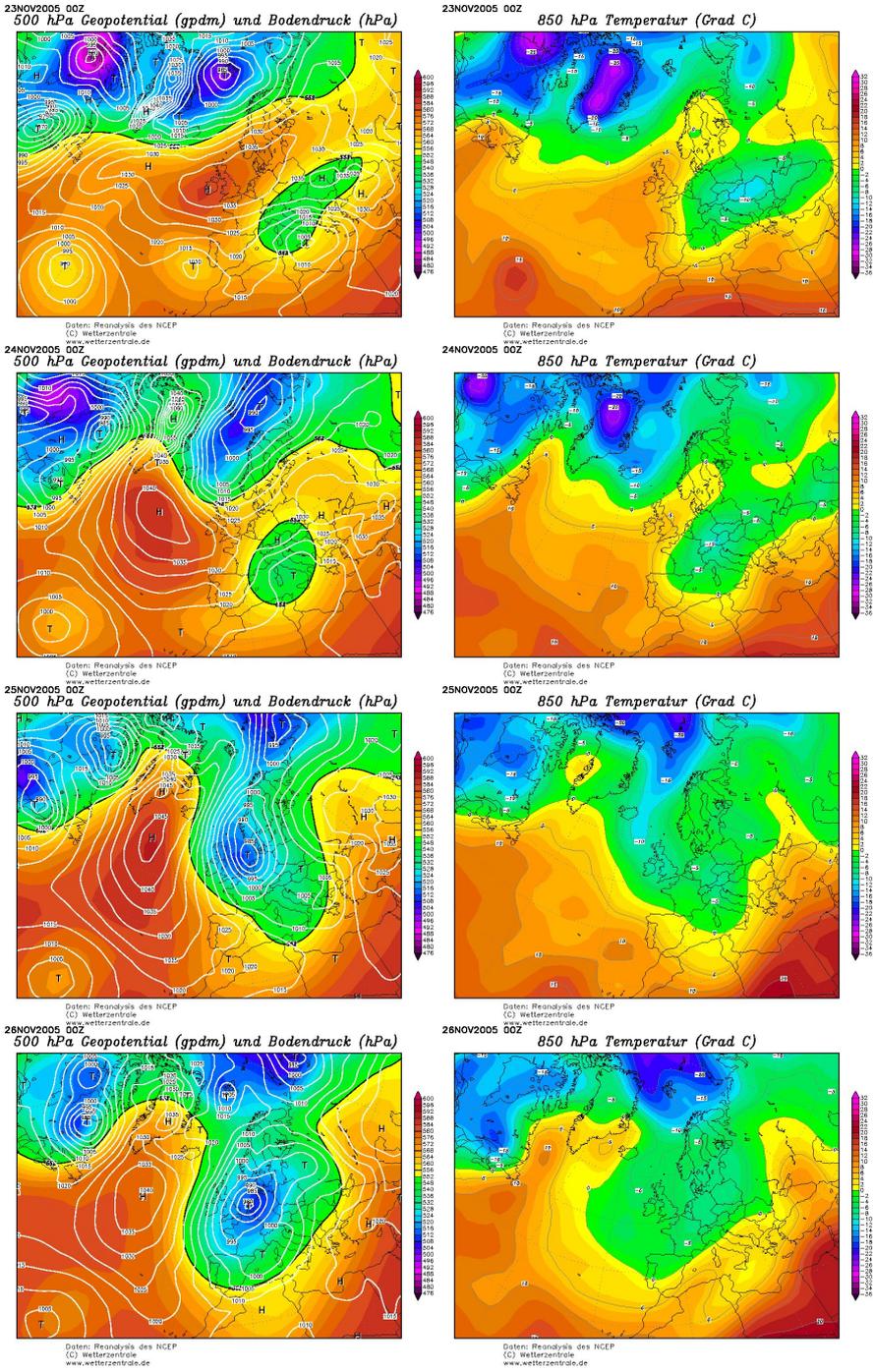


Abbildung 2.1: Entwicklung der Wetterlage vom 23.-27.11.2005. Links: 500hPa-Geopotential und Bodendruck. Rechts: 850hPa-Temperatur.<sup>1</sup>

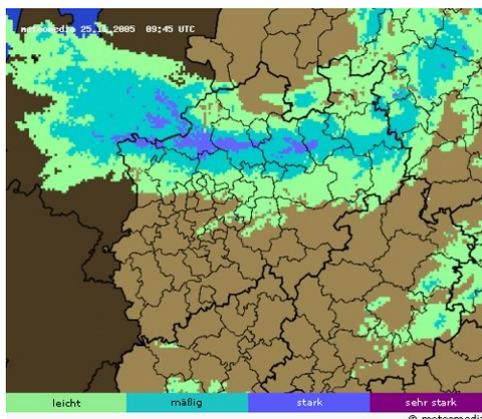


Abbildung 2.2: Niederschlagsradarbild vom 25.11.2005 9.45 Uhr MEZ Nordrhein-Westfalen. <sup>2</sup>

das ganze Land überzog und größtenteils als Schnee fiel.

Am 25.11. hatte der Tiefkern die Grenze zwischen Nordrhein-Westfalen und den Niederlanden erreicht und blieb dort auf Grund der schwachen Höhenströmung nahezu ortsfest bis zum 27.11. Bei Windböen bis Sturmstärke wurde dabei immer wieder feucht-kalte Luft mit teils starken Schneefallgebieten ins Münsterland und nördliche Nordrhein-Westfalen gelenkt (wie beispielhaft im Niederschlagsradar zu sehen - Abb. 2.2). Ähnliche Betrachtungen finden sich auch in Deutschländer und Wichura (2005) und Makkonen und Wichura (2010).

Auf Grund der Jahreszeit und dem polar-maritimen Ursprung der Luftmasse lagen die Temperaturen während des kompletten Zeitraums um den Gefrierpunkt, weshalb der Schnee sehr nass und die Dichte der Schneedecke sehr hoch war. In Bundesnetzagentur (2006) wird davon ausgegangen, dass diese Kombination aus starkem Schneefall, aus Temperaturen um den Gefrierpunkt und aus erheblichen Windböen die Stromleitungen zum Zusammenbruch brachte.

Um diese Annahme zu bekräftigen wird im Folgenden die bekannte Literatur zu Schnee- und Eislasten zusammengetragen.

---

<sup>2</sup><http://www.meteomedia.de/index.php?id=229>, betrachtet am 22.7.2011

### 2.2 Schneelast an Stromleitungen

Schnee- und Eisablagerung an Strukturen kann, insbesondere in Kombination mit mäßigem bis starkem Wind, zu einer deutlichen Belastung der Statik dieser Strukturen führen (Makkonen, 1989). Das bekannteste Beispiel findet sich hierbei in Form von Dachlasten, die in schneereichen Wintern vor allem auf Flachdächer enorme Kräfte entwickeln können. Meistens sind sie jedoch nicht das Resultat eines einzigen starken Schneefallereignisses sondern summieren sich über Tage, Wochen und Monate auf, bis eine kritische Last erreicht ist. Auch kürzere Tauwetterperioden reduzieren die Schneemassen dabei nicht deutlich, sondern können im Gegenteil durch stärkere Komprimierung und eingelagertes Regenwasser die Gesamtlast noch erhöhen. Berechnet werden Dachlasten nach DIN 1055-5 (nachzulesen u.a. in Holschemacher und Klug, 2007). Die vorliegende Arbeit befasst sich allerdings mit Schneelasten an Stromleitungen, die durch einzelne Extremwetterereignisse entstehen.

Aufgrund ihrer Bauweise besonders gefährdet sind dabei Überlandleitungen, weshalb ihre Belastung durch Schnee schon mehrfach im Labor sowie der Natur untersucht wurde (Dalle und Admirat, 2011; Makkonen und Wichura, 2010; Sakamoto, 2000). Im Gegensatz zur trockenen Akkumulation in Form von Eis (Beispiel auf der Webseite des Wettermasts Hamburg <sup>3</sup>), bei der es nur während lang andauernder Dauerfrostperioden mit Reifablagerung zu nennenswerten Lasten kommt, entsteht Schneelast (auch nasse Akkumulation genannt) aus meist einem einzelnen Schneefallereignis. Die Literatur unterscheidet dabei zwischen folgenden Varianten der Schneeablagerung:

- Ablagerung bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes → Trockenschneeablagerung
- Ablagerung bei Temperaturen knapp oberhalb des Gefrierpunktes → Nassschneeablagerung

---

<sup>3</sup><http://wettermast-hamburg.zmaw.de/BesEreigIndex.htm>, Eiswelt 30. Januar 2009

## Kapitel 2 Grundlagen zu Schneelastereignissen

---

Eine dritte Art der Belastung entsteht bei Eisregenereignissen, einem vor allem in Nordamerika weit verbreitetem Phänomen. Dabei fällt Regen in eine bodennahe Inversionsschicht, in der die Temperaturen im negativen Bereich liegen. Die Tropfen gefrieren deshalb bei Kontakt mit der Topographie augenblicklich, wodurch sich bei entsprechend langer Niederschlagsdauer und hoher -intensität ein dicker Eispanzer bilden kann. In Deutschland sind solche Wettersituationen aber eher selten und dauern meist nur kurze Zeit an, bevor die Temperaturen entweder in den positiven Bereich oder der Regen in Schneefall übergehen. Außerdem ist meistens nur der Boden betroffen, da nur dieser gefroren ist, während beispielsweise in 2 Metern Höhe die Temperaturen oberhalb des Gefrierpunkts liegen. Bedingt durch die Orographie des nordamerikanischen Kontinents und die damit verbundenen anderen Großwetterlagen können Eisregenereignisse dort teilweise viele Stunden lang andauern, was extreme Eisummantelungen von bis zu 10 cm nach sich ziehen kann.

Fällt Schnee bei Temperaturen unterhalb von  $0^{\circ}\text{C}$  so unterscheiden sich die Kristallstrukturen deutlich von denen, die bei über  $0^{\circ}\text{C}$  entstehen (Dalle und Admirat, 2011). Entscheidend dabei ist, dass es bei positiven Temperaturen zu teilweisem Schmelzen des Schnees kommt, was bei (in allen Schichten) negativen Temperaturen nicht der Fall ist. Folglich kann zwischen Trockenschnee (keine Wassereinlagerung durch Schmelzprozesse) und Nassschnee (teilweise geschmolzen und entsprechend vorhandene Wassereinlagerungen) unterschieden werden. Im Folgenden werden zunächst die Unterschiede der beiden Schneeablagerungsarten erklärt:

### 2.2.1 Trockenschneeablagerung

Trockenschnee zeichnet sich unter anderem dadurch aus, dass er kein ausgeprägtes Bestreben zeigt, an Strukturen zu haften, weshalb es im Allgemeinen nur bei Windgeschwindigkeiten unterhalb von  $2\text{ m/s}$  überhaupt zu Ablagerungen kommt (Sakamoto, 2000). Abbildung 2.3 stellt den Wachstumsprozess solcher Ablagerungen an Stromleitungen

dar. Zunächst bleibt der Schnee nur an der Oberseite des Kabels haften, mit leichter

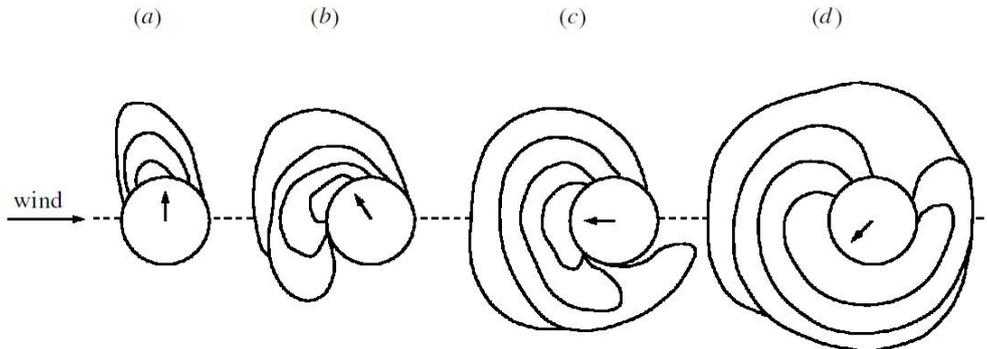


Abbildung 2.3: Schneelagerung an Leitungen unter Trockenschneebedingungen aus Sakamoto (2000), die Pfeile im Kabel zeigen die Neigung des Kabels durch die Schneelast.

Neigung in Richtung des Windes (Abb. 2.3a). Bei weiterer Ablagerung beginnt der bereits liegende Schnee in Luv-Richtung zu kriechen und das Kabel langsam zu umschließen (Abb. 2.3b). Das Kabel selbst wird dabei auch leicht in Richtung des Kriechprozesses verdreht. Dieser Prozess kann sich fortsetzen und schließlich eine zylinderartige Hülle um das Kabel erzeugen (Abb. 2.3c-d).

Häufig kommt es allerdings zu spontanem Abwurf von Teilen dieser Ummantelung, vor allem bei relativ hohen Windgeschwindigkeiten um 1,5 m/s. Doch selbst wenn sich ein solcher Mantel längere Zeit hält steigt die Dichte des Schnees nicht über  $1 \text{ kg/m}^3$  (Sakamoto, 2000), so dass die Trockenschneelagerung selbst bei großen Schneemengen im Allgemeinen keine Gefahr für die Statik von Stromleitungen darstellt.

### 2.2.2 Nassschneelagerung

Anders verhält es sich mit der Ablagerung von Schnee bei Temperaturen oberhalb des Gefrierpunktes. So schätzten Makkonen und Wichura (2010) die Dichte des Schnees an zusammengebrochenen Stromleitungen im Münsterland Ende November 2005 auf bis zu  $300 \text{ kg/m}^3$ . Dieser deutliche Dichteunterschied im Vergleich zu Trockenschnee kommt

## Kapitel 2 Grundlagen zu Schneelastereignissen

---

zum einen durch die beim Schmelzen veränderte Kristallstruktur des Schnees und zum anderen durch die hohe Einschlagsgeschwindigkeit der Schneeflocken zustande. Zu letzterer wiederum kommt es einerseits durch höhere Fallgeschwindigkeiten von Nassschnee und andererseits durch die hohen horizontalen Windgeschwindigkeiten, die beim Ereignis im Münsterland beobachtet wurden.

Abbildungen 2.4 und 2.5 zeigen die Entwicklung der Schneeeummantelungen bei Nassschnee für idealisierte, starre Zylinder (Abb. 2.4) bzw. verdrehte Kabel, die für Überlandstromleitungen eingesetzt werden (Abb. 2.5).

Am Beispiel des starren Zylinders (Abb. 2.4) werden schon in 2.4.1 die deutlich stärkeren Hafteigenschaften von Nassschnee sichtbar, da der Schnee sich direkt auf der Luv-Seite des Zylinders ablagert. In der Folge gleitet der Schnee langsam um den Zylinder (2.4.2 & 2.4.3), bis dieser schließlich ganz umschlossen ist (2.4.4).

Deutlich anders entwickelt sich die Schneeeablagerung an den bei Stromleitungen oft verwendeten verdrehten Kabeln (Abb. 2.5). „Bei einer verdrehten Leitung tauschen die einzelnen Leiter eines Stromkreises entweder in ihrem ganzen Verlauf (bei Kabeln) oder an bestimmten Punkten (bei Freileitungen) ihren Platz zueinander. Durch die Verdrehung wird die gegenseitige Beeinflussung von elektrischen Leitern reduziert. Außerdem wird durch die Verdrehung auch die Unsymmetrie der Leitung, die zu einseitigen Belastungen in Drehstromsystemen führen können, verringert“ (Wikipedia, 2011). Hier lässt sich ein deutliches Maximum der Schneelast in der Mitte des Abstandes zwischen zwei Strommasten feststellen, wo das Kabel dem stärksten Drehmoment unterliegt. Betrachtet man nämlich die Entwicklung der Schneeeablagerungen so erkennt man, dass der Schneemantel um das Stromkabel kaum durch Gleiten zustande kommt sondern fast vollständig durch Verdrehen des Kabels. Zunächst beginnt die Ablagerung ebenfalls an der Luv-Seite (Abb. 2.5.1). Durch das sich ansammelnde Gewicht beginnt das Kabel dann allerdings langsam in diese Richtung zu kippen, wodurch der schon haftende Schnee langsam in Richtung Unterseite verlagert wird und neuer Schnee an Stellen haften bleibt, die zuvor noch schneefrei waren (Abb. 2.5.2). Dieser Vorgang setzt sich fort, das Kabel wird um mehr

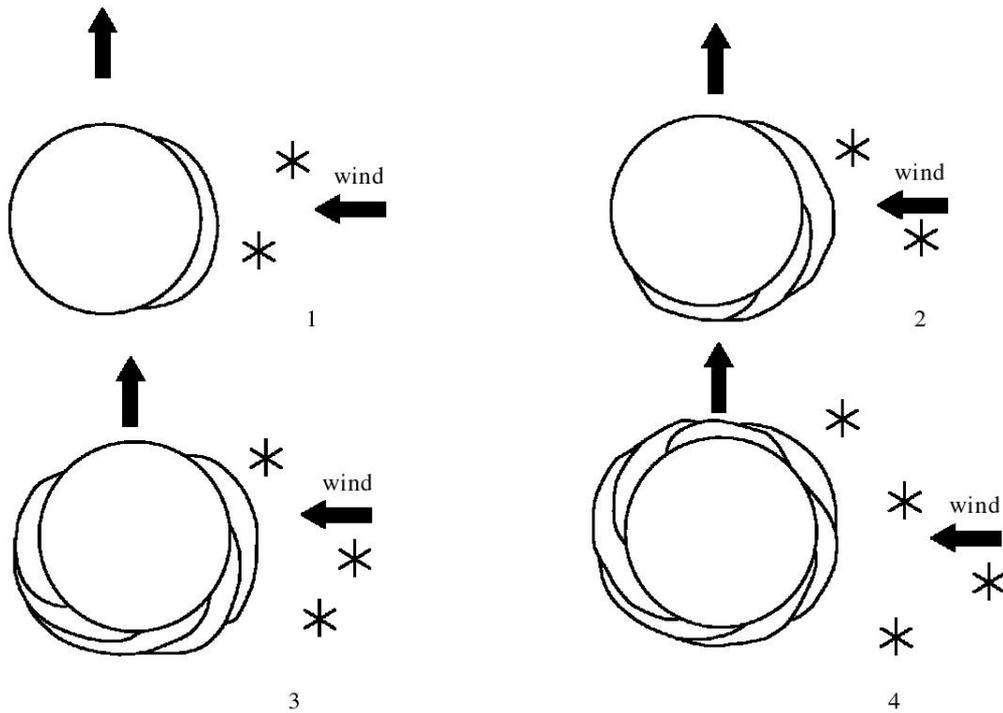


Abbildung 2.4: Schneeeablagerung an einem idealisierten starren Zylinder unter Nassschneebedingungen aus Sakamoto (2000) nach Shoda (1953), die nach oben gerichteten Pfeile zeigen an, dass der starre Zylinder durch die Schneelast nicht verdreht wird.

als  $180^\circ$  verdreht, bis schließlich die schon bekannte Ummantelung entstanden ist (Abb. 2.5.3 & 2.5.4). Nahe bei den Masten ist das Kabel allerdings zu starr eingefasst, um so weit zu verdrehen, dass eine vollständige Ummantelung möglich ist.

Extremwerte des Durchmessers dieser Ummantelung werden für das Münsterlandereignis mit ca. 15 cm angegeben (Makkonen und Wichura, 2010). Dalle und Admirat (2011) beschreiben Ereignisse, bei denen Durchmesser von bis zu 20-30 cm erreicht wurden.

### Ursprung der Erkenntnisse

Um die vorgestellten Erkenntnisse zu Trocken- und vor allem Nassschneeablagerung zu gewinnen, wurden Feld- und Labordaten gewonnen, außerdem eine große Zahl verschie-

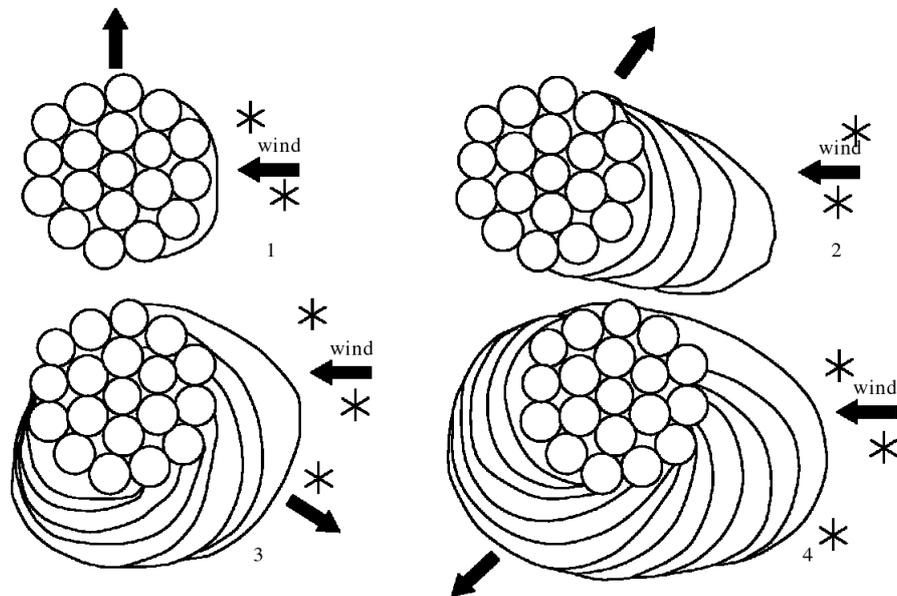


Abbildung 2.5: Schneeeablagerung an einem verseilten Kabel unter Nassschneebedingungen aus Sakamoto (2000) nach Admirat und Sakamoto (1988), die Pfeile zeigen wieder die Verdrehung des Kabels unter Schneelast.

denster Modelle entwickelt.

Vor allem in Japan wurde mit der Erforschung von Schneelasten bereits in den 50er Jahren begonnen. So errichtete Shoda (1953) eine Testleitung, um Naturmessungen zu gewinnen. Auf seinen Arbeiten basiert auch das Wissen um Schneeeablagerung auf starren Zylindern (Abb. 2.4). In den 80er Jahren wurden diese Feldmessungen durch Windkanalmessungen ergänzt (Abb. 2.6). Sakamoto u. a. (1986, 1988) konnten unter Laborbedingungen sowohl die Ergebnisse von Shoda (1953) reproduzieren als auch die in der Praxis eingesetzten verdrehten Kabel untersuchen. Dabei wurde einerseits die Wichtigkeit des Drehmoments der Leitungen gezeigt, da an festen Kabeln (wie die Bedingungen nahe an Strommasten oft gegeben sind) nur Schneelast an der Luv-Seite entstand, welche durch Gravitation in ihrem Gewicht limitiert sind. Andererseits konnte bei flexiblen Kabeln mit hohem Drehmoment (wie z.B. in der Mitte zwischen zwei Strommasten) die oben beschriebene Mantelbildung beobachtet werden, wobei die Dichte des haftenden Schnees

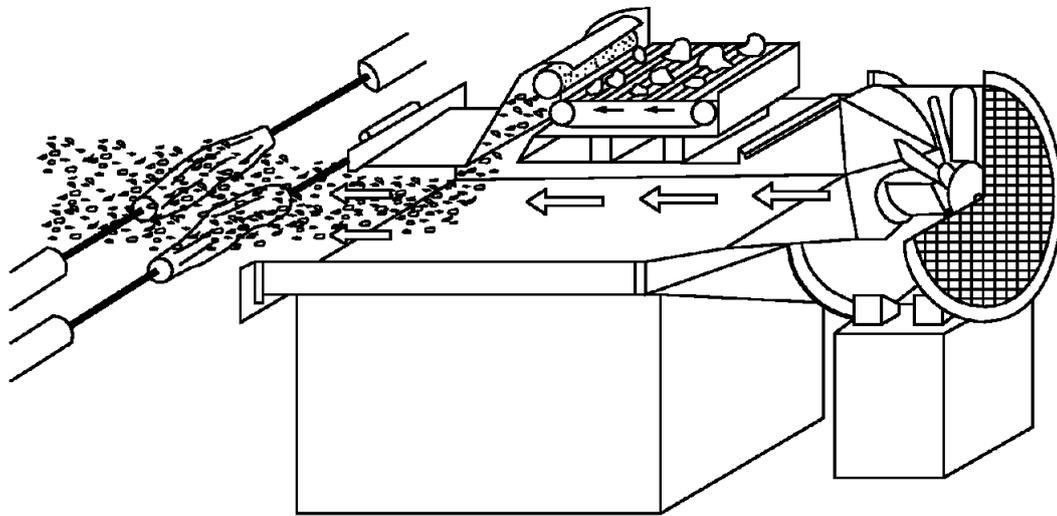


Abbildung 2.6: Windkanalaufbau für die Darstellung von Nassschneeablagerung an Leitungen unter kontrollierten atmosphärischen Bedingungen; aus Sakamoto (2000).

mit zunehmender Windgeschwindigkeit von  $100 \text{ kg/m}^3$  bei  $3 \text{ m/s}$  auf bis zu  $500 \text{ kg/m}^3$  bei  $15 \text{ m/s}$  anstieg. An Testleitungen in Frankreich fand Admirat (2008) Dichtewerte zwischen  $90 \text{ kg/m}^3$  und  $300 \text{ kg/m}^3$ . Die geringeren Werte in der Natur sind vermutlich auf den nur eingeschränkten Untersuchungszeitraum (1985-1988) zurückzuführen, zeigen aber, wie groß selbst unter nicht idealen Bedingungen die Belastung von Leitungen werden kann.

Während vor diesen Ergebnissen in den 50er und 60er Jahren noch große Uneinigkeit darüber herrschte, ob starker Wind die Schneemengen an Stromleitungen erhöht oder reduziert, konnte Bauer (1973) anhand Beobachtung zweier Ereignisse in Saskatchewan, Kanada zeigen, dass starke Schäden an Stromleitungen bei Nassschneefall auch unter Einwirkung hoher Windgeschwindigkeiten entstehen können. Auch Sakamoto (2000) stellte diesen Zusammenhang anhand eines Ereignisses in Japan im März 1986 fest, bei dem es zu schweren Schäden an Stromleitungen kam und dessen meteorologische Bedingungen

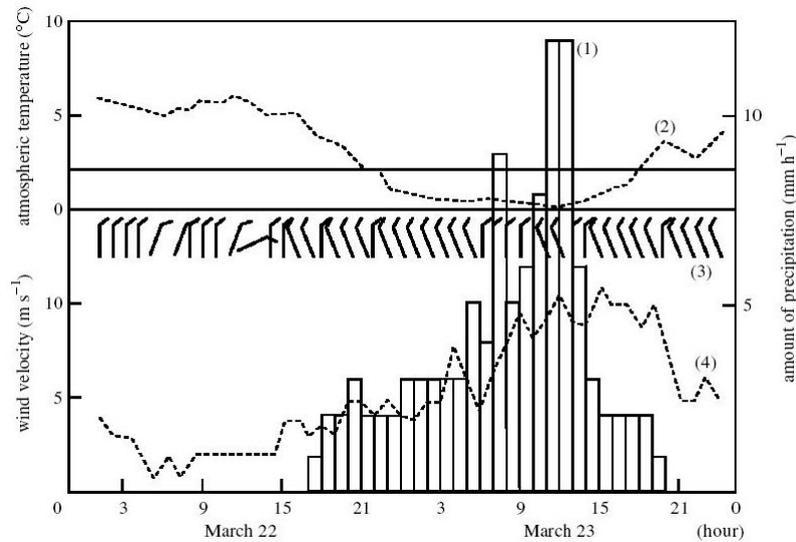


Abbildung 2.7: Wetterbedingungen während eines Schneelastereignisses in Japan, März 1986; aus Sakamoto (2000)

durch eine Station ganz in der Nähe aufgezeichnet wurden (Abb. 2.7). Dabei stechen neben den enormen Niederschlagsmengen (teilweise mehr als 12 mm/h) auch die Temperatur knapp über dem Gefrierpunkt und die relativ hohen Windgeschwindigkeiten um 10 m/s ins Auge - diese Bedingungen ähneln sehr dem Münsterlandereignis.

Neben der Erfassung von Feld- und Labordaten wurde eine Reihe einfacher Modelle entwickelt, um die entstandene Schneelast in Abhängigkeit von verschiedenen Randbedingungen zu parametrisieren. So entwickelte Sakamoto (2000) mithilfe der Windkanalergebnisse eine Reihe empirischer Formeln, um sowohl die Hafteffizienz des Schnees in Abhängigkeit von Temperatur, Windgeschwindigkeit und Schneefallrate als auch die Dichte (und damit die Gesamtmasse) zu berechnen.

Makkonen und Wichura (2010) orientierten sich bei ihrem einfachen Modell zur Berechnung von Dichte und Masse der Schneelast an Naturmessungen und dem damit verbundenen Problem, den Schneefall korrekt zu erfassen. Durch Abschätzen der Schneefallrate anhand der Sichtweite war es möglich, die im Münsterland gemessenen Schneedichten zufriedenstellend wiederzugeben.

## Kapitel 2 Grundlagen zu Schneelastereignissen

---

Weitere Ansätze finden sich beispielsweise in Dalle und Admirat (2011), Poots (1996) und Shao u. a. (2003).

Folgende für diese Arbeit relevante Fakten lassen sich aus diesem Kapitel herausfiltern:

- Trockenschneefallereignisse können für die vorliegende Fragestellung ignoriert werden, da die entstehenden Ablagerungen nur eine geringe Dichte aufweisen und durch ihre geringe Hafteffizienz rasch wieder abfallen.
- Nassschneefallereignisse treten bei Temperaturen knapp über dem Gefrierpunkt auf, zeichnen sich durch eine hohe Hafteffizienz aus und können sehr große Durchmesser und Dichten der Schneeablagerungen hervorrufen.
- Die Dichte der Schneeablagerung ist bei starken Winden am höchsten und damit potentiell am gefährlichsten für Strom- und andere Überlandleitungen.
- Zwar existieren gegenläufige Meinungen darüber ob die erhöhte Dichte den Effekt des verstärkten Abwurfs von Schneelasten durch Windeinfluss ausgleicht oder sogar übertrumpfen kann. Allerdings treten die größten Schäden meist bei einer Kombination von starkem Nassschneefall und mittleren bis hohen Windgeschwindigkeiten auf (Bauer, 1973; Deutschländer und Wichura, 2005; Sakamoto, 2000).

# Kapitel 3

## Modell- und Datenbeschreibung

### 3.1 Das Regionale Klimamodell REMO

#### 3.1.1 Allgemeines

REMO ist ein dreidimensionales, hydrostatisches, regionales Klimamodell und wurde im Rahmen des Baltic Sea Experiment (BALTEX) entwickelt (Jacob, 2001; Jacob u. a., 2001). Der dynamische Kern basiert auf dem ehemaligen operationellen Europäischen Wettervorhersagemodell (EM) des deutschen Wetterdienstes (Majewski u. a., 1995), die Parametrisierung der physikalischen Prozesse auf den ECHAM4- und teilweise ECHAM5-Parametrisierungen (Roeckner u. a., 1996, 2003). Als prognostische Variablen werden verwendet:

- Bodendruck
- Temperatur
- horizontale Windkomponenten
- spezifische Feuchte

## Kapitel 3 Modell- und Datenbeschreibung

---

- Wolkenwassergehalt
- Wolkeneisgehalt (seit REMO 6.0)

REMO-Daten werden bei einem auflösungsabhängigen Zeitschritt (bei den verwendeten 10 km-Läufen beispielsweise 30 Sekunden) als Stundenwerte ausgegeben. Die horizontale Diskretisierung erfolgt auf einem Arakawa-C-Gitter, in dem alle Variablenwerte (außer den Windkomponenten, die in der Mitte der Boxränder berechnet werden) für das Zentrum der jeweiligen Gitterbox gültig sind. Die Gitterboxzentren wiederum sind auf einem rotierten sphärischen System mit einheitlichem Gradzahl-Abstand in x- und y-Richtung definiert (je nach gewählter horizontaler Auflösung z. B.  $0.5^\circ$ ,  $0.22^\circ$  oder  $0.088^\circ$ ). Die Rotation des Gitters sorgt dafür dass der Äquator des Gitters durch die Mitte des Modellgebiets verläuft, wodurch es nur zu einer geringen Meridiankonvergenz kommt, was die Lösung der numerischen Gleichungen verbessert.

In der vertikalen Dimension wird ein hybrides Koordinatensystem verwendet: In Bodennähe folgen die Modellflächen der Orographie, mit zunehmender Höhe werden sie dann immer unabhängiger von selbiger und gleichen sich konstanten Druckflächen an. Abbildung 3.1 zeigt drei Beispiele für die Lage der verschiedenen Modelllevel für Bodendruckwerte von 980 hPa, 1010 hPa und 1040 hPa. Gut zu erkennen ist auch die bodennah höhere vertikale Auflösung mit 4 bis 5 Modellflächen in den untersten 100 hPa, während in den höheren Schichten der Abstand zwischen zwei Flächen auf 50 bis 70 hPa ansteigt.

REMO kann je nach Situation mit Reanalysedaten oder Globalmodelldaten (meistens ECHAM5) angetrieben werden, wobei diese einmal zur Initialisierung des Modells und später als Randwerte verwendet werden. Dieses sogenannte Nesting wird angelehnt an das Verfahren von Davies (1976) durchgeführt. Dazu werden bei der Initialisierung die prognostischen Variablen auf allen Modellleveln vorgegeben und der Lauf gestartet. Alle 6 Stunden erfolgt an den Randboxen des Modellgebietes sogenanntes Nudging, wobei die von REMO berechneten Variablen mit denen des antreibenden Modells zum glei-

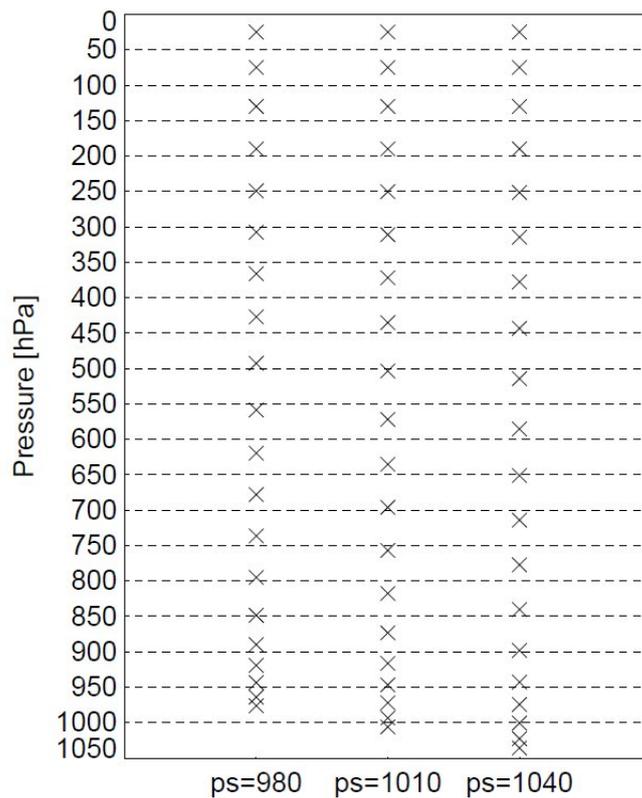


Abbildung 3.1: Höhe der Modellevel im p-Koordinatensystem für hybride Koordinatensysteme mit Werten des Oberflächendruckes von 980hPa, 1010hPa und 1040hPa. Die Kreuze stellen die Zentren des jeweiligen Modelllevels dar; aus Pfeifer (2007)

chen Zeitpunkt gewichtet gemittelt werden. Dabei ist der Einfluss des Antriebs auf die äußerste Reihe des Gitters am größten und fällt bis zur achten Gitterreihe von außen exponentiell ab. Um Sprungstellen alle 6 Stunden zu vermeiden erfolgt auch zwischen- durch Nudging, wobei die Antriebswerte zwischen zwei Zeitpunkten linear interpoliert werden.

### 3.1.2 Schneefall in REMO

Da Niederschlag im Allgemeinen und Schneefall im Speziellen eine wichtige Rolle in dieser Arbeit spielen werden im Folgenden die Bildung von Niederschlag und Schneefall in REMO skizzenhaft vorgestellt. Eine ausführlichere Beschreibung der Niederschlags- und Wolkenbildung lässt sich in Pfeifer (2007) nachlesen.

Schneefall wird in REMO als diagnostische Variable ausgegeben und setzt sich aus einem konvektiven sowie einem stratiformen Anteil zusammen. Als diagnostische Variable enthält die Berechnungsformel des Schneefalls keine zeitliche sondern nur räumliche Ableitungen, er kann also erst abgeleitet werden, wenn sämtliche prognostischen Variablen für den jeweiligen Zeitschritt bereits berechnet wurden. Im Rahmen dieser Arbeit kamen Daten aus verschiedenen REMO-Versionen mit teilweise unterschiedlichen Niederschlagsschemata zum Einsatz, weshalb diese im Folgenden vorgestellt werden.

#### Schneefall in REMO vor Version REMO2008

In den im Rahmen des UBA-Projekts entstandenen REMO-Läufen wurde die Modellversion 5.7 benutzt, welche das Wolken- und Niederschlagsschema des ECHAM4-Modells (Roeckner u. a., 1996) verwendet. Darin wird der konvektive Schneefall anhand einer einfachen Temperaturgrenze aus dem konvektiven Niederschlag extrahiert während für den stratiformen Anteil eine separate Berechnung durchgeführt wird.

## Kapitel 3 Modell- und Datenbeschreibung

---

Da es sich bei Cumulus-Konvektion um ein kleinskaliges Phänomen handelt, welches von Klimamodellen im Allgemeinen nicht aufgelöst werden kann, muss sie parametrisiert werden. Dazu wird für jede Gitterbox anhand der vorherrschenden Bedingungen separat berechnet, ob diese Konvektion zulassen und wenn ja, welcher Art (pro Gitterbox kann nur ein Wolkentyp existieren - flache, mittelhohe oder hochreichende Konvektion). Zunächst wird ein Bulk-Modell verwendet, das Gleichungssysteme für Updraft (aufwärtsgerichteter Massenfluss)- und Downdraft (abwärtsgerichteter Massenfluss)-Regionen enthält. Diese Gleichungen sind für die drei angenommenen Konvektionstypen gleich, weisen aber je nach Typ unterschiedliche, vorgegebene Eigenschaften auf (Massenfluss an der Wolkenbasis, Entrainment- und Detrainmentraten). Entrainment (Einmischen von Umgebungsluft in die Wolke) und Detrainment (Einmischung von Wolkenluft in die Umgebung) werden in ihren turbulenten und organisierten Teil aufgespalten. Je nach Konvektionstyp erfolgt ihre Berechnung bei organisiertem De-/Entrainment mit unterschiedlichen Ansätzen bzw. beim turbulentem De-/Entrainment mit unterschiedlichen Parametern. Anschließend wird noch eine dynamische (flache und mittelhohe Konvektion) bzw. eine Adjustment-Schließung (hochreichende Konvektion) für die drei Konvektionstypen verwendet, um den für die Wolkenbildung benötigten vertikalen Massenfluss in Abhängigkeit von Feuchtegehalt bzw. -konvergenz zu bestimmen. Aus den Gleichungen für die Downdraft-Regionen ergibt sich letztlich der modellierte, konvektive Niederschlag. Überschreitet die Temperatur inner- und unterhalb der Niederschlag produzierenden Wolke an keiner Stelle  $2^{\circ}\text{C}$ , wird der Niederschlag als Schneefall ausgegeben. Wird die kritische Grenze von  $2^{\circ}\text{C}$  hingegen überschritten fällt er als Regen und hat keinen Einfluss auf die Variable Schneefall. Die so gebildeten Wolken und der eventuell vorhandene Niederschlag sorgen für eine Neuberechnung von Feuchte- und Temperaturprofilen. Separat vom Konvektionsschema erfolgt die Berechnung des skaligen Niederschlags bzw. Schneefalls, die anhand der atmosphärischen Profile von Feuchte und Temperatur erfolgt und in drei Schritten geschieht:

1. Zunächst werden die prognostischen Gleichungen für Wasserdampf, Wolkenwasser

## Kapitel 3 Modell- und Datenbeschreibung

---

und Eis mit einem Ansatz für fraktionelle Wolkenbedeckung gelöst (Sundqvist, 1978; Sundqvist u. a., 1989), wobei anhand eines höhenabhängigen Schwellwertes für die relative Feuchte bestimmt wird, ob es bei einer im Mittel ungesättigten Gitterbox dennoch zu kleinräumiger Wolkenbildung kommt.

2. Anschließend wird der bereits berechnete Wolkenwassergehalt in eine flüssige und eine Eisphase aufgespalten.
3. Daraus wiederum wird nun mit der höchsten Wolkenschicht beginnend jeweils die Umwandlungsrate von Wolkenwasser in Regentropfen bzw. der Verlust von Eiskristallen durch Sedimentation (Schneefall) berechnet

Nach Durchlauf aller Modellschichten (verbunden mit eventuellen Schmelz- oder Gefrierprozessen) kommen am Modellboden schließlich Regen bzw. Schnee an und werden in den jeweiligen Variablen “Skaliger Niederschlag“ und “Schneefall“ gespeichert.

### Schneefall in REMO ab Version REMO2008

Neben den UBA-Läufen wurden für diese Arbeit auch Läufe aus den Klimzug- und Klimawasprojekten verwendet, die mit REMO2008 bzw. REMO2009adv gerechnet wurden. Darin wurde ein anderes Niederschlagsschema verwendet, welches in der ECHAM5-Dokumentation (Roeckner u. a., 2003) im Detail beschrieben wird. In den Grundzügen orientiert sich das Schema an der bereits beschriebenen Struktur älterer REMO-Versionen, mit allerdings einigen Änderungen für skalige Wolken:

- Wolkeneis wird nicht mehr diagnostisch aus dem Wolkenwassergehalt berechnet sondern als prognostische Variable ausgegeben. Dies erlaubt Interaktionen zwischen Wolkenwasser und Wolkeneis, die abhängig vom vorherrschenden Temperaturbereich in verschiedenen Schmelz- und Gefrierprozessen zum Ausdruck kommen.
- Ein neues Autoconversion-Schema wird verwendet, welches die Autoconversion-Rate bei geringem Wolkenwassergehalt reduziert, bei hohem dagegen erhöht.

- Die prognostische Berechnung des Wolkeneises zieht einige Folgeberechnungen nach sich, welche die bereits angesprochenen Interaktionen zwischen Wolkenwasser, Wolkeneis, Regentropfen sowie Schneeflocken simulieren. Gesamtschneefall und Niederschlag werden dadurch reduziert, außerdem das Verhältnis zwischen skaligem und konvektivem Niederschlag zu Gunsten des konvektiven Niederschlags verschoben.

Auch im Konvektionsschema kommt es zu Änderungen:

- Ein vierter Konvektionstyp wird eingeführt: Die kalte Konvektion, die sich an der hochreichenden Konvektion orientiert aber für die Modellierung flacher Konvektionstypen mit teilweise starkem Schneefall entwickelt wurde, die bei Kaltluftausbrüchen auf offenes Wasser beobachtet werden.

### 3.2 Verwendete Daten

Im Rahmen der Arbeit wurden 17 verschiedene REMO-Läufe verwendet, die in Tabelle 3.1 zusammengefasst werden.

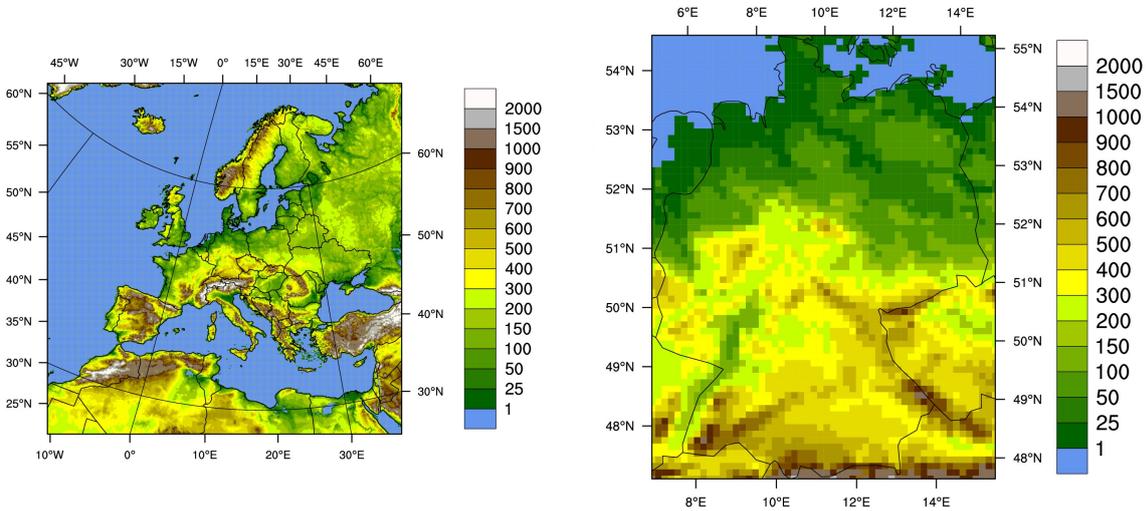
Für die Validierung der in Kapitel 4 vorgestellten Verfahren zur Detektion von Schneelastereignissen in Klimamodelldaten wurden REMO-Daten aus dem CORDEX-Experiment (COordinated Regional climate Downscaling Experiment) verwendet, die mit dem ERA-Interim Reanalyse Datensatz des ECMWF angetrieben wurden (Simmons u. a., 2007). Der Datensatz wurde für Europa auf einem horizontalen 11km-Gitter berechnet und umfasst den Zeitraum von 1989-2008. Für die vorliegende Arbeit wurde allerdings nur ein Ausschnitt verwendet, der Deutschland und einige nahe Gitterboxen umfasst. Durch den Antrieb des Laufes mit Reanalysedaten können zur Validierung Ereignisse wie das Münsterlandereignis betrachtet werden, bei denen die tatsächlich vorherrschenden Bedingungen sehr gut untersucht sind. Dieser Lauf wird im weiteren Verlauf der Arbeit als Validierungslauf bezeichnet.

## Kapitel 3 Modell- und Datenbeschreibung

---

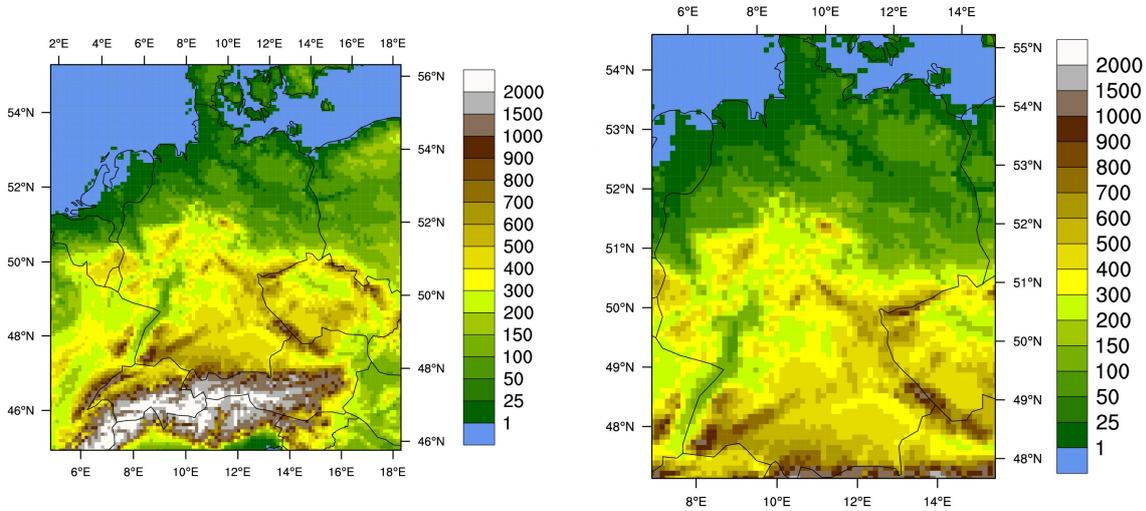
Für die in Kapitel 5 beschriebene statistische Auswertung wurden hochauflösende (10 km-Auflösung) Daten für Deutschland aus dem UBA-Projekt “Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland (Jacob u. a., 2008)“ verwendet, die mithilfe einer Doppelnestung aus ECHAM5-Globalmodelldaten über den Zwischenschritt eines REMO-Laufes mit 50km-Auflösung gewonnen wurden. Diese umfassen einerseits die drei Ensemblemitglieder des Kontrollzeitraums (alle Läufe in Tabelle 3.1 für den Zeitraum 1950-2000), wobei C20-2 und C20-3 jeweils einmal mit REMO2008 und REMO2009adv gerechnet wurden. Außerdem kamen jeweils drei Mitglieder der IPCC-Szenarien A1B, B1 und A2 (alle Läufe in Tabelle 3.1 für den Zeitraum 2001-2100) zum Einsatz, wobei hier das A1B-2-Szenario je einmal mit REMO5.7 und REMO2008 gerechnet wurde. Die Doppelrechnungen erlauben den Vergleich der verschiedenen REMO-Versionen und sollen zeigen, wie sensibel das Auftreten von Extremereignissen selbst auf kleine Änderungen des Modell-Setups reagiert. Die Verwendung mehrerer Ensemblemember verbessert generell die Ergebnisse statistischer Auswertungen, da die Datengesamtheit erhöht wird. Abbildung 3.2 zeigt links die beiden Gesamtmodellgebiete sowie rechts den jeweils verwendeten Ausschnitt. Die Orographie der verwendeten Ausschnitte zeigt eine große Ähnlichkeit auch wenn sich einzelne Details wegen der leicht unterschiedlichen Gitterweite von ca. 11 und 10 Kilometern unterscheiden.

Beobachtungsdaten wurden nur zum Vergleich herangezogen und beispielsweise Makonnen und Wichura (2010) entnommen.



(a) CORDEX-Europa

(b) CORDEX-Europa, Ausschnitt Deutschland



(c) UBA

(d) UBA, Ausschnitt Deutschland

Abbildung 3.2: a) Modellorographie des Cordex-Laufs Gesamtmodellgebiet, b) für die Arbeit verwendeter Ausschnitt; c) Modellorographie des UBA-Laufes Gesamtmodellgebiet, d) für die Arbeit verwendeter Ausschnitt

Tabelle 3.1: Übersicht aller verwendeten REMO-Läufe

<b>Name</b>	<b>exp-id</b>	<b>Domain</b>	<b>Auflösung</b>	<b>Zeit</b>	<b>REMO-Version</b>
Cordex-Europa	001524	Europa	11km	1989-2008	REMO2009adv
C20-1 UBA	006215	UBA	10km	1950-2000	REMO5.7
A1B-1 UBA	006221	UBA	10km	2001-2100	REMO5.7
B1-1 UBA	006222	UBA	10km	2001-2100	REMO5.7
A2-1 UBA	006226	UBA	10km	2001-2100	REMO5.7
C20-2 BfG	029001	UBA	10km	1950-2000	REMO5.7
A1B-2 BfG	029002	UBA	10km	2001-2100	REMO5.7
C20-2 Klimzug	001516	UBA	10km	1950-2000	REMO2008
A1B-2 Klimzug	001516	UBA	10km	2001-2100	REMO2008
C20-3 Klimzug	001518	UBA	10km	1950-2000	REMO2008
A1B-3 Klimzug	001518	UBA	10km	2001-2100	REMO2008
C20-2 (wie 516)	001532	UBA	10km	1950-2000	REMO2009adv
C20-3 (wie 518)	001533	UBA	10km	1950-2000	REMO2009adv
B1-2 Klimzug	001527	UBA	10km	2001-2100	REMO2009adv
B1-3 Klimzug	001528	UBA	10km	2001-2100	REMO2009adv
A2-3 Klimzug	001530	UBA	10km	2001-2100	REMO2009adv
A2-3 Kliwas	004061	UBA	10km	2009-2100	REMO2009adv

# Kapitel 4

## Methodenentwicklung

Den Erkenntnissen aus Kapitel 2 folgend werden in diesem Kapitel zunächst zwei Methoden vorgestellt, mit denen Schneelastereignisse in Klimamodelldaten detektiert werden können. Diese werden am Beispiel des Münsterlandereignisses getestet. Aus der Literatur lassen sich (vergleiche Kapitel 2) folgende Kriterien für Schneelastereignisse herausfiltern:

- Temperaturen nahe am Gefrierpunkt
- starker Schneefall
- mäßiger bis starker Wind
- ein Andauern dieser Verhältnisse über mehrere Stunden oder sogar Tage

Dazu wurden zwei Methoden entwickelt:

1. Eine an die ISO-Norm ISO12494 (2001) angelehnte Methode, welche sich auf Schneefall und die sogenannte Feuchttemperatur (Definition in 4.1) stützt.
2. Eine auf unterschiedlicher Gewichtung von Temperatur, Schneefall und Wind basierende Methode (im Folgenden als “3-Variablen-Methode“ bezeichnet).

Für beide Methoden wurden Programme geschrieben, welche aus den jeweiligen horizontalen Variablenfeldern Felder mit Schneelastindizes erzeugen. Diese Schneelastindizes sind für beide Methoden verschieden und werden im Folgenden jeweils erklärt.

### 4.1 ISO-Norm-Methode

#### 4.1.1 Theorie

Bei der ISO-Norm-Methode werden zur Berechnung eines Schneelastindizes die Feuchttemperatur sowie die Schneefallrate herangezogen. Aus der im Folgenden beschriebenen Kombination der beiden Variablen entsteht ein Schneelastindex, der zwischen null (Wahrscheinlichkeit von Schneelasten gering) und eins (Wahrscheinlichkeit von Schneelasten hoch) unterscheidet.

**Feuchttemperatur 1** *Die Feuchttemperatur (engl. wet-bulb temperature) bezeichnet die Temperatur, bis zu der eine Luftmasse durch Verdunstung von Flüssigkeit abgekühlt werden kann und stellt damit in Kombination mit der Lufttemperatur ein Feuchtemaß dar.*

Die Feuchttemperatur muss dabei laut ISO12494 (2001) knapp über  $0^{\circ}\text{C}$  liegen, während es zu starkem Schneefall kommt. Darauf aufbauend wurden folgende Grenzwerte für die Berechnung des Schneelastparameters aufgestellt:

- $-0.5^{\circ}\text{C} \leq T_{wb} \leq 1.5^{\circ}\text{C}$
- $pp_{snow} \geq 5 \text{ mm/6h}$

Fallen also die Werte für Feuchttemperatur  $T_{wb}$  und Schneefallrate  $pp_{snow}$  in den obigen Bereich wird für beide Variablen ein Wert zwischen 0 (keine Schneelastgefahr unter diesen Bedingungen) und 1 (Bedingungen für Schneelast ideal) ausgegeben. Den Ideen

## Kapitel 4 Methodenentwicklung

---

der Fuzzy-Logik (siehe Abschnitt 4.1.2) folgend wird diese Unterscheidung nicht binär (0 oder 1), sondern linear durchgeführt. Für die Feuchttemperatur wird das Optimum von 1 bei  $T_{wbt} = 0.5^\circ\text{C}$  erreicht, zu den oben angegebenen Randwerten von  $-0.5^\circ$  und  $1.5^\circ$  fällt es linear auf 0 ab. Beim Schneefall wird ab  $pp_{snow} > 5 \text{ mm}/6\text{h}$  ein positiver Wert vergeben, der linear bis auf 1 ansteigt, was bei  $pp_{snow} \geq 10 \text{ mm}/6\text{h}$  erreicht wird. Anschließend werden beide Werte miteinander multipliziert, wodurch ein Wert zwischen 0 und 1 ausgegeben wird, der nur an solchen Zeitschritten größer 0 ist, bei denen beide Kriterien erfüllt sind. Um letztendlich die Ereignisse herauszufiltern, die tatsächlich als extrem zu bezeichnen sind (und die der Theorie folgend eine Feuchttemperatur von möglichst genau  $0.5^\circ$  sowie Schneefallraten von größer  $10 \text{ mm}/6\text{h}$  aufweisen), wird nun noch ein Grenzwert für die Fuzzywahrscheinlichkeit gesetzt, oberhalb derer ein Schneelastereignis markiert wird. Diese Grenze wurde für die vorliegende Arbeit testweise mit 0.7, 0.8 und 0.9 gewählt.

### 4.1.2 Fuzzy-Logik

Fuzzylogik (von englisch fuzzy - verschwommen, also “verschwommene Logik“) ist eine vor allem in der Regelungstechnik beliebte Methode, welche mit dem Ziel entwickelt wurde, umgangssprachlich gebräuchliche Begriffe wie *ziemlich*, *weniger*, *sehr* in mathematischen Modellen darzustellen. Möchte man zum Beispiel aus einem Wasserhahn mit Einhebelmischer *relativ warmes* Wasser gewinnen, wird ein Gemisch aus XX % warmem und YY % kaltem Wasser verwendet, ein mathematisches Modell würde also beispielsweise mit einem relativen Anteil von 0.4 an kaltem und 0.6 an warmem Wasser rechnen. Bei einer Änderung des Gemisches zu *sehr warmem* Wasser würden sich diese Anteile im Modell zum Beispiel in Richtung 0.1 kalt und 0.9 warm verschieben.

Angewandt auf ein meteorologisches Phänomen wie die hier behandelte Schneelast, ließe sich der in Kapitel 4 genauer beschriebene Prozess kurz wie folgt darstellen: Die in die

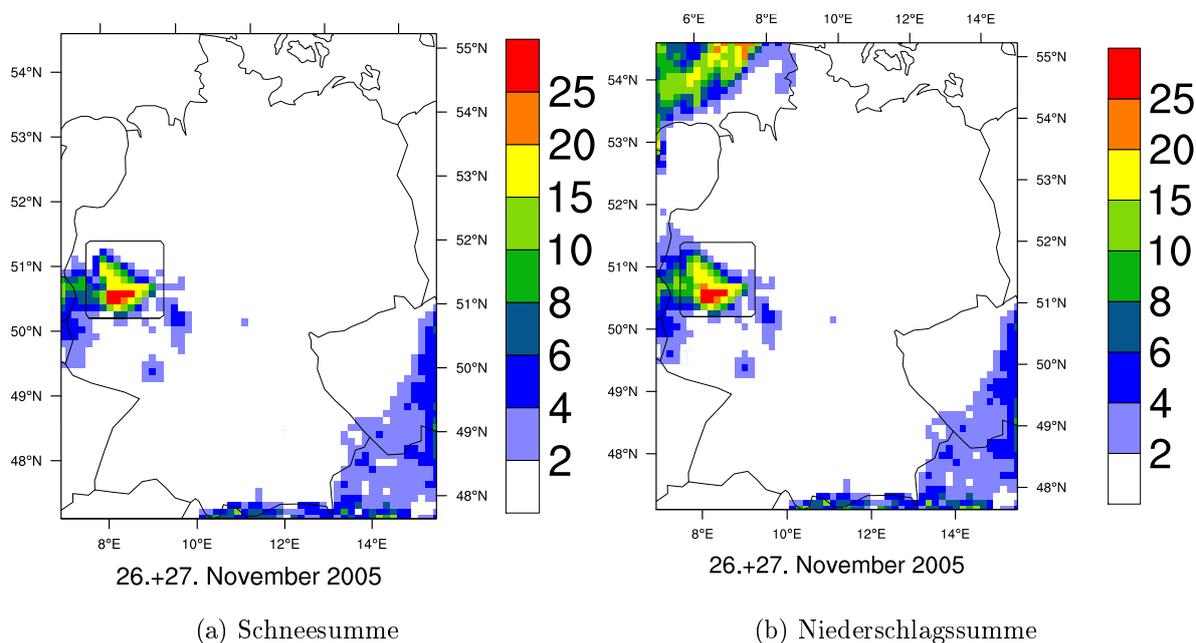


Abbildung 4.1: Schnee- (a) und Niederschlagssumme (b) während des Münsterlanderignisses in mm Schneefall bzw. Niederschlag (26.11.2005 12 Uhr - 27.11.2005 12 Uhr); simuliert durch den REMO Validierungslauf 001524.

Berechnung der Schneelast eingehenden Variablen können - bezogen auf das Risiko, dass sie in einen Wertebereich fallen, der Schneelast möglich macht - statt mit 1 (Risiko) und 0 (kein Risiko) mit einem Gemisch aus XX % Risiko und YY % kein Risiko beschrieben werden. X und Y passen sich dann entsprechend an, je nachdem, ob die sich ändernde Variable in einen risikoreicheren oder -ärmeren Bereich fällt.

Eine ausführlichere Abhandlung der Fuzzy-Logik findet sich beispielsweise in Michels u. a. (2002).

### 4.1.3 Methodentest

Vom 26. auf den 27. November 2005 kam es während des in Kapitel 1 und 2 vorgestellten Schneelastereignisses im Münsterland dem Validierungslauf zufolge zu den stärksten

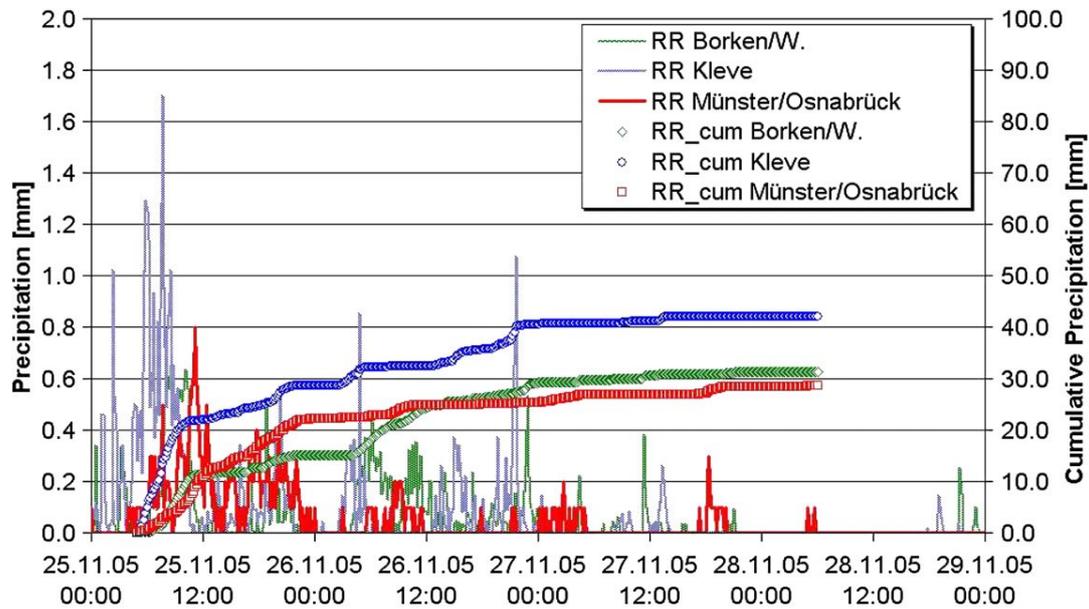


Abbildung 4.2: Messdaten für den Niederschlag an drei Wetterstationen im Münsterland vom 25. bis 28. November 2005. Aus Makkonen und Wichura (2010).

Schneeablagerungen; die Gesamtsumme des (simulierten) Schneefalls im dargestellten Zeitraum zeigt Abbildung 4.1a. In Abbildung 4.1b ist zum Vergleich der vom Modell simulierte Gesamtniederschlag dargestellt. Es fällt auf, dass der komplette Niederschlag während des Ereignisses in der betrachteten Region in Form von Schneefall fiel.

Dieser Zeitraum stimmt allerdings nicht mit Beobachtungsdaten der Wetterstation Münster/Osnabrück überein (Abbildung 4.2). Zwar wurde am 26. und 27. November von den Stationen noch Niederschlag (Wetterstationen unterscheiden nicht zwischen Schnee und Regen) aufgezeichnet, allerdings deutlich weniger als am Nachmittag des 25.11., also 36 Stunden zuvor. Dieser deutlich stärkere Schneefall wurde vom Modelllauf so nicht simuliert. Zwar zieht im Modell am Vormittag des 25.11. ein Schneefallgebiet von Nordwest nach Südwest über Deutschland hinweg, allerdings sind die Schneefallraten deutlich geringer als die beobachteten.

Um einen Grund für diese Abweichungen zu finden wurde die vom Modell simulierte Druckverteilung auf Meeressniveau über Europa vom 24. bis 27. November betrachtet

## Kapitel 4 Methodenentwicklung

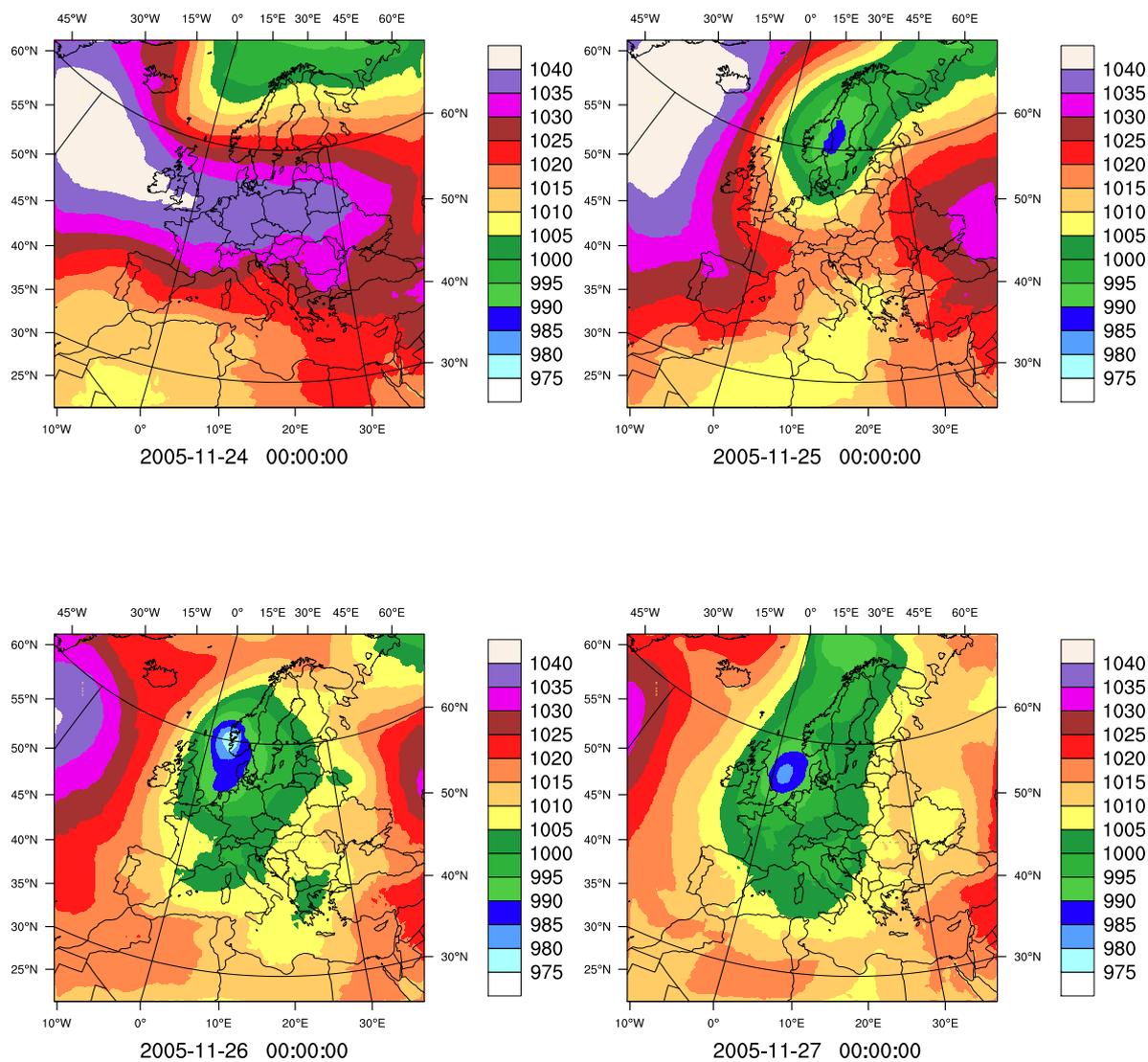


Abbildung 4.3: Entwicklung des Bodendruckfeldes in Europa (in hPa) während des Münsterlandereignisses (ab 24.11.2005 00 Uhr) im Abstand von 24 Stunden; simuliert durch den REMO Validierungslauf 001524.

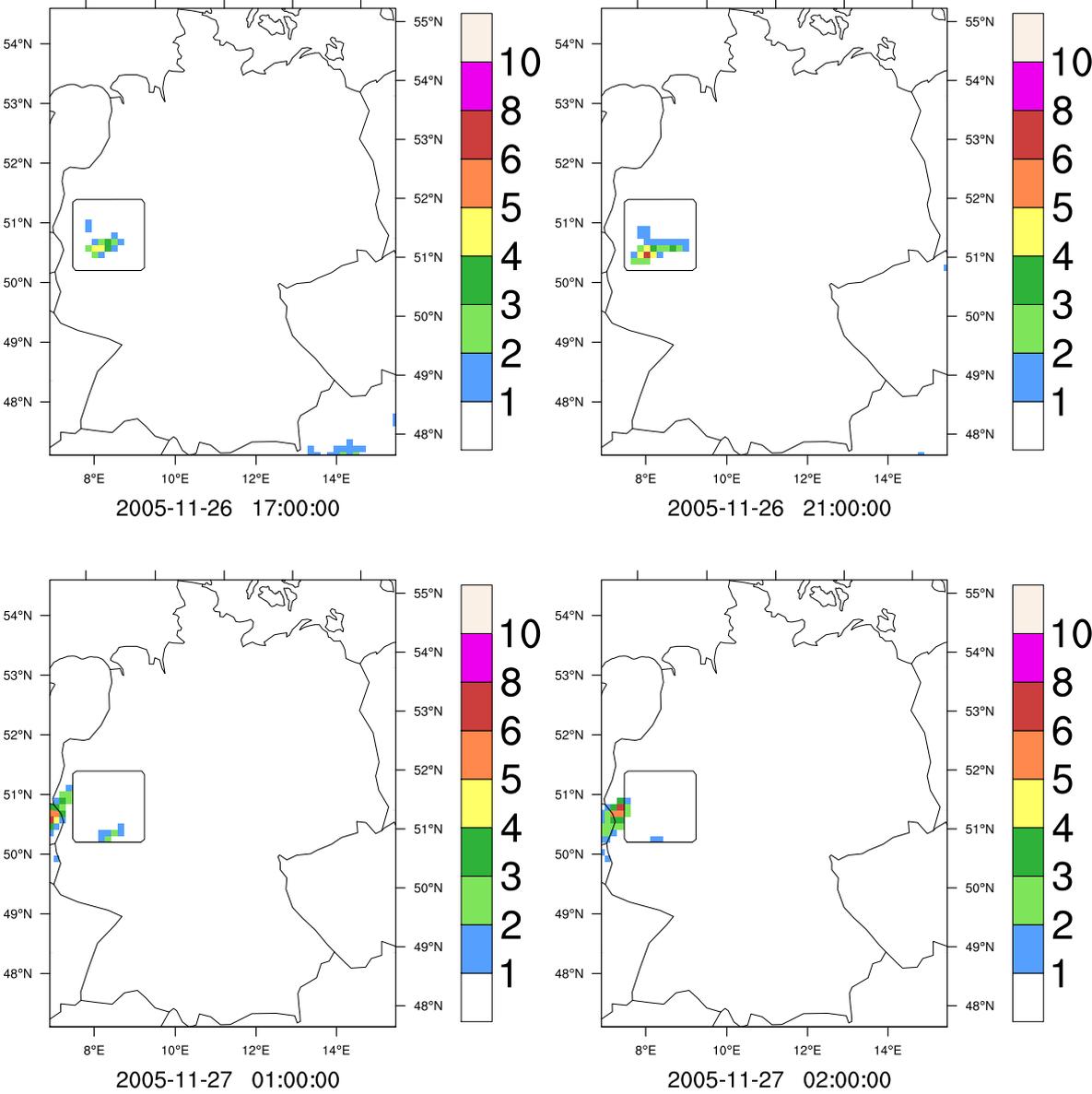


Abbildung 4.4: Entwicklung der Schneefallintensität in Deutschland (in mm/6h) während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr), ausgewählte Zeitpunkte. Stündliche Abfolge im Anhang; simuliert durch den REMO Validierungslauf 001524.

## Kapitel 4 Methodenentwicklung

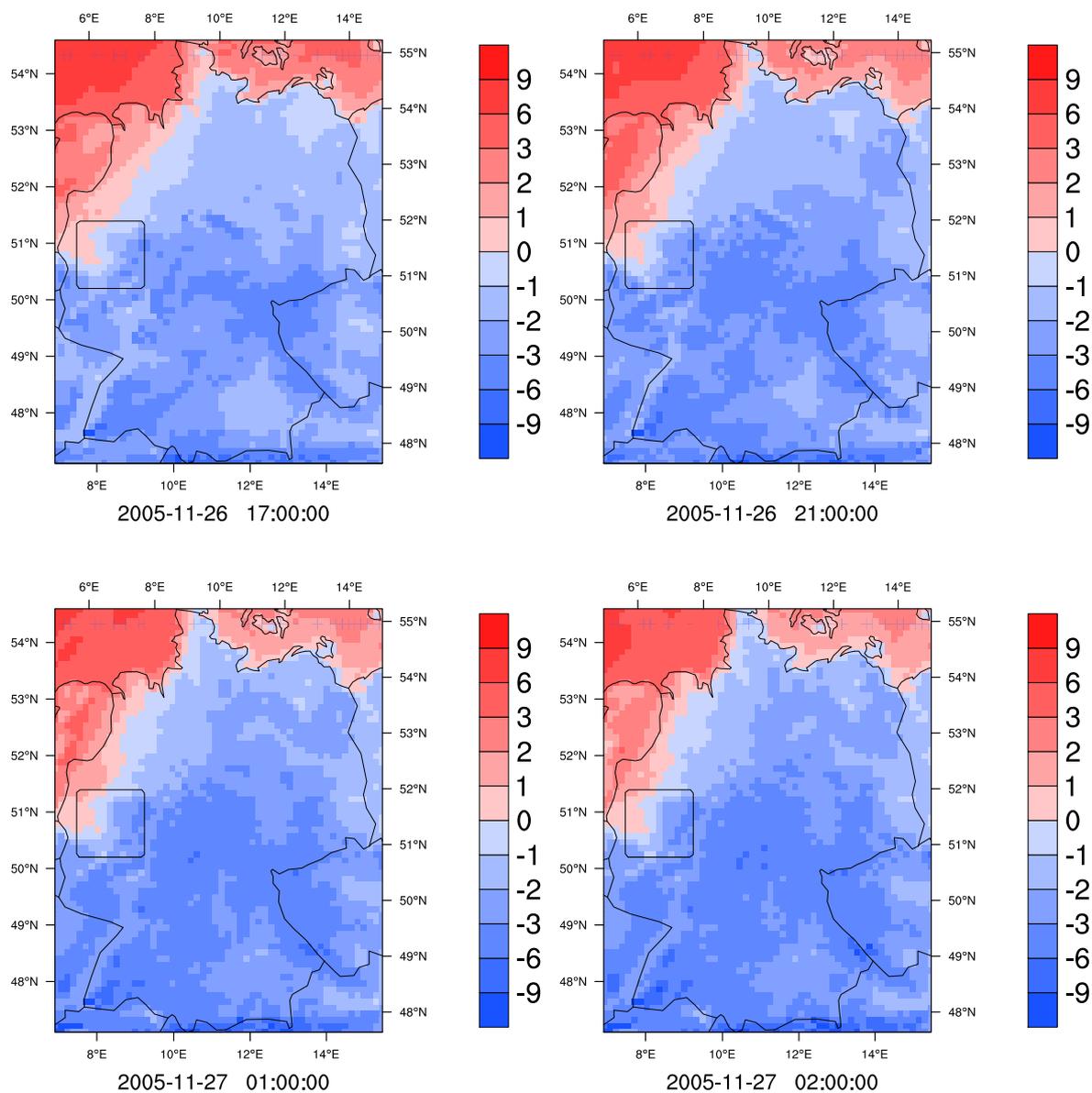


Abbildung 4.5: Entwicklung der Feuchttemperatur in Deutschland (in °C) während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr), ausgewählte Zeitpunkte. Stündliche Abfolge im Anhang; simuliert durch den REMO Validierungslauf 001524.

## Kapitel 4 Methodenentwicklung

---

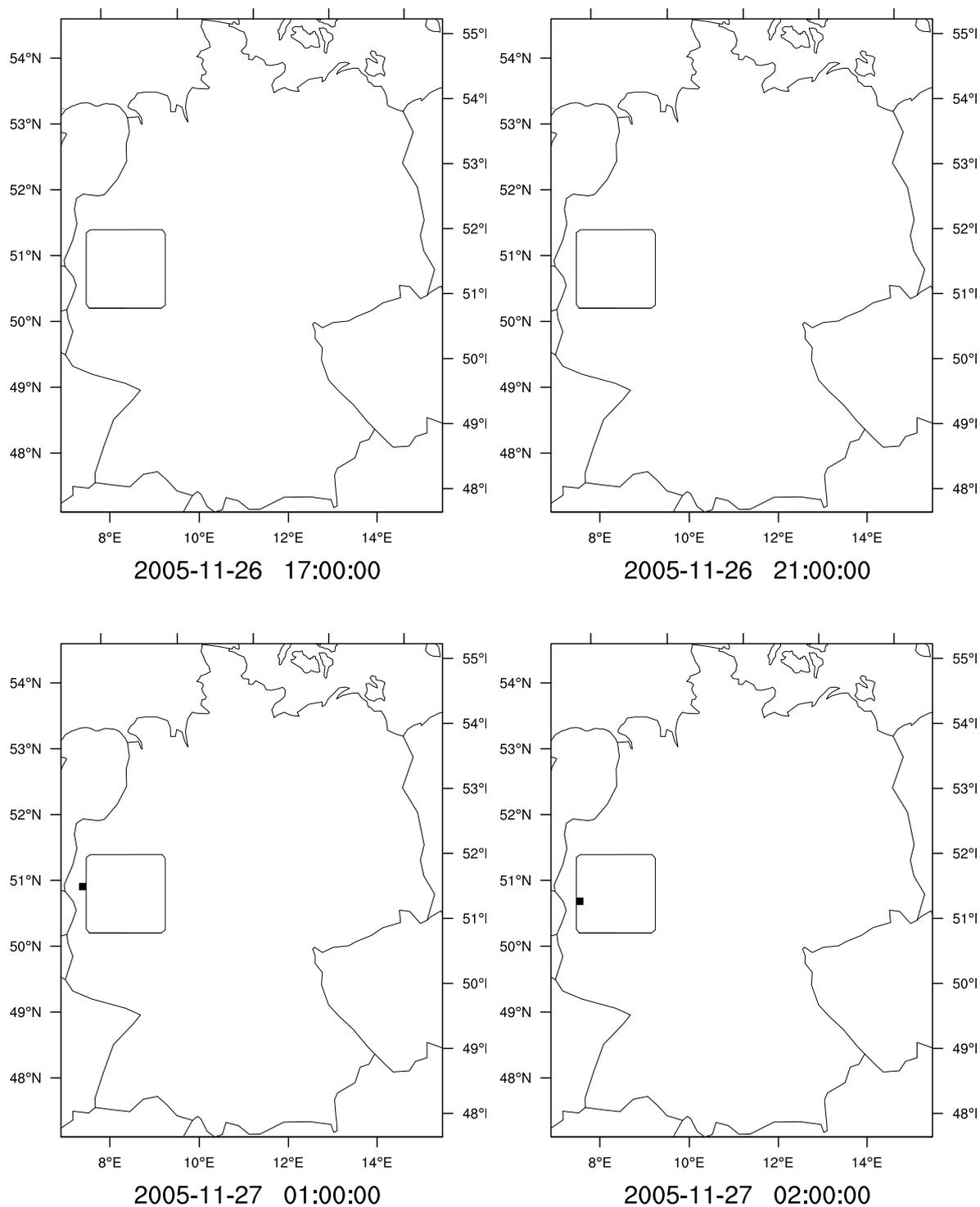


Abbildung 4.6: Entwicklung der Schneelast in Deutschland nach der ISO-Methode mit Grenzwert 0,9 während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr), ausgewählte Zeitpunkte. Stündliche Abfolge im Anhang. Schwarz markierte Gitterboxen zeigen simulierte Schneelast; simuliert durch den REMO Validierungslauf 001524.

## Kapitel 4 Methodenentwicklung

---

(Abbildung 4.3). Diese weicht auffällig von der Realität (Abbildung 2.1) ab. So setzt im Modell die Austrognung über dem Nordmeer deutlich später ein, am 25.11. um Mitternacht lag Tief Thorsten schon über den Niederlanden, während der Tiefkern vom Modell noch über Skandinavien simuliert wird und auch im weiteren Verlauf liegt der Tiefkern nicht über Nordwestdeutschland sondern der Nordsee. Diese Abweichungen des Validierungslaufs liegen an der Art, wie er gerechnet wird. Die Initialisierung wird zwar im gesamten Modellgebiet auf Basis von Beobachtungsdaten durchgeführt, anschließend erfolgt das Nesting aber nur noch am Modellrand. Dadurch bildet sich im Modell eine der Realität zwar sehr ähnliche aber doch leicht unterschiedliche Wetterlage aus, was die räumliche und zeitliche Verschiebung der Druckgebilde und damit des Gebiets starken Schneefalls erklären könnte.

Auf Grund dieser Unterschiede zwischen vorhandenem Modelldatensatz und der Realität hat die Untersuchung der hier vorgestellten Methoden auf ihre Reproduktionsfähigkeit des Münsterlandereignisses nur begrenzte Aussagekraft. Dennoch wird im Folgenden versucht, die Vor- und Nachteile beider Methoden herauszuarbeiten.

In allen Abbildungen ist durch einen schwarzen Rahmen die Region eingegrenzt, in der das Ereignis (gut erkennbar z.B. am Schneefall in Abb. 4.1) vom Modell simuliert wird. Das Münsterland liegt jedoch etwa 100km in Richtung Nord-Nordost. Diese räumliche Abweichung ist auf die bereits angesprochenen Abweichungen des Validierungslaufs von der Realität zurückzuführen. So zeigt Abbildung 4.4 ein stundenlang stationär über Nordrhein-Westfalen liegendes Schneeband (hier aus Gründen der Übersichtlichkeit nur vier Zeitpunkte dargestellt, übrige Zeitpunkte im Anhang), in einer Modellregion, die auch ungefähr an der  $0^{\circ}\text{C}$ -Grenze der Feuchttemperatur (Abb. 4.5) liegt. Dass der komplette Niederschlag im Gebiet als Schnee fiel und nicht von einem Bereich mit Regen umgeben war zeigt, dass diese Verschiebung vermutlich nicht durch Fehler der Modellphysik hinsichtlich Schneefallbildung zu Stande kam.

Aus Abbildung 4.6 geht allerdings hervor, dass die vorgestellte Methode nur zu zwei Zeitpunkten (27.11.2005 um 1:00 und 2:00 Uhr) ein Schneelastereignis detektiert und

auch dann nur an jeweils einer Gitterbox. Diese Ergebnisse verwenden dabei eine Grenze von 0.9 (Erklärung siehe Abschnitt 4.1.1), doch auch deutlich niedrigere Grenzwerte von 0.7 oder 0.8 erhöhen die Anzahl der detektierten Gitterpunkte nur wenig. Bei genauerer Betrachtung lässt sich der Grund für diese geringe Detektionsrate darin finden, dass die Bereiche starken Schneefalls fast durchgängig in Gitterboxen fallen, die Feuchttemperaturen von unter  $0^{\circ}\text{C}$ , oft sogar unter  $-1^{\circ}\text{C}$  aufweisen und damit vom Modell als kaum geeignet für Schneelast angesehen werden.

Dieses Ergebnis zeigt eine elementare Schwäche der ISO-Norm-Methode auf, die Schneelast nur bei (leicht) positiven Feuchttemperaturen zulässt. Zwar ließe sich diese Einschränkung im verwendeten Modell ohne weiteres umgehen, indem der Detektionsbereich auch auf leicht negative Werte ausgedehnt würde. Dies widerspräche allerdings den Vorgaben der ISO-Norm ISO12494 (2001), weshalb darauf in dieser Arbeit verzichtet wurde. Allerdings sind diese Ergebnisse ein Signal, dass darüber nachgedacht werden sollte, die ISO-Norm entsprechend anzupassen.

## 4.2 3-Variablen-Methode

### 4.2.1 Theorie

Die 3-Variablen-Methode verwendet zur Berechnung der Schneelast neben Schneefall die 2m-Temperatur und die 10m-Windgeschwindigkeit. Basierend auf den in Kapitel 2 gewonnenen Erkenntnissen wurden dabei folgende Bereiche gewählt, innerhalb derer die Kriterien für Schneelast erfüllt sind:

- $-2^{\circ}\text{C} \leq T_{2m} \leq 2^{\circ}\text{C}$
- $pp_{snow} \geq 5 \text{ mm/6h}$
- $u_{10m} \geq 5 \text{ m/s}$

## Kapitel 4 Methodenentwicklung

---

Darauf aufbauend entsteht ein Schneelastindex, der von null bis sieben reicht und einerseits die Gitterboxen des Modellgebiets markiert, in denen die Bedingungen für die Ausbildung von Schneelasten ideal sind. Andererseits sollte es damit auch möglich sein, Gitterboxen zu erkennen, in denen die Bedingungen nur leicht von den idealen abweichen. In solchen Fällen könnten sich die Bedingungen nämlich schnell dahingehend ändern, dass es doch zur Schneelastentwicklung kommt.

Fallen die Variablen in die angegebenen Wertebereiche, wird der Schneelastindex erhöht. Auch hierbei kommt die Fuzzy-Logik zur Anwendung, indem Variablen, die nur knapp in den Wertebereich fallen, den Index deutlich weniger erhöhen als solche, die nahe am Optimum liegen. Der Einfluss der 3 Variablen wird aufaddiert, nachdem unterschiedliche Wichtungsfaktoren zum Einsatz kamen: So wird der Index durch Schneefall um 0 bis 4 erhöht, durch den Temperaturbereich um 0 bis 2 und durch die Windgeschwindigkeit um 0 bis 1. Diese unterschiedliche Wichtung wurde wegen der unterschiedlichen Bedeutung der drei Variablen gewählt. Starker Schneefall ist demnach die entscheidendste Voraussetzung, der passende Temperaturbereich ebenfalls sehr wichtig, während starker Wind zwar eine wichtige aber nicht entscheidende Rolle spielt (vergleiche hierzu auch die Ergebnisse aus der Literatur). Liegen also alle drei Variablen im Optimum (also  $pp_{snow} \geq 10 \text{ mm/6h}$ ,  $T_{2m} = 0^\circ$  und  $u_{10m} \geq 10 \text{ m/s}$ ) wird ein Maximalwert der Schneelast von 7 erreicht. Durch den Einfluss der Fuzzylogik ist dies allerdings selten der Fall, doch schon Werte des Schneelastindex zwischen 6 und 7 deuten darauf hin, dass die meteorologischen Bedingungen die Ausbildung von Schneelasten zulassen.

Diese Methode unterscheidet also nicht einfach zwischen Regionen mit und ohne Gefahr auf sich entwickelnde Schneelasten, sondern stellt durch die Addition des Einflusses der drei Variablen eine lineare Entwicklung dieser Gefahr dar. So werden zwar auch Gitterboxen mit Werten  $< 4$  markiert, in denen Schneelast quasi auszuschließen ist. Diese Gitterboxen liegen jedoch möglicherweise in direkter Nachbarschaft zu solchen mit Werten  $> 6$  (und damit hoher Wahrscheinlichkeit für Schneelasten) und würden bei nur geringen Änderungen ihrer Wetterbedingungen ebenfalls in den "gefährdeten" Bereich

fallen. Solche Änderungen kommen möglicherweise auch durch Modellunsicherheiten zustande, was von einer binär unterscheidenden Methode nicht erfasst würde. Ein Beispiel dafür findet sich in der folgenden Validierung der Methode.

### 4.2.2 Methodentest

Abbildungen 4.4, 4.7, 4.8 und 4.9 zeigen wie in Abschnitt 4.1 die zeitliche Entwicklung der 3 Variablen sowie der Schneelast während des Münsterlandereignisses. Anders als bei der ISO-Methode zeigen die Schneelastkarten auch Bereiche an, in denen nur einzelne Kriterien erfüllt sind. So fallen beispielsweise große Teile Norddeutschlands in den Bereich des Schneelastindizes zwischen 2 und 3, da dort Temperatur- und Windbereich mäßig bis gut erfüllt sind. Mittel- und Süddeutschland sind größtenteils zu kalt und windarm, so dass nur im Raum München eine Region im Indexbereich zwischen 1 und 2 markiert wird.

Deutlich ins Auge fällt die bereits bei der ISO-Norm angesprochene markierte Region auf Höhe des mittleren Rheinlands, wo sowohl starker Schneefall als auch ein durchweg hoher Schneelastindex um 6 simuliert werden. Da in dieser Region auch mäßiger Wind sowie Temperaturen um den Gefrierpunkt auftreten, sind die Bedingungen für sich entwickelnde Schneelast gut bis sehr gut erfüllt. Da der Schneelastindex in dieser Region über den kompletten Zeitraum hinweg hohe Werte aufweist, ist das Auftreten großer Schneelasten wie beim Münsterlandereignis hier sehr wahrscheinlich. Zwar liegt die Region des simulierten Ereignisses wie schon angesprochen ca. 100 km südwestlich des Münsterlandes, was sich durch die bereits angesprochene räumliche und zeitliche Verschiebung der Modellwetterlage im Vergleich zur Realität bei der Verwendung des Validierungslaufs erklären lässt. Entscheidend ist jedoch, dass die vorgestellte Methode sehr gut und anschaulich auf die Kombination der drei Variablen Schneefall, Temperatur und Windgeschwindigkeit reagiert und ein Schneelastereignis detektiert.

Die Temperatur- und Schneelastverteilung zeigen weiterhin, dass das beschriebene Er-

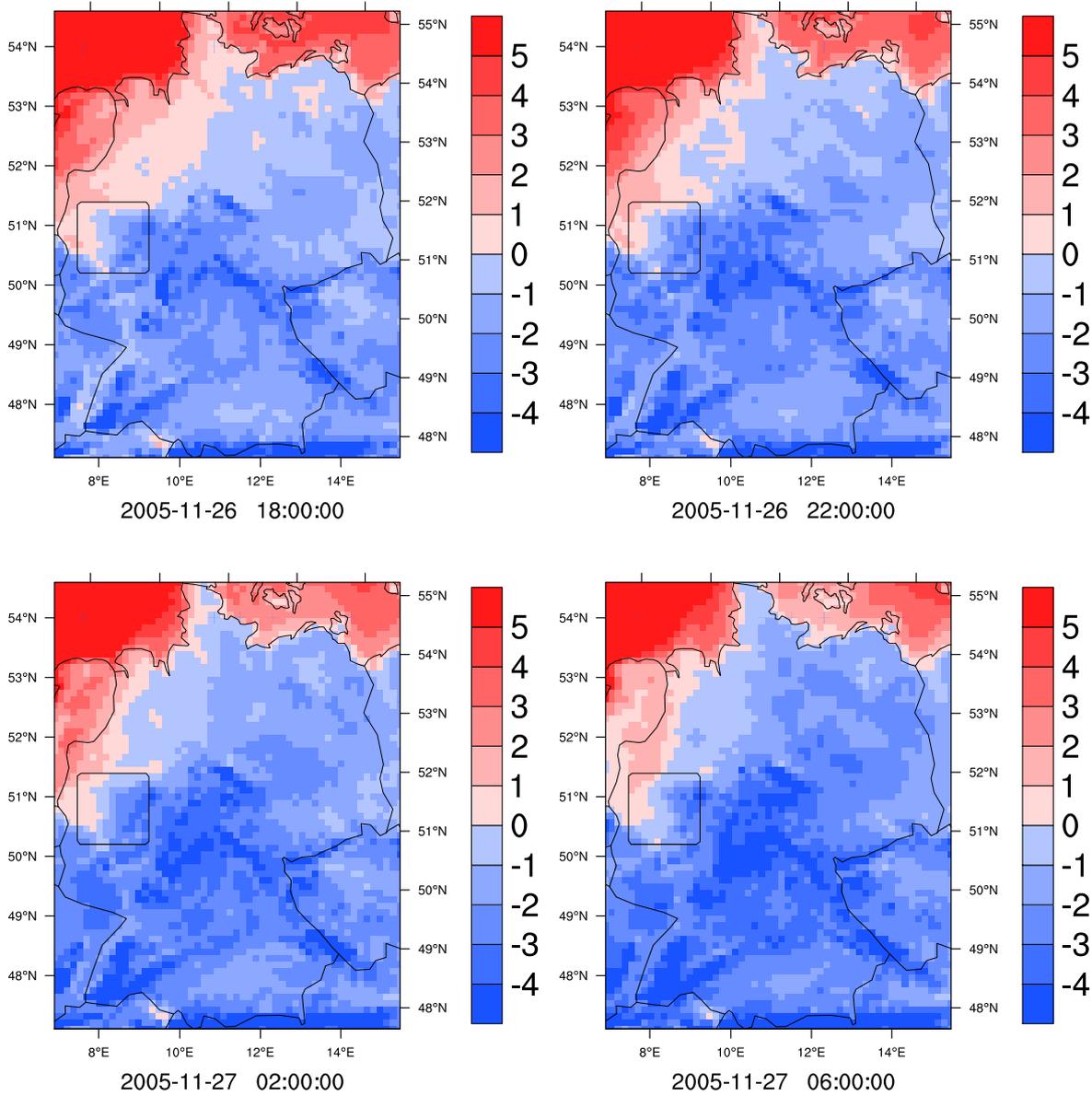


Abbildung 4.7: Entwicklung der 2m-Temperatur (in °C) in Deutschland während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr), ausgewählte Zeitpunkte. Stündliche Abfolge im Anhang; simuliert durch den REMO Validierungslauf 001524.

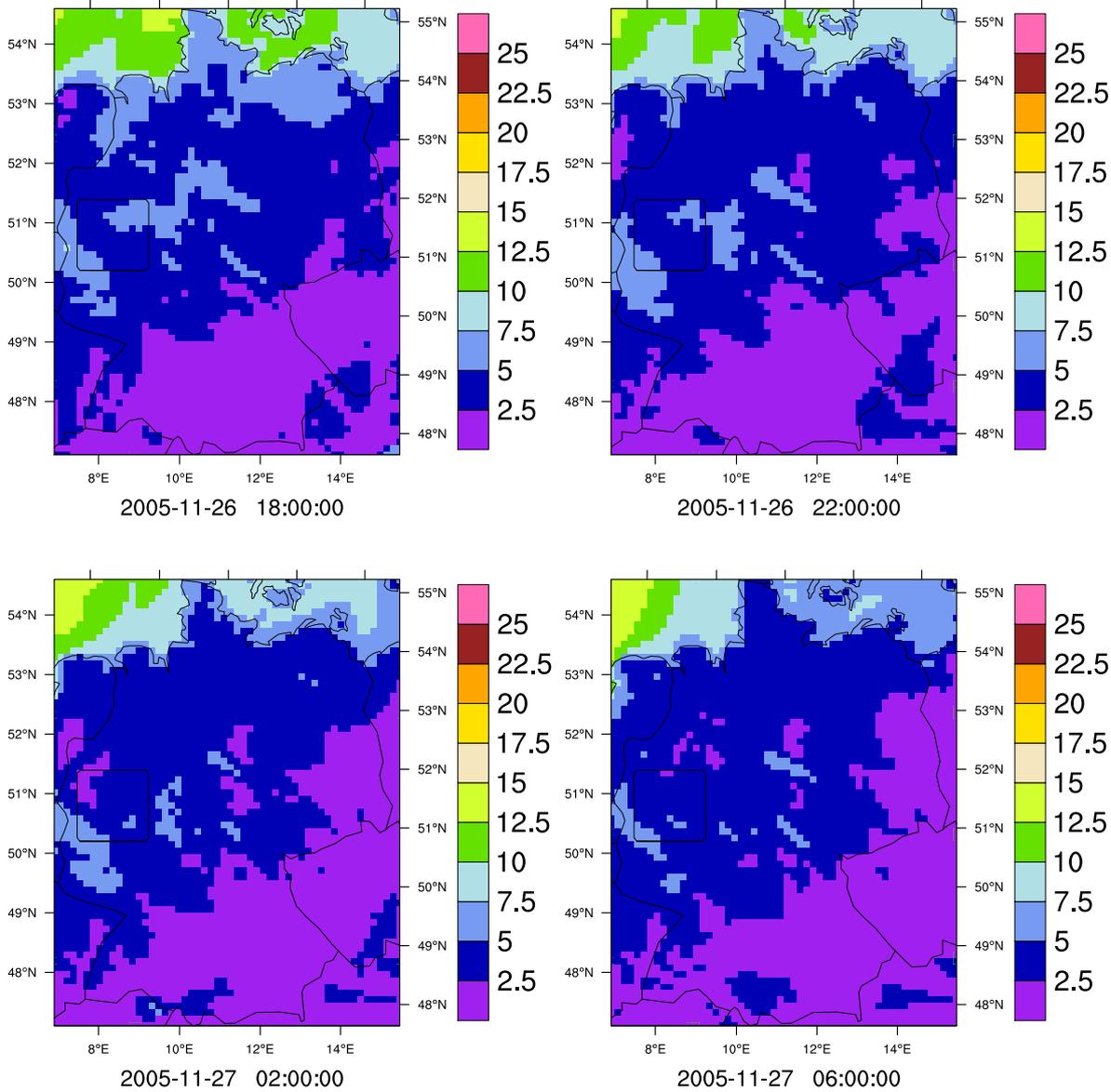


Abbildung 4.8: Entwicklung der 10m-Windgeschwindigkeit (in m/s) in Deutschland während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr), ausgewählte Zeitpunkte. Stündliche Abfolge im Anhang; simuliert durch den REMO Validierungslauf 001524.

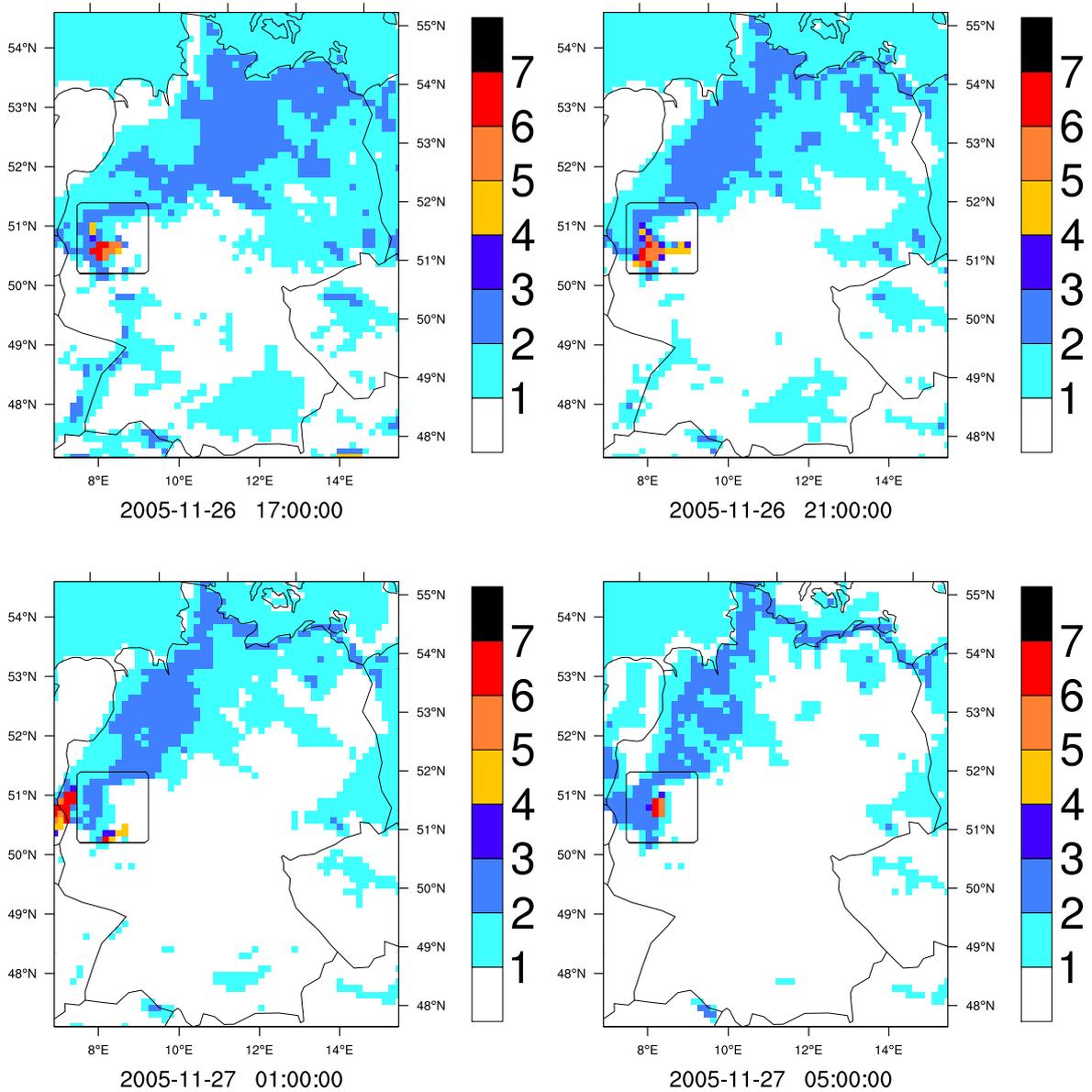


Abbildung 4.9: Entwicklung des Schneelastindizes in Deutschland nach der 3-Variablen-Methode während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr), ausgewählte Zeitpunkte. Stündliche Abfolge im Anhang. Als Skala wird die im Text beschriebene Wichtung der Gefahr von Schneelast zwischen 0 und 7 verwendet; simuliert durch den REMO Validierungslauf 001524.

## Kapitel 4 Methodenentwicklung

---

eignis tatsächlich von der Methode auch im Münsterland erkannt worden wäre, würde der Niederschlag vom Validierungslauf die angesprochenen ca. 100 km weiter nordöstlich simuliert. Dort fällt nämlich einerseits die Temperatur in einen Bereich knapp um den Gefrierpunkt (Abb. 4.7), was außerdem auch von der Methode in Abbildung 4.9 erkannt wird, welche die Schneelast dort mit Werten leicht  $> 2$  angibt. Addiert man hier den aus starkem Schneefall resultierenden Wert von 3 bis 4, wird auch im Münsterland ein Wert von  $> 6$  erreicht. Die Verschiebung des Gebietes mit simulierter Schneelast ist also nicht der verwendeten 3-Variablen-Methode sondern den bereits beschriebenen Abweichungen der Wetterverhältnisse im Validierungslauf von der Realität anzulasten.

Trotz Abweichungen von der Realität im Falle des Münsterlandereignisses - die allerdings vermutlich durch die verwendeten Daten zustande kommen - scheint die 3-Variablen-Methode in der Lage zu sein, Gitterboxen, in denen die Bedingungen für die Ausbildung von Schneelasten der Theorie zufolge gegeben sind, mit einem entsprechend hohen Schneelastindex zu versehen.

Um jedoch nicht von einem Fall auf Allgemeingültigkeit zu schließen wurden weitere Testfälle untersucht. Dazu wurde die Tabelle (unnummeriert) auf Seite 23 im Bericht der Bundesnetzagentur (2006) als Grundlage genommen, die dem Münsterlandereignis vergleichbare Schnee- und Eislastereignisse auflistet. Leider fällt außer dem Münsterlandereignis nur ein Ereignis (1994 im Alpenvorland) in den Zeitraum, der vom REMO-Validierungslauf abgedeckt wird (1989-2008).

Dieses wurde auf die gleiche Weise untersucht (aus Platzgründen hier nicht dargestellt), konnte die Realität aber nicht reproduzieren. Als Grund kann hierbei jedoch eindeutig der vom Validierungslauf nicht simulierte, aber in der Realität eingetretene starke Schneefall genannt werden, ohne den folglich auch keine Schneelast erkannt wurde. Warum im Validierungslauf vom Modell kein Schneefall simuliert wurde, kann an dieser Stelle leider nicht beantwortet werden. Dazu wäre eine genaue Fallstudie zu diesem speziellen Ereignis nötig, die näher auf die Modellphysik und Besonderheiten von Validierungsläufen eingeht.

### 4.3 Fazit

Mangels weiterer Ereignisse, die gleichzeitig dokumentiert sind und in den vom vorliegenden Validierungslauf betrachteten Zeitraum 1989-2008 fallen, konnte leider keine weitere Falluntersuchung durchgeführt werden. Aus den vorliegenden Ergebnissen lassen sich jedoch einige Schlussfolgerungen zu den beiden getesteten Methoden ziehen:

- Es ließ sich nicht zeigen, dass die ISO-Norm-Methode in der Lage ist, ein in der Realität aufgetretenes Schneelastereignis im Validierungslauf zu detektieren. Der Grund dafür liegt in der strikten Vorgabe der verwendeten ISO-Norm, dass die in die Methode eingehende Feuchttemperatur im leicht positiven Celsius-Bereich liegen muss. Würde diese Vorgabe gelockert, könnte sie sich als probates Mittel erweisen.
- Die ISO-Norm-Methode unterscheidet binär zwischen Schneelast und keiner Schneelast. Diese Herangehensweise detektiert also nur Ereignisse, bei denen die Bedingungen nahezu optimal für Schneelast sind. Dadurch werden jedoch möglicherweise Situationen übersehen, bei denen die Bedingungen im Grenzbereich liegen.
- Die 3-Variablen-Methode konnte das Münsterlandereignis mit räumlichen und zeitlichen Verschiebungen simulieren. Diese Abweichungen resultieren allerdings aus dem verwendeten Validierungslauf. Auch die Tatsache, dass ein zweites Ereignis überhaupt nicht simuliert werden konnte, ist nicht der Methode anzulasten, sondern resultiert ebenfalls aus Abweichungen im Validierungslauf.
- Durch die Verwendung einer linearen Skala für den bei der 3-Variablen-Methode generierten Schneelastindex werden deutlich mehr Gitterboxen als potentiell ge-

## Kapitel 4 Methodenentwicklung

---

fährlich markiert als bei der ISO-Norm-Methode. Allerdings kann auch deutlich besser zwischen besonders und weniger gefährdeten Gebieten unterschieden werden.

Auch wenn mit den vorliegenden Daten nur zwei Ereignisse untersucht und davon auch nur für das Münsterlandereignis Beobachtungsdaten zum Vergleich herangezogen werden konnte(n), wird an dieser Stelle die 3-Variablen-Methode für die folgende statistische Auswertung ausgewählt.

Um die Methoden vollständig zu validieren müssten allerdings noch mehr Fallstudien durchgeführt werden. Diese sollten idealerweise mit einem Vorhersagelauf, bei dem REMO alle 36 Stunden neu initialisiert wird, betrachtet werden, um Abweichungen wie beim vorliegenden Validerungslauf zu vermeiden. Somit könnte der Unterschied zwischen beiden Methoden besser hervorgehoben werden, wenn auch die zu Grunde liegenden meteorologischen Größen nahezu der Realität entsprechen.

Die Wahl der 3-Variablen-Methode erfolgt somit mit einem gewissen Vorbehalt. Sollten genauere Fallstudien ihre Verwendbarkeit widerlegen, müssen die folgenden Ergebnisse dieser Arbeit neu betrachtet werden.

Von den beiden getesteten Methoden wird sie allerdings gewählt, da im folgenden Kapitel untersucht wird, wie oft das Potential für Schneelastereignisse besteht. Käme stattdessen die ISO-Norm-Methode zum Einsatz würden möglicherweise weniger Tage mit einem solchen Potential berechnet. Diese möglicherweise leichte Überschätzung ist vom Autor gewollt und soll zeigen, dass nicht jede Situation, bei der die meteorologischen Bedingungen für große Schneelasten passen, auch wirklich zu einem Schneelastereignis führt.

# Kapitel 5

## Statistische Auswertung

Nach Auswahl der 3-Variablen-Methode als plausibles Modell zur Detektion von Schneelastereignissen werden in diesem Kapitel verschiedene statistische Auswertungen vorgenommen. Dazu erfolgte zunächst für sämtliche verwendeten REMO-Läufe (siehe Tabelle 3.1) die Berechnung des Schneelastindizes mit der 3-Variablen-Methode. Diese Datensätze bilden die Grundlage für die folgenden Auswertungen.

Zunächst wird in Abschnitt 5.1 die Häufigkeit von Schneelastereignissen in Deutschland während des Kontrollzeitraums von 1950-2000 dargestellt, wobei auch auf regionale Unterschiede und Unterschiede zwischen verschiedenen REMO-Versionen eingegangen wird. In Abschnitt 5.2 wird anschließend die zu erwartende Entwicklung im 21. Jahrhundert gezeigt. In beiden Abschnitten wird auch die Zahl der Tage pro Jahr angegeben, an denen die einzelnen Variablen Schneefall, Temperatur und Wind in den vorgegebenen Wertebereich fallen.

### 5.1 Häufigkeit des Auftretens von Schneelastereignissen in Deutschland im 20. Jahrhundert

Wetterereignisse, in deren Folge große Schneelasten entstehen können, treten in Deutschland so selten auf, dass sie als Extremereignisse zu werten sind. Mit Wiederkehrdauern von z.B. 60 Jahren für das Münsterland (Deuschländer und Wichura, 2005) sind sie so selten, dass außerhalb von prädestinierten Gegenden wie Berggipfeln nur wenige Vorsichtsmaßnahmen existieren. Um dennoch eine ungefähre Vorstellung zu vermitteln, wie oft es (im Klima der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts) in den verschiedenen Regionen Deutschlands zu Wetterlagen kommt, die das Potential für mögliche Schäden an Überlandleitungen durch Schneelasten bergen, werden in diesem Abschnitt einerseits Untersuchungen vorgestellt, die eine räumliche Verteilung zeigen und andererseits die Anzahl solcher Ereignisse pro Jahr in einer Gesamtregion.

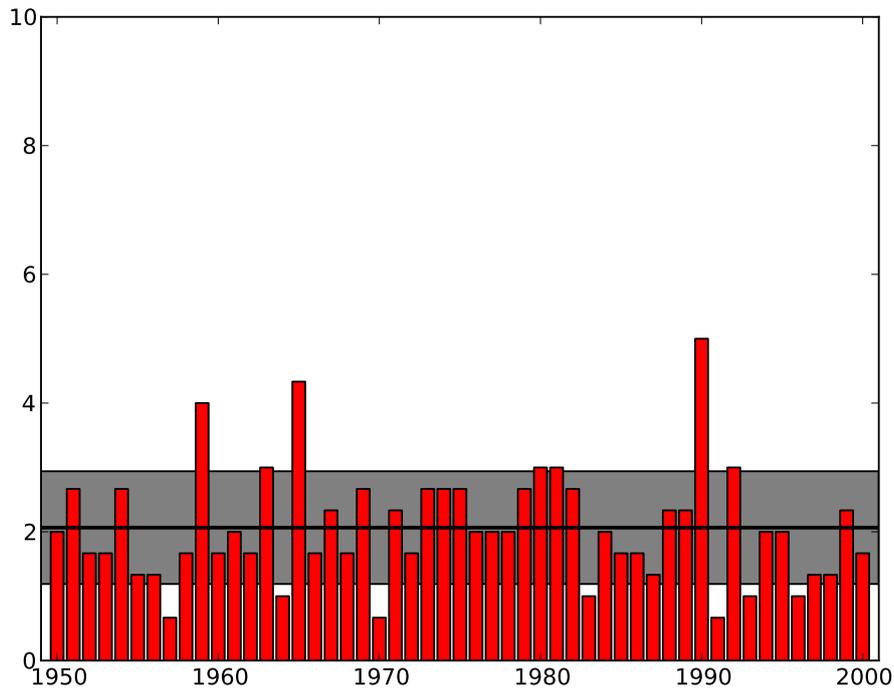
Als Datengrundlage dienen dazu der schon zur Validierung verwendete REMO-Validierungslauf sowie die der Tabelle 3.1 zu entnehmenden sogenannten Kontrollläufe (C20-1 bis C20-3), die das Klima der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts simulieren. C20 bezeichnet dabei die Art des Laufs (Kontrolllauf 20. Jahrhundert), der Zusatz 1 bis 3 die Nummer des Ensembles - sowohl der Kontrolllauf als auch die Szenarien für das 21. Jahrhundert, die in Abschnitt 5.2 vorgestellt werden, wurden jeweils mit drei verschiedenen Anfangszuständen gerechnet. Drei Ensembleläufe sind im Vergleich zu operationellen Wettermodellen zwar nicht viel, für ein Klimamodell mit seinem vielfach höheren Rechenaufwand jedoch eine Anzahl, die zumindest reicht, um Ausreißer in Einzeljahren im Mittel etwas zu glätten. Da die verschiedenen Ensembles mit verschiedenen Versionen von REMO gerechnet wurden, wird auf den möglichen Einfluss der verschiedenen Versionen auf die Ergebnisse eingegangen.

### 5.1.1 Gesamtdeutschland

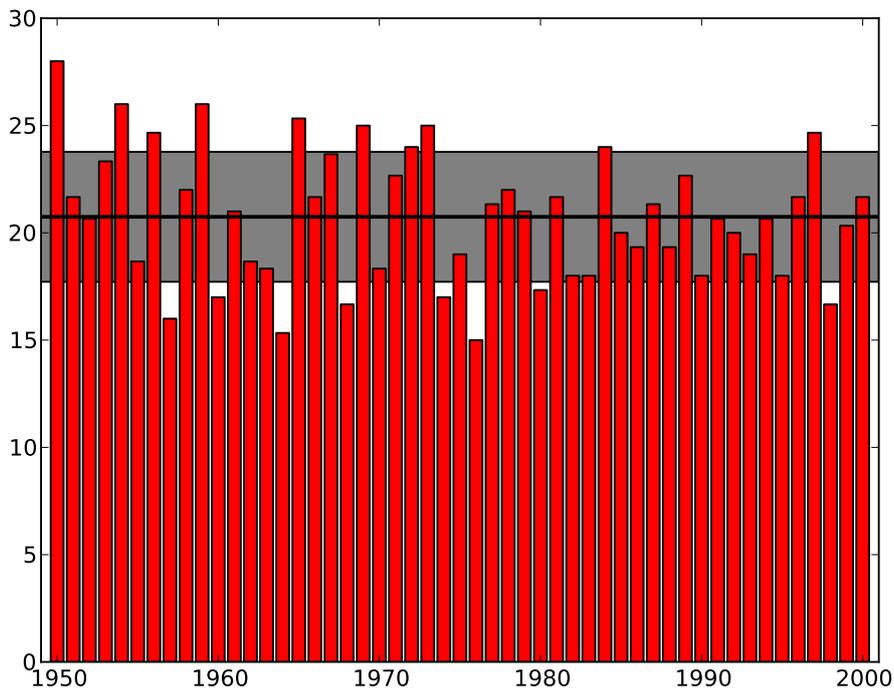
Auf Basis des C20-Ensemblemittels wurde zunächst für Gesamtdeutschland (Modellgebiet siehe Abbildung 3.2 d) die Anzahl der Wettersituationen pro Jahr ermittelt, die die Entstehung großer Schneelasten möglich machen. Dabei wird ein solches Ereignis detektiert, wenn folgende Bedingungen gegeben sind:

- Die betrachtete Gitterbox hat eine mittlere Höhe von weniger als 700m. Gitterboxen in größerer Höhe stellen in Deutschland die Hoch- und Gipfellagen der Gebirge dar, wo von den Netzbetreibern besondere Vorkehrungen zum Schutz ihrer Leitungen getroffen werden. Da in dieser Arbeit allerdings nur Situationen betrachtet werden sollen, die eine tatsächliche Gefahr für die Leitungen darstellen, wird diese Reduktion der Gesamtzahl an Ereignissen akzeptiert.
- Über einen Zeitraum von mindestens 6 Stunden weisen eine oder mehrere Gitterboxen (irgendwo in Deutschland) einen Wert des Schneelastindizes von mehr als 6,5 auf. Es wird davon ausgegangen, dass erst nach dieser Zeit eine mögliche Schneelast an Leitungen soweit angewachsen ist, dass sie eine Gefahr darstellt.

Abbildung 5.1a zeigt das Ergebnis dieser Berechnungen. Deutlich sichtbar ist die geringe Anzahl solcher Situationen mit einem Mittelwert (schwarzer Querbalken) von etwa zwei Fällen pro Jahr. Auch die Varianz ist nicht unerwartet und bestätigt die Erwartung, dass die Häufigkeit zwar von Jahr zu Jahr relativ gesehen stark schwankt, aber keine außergewöhnlichen Ausreißer auftreten. Diese lässt sich durch die große Bandbreite an Großwetterlagen begründen, die in Deutschland vor allem im Winterhalbjahr von Jahr zu Jahr teilweise sehr große Unterschiede in Temperatur-, Niederschlags- und Windverteilung nach sich ziehen. In Abbildung 5.1b sowie 5.2 wird die Anzahl der Ereignisse dargestellt, zu denen die drei einzelnen Variablen jeweils in den vorgegebenen Wertebereich fallen (durch den Einfluss der Fuzzy-Logik:  $-1^\circ \leq T_{2m} \leq 1^\circ$ ,  $pp_{snow} \geq 9$  mm/6h sowie  $u_{10m} \geq 8$  m/s). Alle drei Variablen fallen einzeln deutlich häufiger in diese

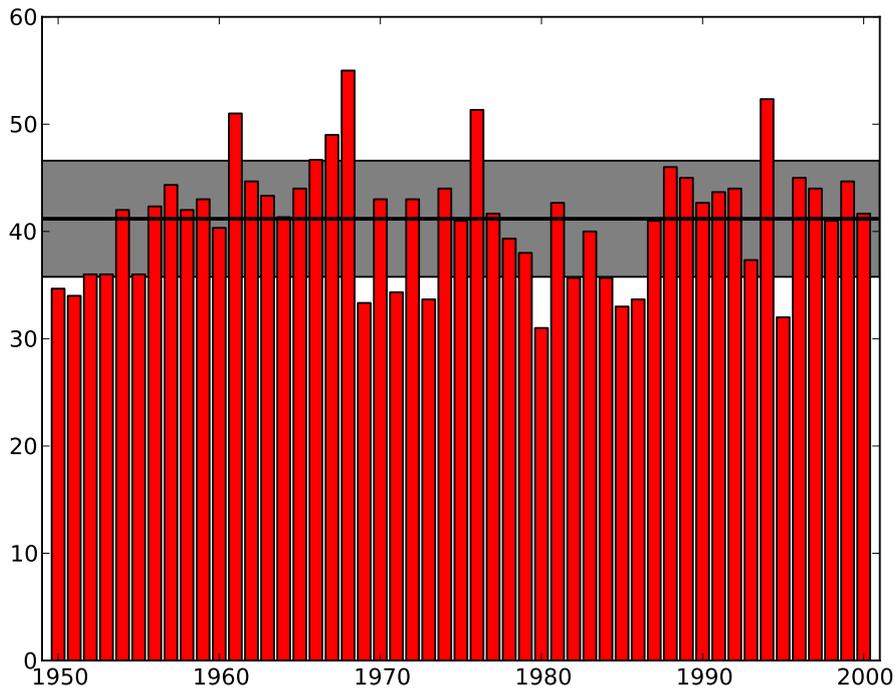


(a) Schneelastereignisse

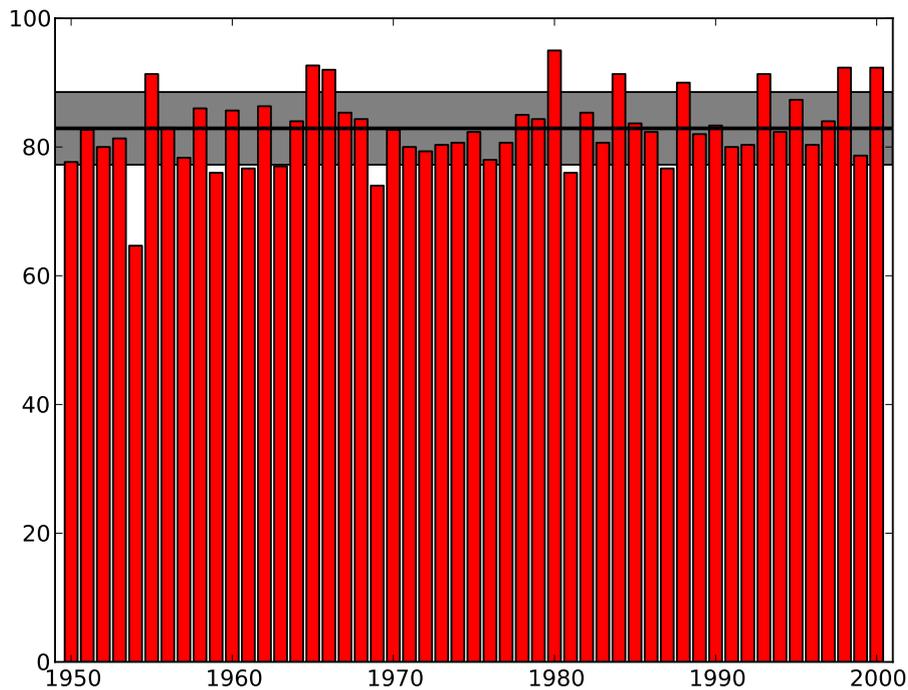


(b) Schneekriterium erfüllt

Abbildung 5.1: a) Anzahl der Schneelastereignisse pro Jahr in Deutschland von 1950-2000, b) Anzahl der Ereignisse an denen Schneefall in den vorgegebenen Wertebereich fällt, sowie durchschnittliche Anzahl pro Jahr mit einfacher Standardabweichung (schwarzer Querbalken mit grauer Schattierung). Datensatz: Ensemblemittel der Häufigkeit für die REMO-Läufe C20-1, C20-2 und C20-3. Details siehe Text.



(a) Temperaturkriterium erfüllt



(b) Windkriterium erfüllt

Abbildung 5.2: Anzahl der Ereignisse in Deutschland von 1950-2000 an denen a) Temperatur und b) Wind in den jeweils vorausgesetzten Wertebereich fallen sowie durchschnittliche Anzahl pro Jahr mit einfacher Standardabweichung (schwarzer Querbalken mit grauer Schattierung), Datensatz: Ensemblemittel der Häufigkeit für die REMO-Läufe C20-1, C20-2 und C20-3.

Wertebereiche als gemeinsam, Schneefall hat den (gemessen am jährlichen Auftreten) am stärksten, Wind den am wenigsten limitierenden Einfluss. Außerdem schwankt die Häufigkeit, mit der die einzelnen Variablen in den vorgegebenen Bereich fallen, deutlich weniger von Jahr zu Jahr als die Häufigkeit von Schneelastereignissen. Auch ein direkter Zusammenhang zwischen einer einzelnen der drei Variablen und der Schneelast lässt sich auf den ersten Blick nicht finden, ihre Häufigkeit variiert zwar ebenfalls von Jahr zu Jahr, allerdings fällt in Jahren mit besonders vielen oder wenigen Schneelastereignissen keine Variable auf, die in diesem Jahr ebenfalls stark über die Standardabweichung hinausragt.

### 5.1.2 Regionale Unterschiede

Auf Basis dieser Ergebnisse und vor allem der Kernaussage, dass pro Jahr im Klima des 20. Jahrhunderts mit im Mittel etwa zwei Schneelastereignissen pro Jahr (irgendwo) in Deutschland zu rechnen ist, werden in diesem Kapitel nun regionale Unterschiede herausgestellt.

Abbildung 5.3 gibt zunächst einen Überblick über die Verteilung der Ereignisse in Deutschland (auch hier sind nur solche in Gitterboxen mit mittlerer Modellhöhe  $< 700\text{m}$  berücksichtigt). Wie erwartet kam es im Modellklima des 20. Jahrhunderts zwischen 1950 und 2000 an den meisten Gitterboxen abseits der Mittelgebirge zu maximal einem Ereignis (grün markierte Boxen). Gelb und rot markierte Gitterboxen (mit 1 bis 5 bzw. mehr als 5 Ereignissen) in den westlichen zwei Dritteln Deutschlands sind fast ausschließlich auf die Mittelgebirge beschränkt, wo es vermutlich vermehrt zu Schneelastsituationen kommt, wenn in diesen Regionen auf Grund der Höhenlage Niederschlag, der im Tiefland als Regen fällt, in Schneefall übergeht, die Temperaturen für trockenen Schnee jedoch zu hoch sind.

Besonders auffällig ist die große Zahl von Gitterboxen roter und gelber Färbung im Osten Deutschlands (vor allem im Erzgebirge und Ostbayern) sowie in Österreich. Auch

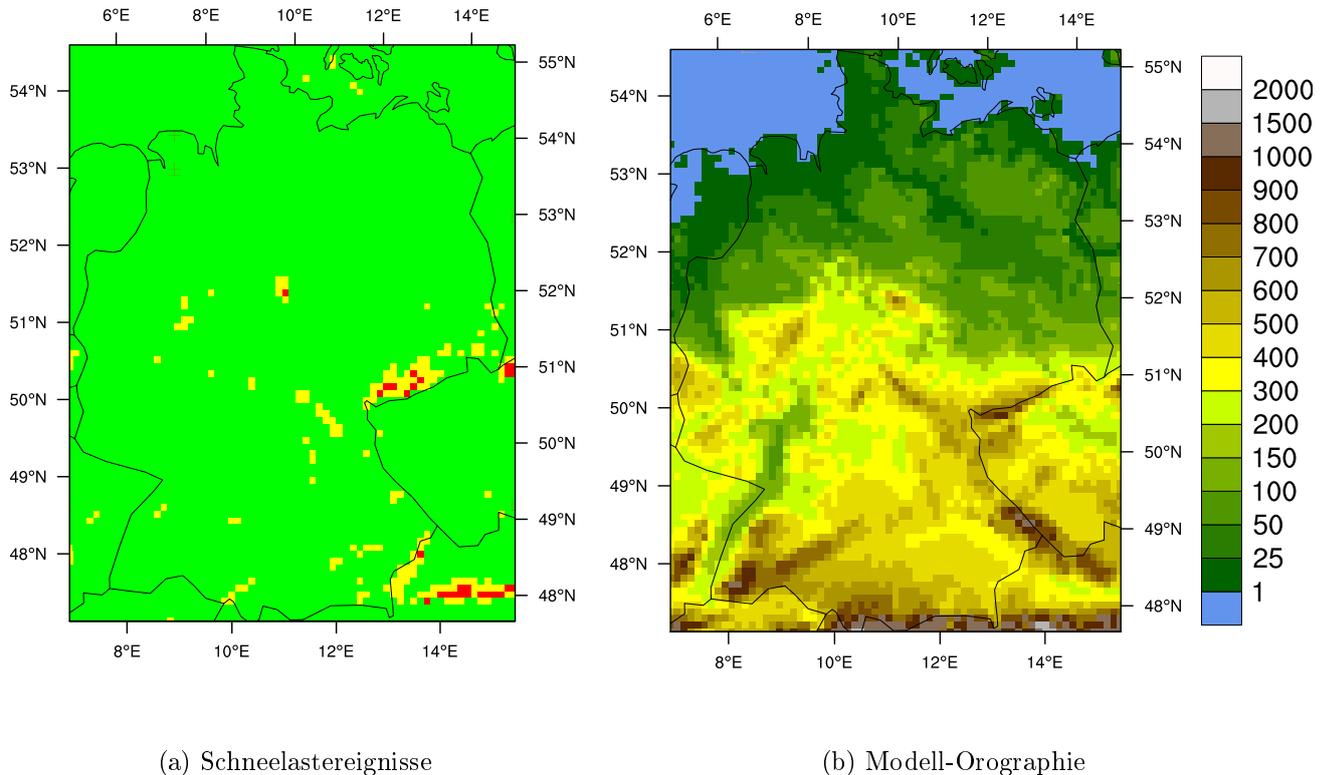


Abbildung 5.3: a) Anzahl der Schneelastereignisse pro Gitterbox im Gesamtzeitraum 1950-2000. Grün: maximal 1 Ereignis, Gelb: > 1 bis 5 Ereignisse, Rot: mehr als 5 Ereignisse. Datensatz: Ensemblemittel der Häufigkeit für die REMO-Läufe C20-1, C20-2 und C20-3. b) Modell-Orographie zum Vergleich

wenn in dieser Arbeit kein Nachweis dazu gebracht wird, lässt sich vermuten, dass diese Häufung mit dem Auftreten sogenannter Vb-Wetterlagen korreliert ist, bei denen Tiefdruckgebiete aus dem Mittelmeerraum östlich der Alpen nordwärts ziehen und dabei im Winter auf ihrer Westseite oft für starke Schneefälle sorgen. Da die Luftmassen dabei meist sehr feucht sind und die Temperaturen um den Gefrierpunkt liegen, werden bereits zwei von drei Bedingungen für Schneelast erfüllt und für Windgeschwindigkeiten von 10 m/s ist kein allzu großer Druckgradient notwendig.

In Abbildung 5.4 ist die Anzahl der Schneelastereignisse pro Jahr außerdem als Balkendiagramm für Nord-, Mittel- und Süddeutschland dargestellt. Da es sich auch hier um Ensemblemittel der Häufigkeit in den drei hochauflösenden REMO-Kontrollläufen

handelt wird beispielsweise für Norddeutschland in keinem einzigen Jahr ein Wert von eins überschritten, was die schon mehrfach angesprochene Seltenheit von Schneelastergebnissen im norddeutschen Tiefland unterstreicht. In Mittel- und Süddeutschland bietet sich ein Bild mit Mittelwerten von ca. einem Ereignis pro Jahr und Region und einer hohen interannualen Streuung, wobei Einzeljahre über die Standardabweichung teilweise deutlich hinausgehen.

Zusammenfassend kann also für die regionale Verteilung von Schneelastereignissen in Deutschland festgehalten werden, dass diese

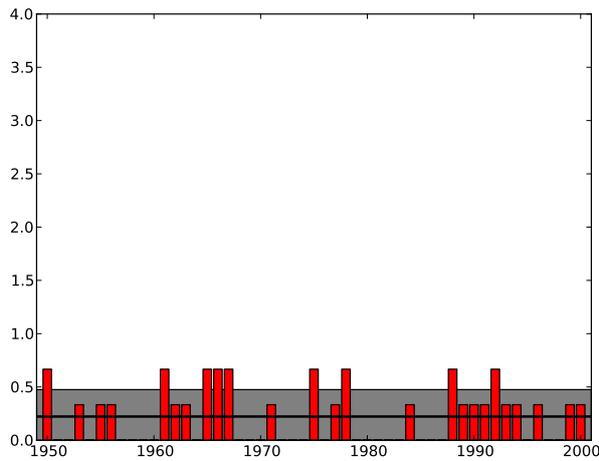
- im Flachland sehr selten auftreten,
- durch die Höhenlage im Mittelgebirgsraum und dem Alpenvorland noch immer selten aber vermehrt entstehen und
- ein deutliches Maximum im Erzgebirge und Ostbayern aufweisen, was vermutlich durch Vb-Wetterlagen ausgelöst wird.

### 5.1.3 Unterschiede nach Modellversion

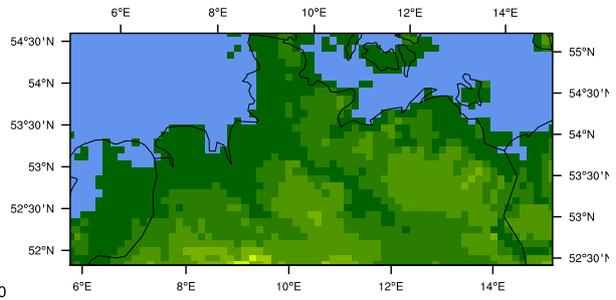
Wie schon mehrfach erwähnt wurden für die verschiedenen verwendeten REMO-Läufe unterschiedliche REMO-Versionen verwendet, da die Läufe im Rahmen verschiedener Projekte und damit in unterschiedlichen Jahren gerechnet wurden. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick darüber, welcher Lauf mit welcher Modellversion gerechnet wurde.

Von den Kontrollläufen gingen beispielsweise die Läufe mit den Nummern 006215, 001532 und 001533 in das Ensemblemittel ein. Gleichzeitig existieren noch die beiden Läufe 001516 und 001518, die mit den gleichen globalen Antriebs-Daten wie 001532 und 001533 gerechnet wurden, jedoch mit REMO2008 statt REMO2009. Abbildung 5.5 zeigt die Unterschiede, die diese Änderung der Modellversion auf die berechneten Schneelastereignisse hat.

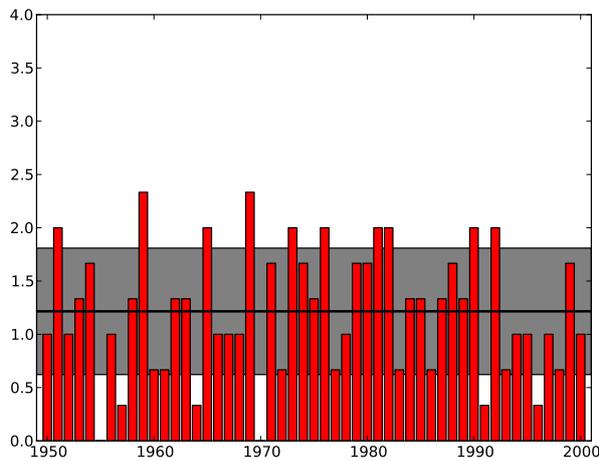
## Kapitel 5 Statistische Auswertung



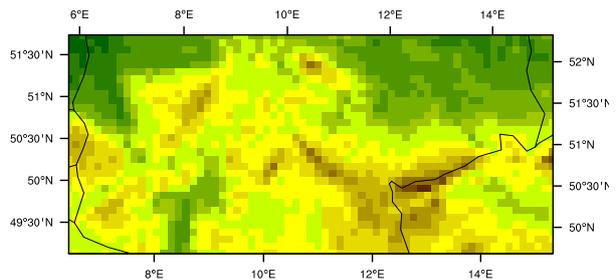
(a) Schneelastereignisse Norddeutschland



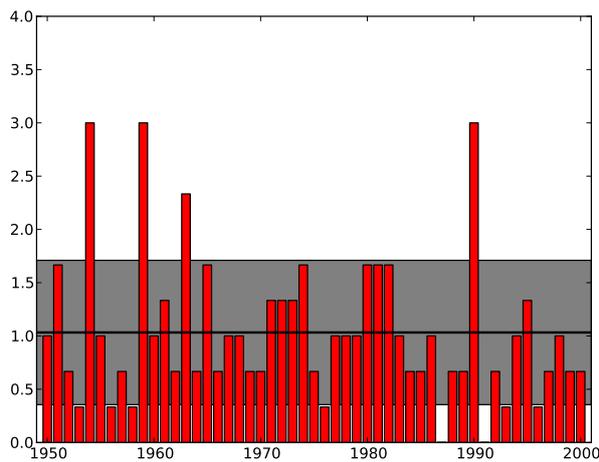
(b) Modell-Orographie Norddeutschland



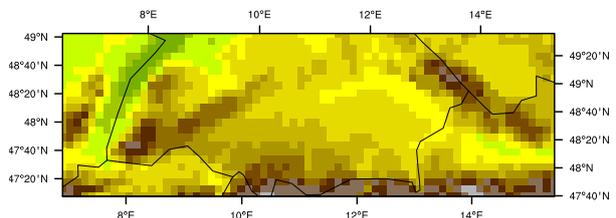
(c) Schneelastereignisse Mitteldeutschland



(d) Modell-Orographie Mitteldeutschland



(e) Schneelastereignisse Süddeutschland



(f) Modell-Orographie Süddeutschland

Abbildung 5.4: Anzahl Schneelastereignisse pro Jahr in Nord-, Mittel- und Süddeutschland von 1950-2000 mit Mittelwert und Standardabweichung. Datensatz: Ensemblemittel der Häufigkeit für die REMO-Läufe C20-1, C20-2 und C20-3. Modell-Orographie zum Vergleich.

## Kapitel 5 Statistische Auswertung

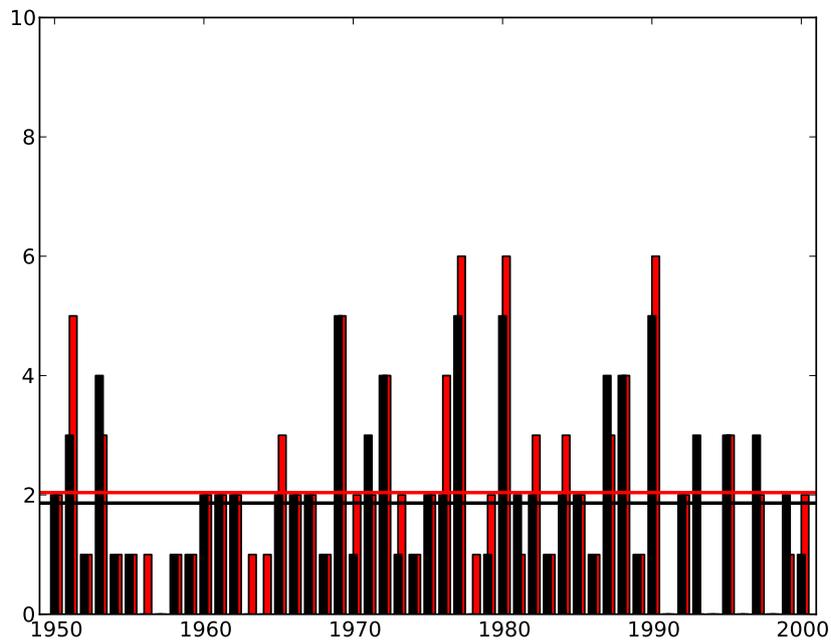
---

Zunächst lässt sich feststellen, dass zwar Unterschiede zwischen den Versionen auftreten, diese jedoch keine eindeutige Tendenz erkennen lassen. So werden im C20-3 Szenario von REMO2009adv etwas mehr Ereignisse detektiert als im gleichen Szenario mit REMO2008 (Abbildung 5.5a). Im C20-2-Szenario (Abbildung 5.5b) ist dies allerdings genau umgekehrt. Dabei werden in vielen Jahren von beiden Versionen gleich viele Ereignisse erkannt, während die Abweichungen vor allem im C20-2-Szenario in anderen Jahren deutlich hervorstechen.

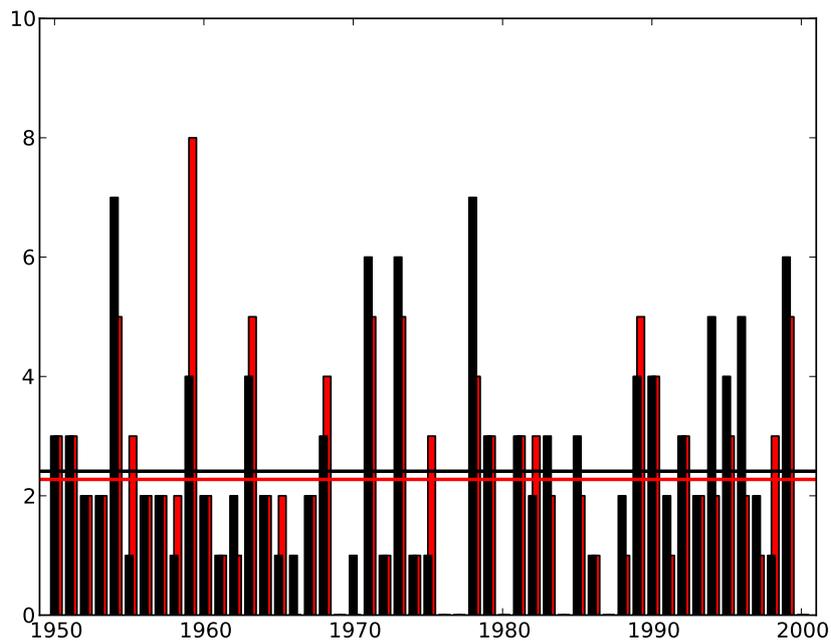
Die Modellphysik zwischen den beiden Versionen unterscheidet sich nur geringfügig. So gab es eine Änderung der Horizontaldiffusion und das Einfügen der Niederschlagsadvektion. Dabei kann Niederschlag, der in einer Gitterbox gebildet wird, durch Höhenwinde in benachbarte Gitterboxen transportiert werden.

Allerdings führen selbst geringere Änderungen bei gleichbleibenden Anfangs- und Randwerten zu einem leicht veränderten Modellklima, da das Modellgebiet nur bei der Initialisierung exakt gleich ist und danach nur noch die Randwerte angeglichen werden. Da in keiner der beiden Modellversionen eine deutliche Tendenz zu mehr Schneelastereignissen erkennbar ist und die geringen Unterschiede eher zufallsverteilt wirken, lassen sich die Unterschiede sehr wahrscheinlich auf dieses Phänomen sowie den advehierten Niederschlag zurückführen. Auch beim Vergleich der Einzelkriterien (hier aus Platzgründen nicht dargestellt) sind keine eindeutigen Tendenzen festzustellen, was die Vermutung bestärkt, dass die Veränderung der Modellversion keinen nachweislichen Einfluss auf die mittlere Anzahl von detektierten Schneelastereignissen hat.

In Kapitel 5.2.3 wird die Betrachtung der Modellunterschiede fortgeführt.



(a) C20-3



(b) C20-2

Abbildung 5.5: Modellversionsvergleich für den C20-3-Lauf (a) und den C20-2-Lauf (b).  
Rot: REMO2009adv, Schwarz: REMO2008

## 5.2 Entwicklung der Häufigkeit von Schneelastereignissen in Deutschland im 21. Jahrhundert

Im Folgenden werden Ergebnisse präsentiert, die die Entwicklung der Häufigkeit von Schneelastereignissen nach den verschiedenen Emissionsszenarien des IPCC (Fisher u. a., 2007) darstellen.

### 5.2.1 Die Emissionsszenarien

Die verwendeten REMO-Läufe für das Klima des 21. Jahrhunderts wurden von ECHAM5-Globaldaten angetrieben, die auf den verschiedenen IPCC-Emissionsszenarien basieren. Die gebräuchlichsten sind die Szenarien A1B, B1 und A2. Diese gehen von folgenden sozioökonomischen Veränderungen aus:

- A1B: Rasches weltweites Wirtschaftswachstum, Maximum der Erdbevölkerung zur Mitte des Jahrhunderts, schnelle Einführung energieeffizienter Technologien bei Verwendung fossiler und nicht-fossiler Energieträger.
- B1: Gleiche Bevölkerungsentwicklung wie A1B, allerdings Wandel hin zur Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft.
- A2: Heterogene Welt mit raschem Bevölkerungs- und langsamem Wirtschaftswachstum bei nur langsamem Wandel der Technologien

In verschiedenen Studien (beispielsweise Jacob u. a. (2008)) zeigt sich, dass, bezogen auf die Entwicklung der mittleren 2m-Temperatur, B1 das Szenario mit der geringsten Temperaturerhöhung ist, während A1B und A2 den Großteil des 21. Jahrhunderts eine ähnliche Entwicklung zeigen, die erst zum Ende hin auseinanderdriftet. Dann jedoch steigen die Temperaturen des A2- über die des A1B-Szenarios. Die folgenden Abschnitte

zeigen, wie sich diese unterschiedlichen Entwicklungen auf die Häufigkeit von Schneelastereignissen auswirken.

### 5.2.2 Prognostizierte Änderungen

Vergleichbar zu Abschnitt 5.1 werden in diesem Abschnitt zunächst die Änderungen auf Gesamtdeutschland bezogen gezeigt und anschließend regionale Unterschiede hervorgehoben. Auch auf die Änderung der drei Eingangsvariablen wird eingegangen. Als Datengrundlage dienten beim A1B- und B1-Szenario ebenfalls die Ensemblemittel der drei Ensembleläufe A1B-1, A1B-2 und A1B-3 bzw. B1-1, B1-2 und B1-3. Beim A2-Szenario konnte nur ein Ensemblemittel aus zwei Läufen (A2-1 und A2-2) verwendet werden, da wegen Fehler in den Antriebsdaten für A2-3 erst Werte ab 2009 statt wie sonst 2001 vorlagen, was den Lauf für Mittelbildungen ungeeignet machte.

#### Deutschland

In den Abbildungen 5.6 und 5.7 wird die Entwicklung der Häufigkeit von Schneelastereignissen im 21. Jahrhundert sowie des Erfüllens der Kriterien für die drei Eingangsvariablen gezeigt. Diese Entwicklung wird für die drei Emissionsszenarien A1B, B1 und A2 dargestellt. In allen drei Szenarien fällt deutlich die Abnahme der Anzahl von Schneelastereignissen auf (von im Mittel etwa zwei zu Beginn auf unter eins zum Ende des Jahrhunderts). Um dies herauszustellen wurden die den Mittelwert darstellenden Querbalken im Gegensatz zu den Kontrollläufen nicht für das gesamte Jahrhundert gewählt, sondern für die drei Zeiträume 2001-2035, 2036-2070 und 2071-2100, die jeweils unterschiedliche Phasen der prognostizierten Erwärmung abdecken. Dem Autor ist bewusst, dass diese Wahl sehr willkürlich erscheint, doch sind vor allem die beiden letztgenannten Zeiträume in der Klimaforschung übliche Zeiträume.

## Kapitel 5 Statistische Auswertung

---

Neben der generellen Abnahme von Schneelastereignissen wird hier auch erstmals deutlich, dass B1 nicht nur bei der Temperaturzunahme moderater ausfällt als die beiden anderen Szenarien, sondern scheinbar auch bei der Abnahme von Schneelastereignissen. Auch bei der Anzahl der Ereignisse, an denen das Schneefallkriterium zutrifft ist eine deutliche Abnahme in allen Szenarien festzustellen, die im B1-Szenario jedoch schwächer ausfällt, was sich vor allem zum Ende des Jahrhunderts hin zeigt (B1 fällt von etwa 20 zu Beginn auf 15 Tage zum Ende des Jahrhunderts, während A2 und vor allem A1B von den ebenfalls etwa 20 Tagen auf 10 (A1B) bzw. 12 (A2) Tage zurückgehen).

Dagegen sind bei der Anzahl der Ereignisse, an denen das Wind- bzw. das Temperaturkriterium zutreffen im Verlauf des 21. Jahrhunderts keine deutlichen Veränderungen zu erwarten. Bei der Windgeschwindigkeit, die von der Erwärmung relativ unbeeinflusst bleibt, war dies zu erwarten, dass hingegen die Zahl der Tage mit Temperaturen um den Gefrierpunkt nicht ab- sondern sogar leicht zunimmt lässt sich erst auf den zweiten Blick erklären. So nimmt durch die Erwärmung zwar die Zahl der Frost- (Temperatur mindestens zu einem Messzeitpunkt unter  $0^{\circ}$ ) und Eistage (Temperatur ganztägig unterhalb des Gefrierpunkts) ab. Allerdings steigen die Temperaturen zu Zeitpunkten, zu denen sie im heutigen Klima deutlich unter  $0^{\circ}$  liegen auf Werte um den Gefrierpunkt im Klima zum Ende des Jahrhunderts an, was den "Verlust" an Zeitpunkten, die heute um den Gefrierpunkt liegen, an deutlich positive Temperaturen ausgleicht.

Da allerdings alle drei Variablen (und der Schneefall mit besonders starkem Einfluss) in den berechneten Schneelastindex eingehen, nimmt die Gesamtzahl der Schneelastereignisse ab, weil die Zahl der Zeitpunkte mit starkem Schneefall insgesamt abnimmt. Es scheint also keine Tendenz hin zu mehr Nassschneeereignissen auf Kosten der Trockenschneeereignisse zu geben, sondern eine generelle Abnahme aller Schneefallereignisse.

Diese Abnahme scheint den Simulationen zufolge auch erst etwa um das Jahr 2030 einzusetzen. Bis dahin simulieren alle drei Emissionsszenarien eine ähnlich hohe Anzahl von Schneelastereignissen wie im 20. Jahrhundert.

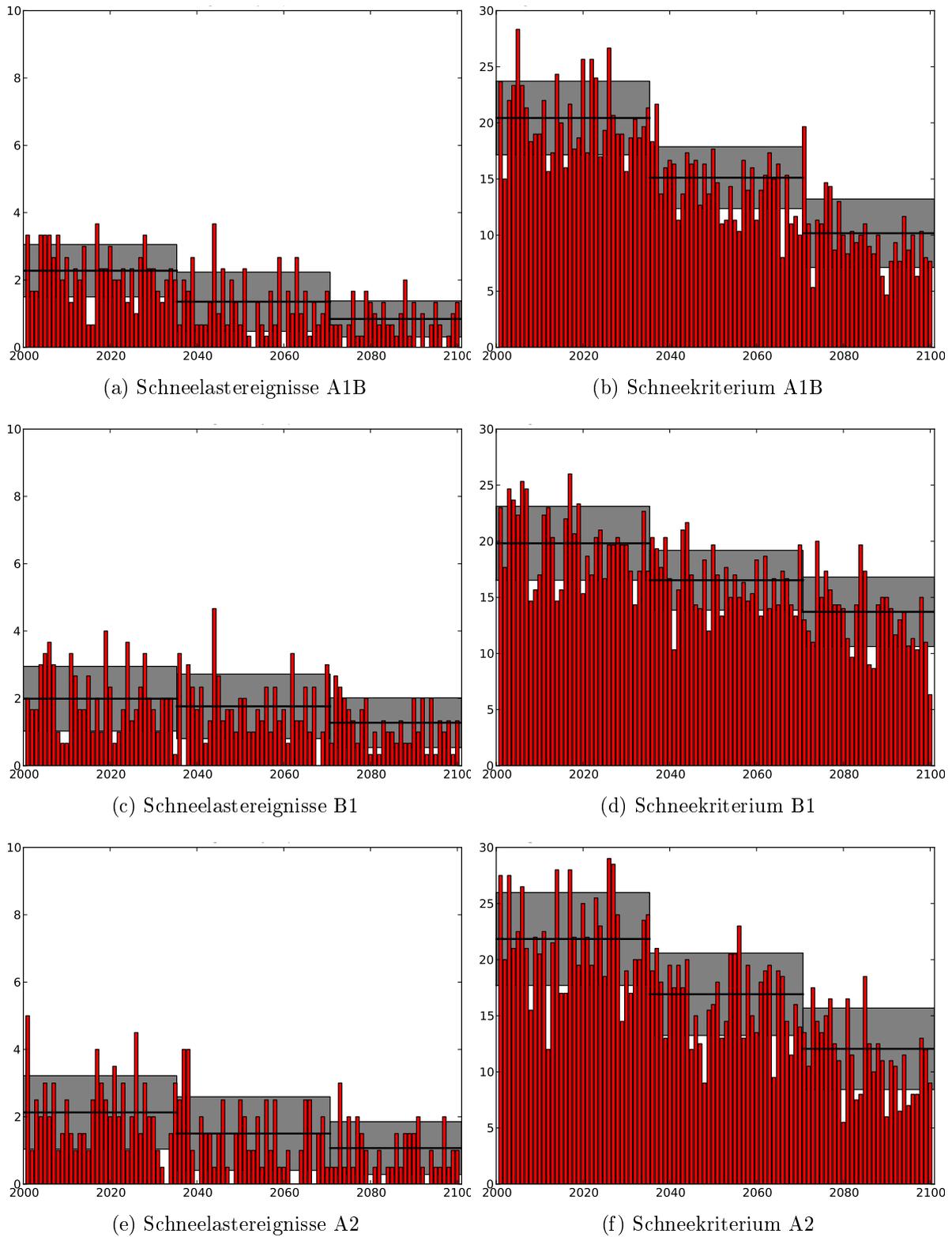


Abbildung 5.6: Anzahl der Schneelastereignisse pro Jahr in Deutschland von 2001-2100 für die Szenarien a) A1B, b) B1, c) A2 und Anzahl der Ereignisse, an denen das Schneekriterium erfüllt ist (b,d,f). Schwarze Querbalken entsprechen jeweiligem Mittelwert.

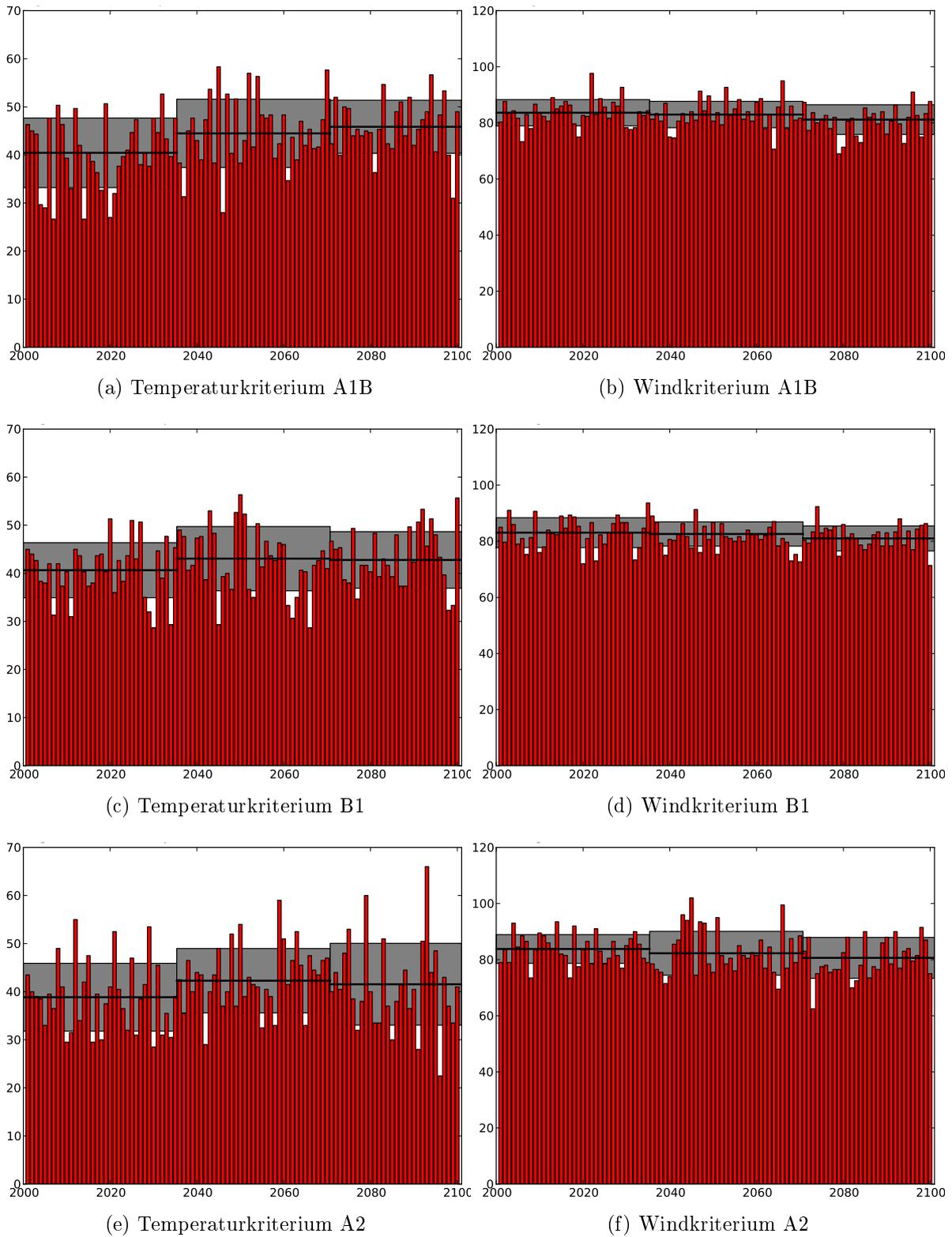


Abbildung 5.7: Tage pro Jahr in Deutschland von 2001-2100 für die Szenarien A1B, B1, A2 an denen das Temperaturkriterium (a,c,e) und Anzahl der Ereignisse, an denen das Windkriterium erfüllt ist (b,d,f). Schwarze Querbalken entsprechen jeweiligem Mittelwert.

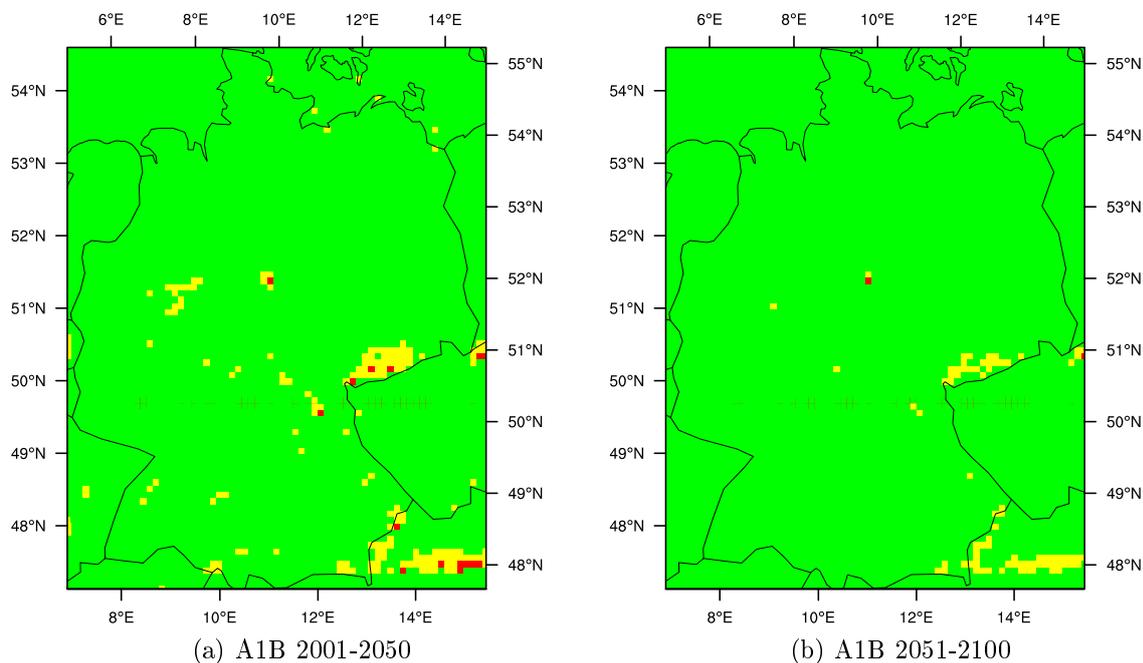


Abbildung 5.8: Anzahl der Schneelastereignisse pro Gitterbox im 21. Jahrhundert für das A1B-Szenario B1 während der Zeiträume 2001-2050 (a) und 2051-2100 (b). Grün: maximal 1 Ereignis, Gelb: 1 bis 5 Ereignisse, Rot: mehr als 5 Ereignisse.

### Regional

Wie schon in Abschnitt 5.1 werden zunächst Karten von Deutschland gezeigt, in denen die Anzahl der Ereignisse pro Gitterbox nach einem Ampelfarbenschema dargestellt ist (Abb. 5.8, sowie anschließend Balkendiagramme für Nord-, Mittel- und Süddeutschland. Die Zeiträume bei den Karten der regionalen Verteilung (2001-2050 und 2051-2100) wurden gewählt, um einen Vergleich mit den Plots für das 20. Jahrhundert (1951-2000) zu erleichtern. Bei den Balkendiagrammen erschien die Wahl dieser Zeiträume für die unterschiedlichen Mittelwerte als zu lang, um die beobachteten Trends angemessen darzustellen, weshalb dort Zeiträume von 30-35 Jahren gewählt wurden.

Bei den Karten (Abbildungen 5.8 und 5.9), die in zwei Zeiträume (2001-2050 und 2051-2100) aufgeteilt wurden, fällt zum Einen ins Auge, dass die Anzahl der Ereignisse erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts im Vergleich zum 20. Jahrhundert (Abbildung

5.3) deutlich abnimmt, während die Abweichungen in der ersten Jahrhunderthälfte noch klein bleiben. Der Rückgang im Szenario B1 ist wie erwartet etwas schwächer ausgeprägt als in A1B. Allerdings ist der Rückgang auch im A2-Szenario ähnlich schwach wie im B1- und deutlich schwächer als im A1B-Szenario. Dabei muss jedoch bedacht werden, dass für das A2-Szenario nur zwei statt drei Ensemblemitglieder zur Verfügung standen und folglich bei der Mittelung Einzelereignisse weniger stark geglättet wurden als bei den anderen beiden Szenarien. Dadurch konnten im A2-Szenario mehr Gitterboxen die Schwelle zur gelben Färbung (im Mittel mehr als 1 aber weniger als 5 Ereignisse während des Betrachtungszeitraums) überschreiten als beispielsweise im A1B-Szenario. Die bereits in Abschnitt 5.1.2 für das 20. Jahrhundert diskutierte regionale Verteilung ändert sich auch im wärmeren Klima des 21. Jahrhunderts nicht, die besonders oft betroffenen Regionen bleiben die gleichen.

Diese Entwicklung zeigt sich auch in den Balkendiagrammen für Nord-, Mittel- und Süddeutschland (Abbildungen 5.10 und 5.11). So bleiben Schneelastereignisse im norddeutschen Tiefland auch im 21. Jahrhundert Ausnahmen (Rückgang von etwa einem halben Ereignis pro Jahr auf circa ein viertel Ereignis), während sie in Mittel- und Süddeutschland zwar nach wie vor häufiger auftreten, allerdings mit abnehmender Tendenz (von etwa einem Ereignis auf ein halbes pro Jahr). Auch hier zeigt sich für Szenario B1 eine leicht schwächere Abnahme als für die beiden anderen Szenarien.

### 5.2.3 Unterschiede nach Modellversion

Von den hochauflösenden 10km-Läufen für das 21. Jahrhundert existieren nur für den A1B-2-Lauf zwei Läufe mit verschiedenen REMO-Versionen (REMO5.7 und REMO2008). Zwischen diesen beiden Versionen gab es in Modelldynamik und -physik deutlich mehr Änderungen als zwischen REMO2008 und REMO2009adv (vgl. Abschnitt 5.1.3), was sich auch in den Unterschieden die Anzahl der Schneelastereignisse pro Jahr betreffend bemerkbar macht (Abbildung 5.12). Der Mittelwert beider Läufe ist zwar annähernd

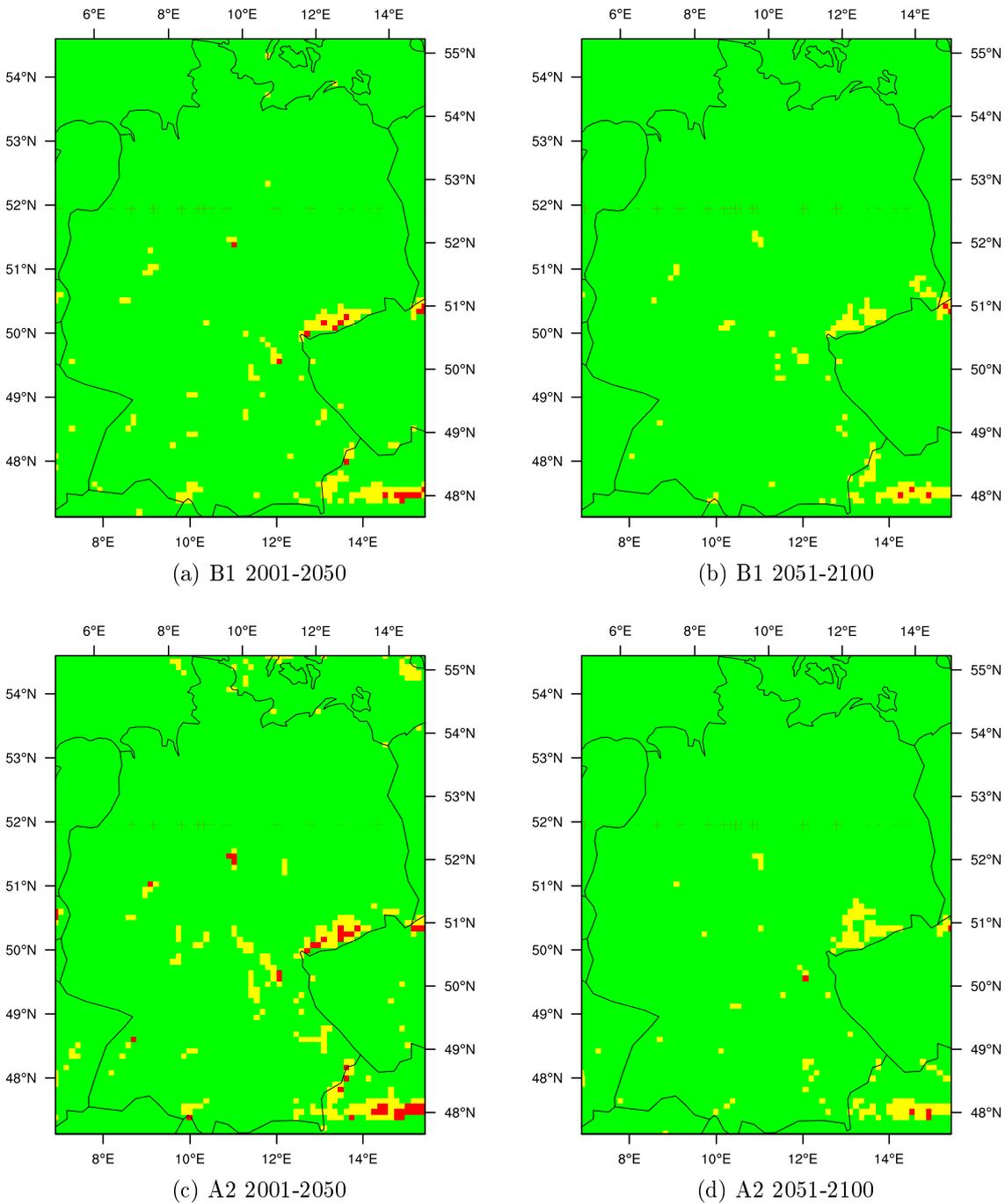


Abbildung 5.9: Anzahl der Schneelastereignisse pro Gitterbox im 21. Jahrhundert für die Szenarien B1 (a,b) und A2 (c,d) während der Zeiträume 2001-2050 (a,c) und 2051-2100 (b,d). Grün: maximal 1 Ereignis, Gelb: 1 bis 5 Ereignisse, Rot: mehr als 5 Ereignisse.

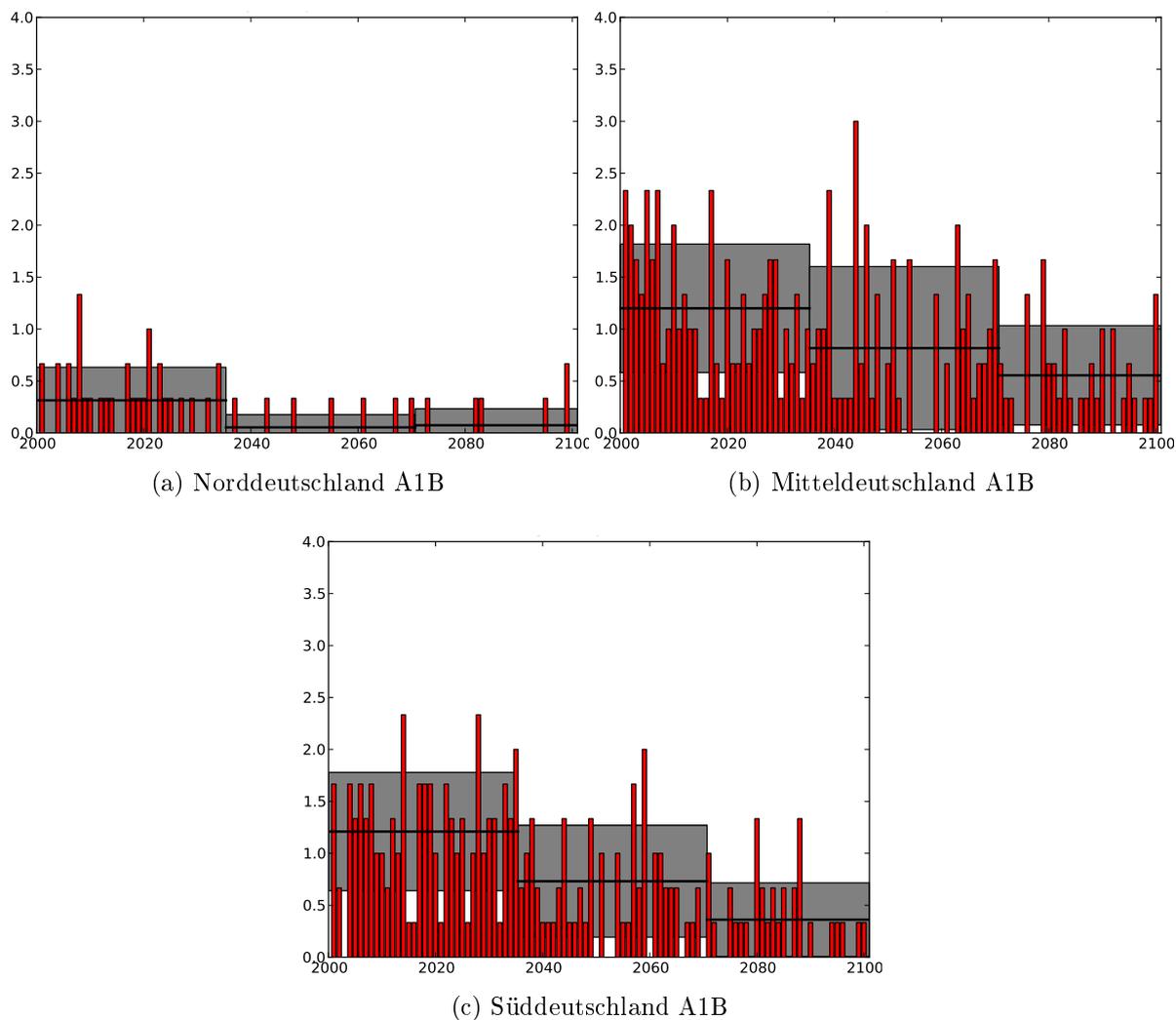


Abbildung 5.10: Anzahl der Schneelastereignisse pro Jahr in Nord- (a), Mittel- (b) und Süddeutschland (c) von 2001-2100 für das A1B Szenario. Schwarze Querbalken entsprechen jeweiligem Mittelwert.

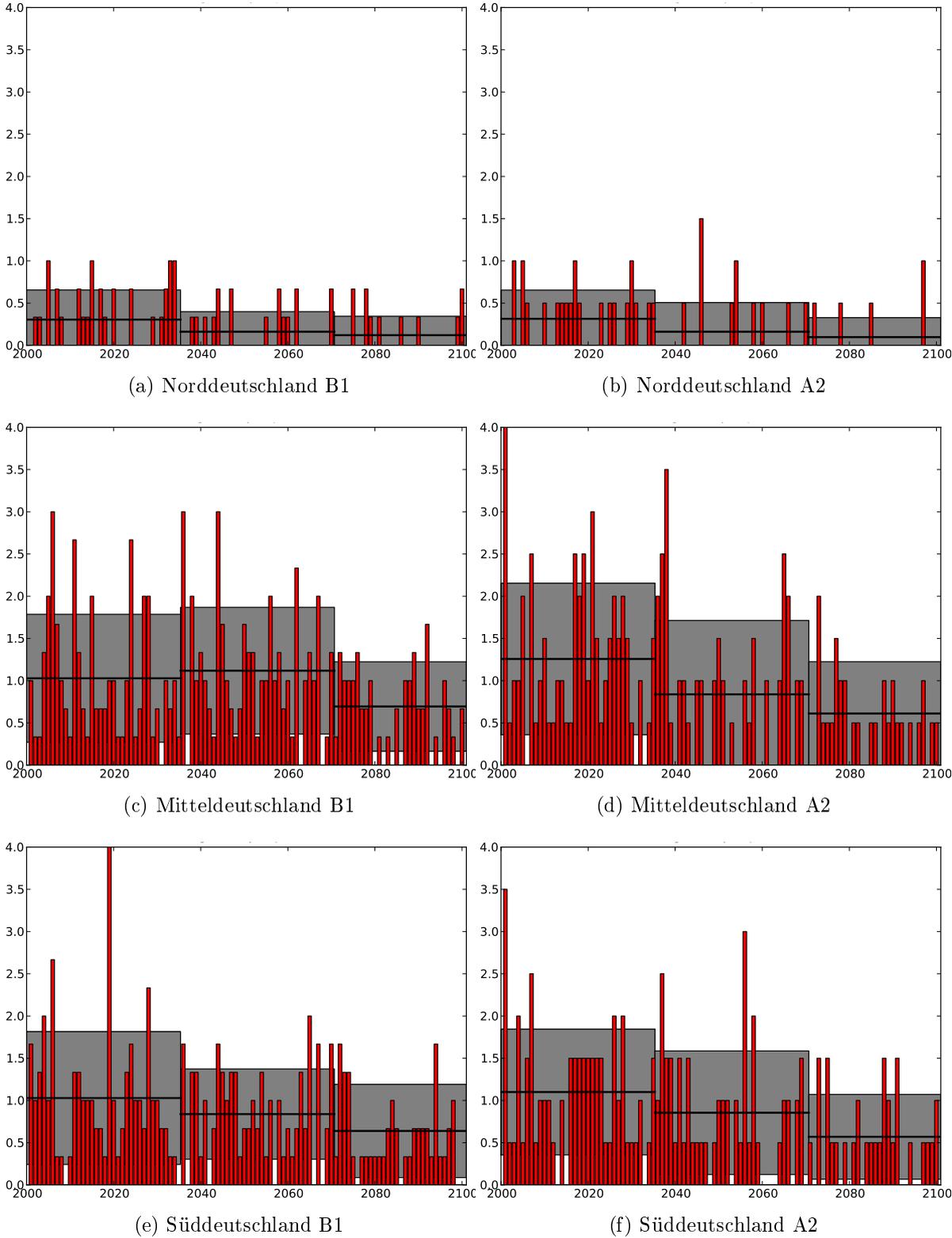


Abbildung 5.11: Anzahl der Schneelastereignisse pro Jahr in Nord-, Mittel- und Süddeutschland von 2001-2100 für die Szenarien B1 (a,c,e) und A2 (b,d,f). Schwarze Querbalen entsprechen jeweiligem Mittelwert.

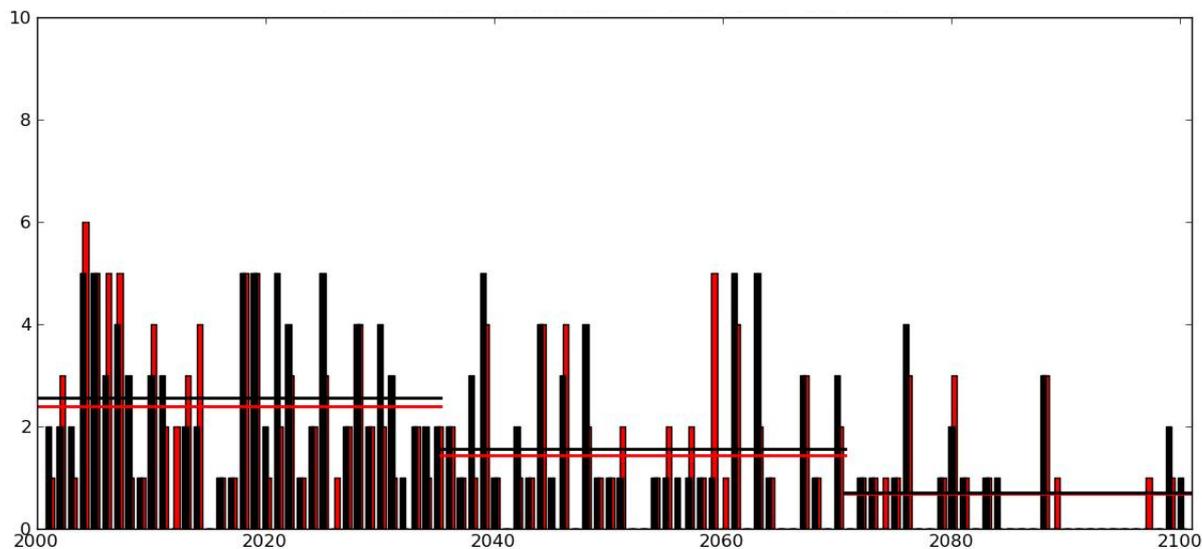


Abbildung 5.12: Modellversionsvergleich für den A1B-2 Lauf. Rot: REMO5.7, Schwarz: REMO2008

vergleichbar, doch die Unterschiede von Jahr zu Jahr sind auf den ersten Blick deutlich ausgeprägter als beim C20-Szenario mit REMO2008 und REMO2009adv. Vermutlich ist auch dies wieder auf Veränderungen im Modellklima zurückzuführen, die bei gleichem Initialisierungszustand und gleichen Randwerten, aber unterschiedlicher Dynamik und Physik solche Unterschiede hervorrufen. Da die Änderungen, wie schon angesprochen, gravierender ausfielen als zwischen REMO2008 und REMO2009adv kann also auch mit größeren Abweichungen gerechnet werden. Da nur ein Lauf für das 21. Jahrhundert vorliegt, der mit den beiden unterschiedlichen Versionen gerechnet wurde, kann dies allerdings nur gemutmaßt werden. Die häufigeren Abweichungen könnten auch Zufall sein. Deutliche Unterschiede auch der Mittelwerte sind hingegen bei der Zahl der Ereignisse, an denen Schneefall- bzw. Temperaturkriterium zutreffen, zu sehen (Abbildung 5.13). So scheint REMO5.7 deutlich mehr Ereignisse mit starkem Schneefall zu produzieren als REMO2008, während dies bei der Zahl der Tage mit Temperaturen um  $0^{\circ}$  umgekehrt der Fall ist. Dies sind insofern besonders interessante Ergebnisse, da mit REMO2008 die

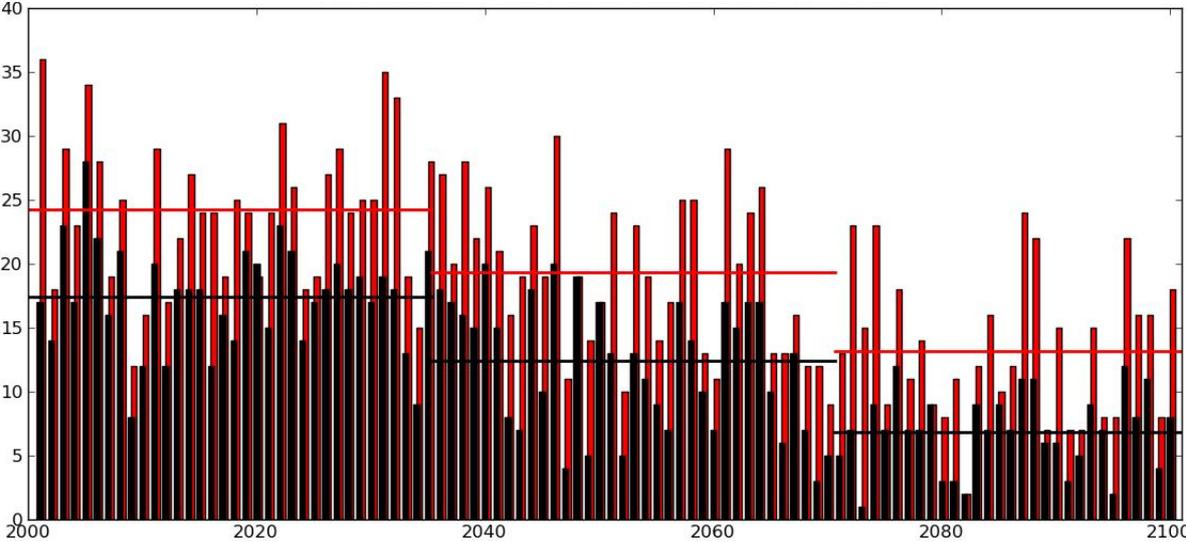
## Kapitel 5 Statistische Auswertung

---

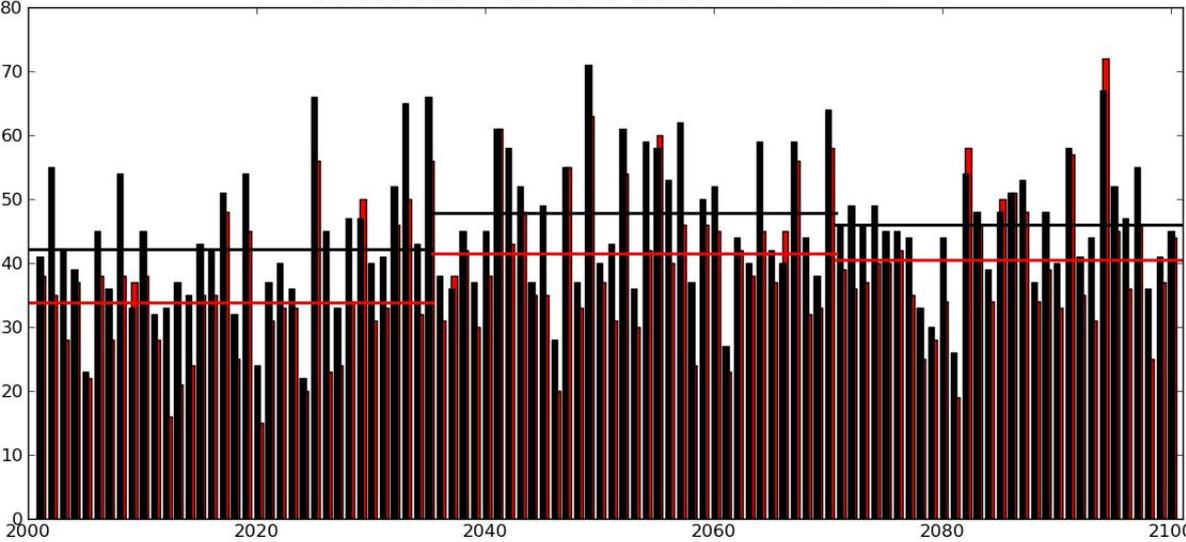
in der Modellbeschreibung angesprochene Kalte Konvektion sowie durch die Einführung von Wolkeneis als prognostische Variable ein neues Schema für großskaligen Niederschlag implementiert wurde und außerdem das sogenannte 0 Grad Problem gelöst wurde. So gab es bei älteren REMO-Versionen eine unrealistische Häufung der Temperaturverteilung bei  $0^\circ$ , da Schmelz- und Gefrierprozesse im Boden nicht korrekt dargestellt wurden. Folglich ließe sich für REMO2008 eigentlich eine Abnahme der Tage, an denen das Temperaturkriterium erfüllt wird, erwarten (im Vergleich zu REMO5.7). Warum genau das Gegenteil der Fall ist ist noch unklar.

Dass die Zahl der Ereignisse mit genügend Schneefall in REMO2008 gegenüber REMO5.7 zurückgeht lässt sich vermutlich durch das neue Niederschlagsschema erklären. So konnte Pfeifer (2007) zeigen, dass mit diesem der Winterniederschlag reduziert wird. Diese Reduktion könnte dazu führen, dass es zu weniger Ereignissen mit Starkschneefall kommt. Allerdings ist auch dies nur eine (wenn auch plausible) Vermutung, die genauer untersucht werden sollte.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Unterschied bei der Zahl der Schneelastereignisse sowie der Ereignisse, an denen die eingehenden Komponenten Schneelast zulassen würden, zwischen REMO5.7 und REMO2008 ausgeprägter ist als zwischen REMO2008 und REMO2009adv. Dies war auf Grund der deutlich größeren Änderungen am Modell zu erwarten. Eine genaue Analyse erlaubt der Vergleich von insgesamt nur drei Läufen allerdings nicht, auch wenn er Ansätze zur Diskussion bietet.



(a) Schneefallkriterium



(b) Temperaturkriterium

Abbildung 5.13: Modellversionsvergleich für Schneefall- und Temperaturkriterium im A1B-2 Lauf. Rot: REMO5.7, Schwarz: REMO2008

# Kapitel 6

## Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der Arbeit, eine Methode zu finden, um Wetterbedingungen, die eine Entstehung von Schneelasten an Überlandleitungen begünstigen, in Klimamodellen zu detektieren, wurde erreicht.

Hierzu wurde das Schneelastereignis im Münsterland anhand von Wetterkarten und Untersuchungsberichten auf Besonderheiten der meteorologischen Bedingungen ausgewertet (Kapitel 2). Die Literaturrecherche, bei der Feld- und Labormessungen, Theorien und Modelle vorgestellt wurden, ergab in Kombination mit den Münsterlandergebnissen folgende meteorologische Bedingungen, bei denen die Gefahr, dass sich Schneelast an Leitungen ausbilden kann, am größten ist: Eine Kombination aus starkem Schneefall, Temperaturen um den Gefrierpunkt und mittlere bis hohe Windgeschwindigkeiten.

Auf den Erkenntnissen aus Kapitel 2 basierend wurden in Kapitel 4 zwei Methoden zur Detektion von Schneelastereignissen vorgestellt, die anhand des Münsterlandereignisses - modelliert durch den Validierungslauf - getestet wurden. Dabei zeigte sich, dass der zum Testen verwendete Validierungslauf die genaue Wettersituation während des Münsterlandereignisses nicht korrekt wiedergibt. Dies ist vermutlich der Hauptgrund, warum die beiden Methoden das Schneelastereignis nicht (ISO-Methode) oder nur mit Abweichungen (3-Variablen-Methode) wiedergeben. Die erste Methode (ISO-Norm-Methode),

## Kapitel 6 Zusammenfassung und Ausblick

---

die starken Schneefall und eine leicht positive Feuchtkugeltemperatur voraussetzt, simulierte für das Ereignis keine Schneelast. Die zweite Methode (3-Variablen-Methode), bei der 2m-Temperaturen um den Gefrierpunkt, starker Schneefall und mindestens mittlere 10m-Windgeschwindigkeiten erforderlich sind, erzeugt einen von null bis sieben reichen Schneelastindex, der eine im Vergleich zur Realität räumlich und zeitlich versetzte Zone hoher Schneelastgefahr in Nordrhein-Westfalen simuliert. Da die vorliegenden Daten keine weiteren bekannten Schneelastereignisse abdecken, konnte keine vollständige Validation der beiden Methoden erfolgen. Dennoch wurde die 3-Variablen-Methode unter Vorbehalt im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet, da ihre Funktionalität durch die vorliegenden Ergebnisse auch nicht angezweifelt werden muss. Sie wurde der ISO-Norm-Methode vorgezogen, da sie für die Detektion von Ereignissen, die das Potential für Schneelasten haben, als die bessere Wahl angesehen wird.

Für eine statistische Untersuchung wurde zunächst für den Kontrollzeitraum von 1950 bis 2000 die mittlere Häufigkeit von Situationen, bei denen es der Theorie folgend zu Schneelasten an Leitungen kommen kann, berechnet. Auf Basis der drei C20-Ensembleläufe kam es demnach in diesem Zeitraum jährlich zu etwa zwei Situationen, bei denen irgendwo in Deutschland die Bedingungen erfüllt wurden. Für solche Situationen prädestiniert erscheinen generell die mittleren Lagen der Mittelgebirge sowie Ostbayern und das Erzgebirge. Letzteres dürfte auf winterliche Vb-Tiefdruckgebiete zurückzuführen sein. Im prognostizierten Klima des 21. Jahrhunderts geht die berechnete Anzahl von Schneelastereignissen um mehr als 50 % zurück, was sich vor allem ab der zweiten Jahrhunderthälfte bemerkbar macht. Das eher moderate Erwärmungsszenario B1 simuliert dabei einen etwas schwächeren Rückgang während die regionale Verteilung des 20. Jahrhunderts in allen drei Szenarien auch im 21. Jahrhundert zu finden ist.

Da mehrere Läufe mit gleichem Antrieb aber verschiedenen REMO-Versionen existieren, wurden diese auf Unterschiede bei der Anzahl berechneter Schneelastereignisse und Situationen mit erfüllten Kriterien für Schneefall, Temperatur und Windgeschwindigkeit untersucht. Während die Unterschiede zwischen REMO2008 und REMO2009adv klein

## Kapitel 6 Zusammenfassung und Ausblick

---

und durch statistische Variabilität erklärbar sind, zeigen sich zwischen REMO5.7 und REMO2008 teilweise deutliche Unterschiede vor allem bei Schneefall und Temperaturbereich, die weiter untersucht werden könnten.

Die vorgestellte 3-Variablen-Methode und der von ihr berechnete Schneelastindex bietet Spielraum für weitere Untersuchungen im Bereich der Schneelastdetektion und eventuell auch -vorhersage. So könnte beispielsweise mit einem Vorhersagelauf, bei dem REMO stündlich neu initialisiert wird, das Münsterlandereignis oder andere bekannte Situationen, bei denen es zum Zusammenbruch mehrerer Überlandleitungen kam, noch eingehender untersucht werden. Dabei ließen sich möglicherweise auch Korrelationen zu bestimmten Druckmustern herstellen, die eine Ausbildung von Schneelasten begünstigen (z.B. Vb-Wetterlagen). Weiteren Spielraum bietet auch die Entwicklung zusätzlicher Schneelastindizes und deren Vergleich, wie in dieser Arbeit am Beispiel der ISO-Norm-Methode geschehen. Auch das Anwenden der Methode auf andere Modellgebiete wie Japan oder Nordamerika, die der Literatur folgend noch deutlich häufiger Schneelasten hervorrufende Wetterlagen erleben, bietet sich für weitere Studien an.

Die (Weiter-)Entwicklung und Validierung der 3-Variablen-Methode sowie das Herausarbeiten von Gebieten in Deutschland, die besonders von Schneelasten betroffen sind, anhand vorhandener Klimamodelldaten liefert sicherlich einen Beitrag, mit dem in Deutschland eher wenig untersuchten Problem von Schneelasten an Überlandleitungen besser umzugehen und so Schäden und Folgeschäden zu reduzieren. Darüberhinaus bietet sicherlich auch die Auseinandersetzung mit Schneelasten auf Dächern eine Herausforderung, da diese durch andere meteorologische Bedingungen entstehen und das Betrachten längerer Zeiträume (Wochen bis Monate) nötig machen.

# Literaturverzeichnis

- [ISO12494 2001] : *ISO 12494:2001 Atmospheric icing of structures*. 2001
- [Admirat und Sakamoto 1988] ADMIRAT, P. ; SAKAMOTO, Y.: Wet snow on overhead lines - state of art IWAIS (Veranst.), 1988, S. 7–13
- [Admirat 2008] ADMIRAT, Pierre: Wet Snow Accretion on Overhead Lines. In: FARZANEH, Masoud (Hrsg.): *Atmospheric Icing of Power Networks*. Springer Netherlands, 2008, S. 119–169
- [Bauer 1973] BAUER, D.: Snow Accretion on Power Lines. In: *Atmosphere* 11 (1973), S. 88–96
- [Bundesnetzagentur 2006] BUNDESNETZAGENTUR: Untersuchungsbericht über die Versorgungsstörungen im Netzgebiet des RWE im Münsterland vom 25.11.2005 / Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. 2006. – Forschungsbericht
- [Dalle und Admirat 2011] DALLE, B. ; ADMIRAT, P.: Wet snow accretion on overhead lines with French report of experience. In: *Cold Regions Science and Technology* 65 (2011), Januar, Nr. 1, S. 43–51. – ISSN 0165-232X
- [Davies 1976] DAVIES, H.C.: A lateral boundary formulation for multi-level prediction models. In: *Quart. J. R. Meteor. Soc.* 102 (1976), S. 405–418
- [Deutschländer und Wichura 2005] DEUTSCHLÄNDER, T. ; WICHURA, B.: Das Mün-

## Literaturverzeichnis

---

- serländer Schneechaos am 1. Adventswochenende 2005. In: *DWD Klimastatusbericht* (2005), S. 163–167
- [Fisher u. a. 2007] FISHER, B.S. ; NAKICENOVIC, N. ; ALFSEN, K. ; CORFEE MORLOT, J. ; CHESNAYE, F. de la ; HOURCADE, J.-Ch. ; JIANG, K. ; KAINUMA, M. ; LA ROVERE, E. ; MATYSEK, A. ; RANA, A. ; RIAHI, K. ; RICHEL, R. ; ROSE, S. ; VUUREN, D. van ; WARREN, R. ; METZ, B. (Hrsg.) ; DAVIDSON, O.R. (Hrsg.) ; BOSCH, P.R. (Hrsg.) ; DAVE, R. (Hrsg.) ; MEYER, L.A. (Hrsg.): *Issues related to mitigation in the long term context, In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2007
- [Holschemacher und Klug 2007] HOLSCHEMACHER, Klaus ; KLUG, Yvette: *Lastannahmen nach neuen Normen*. Bauwerk, 2007
- [Jacob 2001] JACOB, D.: A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. In: *Meteor. Atm.* 77 (2001), S. 61–73
- [Jacob u. a. 2008] JACOB, D. ; GÖTTEL, H. ; KOTLARSKI, S. ; LORENZ, P. ; SIECK, K.: *Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland / Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), Hamburg im Auftrag des Umweltbundesamtes. 2008. – Forschungsbericht*
- [Jacob u. a. 2001] JACOB, D. ; HURK, B.J.J.M. Van den ; ANDRAE, U. ; ELGERED, G. ; FORTELIUS, C. ; GRAHAM, L.P. ; JACKSON, S.D. ; KARSTENS, U. ; KÖPKEN, C. ; LINDAU, R. ; PODZUN, R. ; ROCKEL, B. ; RUBEL, F. ; SASS, B.H. ; SMITH, R.N.B. X. Y.: A comprehensive model inter-comparison study investigating the water budget during the BALTEX-PIDCAP period. *Meteorology and Atmospheric Physics*. In: *Met* 77 (2001), S. 19–43
- [Majewski u. a. 1995] MAJEWSKI, D. ; DOMS, G. ; EDELMANN, W. ; GERTZ, M. ;

## Literaturverzeichnis

---

- HANISCH, T. ; HEISE, E. ; LINK, A. ; PROHL, P. ; SCHAETTLER, U. ; RITTER, B.:  
Dokumentation des EM/DM-Systems / Abteilung Forschung, Deutscher Wetterdienst.  
1995. – Forschungsbericht
- [Makkonen 1989] MAKKONEN, L.: Estimation of wet snow accretion on structures. In:  
*Cold Regions Science and Technology* 17 (1989), September, Nr. 1, S. 83–88. – ISSN  
0165-232X
- [Makkonen und Wichura 2010] MAKKONEN, L. ; WICHURA, B.: Simulating wet snow  
loads on power line cables by a simple model. In: *Cold Regions Science and Technology*  
61 (2010), Mai, Nr. 2-3, S. 73–81. – ISSN 0165-232X
- [Michels u. a. 2002] MICHELS, Kai ; KLAWONN, Frank ; KRUSE, Rudolf ; NÜRNBER-  
GER, Andreas: *Fuzzy-Regelung: Grundlagen, Entwurf, Analyse*. Springer, 2002
- [Pfeifer 2007] PFEIFER, Susanne: *Modeling cold cloud processes with the regional  
climate model REMO*, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Dissertation, 2007
- [Poots 1996] POOTS, G.: *Ice and snow accretion on structures*. Research Studies  
Press, 1996 (Electronic & electrical engineering research studies: Applied and engi-  
neering mathematics series). – URL <http://books.google.com/books?id=8CBRAAAAMAAJ>. – ISBN 9780863801891
- [Roeckner u. a. 1996] ROECKNER, E. ; ARPE, K. ; BENGTSSON, L. ; CHRISTOPH, M. ;  
CLAUSSEN, M. ; DÜMENIL, L. ; ESCH, M. ; SCHLESE, U. ; SCHULZWEIDA, U.: The  
atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation  
of present-day climate / Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 218. 1996.  
– Forschungsbericht
- [Roeckner u. a. 2003] ROECKNER, E. ; BÄUML, G. ; BONAVENTURA, L. ; BROKOPF,  
R. ; ESCH, M. ; HAGEMANN, S. ; KIRCHNER, I. ; KORNBLUEH, L. ; MANZINI, E. ;  
RHODIN, A. ; SCHLESE, U. ; SCHULZWEIDA, U. ; TOMPKINS, A.: The atmospheric  
general circulation model ECHAM5 / Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report  
No. 349. 2003. – Forschungsbericht

## Literaturverzeichnis

---

- [Sakamoto 2000] SAKAMOTO, Y.: Snow accretion on overhead wires. In: *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* (Sakamoto, 2000), S. 2941–2970
- [Sakamoto u. a. 1986] SAKAMOTO, Y. ; ADMIRAT, P. ; LAPEYRE, J.L. ; MACCAGNAN, M.: Modelling wet snow accretion in a wind tunnel IWAIS (Veranst.), 1986
- [Sakamoto u. a. 1988] SAKAMOTO, Y. ; ADMIRAT, P. ; LAPEYRE, J.L. ; MACCAGNAN, M.: Thermodynamic simulation of wet snow accretion under wind-tunnel conditions IWAIS (Veranst.), 1988
- [Shao u. a. 2003] SHAO, J. ; LAUX, S. J. ; TRAINOR, B. J. ; PETTIFER, R. E. W.: Nowcasts of temperature and ice on overhead railway transmission wires. In: *Meteorological Applications* 10 (2003), S. 123–133
- [Shoda 1953] SHODA, M.: Snow accretion on overhead wires. In: *Research on snow and ice* 1 (1953)
- [Simmons u. a. 2007] SIMMONS, A. ; UPPALA, S. ; DEE, D. ; KOBAYASHI, S.: ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. In: *ECMWF Newsletter* 110 (2007), S. 25–36
- [Sundqvist 1978] SUNDQVIST, H.: A parameterization scheme for non-convective condensation including prediction of cloud water content. In: *Quart. J. R. Meteor. Soc.* 104 (1978), S. 677–690
- [Sundqvist u. a. 1989] SUNDQVIST, H. ; BERGE, E. ; KRISTJANSSON, J. E.: Condensation and cloud parameterization studies with a mesoscale numerical weather prediction model. In: *Monthly Weather Review* 117 (1989), S. 1641–1657
- [Wikipedia 2011] WIKIPEDIA: Verdrillung. In: *Wikipedia - Die frei Enzyklopädie* betrachtet am: 25.08.2011 (2011). – URL <http://de.wikipedia.org/wiki/Verdrillung>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Zusammengebrochene Strommasten im Münsterland . . . . .	1
2.1	Entwicklung der Wetterlage vom 23.-27.11.2005. . . . .	4
2.2	Niederschlagsradarbild vom 25.11.2005 9.45 Uhr MEZ Nordrheinwestfalen	5
2.3	Schneeablagerung an Stromleitungen unter Trockenschneebedingungen .	8
2.4	Schneeablagerung an einem idealisierten starren Zylinder unter Nassschnee- bedingungen . . . . .	10
2.5	Schneeablagerung an einem verseilten Kabel unter Nassschneebedingungen	11
2.6	Windkanalaufbau für die Darstellung von Nassschneeablagerung an Lei- tungen unter kontrollierten atmosphärischen Bedingungen; aus Sakamoto (2000). . . . .	12
2.7	Wetterbedingungen während eines Schneelastereignisses in Japan, März 1986; aus Sakamoto (2000) . . . . .	13
3.1	Höhe der Modellevel im p-Koordinatensystem für hybride Koordinaten- systeme mit Werten des Oberflächendruckes von 980hPa, 1010hPa und 1040hPa. Die Kreuze stellen die Zentren des jeweiligen Modelllevels dar; aus Pfeifer (2007) . . . . .	17
3.2	a) Modellorographie des Cordex-Laufs Gesamtmodellgebiet, b) für die Arbeit verwendeter Ausschnitt; c) Modellorographie des UBA-Laufes Ge- samtmodellgebiet, d) für die Arbeit verwendeter Ausschnitt . . . . .	23

## Abbildungsverzeichnis

---

4.1	Schnee- (a) und Niederschlagssumme (b) während des Münsterlandereignisses in mm Schneefall bzw. Niederschlag (26.11.2005 12 Uhr - 27.11.2005 12 Uhr); simuliert durch den REMO Validierungslauf 001524. . . . .	28
4.2	Messdaten für den Niederschlag an drei Wetterstationen im Münsterland vom 25. bis 28. November 2005. Aus Makkonen und Wichura (2010). . .	29
4.3	Entwicklung des Bodendruckfeldes in Europa (in hPa) während des Münsterlandereignisses (ab 24.11.2005 00 Uhr) im Abstand von 24 Stunden; simuliert durch den REMO Validierungslauf 001524. . . . .	30
4.4	Entwicklung der Schneefallintensität in Deutschland (in mm/6h) während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr), ausgewählte Zeitpunkte. Stündliche Abfolge im Anhang; simuliert durch den REMO Validierungslauf 001524. . . . .	31
4.5	Entwicklung der Feuchttemperatur in Deutschland (in °C) während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr), ausgewählte Zeitpunkte. Stündliche Abfolge im Anhang; simuliert durch den REMO Validierungslauf 001524. . . . .	32
4.6	Entwicklung der Schneelast in Deutschland nach der ISO-Methode mit Grenzwert 0,9 während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr), ausgewählte Zeitpunkte. Stündliche Abfolge im Anhang. Schwarz markierte Gitterboxen zeigen simulierte Schneelast; simuliert durch den REMO Validierungslauf 001524. . . . .	33
4.7	Entwicklung der 2m-Temperatur (in °C) in Deutschland während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr), ausgewählte Zeitpunkte. Stündliche Abfolge im Anhang; simuliert durch den REMO Validierungslauf 001524. . . . .	38

## Abbildungsverzeichnis

---

4.8	Entwicklung der 10m-Windgeschwindigkeit (in m/s) in Deutschland während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr), ausgewählte Zeitpunkte. Stündliche Abfolge im Anhang; simuliert durch den REMO Validierungslauf 001524. . . . .	39
4.9	Entwicklung des Schneelastindizes in Deutschland nach der 3-Variablen-Methode während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr), ausgewählte Zeitpunkte. Stündliche Abfolge im Anhang. Als Skala wird die im Text beschriebene Wichtung der Gefahr von Schneelast zwischen 0 und 7 verwendet; simuliert durch den REMO Validierungslauf 001524. . . . .	40
5.1	a) Anzahl der Schneelastereignisse pro Jahr in Deutschland von 1950-2000, b) Anzahl der Ereignisse an denen Schneefall in den vorgegebenen Wertebereich fällt, sowie durchschnittliche Anzahl pro Jahr mit einfacher Standardabweichung (schwarzer Querbalken mit grauer Schattierung). Datensatz: Ensemblemittel der Häufigkeit für die REMO-Läufe C20-1, C20-2 und C20-3. Details siehe Text. . . . .	47
5.2	Anzahl der Ereignisse in Deutschland von 1950-2000 an denen a) Temperatur und b) Wind in den jeweils vorausgesetzten Wertebereich fallen sowie durchschnittliche Anzahl pro Jahr mit einfacher Standardabweichung (schwarzer Querbalken mit grauer Schattierung), Datensatz: Ensemblemittel der Häufigkeit für die REMO-Läufe C20-1, C20-2 und C20-3. . . . .	48
5.3	a) Anzahl der Schneelastereignisse pro Gitterbox im Gesamtzeitraum 1950-2000. Grün: maximal 1 Ereignis, Gelb: > 1 bis 5 Ereignisse, Rot: mehr als 5 Ereignisse. Datensatz: Ensemblemittel der Häufigkeit für die REMO-Läufe C20-1, C20-2 und C20-3. b) Modell-Orographie zum Vergleich . . . . .	50

## Abbildungsverzeichnis

---

5.4	Anzahl Schneelastereignisse pro Jahr in Nord-, Mittel- und Süddeutschland von 1950-2000 mit Mittelwert und Standardabweichung. Datensatz: Ensembledittel der Häufigkeit für die REMO-Läufe C20-1, C20-2 und C20-3. Modell-Orographie zum Vergleich. . . . .	52
5.5	Modellversionsvergleich für den C20-3-Lauf (a) und den C20-2-Lauf (b). Rot: REMO2009adv, Schwarz: REMO2008 . . . . .	54
5.6	Anzahl der Schneelastereignisse pro Jahr in Deutschland von 2001-2100 für die Szenarien a) A1B, b) B1, c) A2 und Anzahl der Ereignisse, an denen das Schneekriterium erfüllt ist (b,d,f). Schwarze Querbalken entsprechen jeweiligem Mittelwert. . . . .	58
5.7	Tage pro Jahr in Deutschland von 2001-2100 für die Szenarien A1B, B1, A2 an denen das Temperaturkriterium (a,c,e) und Anzahl der Ereignisse, an denen das Windkriterium erfüllt ist (b,d,f). Schwarze Querbalken entsprechen jeweiligem Mittelwert. . . . .	59
5.8	Anzahl der Schneelastereignisse pro Gitterbox im 21. Jahrhundert für das A1B-Szenario B1 während der Zeiträume 2001-2050 (a) und 2051-2100 (b). Grün: maximal 1 Ereignis, Gelb: 1 bis 5 Ereignisse, Rot: mehr als 5 Ereignisse. . . . .	60
5.9	Anzahl der Schneelastereignisse pro Gitterbox im 21. Jahrhundert für die Szenarien B1 (a,b) und A2 (c,d) während der Zeiträume 2001-2050 (a,c) und 2051-2100 (b,d). Grün: maximal 1 Ereignis, Gelb: 1 bis 5 Ereignisse, Rot: mehr als 5 Ereignisse. . . . .	62
5.10	Anzahl der Schneelastereignisse pro Jahr in Nord- (a), Mittel- (b) und Süddeutschland (c) von 2001-2100 für das A1B Szenario. Schwarze Querbalken entsprechen jeweiligem Mittelwert. . . . .	63
5.11	Anzahl der Schneelastereignisse pro Jahr in Nord-, Mittel- und Süddeutschland von 2001-2100 für die Szenarien B1 (a,c,e) und A2 (b,d,f). Schwarze Querbalken entsprechen jeweiligem Mittelwert. . . . .	64

## Abbildungsverzeichnis

---

5.12	Modellversionsvergleich für den A1B-2 Lauf. Rot: REMO5.7, Schwarz: REMO2008 . . . . .	65
5.13	Modellversionsvergleich für Schneefall- und Temperaturkriterium im A1B-2 Lauf. Rot: REMO5.7, Schwarz: REMO2008 . . . . .	67
A.1	Entwicklung der Feuchtkugeltemperatur in Deutschland (in °C) während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr) im stündlichen Abstand.XVIII	
A.2	Entwicklung der Schneefallintensität in Deutschland (in mm/6h) während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr) im stündlichen Abstand.XX	
A.3	Entwicklung der Schneelast in Deutschland nach der ISO-Methode mit Grenzwert 0,9 während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr) im stündlichen Abstand. Schwarz markierte Gitterboxen zeigen simulierte Schneelast. . . . .	XXII
A.4	Entwicklung der 2m-Temperatur (in °C) in Deutschland während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr) im stündlichen Abstand. .	XXIV
A.5	Entwicklung der 10m-Windgeschwindigkeit (in m/s) in Deutschland während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr) im stündlichen Abstand . . . . .	XXVI
A.6	Entwicklung der Schneelast in Deutschland nach der 3-Variablen-Methode während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr) im stündlichen Abstand. Als Skala wird die im Text beschriebene Wichtung der Gefahr von Schneelast zwischen 0 und 7 verwendet. . . . .	XXVIII

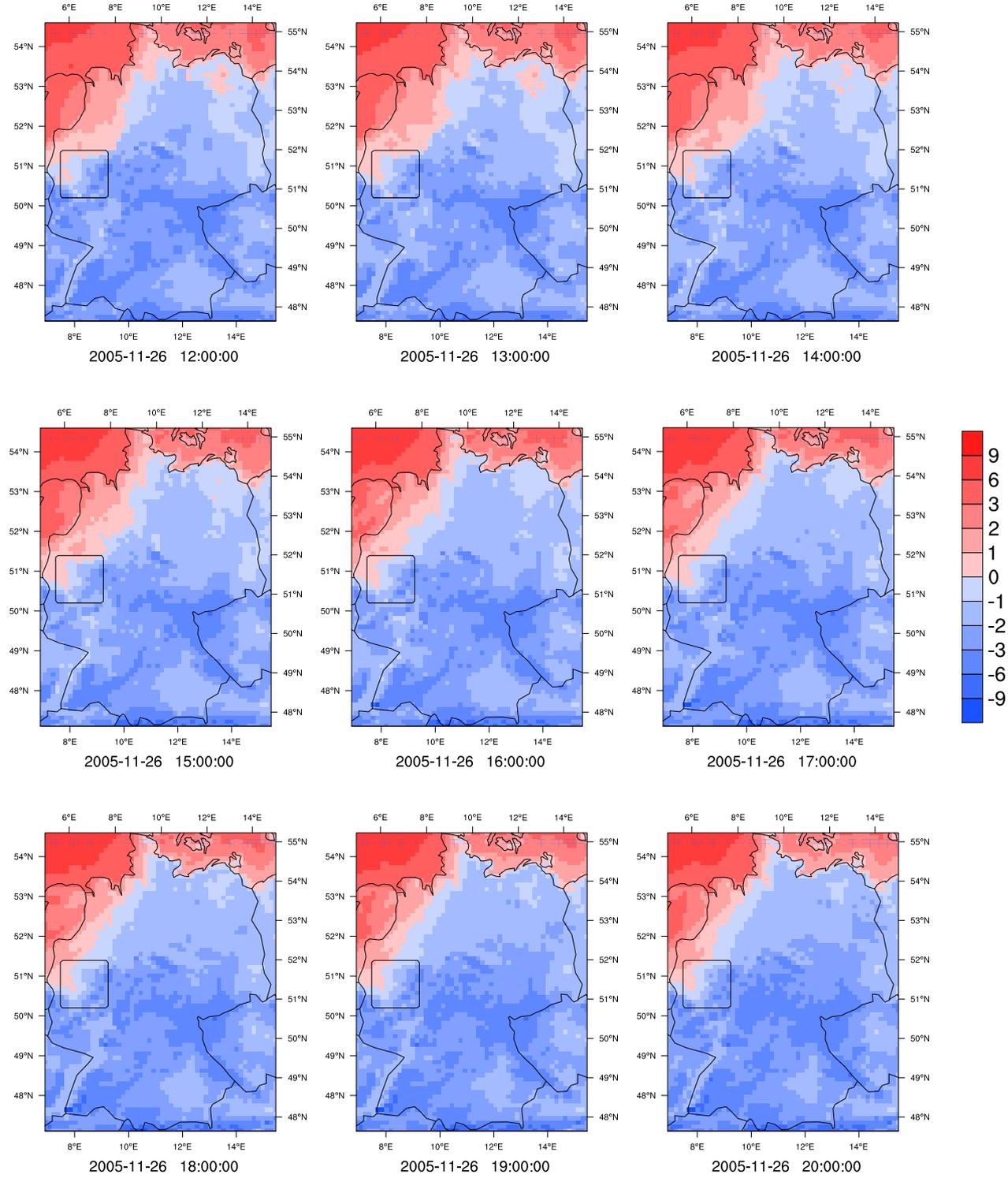
# Tabellenverzeichnis

3.1 Übersicht aller verwendeten REMO-Läufe . . . . .	24
--	----

Anhang A

Anhang

Anhang A Anhang



## Anhang A Anhang

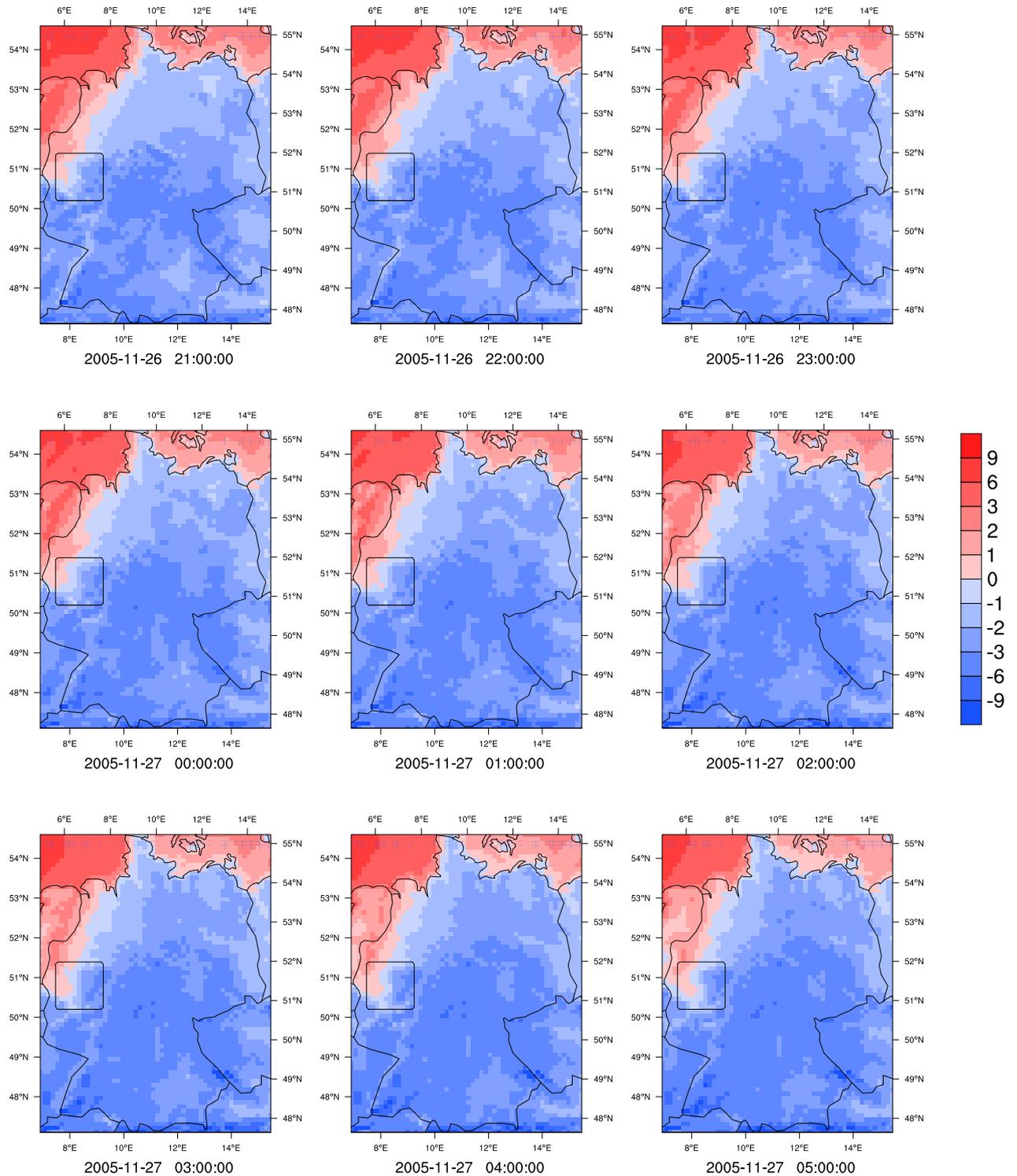
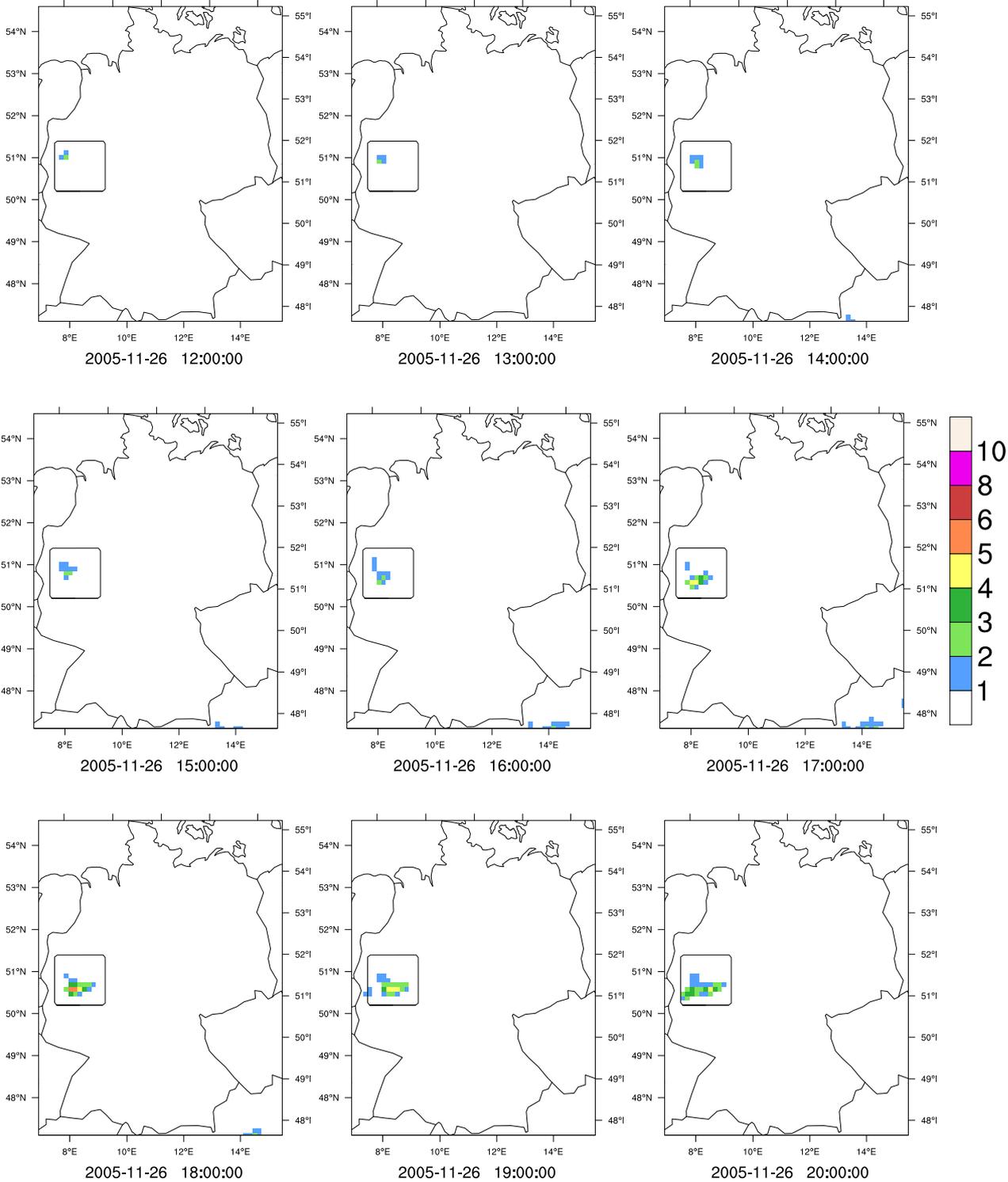


Abbildung A.1: Entwicklung der Feuchtkugeltemperatur in Deutschland (in °C) während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr) im stündlichen Abstand.

# Anhang A Anhang



## Anhang A Anhang

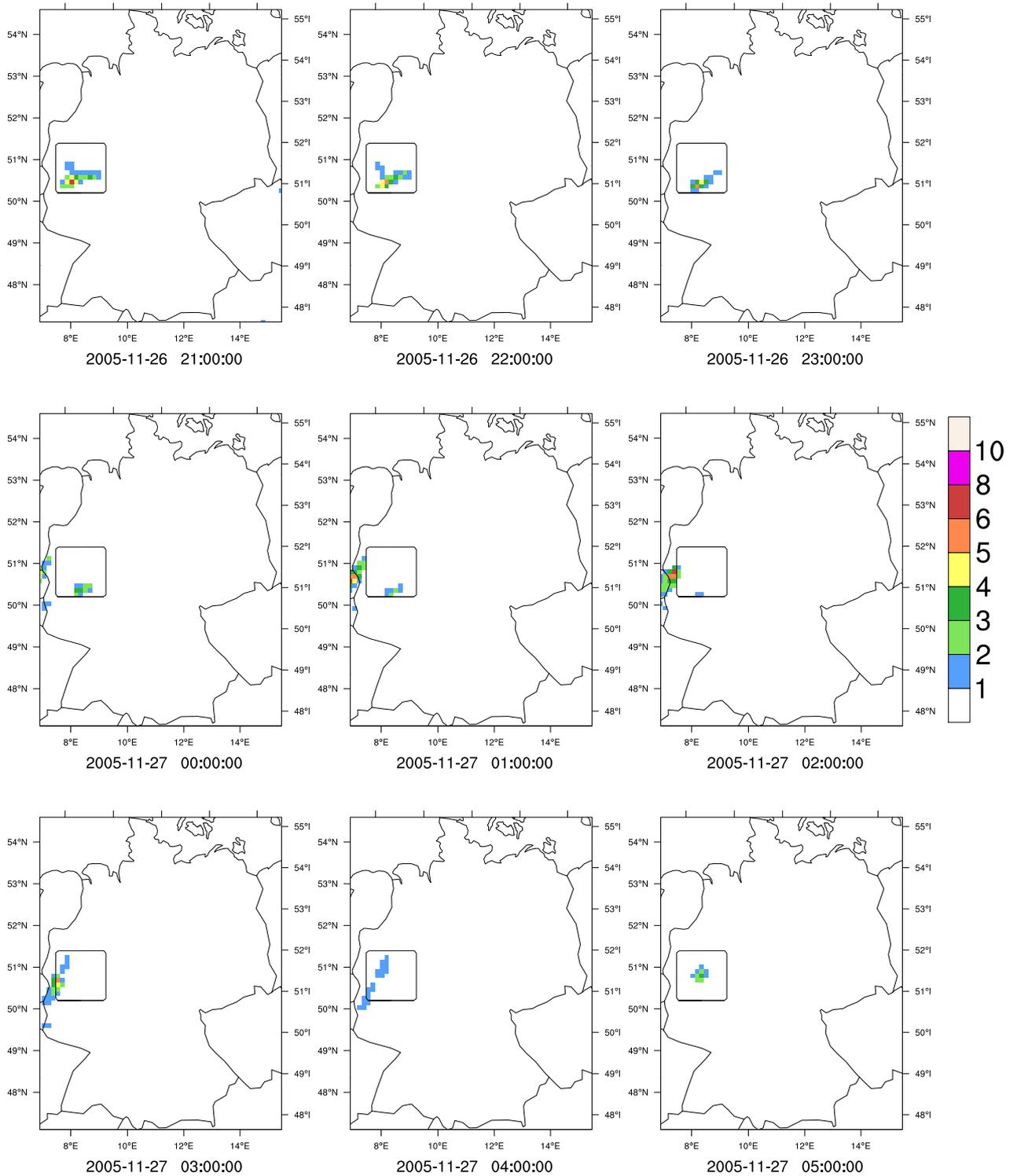
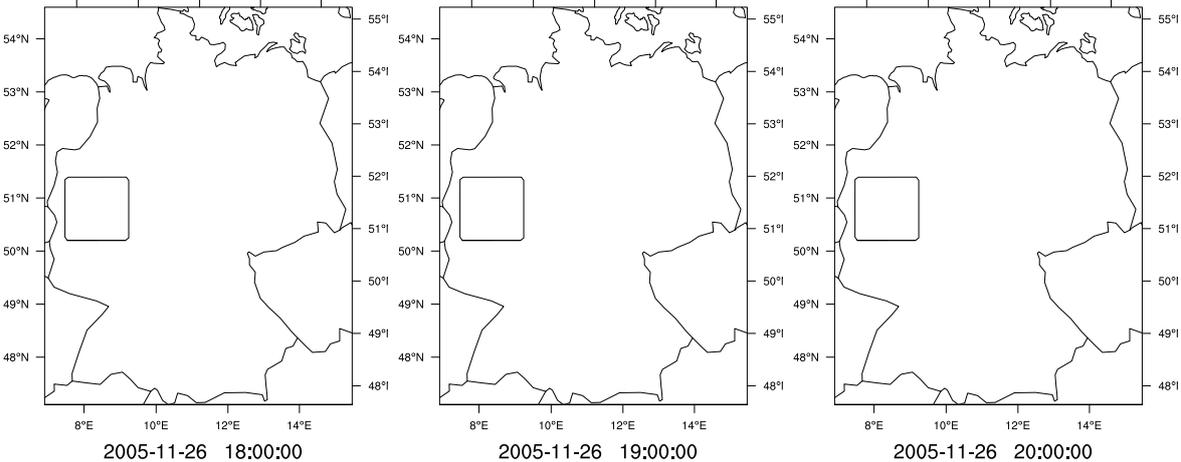
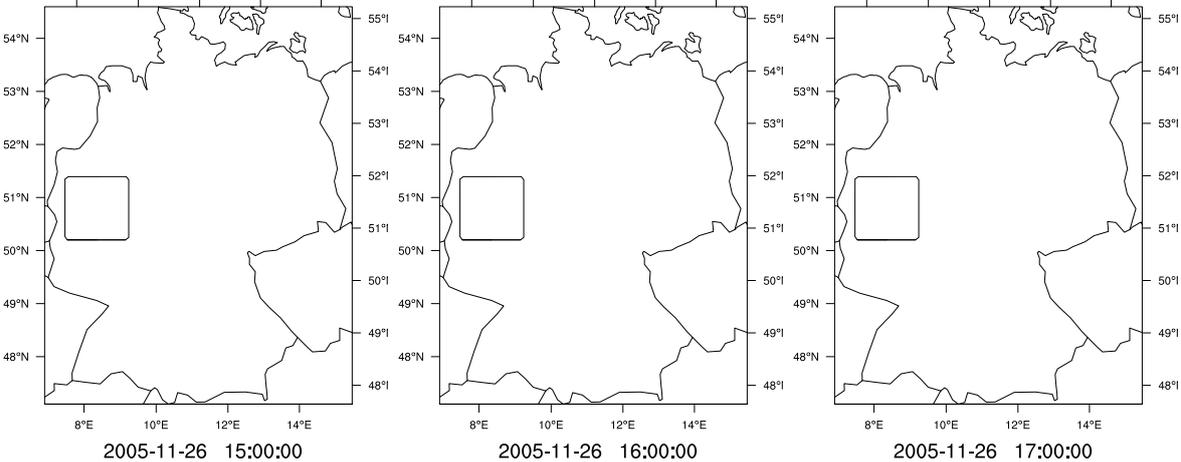
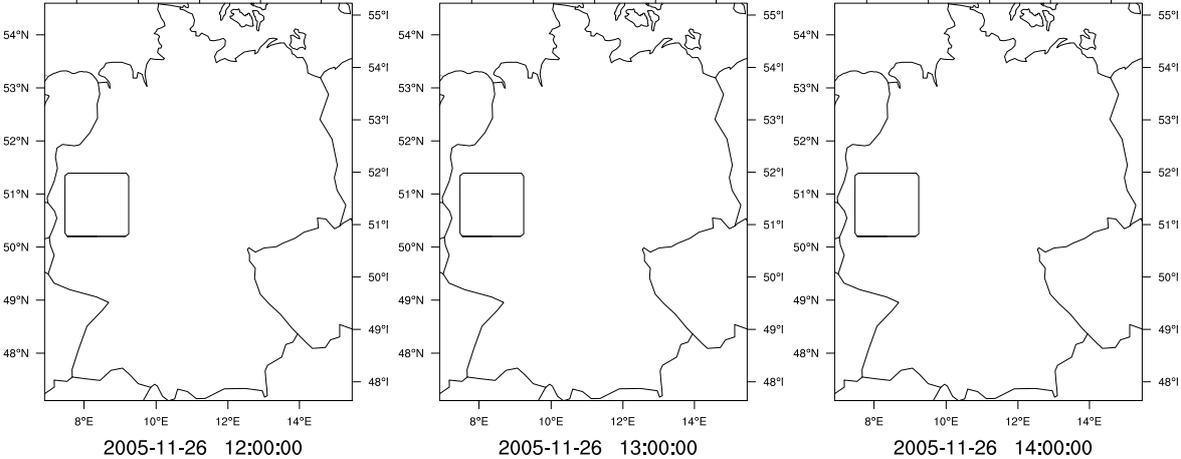


Abbildung A.2: Entwicklung der Schneefallintensität in Deutschland (in mm/6h) während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr) im stündlichen Abstand.

Anhang A Anhang



## Anhang A Anhang

---

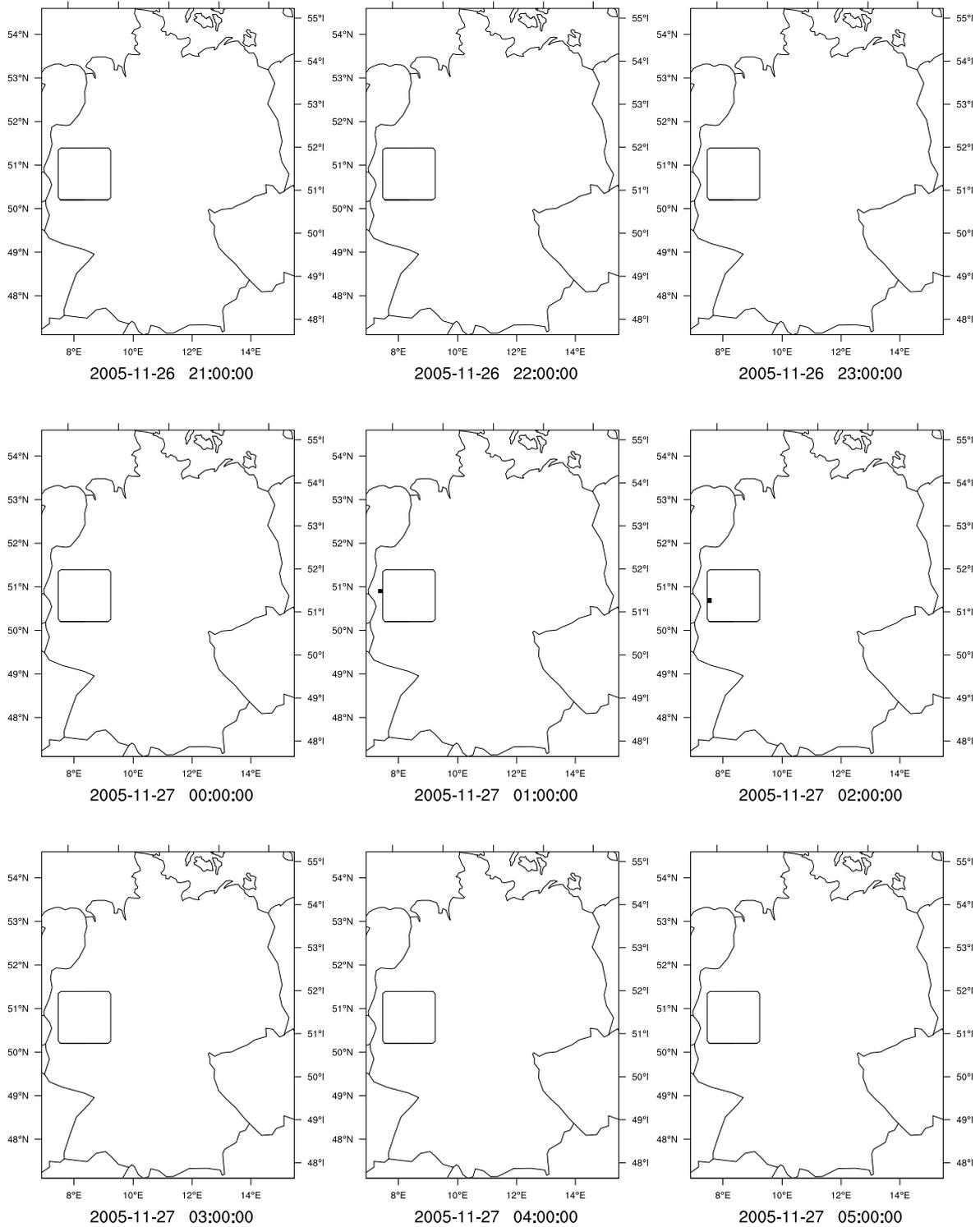
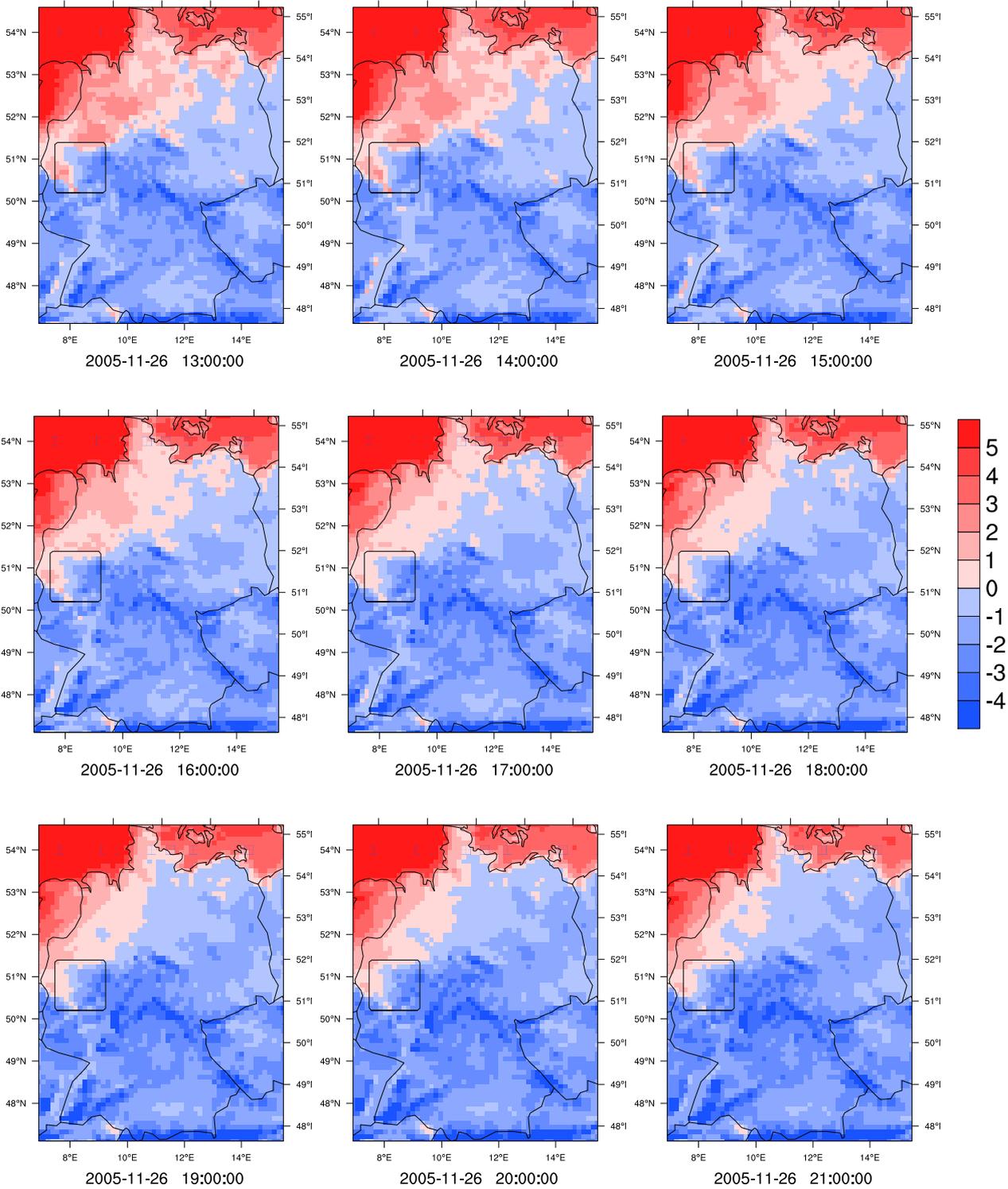


Abbildung A.3: Entwicklung der Schneelast in Deutschland nach der ISO-Methode mit Grenzwert 0,9 während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr) im stündlichen Abstand. Schwarz markierte Gitterboxen zeigen simulierte Schneelast.

Anhang A Anhang



## Anhang A Anhang

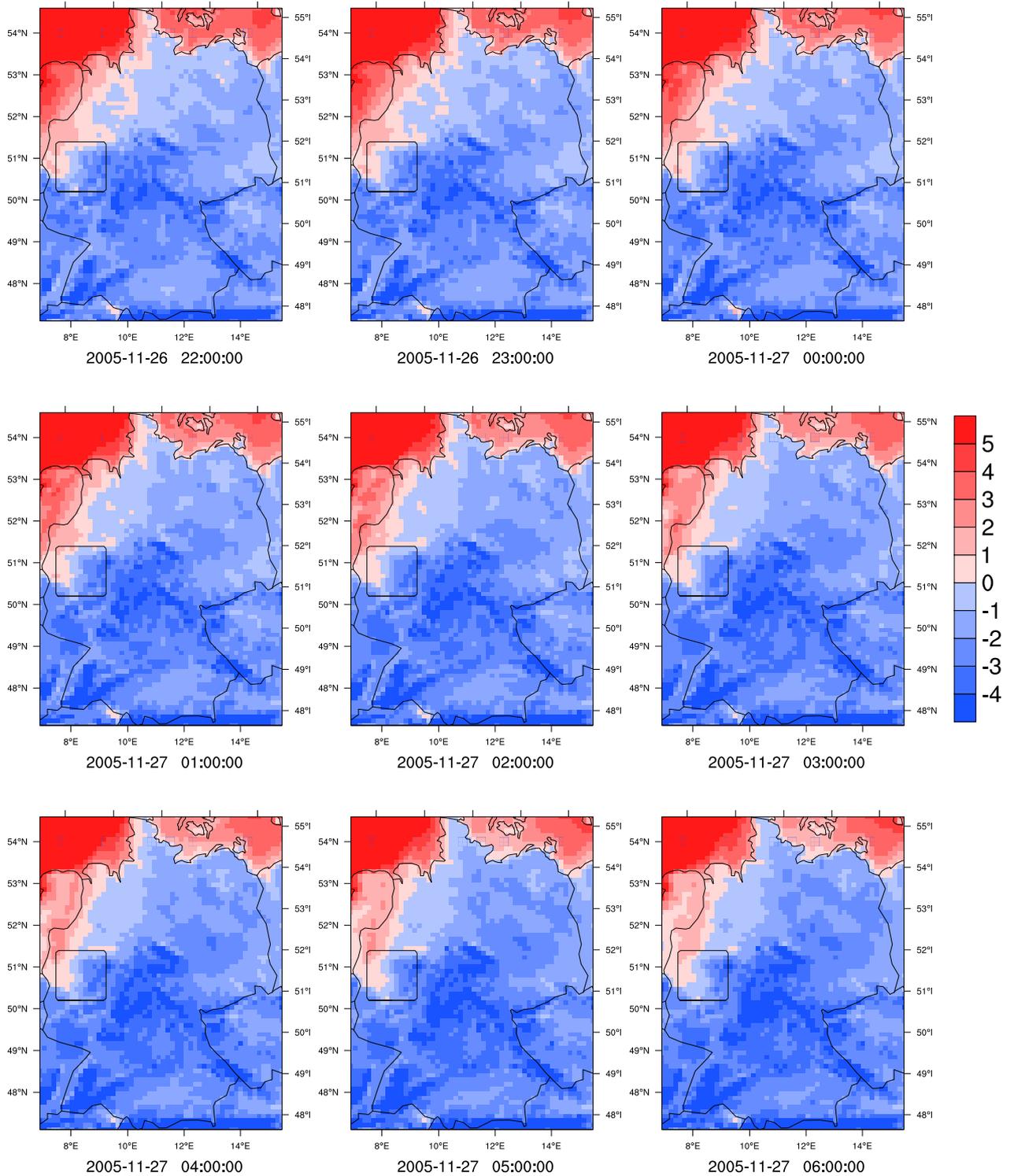
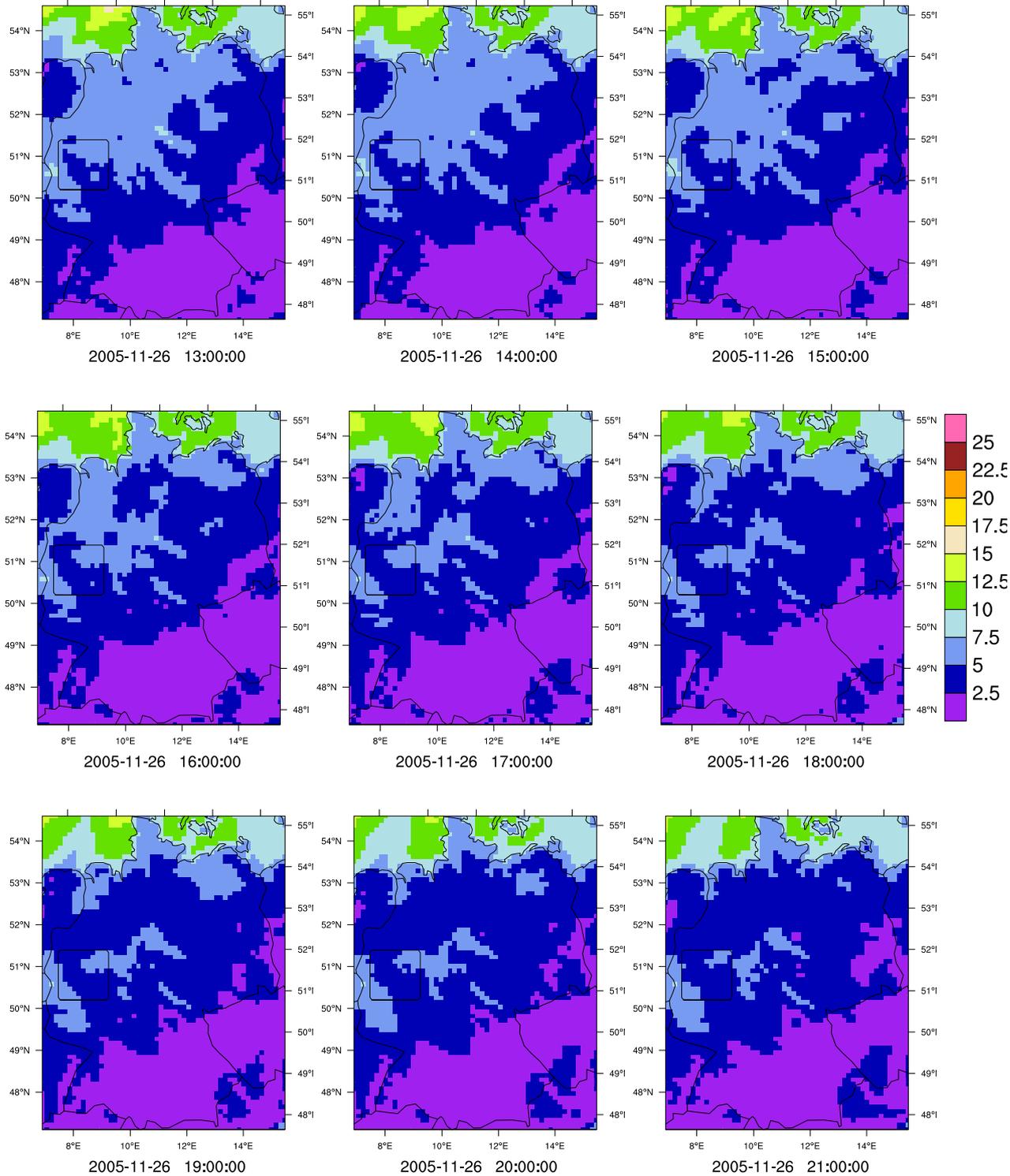


Abbildung A.4: Entwicklung der 2m-Temperatur (in °C) in Deutschland während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr) im stündlichen Abstand.

Anhang A Anhang



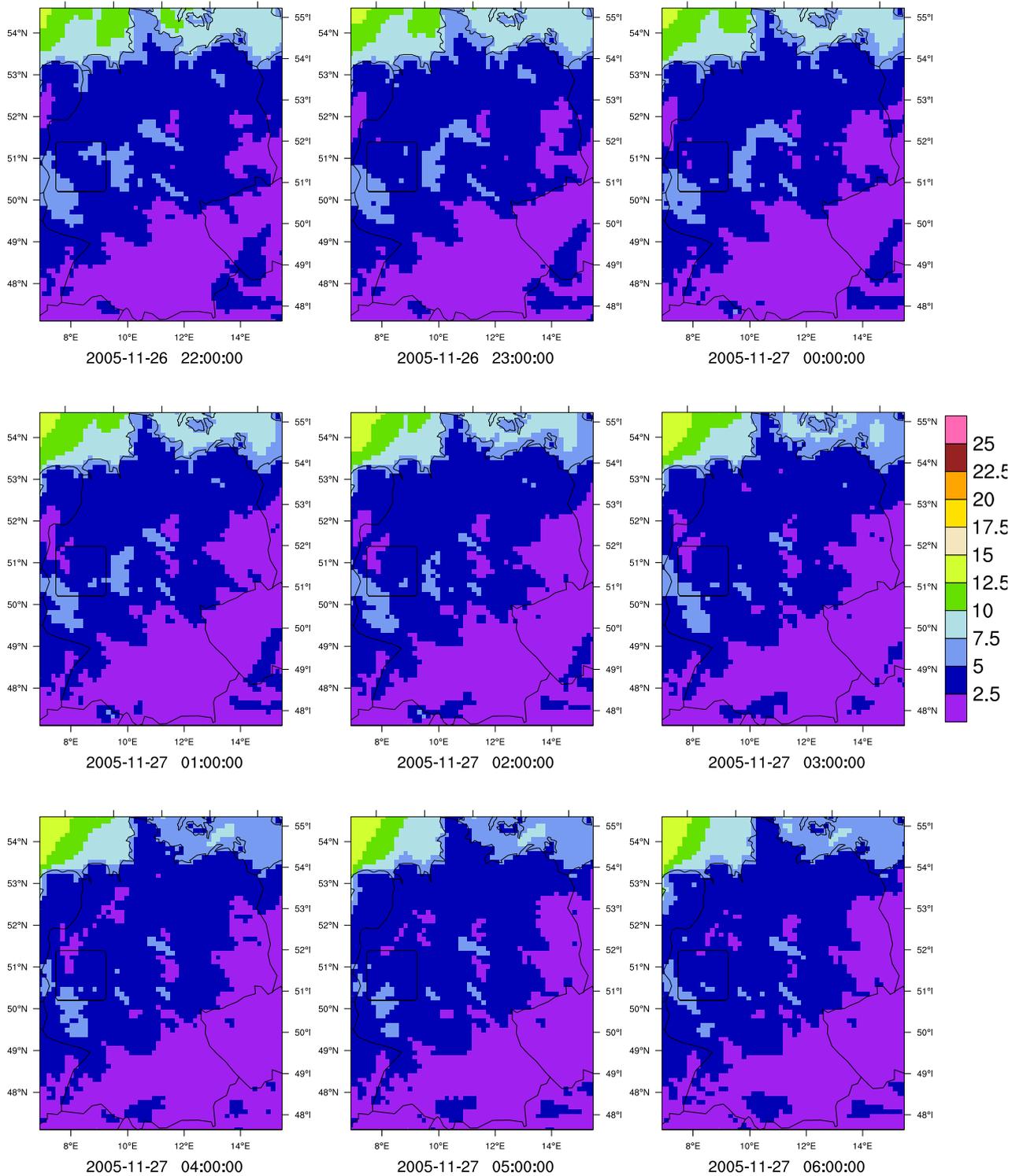
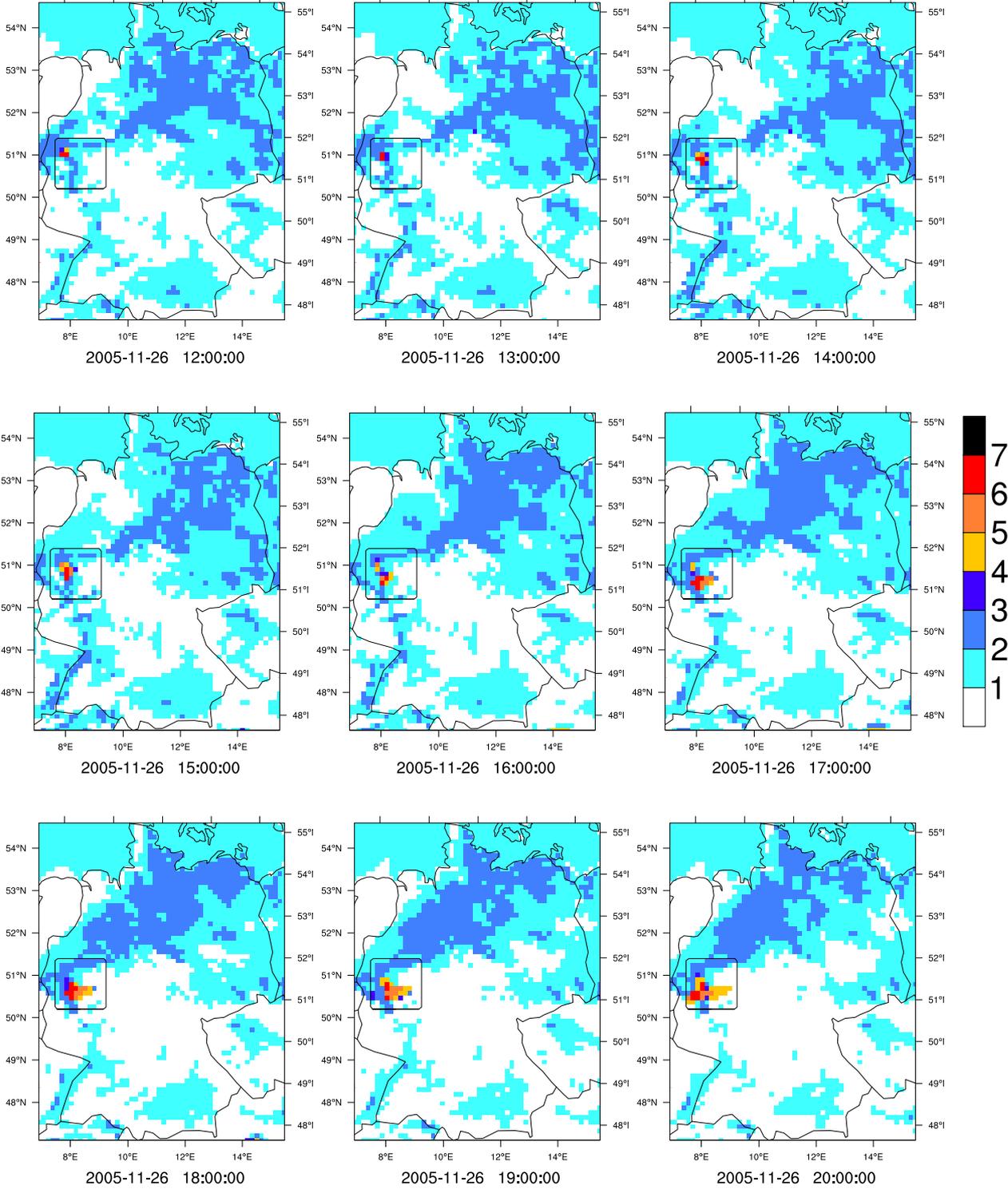


Abbildung A.5: Entwicklung der 10m-Windgeschwindigkeit (in m/s) in Deutschland während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr) im stündlichen Abstand

Anhang A Anhang



## Anhang A Anhang

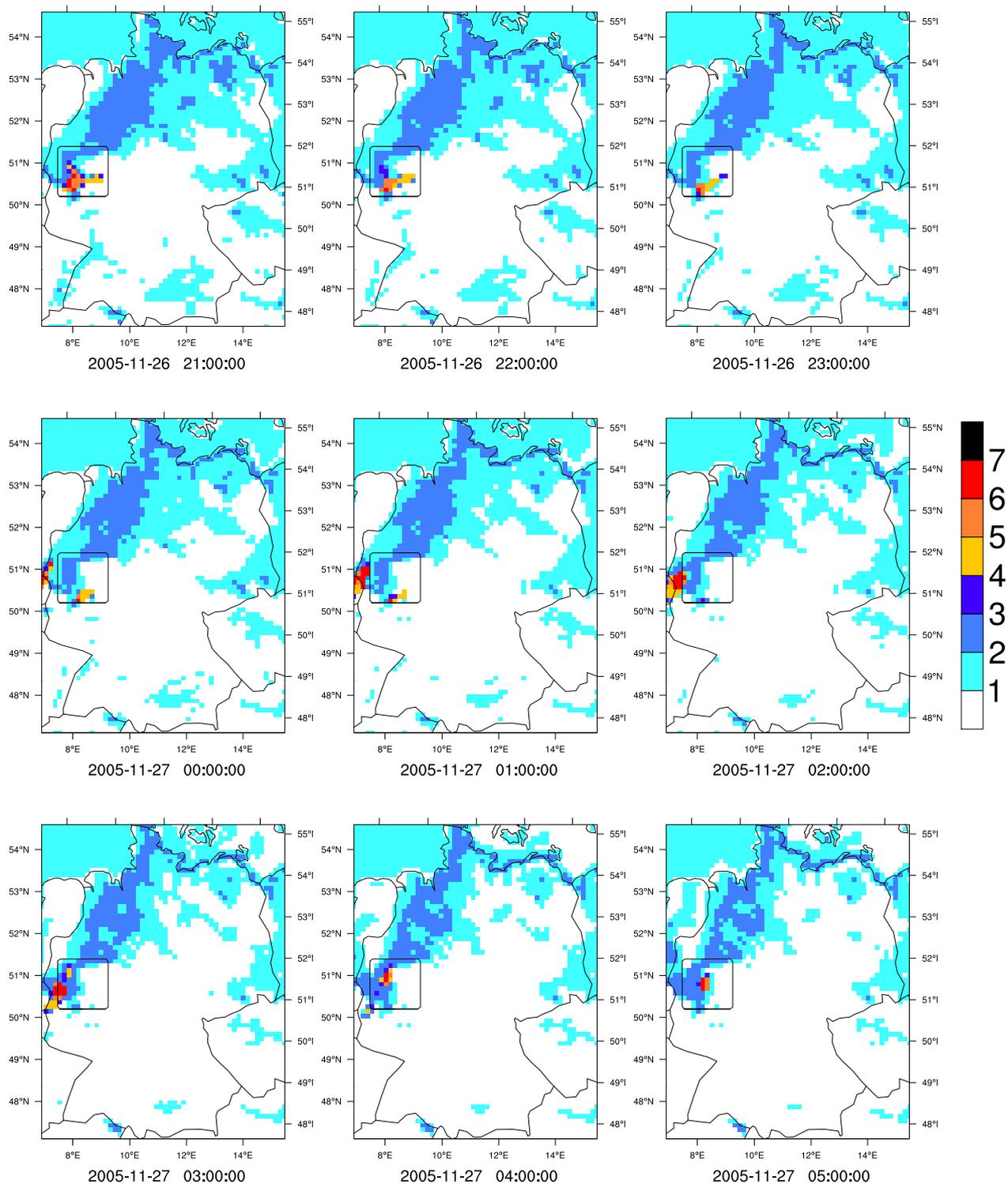


Abbildung A.6: Entwicklung der Schneelast in Deutschland nach der 3-Variablen-Methode während des Münsterlandereignisses (ab 26.11.2005 12 Uhr) im stündlichen Abstand. Als Skala wird die im Text beschriebene Wichtung der Gefahr von Schneelast zwischen 0 und 7 verwendet.

# Anhang B

## Danksagung

Herzlicher Dank geht an Prof. Dr. Daniela Jacob und Jun-Prof. Dr. Felix Ament für die Betreuung und Begutachtung dieser Arbeit sowie Hilfe bei der Themenfindung.

Dank geht auch an Kevin Sieck, auf dessen Vorarbeit die Entwicklung der Schneelastindizes beruht, und an Susanne Pfeifer für ihre Informationen über die REMO-Niederschlags-schemata.

Juliane und Bastian danke ich für die vielen Monate als Leidensgenossen und Zimmernachbarn, technische Hilfen, Diskussionen und Ablenkung.

Ein großes Danke geht an die gesamte REMO-Gruppe für vier Jahre gute Arbeitsatmosphäre, freundliche Aufnahme und viele offene Ohren bei Fragen. Auch das CSC-Team soll nicht vergessen werden für die gute Kollegialität im letzten Jahr.

Besonderer Dank geht an die Sölden-Crew, Amelie, Anne, Karo und noch viele andere, dank derer die fünf Jahre Studium eine grandiose Zeit wurden und die alle, in vielleicht noch so unscheinbarer Weise, an der Vollendung dieser Arbeit mitgewirkt haben. Dabei möchte ich im Speziellen Amelie hervorheben, die mich vor allem die letzten beiden Jahre in besonders guter Erinnerung behalten lassen wird.

Zuletzt möchte ich noch meinen Eltern danken, die mir auf vielfältige Art und Weise das Studium erst möglich gemacht haben und stets hinter mir standen.

# Erklärung der Urheberschaft

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form in keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht. Einer Veröffentlichung der Arbeit stimme ich zu.

Ort, Datum

Unterschrift

**Kontakt:**

Climate Service Center  
Fischertwiete 1  
20095 Hamburg

Tel. 040-226 338-424  
Fax. 040-226 338-163

[www.climate-service-center.de](http://www.climate-service-center.de)

ISSN 2192-4058

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung