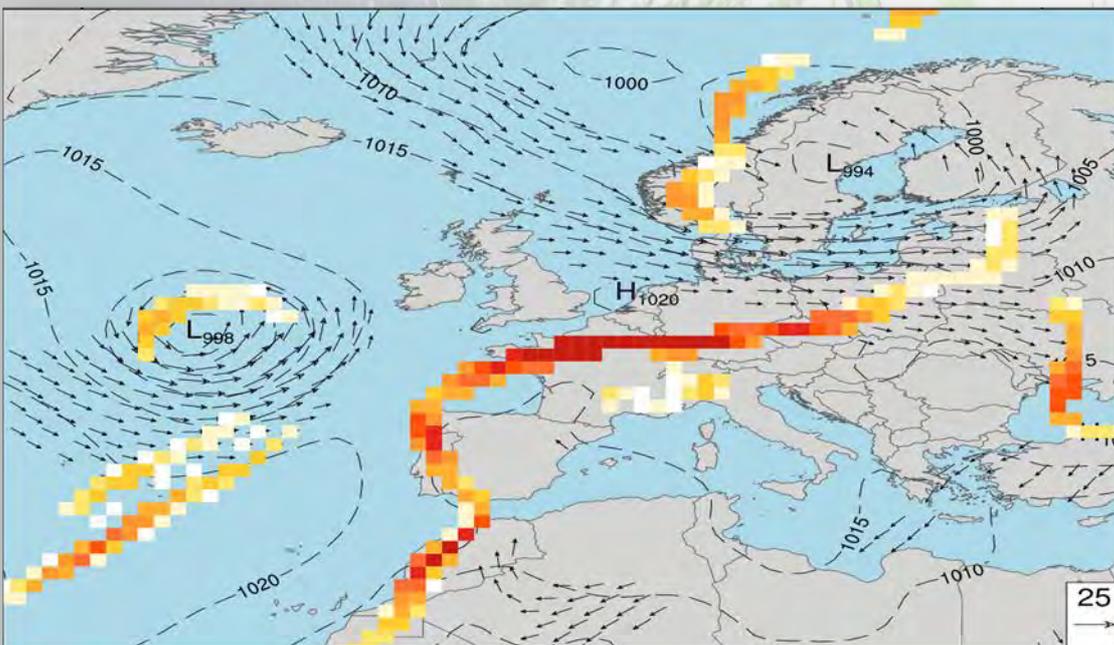
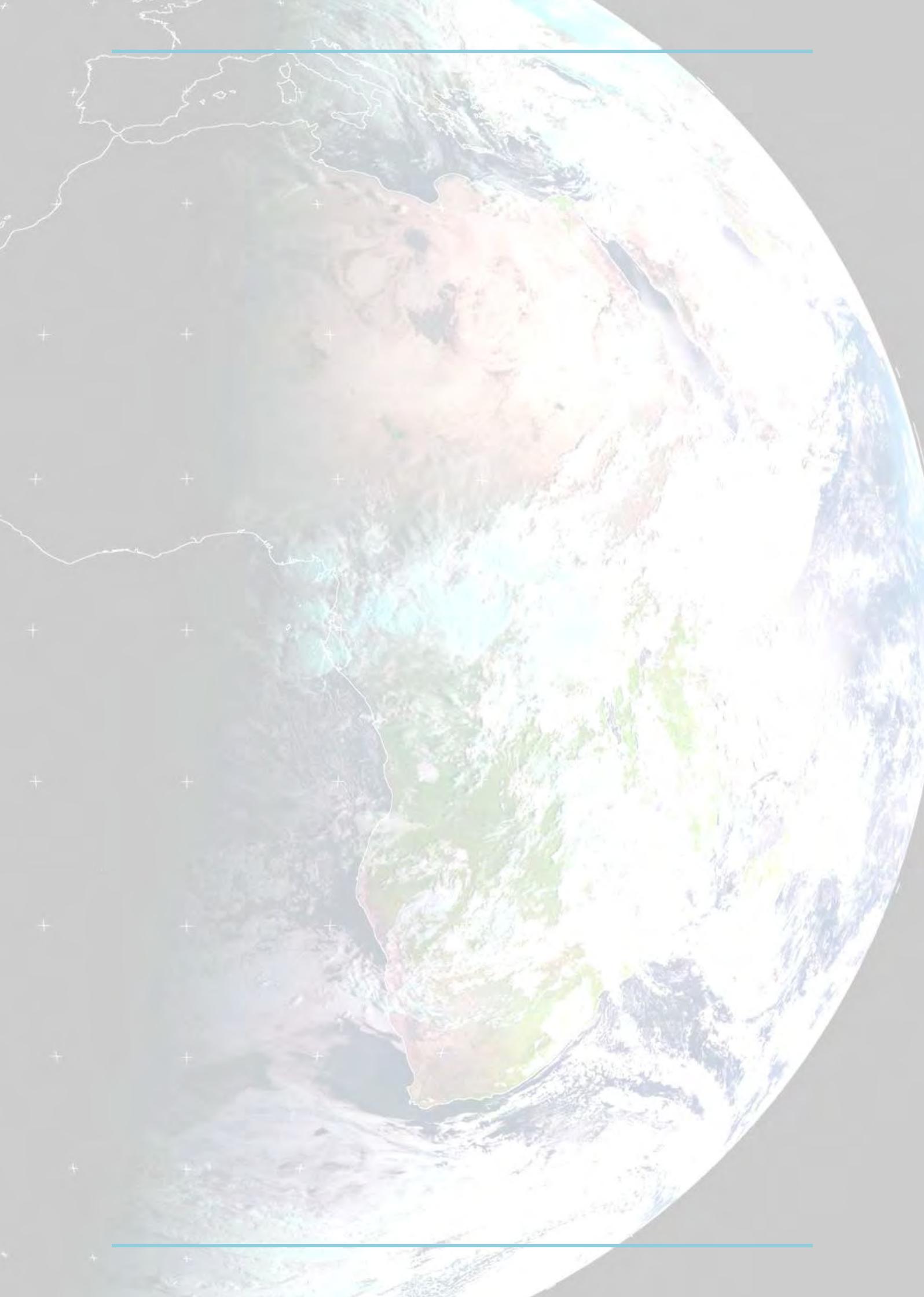


Projektbericht: Frontenerkennung & -klimatologie





Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
Einführung: Fronten in der Atmosphäre	7
Methodik: Die Frontenerkennung	9
Zu Grunde liegende physikalische Felder.....	9
Automatisierte Frontenerkennung.....	10
Daten und Datenverarbeitung	13
Domain	13
Reanalysen: ERA-Interim.....	14
Das Emissionsszenario RCP8.5	15
CMIP5 Simulationen	16
Fronten in der Reanalyse Periode: 1979 - 2005	19
Extremwertanalyse von Fronten	23
Bekannte Stürme	25
Markante Fronten	27
Fronten und die Nordatlantische Oszillation	29
Klimaprojektionen: Szenario RCP8.5	31
Nahe Zukunft: 2021 - 2050	31
Ferne Zukunft: 2071 - 2100.....	32
Verteilung der Frontenstärke	34
Extremwertanalyse der Klimaprojektionen.....	35
Schlussfolgerung	37
Referenzen	39
Anhang A - Frontenhäufigkeit und -intensität	41
Anhang A1: Referenzperiode (1979 - 2005)	42
Anhang A2: Nahe Zukunft (2021 - 2050).....	47
Anhang A3: Ferne Zukunft (2071 - 2100)	51
Anhang B - Histogramme der Frontenstärke	55
.....	56
Anhang C - Bekannte Stürme	59
Lothar.....	59
Wiebke.....	60
Kyrill.....	61
Anhang D - Starke Fronten (1979 - 2005) über Rheinland-Pfalz	63

Zusammenfassung

Diese Studie untersucht die Häufigkeit und Intensität atmosphärischer Bodenfronten in Europa mit einem Fokus auf den Südwesten Deutschlands. Eine automatisierte Methode zur Frontenerkennung wird verwendet, um in ERA-Interim Reanalysen und in ausgewählten CMIP5 Klimasimulationen Fronten zu identifizieren und ihre Häufigkeit und Intensität zu quantifizieren. Im Vergleich mit der jeweiligen modelleigenen Simulation der Referenzperiode (1979 – 2005) nimmt die Häufigkeit atmosphärischer Bodenfronten in den Jahren 2071 – 2100 zwischen 20 – 100 % zu (in Abhängigkeit von Jahreszeit und Modell). Die Intensität der Fronten schwankt dabei zwischen einer Zunahme von 5 – 10 %. Insbesondere lässt sich eine Verstärkung des Jahresgangs erwarten, der bereits in der Referenzperiode ein Maximum der Fronthäufigkeit im Sommer aufweist. Keines der Modelle simuliert die Fronten der Referenzperiode in Einklang mit ERA-Interim. Dabei wird die Frontenhäufigkeit in den Wintermonaten sowohl über Land wie auch im Bereich der Sturmzugbahnen über dem Nordatlantik unterschätzt. In den Sommermonaten gilt dies vor allem für die Sturmzugbahn. Jedoch wird der Jahresgang ausreichend gut wiedergegeben.

Bei der Intensitätsverteilung sind die Abweichungen zur Referenzperiode geringer. Differenzen werden hauptsächlich in den Sommermonaten im Bereich der Sturmzugbahnen gefunden.



Einführung: Fronten in der Atmosphäre

Atmosphärische Bodenfronten zählen zu den wichtigsten Phänomenen, welche die Variabilität des täglichen Wetters in Deutschland bestimmen. Sie sind gekennzeichnet durch rasche und starke Übergänge in der Lufttemperatur und der Feuchte, sowie durch Schwankungen im Druck und Drehung der Windrichtung.

Bei einer Kaltfront schieben sich typischerweise kalte und trockene Luftmassen mit hoher Dichte unter wärmere und feuchtere Luftschichten, welche dadurch gehoben werden. Hierbei kommt es in der Regel während der Hebung durch Abkühlung der Luft zur Bildung von starken Niederschlägen oft in Verbindung mit hochreichenden konvektiven Gewitterwolken (Kumulonimbus). Gewitter an Kaltfronten treten besonders dann auf, wenn die unteren Luftschichten durch starke Sonneneinstrahlung erwärmt und die Luftsäule somit destabilisiert wurde. Die leichte Hebung durch die Kaltfront kann gerade im Sommer starke Gewitter nach sich ziehen. Vor einer Kaltfront wird normalerweise, bedingt durch das Anheben der wärmeren Luft, ein Druckabfall beobachtet. Wohingegen nach dem Frontdurchgang ein Druckanstieg, bedingt durch das Vorstoßen der kälteren Luft, gemessen werden kann. Bei einer Warmfront hingegen gleitet die warme Luft auf dichtere kalte Luftmassen auf. Im Vergleich zur starken Hebung vor einer Kaltfront ist dieser Aufgleitprozess häufig langsamer und weniger hochreichend. Folglich ist der sich bildende Regen breitflächiger und die Bewölkung stratusförmiger (Cirrostratus, Altostratus). Weitreichend bekannt sind Fronten durch ihre Darstellung auf Wetterkarten. In der Abbildung 1 ist beispielhaft eine Bodenwetterkarte für Europa mit Fronten zu sehen.

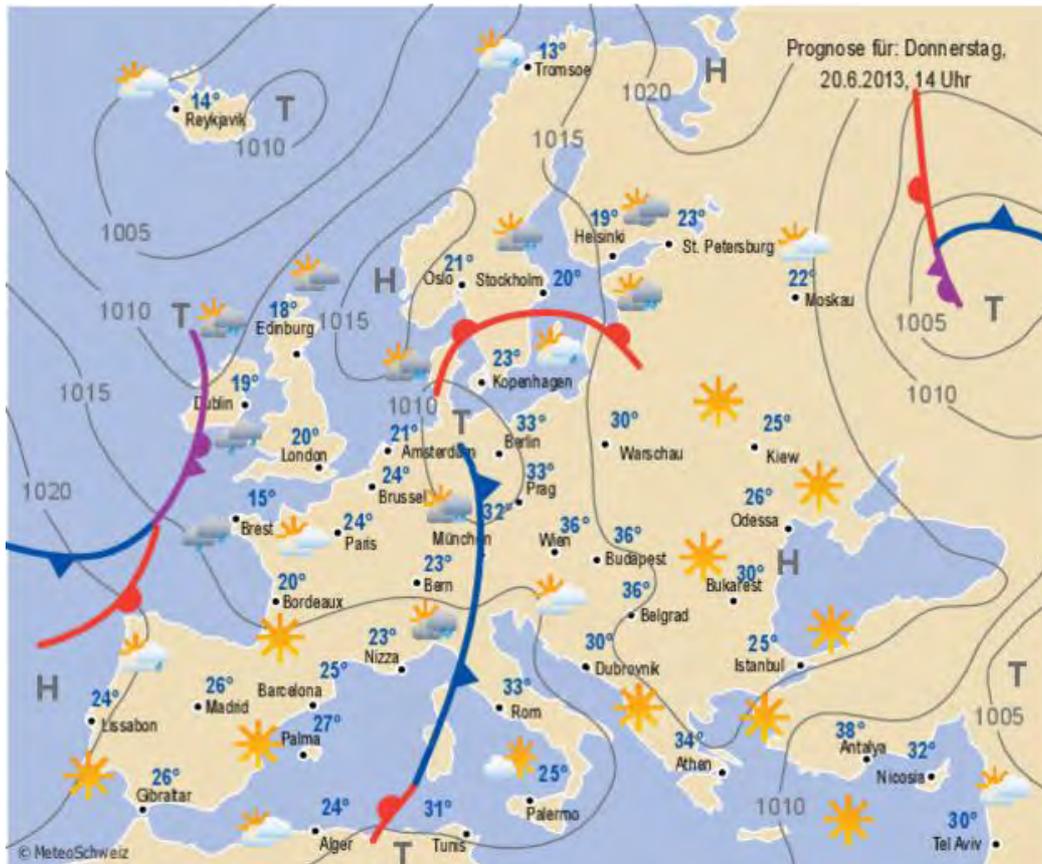


Abbildung 1: Bodenwetterkarte der MeteoSchweiz vom 20. Juni 2013. Neben dem Bodendruck (schwarze Linien, in hPa) und Wettersymbolen mit Temperaturangaben (in °C) sind die Bodenfronten das prägnanteste Merkmal einer Wetterkarte. Unterschieden werden Warmfronten (rot), Kaltfronten (blau) und Okklusionen (lila).

Typischerweise treten Fronten im Zusammenhang mit atmosphärischen Tiefdruckgebieten auf. Sie können sich jedoch auch in großer Entfernung des eigentlichen Kerns des Tiefdruckgebiets befinden. Darüber hinaus wird der Zusammenschluss von Warm- und Kaltfronten als eine okkludierte Front bezeichnet, ein Vorgang der für die folgende Auswertung aber nicht weiter relevant ist. Zusätzlich werden neben den vorher erwähnten „dynamischen“ Fronten noch thermische Fronten unterscheiden, welche sich durch starke Temperatur- und Feuchteunterschiede bemerkbar machen, z.B. entlang von Küstenregionen.

Methodik: Die Frontenerkennung

Dank der charakteristischen Wolkenbildung lassen sich Fronten für das menschliche Auge sehr gut auf Satellitenbildern erkennen und identifizieren. Auf Bodenkarten, basierend auf Messungen von z.B. Wetterstationen, ist eine Identifizierung von Fronten vor allem durch Sprünge oder schnelle Veränderungen und Schwankungen im Druck, Windfeld oder der Temperatur möglich. Im Folgenden stellen wir kurz und übersichtlich die in dieser Arbeit verwendete automatisierte Erkennung von bodennahen Fronten vor.

Zu Grunde liegende physikalische Felder

Wir betrachten zur Erkennung der Fronten die pseudo-potentielle Temperatur auf einer Höhe von 850 hPa. Es wird davon ausgegangen, dass sich in der Regel große Teile der Luft auf einer Höhe von 850 hPa oberhalb der gut durchmischten Grenzschicht an der Oberfläche der Erde befinden. Somit eignet sich diese Höhe gut, um den horizontalen Gradienten, der für Fronten typisch ist, in der pseudo-potentiellen Temperatur zu erkennen. Die pseudo-potentielle Temperatur bezeichnet jene hypothetische Temperatur eines Luftpaketes die sich ergibt, wenn es das zunächst auf den Boden absinkt, und dabei durch die Druckzunahme erwärmt wird (adiabatische Erwärmung), plus den Anteil der latenten Wärme welcher freigesetzt wird falls alle Feuchte innerhalb des Luftpaketes kondensiert (Kondensationswärme). Die pseudo-potentielle Temperatur wird berechnet durch folgende Gleichung (Bolton, 1980, Seite 1051, Gleichung 38):

$$\theta_e = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{\kappa(1-0.28r)} \exp \left[\left(\frac{3.376}{T_L} - 0.00254 \right) 10^3 r (1 + 0.81r) \right]$$

Hierbei sind $\kappa = R/c_p$ (R ist die spezifische Gaskonstante der trockenen Luft und c_p deren spezifische Wärmekapazität), r bezeichnet das Mischungsverhältnis von Wasserdampf zu trockener Luft und T_L bezeichnet die Temperatur auf Höhe des Kondensationsniveaus (für weitere Details und zur Berechnung von T_L siehe Bolton, 1980).

Automatisierte Frontenerkennung

Die hier verwendete automatisierte Frontenerkennung basiert auf der Arbeit von Jenkner et al. (2010). Die Erkennung erfolgt in einem drei-stufigen Verfahren. Nach der Berechnung der pseudo-potentiellen Temperatur auf 850 hPa wird das resultierende Feld durch einen digitalen Filter geglättet, um die Berechnung der Gradientenwerte zu erleichtern. Hierzu wird in einem Radius von 150 km um den Gitterpunkt ein gewichteter Mittelwert aus den Werten in der Umgebung gebildet, wobei das Gewicht exponentiell mit dem Abstand abnimmt. Der zweite Schritt enthält die Berechnung des horizontalen Gradienten der pseudo-potentiellen Temperatur und der Markierung von Regionen mit Gradienten welche 4 K auf 100 km überschreiten, ein typischer Schwellenwert für die Frontenerkennung. In einem dritten Schritt wird nun die genaue Position der Front durch einen thermischen Frontparameter (TFP) bestimmt:

$$TFP = -\nabla |\nabla\theta_e| \times \left(\frac{\nabla\theta_e}{|\nabla\theta_e|} \right)$$

Der TFP gibt die Änderung des Gradienten der pseudo-potentiellen Temperatur (erster Term) in Richtung des Temperaturgradienten (zweiter Term) an. Wird der TFP null hat der Gradient ein Extremum. Dort, innerhalb einer Region mit einem Gradienten größer als 4 K auf 100 km, wird nun die Position der Front markiert. Um sicher zu stellen, dass sich in der betrachteten Region nicht kleinere lokale (eingebettete) Minima im Gradienten der pseudo-potentiellen Temperatur finden, fordern wir an allen identifizierten Gitterpunkten zusätzlich:

$$\nabla \times \nabla |\nabla\theta_e| < 0$$

Dies bedeutet, dass wir nur Wendepunkte um Maxima im Gradienten erlauben.

In der Abbildung 2 ist ein idealisiertes Beispiel gezeigt. Die zugrunde liegende Simulation erfolgt über einer flachen Oberfläche, ausgehend von einem zonal konstanten vertikalen Referenzprofil der Atmosphäre (Schemm et al., 2013). Eine Störung an der Tropopause führt zum Wachstum einer ersten Zyklone und der Entwicklung von Warm- und Kaltfronten. Im Verlauf der Simulation bilden sich stromauf- und abwärts zwei weitere Tiefdrucksysteme aus. Die oben beschriebene Methodik der Frontenerkennung identifiziert an allen drei Zyklonen mit hoher Genauigkeit die Position und Länge der Fronten. Dies lässt sich gut anhand der Temperatur- und Feuchtegradienten im oberen Teil der Abbildung 2 überprüfen.

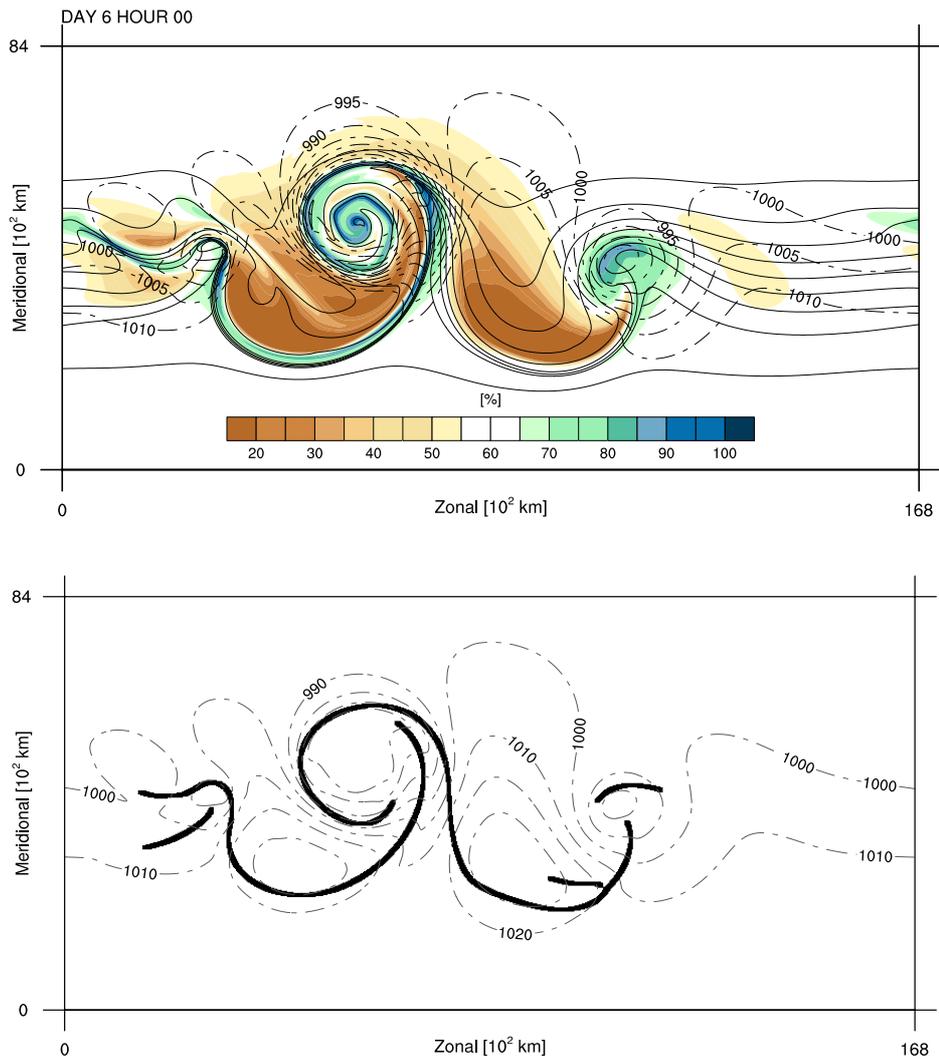


Abbildung 2: Idealisertes Beispiel der Frontenerkennung. Zu sehen sind oben mehrere idealisierte Zyklonen mit Konturen des Bodendruckes (gestrichelt), pseudo-potentieller Temperatur (durchgezogen) und relativer Feuchte (farbig) auf 850 hPa. Unten dargestellt ist die Position der Fronten mit der im Text beschriebenen Methodik.

Daten und Datenverarbeitung

Domain

Typische Längenskalen von ausgedehnten Bodenfronten erreichen mehrere tausend Kilometer. Folglich beziehen wir Mittel- und Osteuropa, sowie Teile des östlichen Nordatlantiks und den Mittelmeerraum in unsere Analyse mit ein. Die Berechnung der Fronten erfolgt innerhalb der geographischen Region $40^{\circ}\text{W} - 40^{\circ}\text{E}$ und $30^{\circ}\text{N} - 75^{\circ}\text{N}$, die ganz Europa einschließt. Die Extremwertanalyse wird in einer kleineren Box zentriert über Rheinland Pfalz ($6^{\circ}\text{E} - 10^{\circ}\text{E}$, $48^{\circ}\text{N} - 52^{\circ}\text{N}$) durchgeführt, siehe dazu auch Abbildung 3.

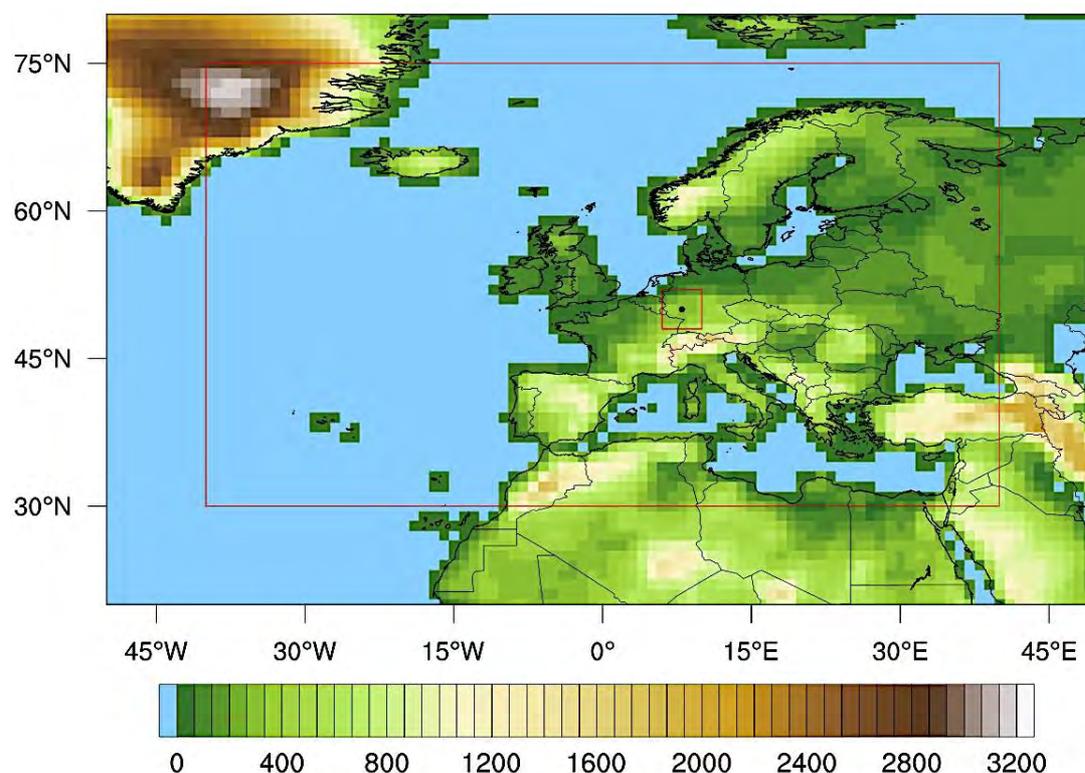


Abbildung 3: Analyzierte Regionen und zugrunde liegende Orographie der ERA-Interim Daten. Die Analyse der Frontenhäufigkeit und Intensität erfolgt jeweils in den beiden rot umrandeten Regionen. Mainz ist durch einen schwarzen Punkt markiert.

Reanalysen: ERA-Interim

Als Datengrundlage für die Referenzperiode 1979 – 2005, d.h. zur Charakterisierung des aktuellen Klimas, verwenden wir den ERA-Interim Reanalyse Datensatz mit einer horizontalen Gitterweite von $1^\circ \times 1^\circ$ mit sechsstündigen Zeitschritten. Reanalysen kombinieren über eine Datenassimilationstechnologie Messungen verschiedener Quellen, z.B. von Bodenmessungen, Satelliten und Flugzeugmessungen, mit Kurzfristvorhersagen eines numerischen Modells. Sie bilden somit den bestmöglichen zusammenhängenden vier-dimensionalen Datensatz, welcher den Zustand der Atmosphäre hoch auflösend beschreibt. Für ERA-Interim wird das globale Model IFS des ECMWF verwendet. Eine detaillierte Beschreibung der Datenassimilation ist Dee et al. (2011) zu entnehmen. Technische Details des verwendeten IFS (Cy31r1) werden durch das ECMWF auf der Webseite www.ecmwf.int/research/ifsdocs/ dokumentiert.

Das Emissionsszenario RCP8.5

Während für die verwendete Referenzperiode 1979 – 2005 die Konzentrationen verschiedener Treibhausgase den gemessenen Werten entsprechen, werden für mögliche, zukünftige Entwicklungen der Treibhausgasemission verschiedene Szenarien angenommen. Diese Szenarien werden als „representative concentration pathways“, kurz RCP, bezeichnet und berücksichtigen verschiedene potentielle Entwicklungen der Landnutzung sowie des Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum bis in das Jahr 2100. Die Emissionsszenarien dienen den Klimasimulationen als Randwerte und bestimmen den Strahlungsantrieb aller Treibhausgase. Einen Überblick über alle Szenarien sowie die verwendeten Methoden zur Bestimmung dieser findet sich bei Van Vuuren et al. (2011). Der in dieser Studie verwendete RCP8.5 gilt als das emissionsstärkste Szenario, er wird in der oben genannten Studie wie folgt beschrieben: „*This RCP is characterized by increasing greenhouse gas emissions over time, representative of scenarios in the literature that lead to high greenhouse gas concentration levels*“. Der anthropogene Strahlungsantrieb des RCP8.5 erreicht bis in das Jahr 2100 $8,5 \text{ W/m}^2$. Abbildung 4 zeigt den Verlauf des Strahlungsantriebs aller RCPs für die Jahre 2000 – 2100. Darüber hinaus die sogenannten *Extended Concentration Pathways (ECPs)* bis in das Jahr 2500.

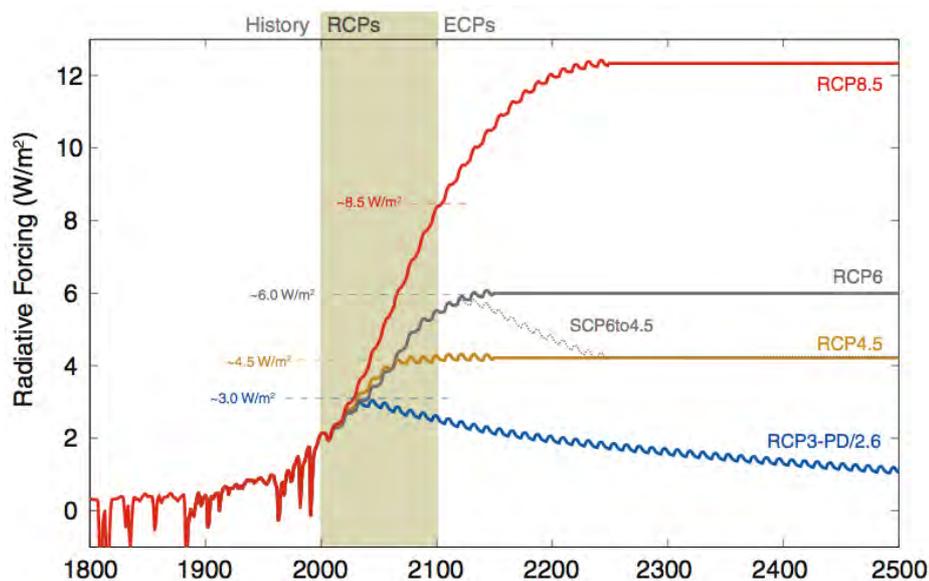


Abbildung 4: Szenarien für den zukünftigen Verlauf des Strahlungsantriebs durch Treibhausgasemissionen (Meinshausen et al., 2011).

CMIP5 Simulationen

Im Rahmen des Climate Model Intercomparison Project 5 (CMIP5) stellen führende Globalmodelle Datensätze für verschiedene Emissionsszenarien unter <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/> online zur Verfügung.

Bisher stehen jedoch nicht alle Variablen mit derselben zeitlichen wie räumlichen Auflösung zur Verfügung. Für dieses Projekt hat sich die Verfügbarkeit von Feuchtedaten, die zur Berechnung der pseudo-potentiellen Temperatur benötigt werden, mit einer zeitlichen Auflösung von sechs Stunden als kritisch herausgestellt und somit die Anzahl verfügbarer Modelle erheblich reduziert. Zudem konnten nur Modelle berücksichtigt werden, bei denen sich der Druck einfach aus der Formulierung der vertikalen Modellkoordinaten berechnen lässt. Erschwerend kommt hinzu, dass alle Modelle mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen arbeiten, was eine zeitaufwendige Interpolation auf ein homogenes Gitter ($1^\circ \times 1^\circ$, analog zu den ERA-Interim Daten) nötig macht. Die Homogenisierung und Interpolation der Datensätze beanspruchte ca. zwei Wochen Rechendauer, ebenso wie der Download der Daten von ca. 3 TB über das Internet. Die Berechnung der Fronten für jedes Modell sowie die Berechnung der Klimatologien beanspruchte zusätzlich ca. drei Wochen. Für zukünftige Projekte muss der dafür nötige Zeitaufwand dringend berücksichtigt werden. Im Folgenden sind die nötigen Schritte zusammengefasst:

- Download der Daten aller Jahre von 1850 bis 2200. Der Download einzelner Jahre ist nicht möglich.
- Aufspaltung der Daten in einzelne Zeitschritte von jeweils 6 Stunden.
- Bilineare Interpolation auf ein $1^\circ \times 1^\circ$ -Gitter.
- Berechnung des Drucks aus vertikalen Koordinaten.
- Berechnung der pseudo-potentiellen Temperatur (THE) und Interpolation auf 850 hPa.
- Detektion der Fronten.
- Erstellen der saisonalen Klimatologie.

Die folgenden Modelle konnten in dieser Studie miteinbezogen werden:

Modell (Abkürzung)	Gitterweite (°)	Betreiber
1. CNRM-CM5 (CNRM)	1,5 x 1,5	Meteo France
2. CSIRO-Mk3-6-0 (CSIRO)	1,9 x 1,9	CSIRO Australia
3. FDL-ESM2M (GFDL)	2,0 x 2,5	GFDL Princeton USA
4. Nor-ESM1-M (NOR)	1,9 x 1,9	Norwegian Earth System Model

Das MPI-ESM (ECHAM) stellte zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie keine sechsstündigen Feuchtedaten zur Verfügung und konnte deshalb nicht berücksichtigt werden.

Fronten in der Reanalyse Periode: 1979 – 2005

Zunächst werden für die gewählte Referenzperiode von 1979 – 2005 die saisonalen Mittelwerte der Frontenhäufigkeit und -intensität aus dem Reanalyse Datensatz mit den Resultaten der einzelnen Klimamodelle verglichen, um einen Eindruck der Performance der einzelnen Modelle zu erhalten. Die Referenzperiode wurde so gewählt, dass sich ERA-Interim und die historischen Simulationen der CMIP5 Modelle zeitlich überschneiden. In Abbildung 5 ist für ERA-Interim die mittlere Frontenhäufigkeit, sowie in Abbildung 6 die mittlere Frontenintensität für alle Jahreszeiten gezeigt.

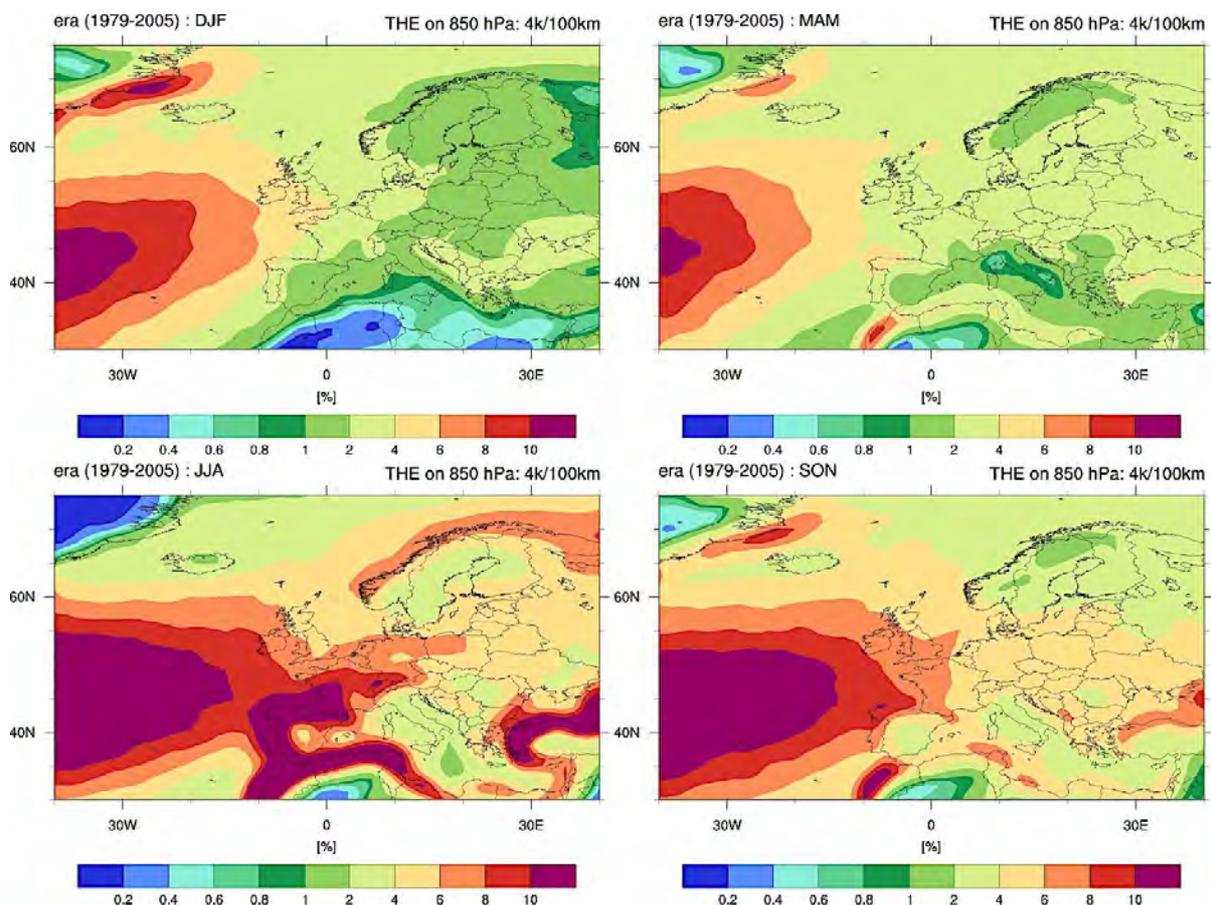


Abbildung 5: Saisonale Frontenhäufigkeit in ERA-Interim für die Jahre 1979 – 2005. Im Winter findet sich in Mitteleuropa an 2 bis 4 % aller Zeitschritte eine Front und im Sommer bei 8 %.

Für die Häufigkeit finden wir über Mitteleuropa im Winter und Frühjahr Werte im Bereich von 2 – 4 % (hellgrün). Dies bedeutet, dass an 2 – 4 % aller Zeitschritte eine Front detektiert wird, was im saisonalen Mittel dem Auftreten einer Front an jedem 7. bis 9. Tag entspricht. Für die Intensität finden wir eine mittlere Frontenstärke für die Wintermonate von 5 K auf 100 km. Nach leicht geringeren Werten im Frühjahr ist die Frontenhäufigkeit im Sommer mit bis zu 8 % am höchsten (dunkel-orange). Im Herbst

nimmt sie wieder leicht ab auf ca. 6 % (gelb). Gut zu erkennen ist die erhöhte Häufigkeit von Fronten entlang der Küstenregionen; induziert durch eine starke Land-Seezirkulation wird ein erhöhter Temperatur- und Feuchtegradient als Front detektiert. Solche quasi-stationären Fronten lassen sich durch die Hinzunahme eines einfachen Advektionskriteriums aus dem Datensatz entfernen.

Bei der Intensität zeigt sich ein ähnliches Bild. Die stärksten Fronten werden im Mittel mit 5,8 K auf 100 km im Sommer gefunden. Ausschlaggebend für die saisonalen Unterschiede ist vor allem die Variation der Zugbahnen der Tiefdruckgebiete über dem Atlantik. Finden sich Tiefdruckgebiete im Winter hauptsächlich in einem nach Nordosten ausgerichteten Band dreht dieses im Sommer und Herbst mehr auf eine West-Ost Achse. Als Folge nimmt die Häufigkeit der Fronten in Mitteleuropa zu.

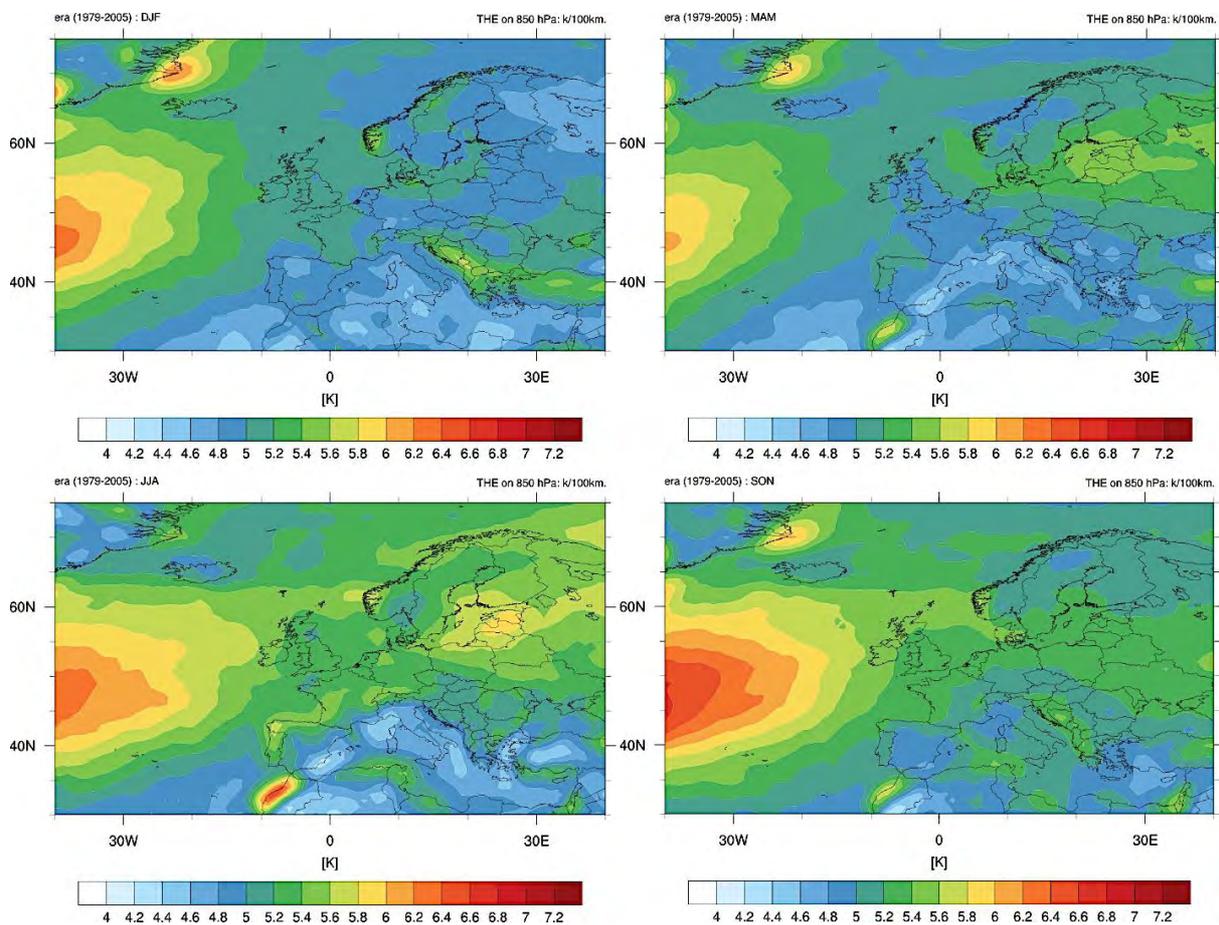


Abbildung 6: Saisonale mittlere Frontenintensität. In Mitteleuropa haben Fronten eine mittlere Stärke von 5 K/100 km im Winter, in den Sommermonaten von 5,8 K/100 km.

Frontenhäufigkeit und Intensität wurden für die Zeitperiode 1979 – 2005 jeweils für alle Jahreszeiten und alle betrachteten Klimamodelle berechnet. Das Resultat wurde kompakt in einem Histogramm zusammengefasst (Abbildung 7) indem für alle

Jahreszeiten und für alle Modelle über die oben genannte Domain „Europa“ gemittelt wurde. Die Darstellung der Resultate aller einzelnen Modelle (wie in den Abbildungen 5 und 6) befinden sich im Anhang.

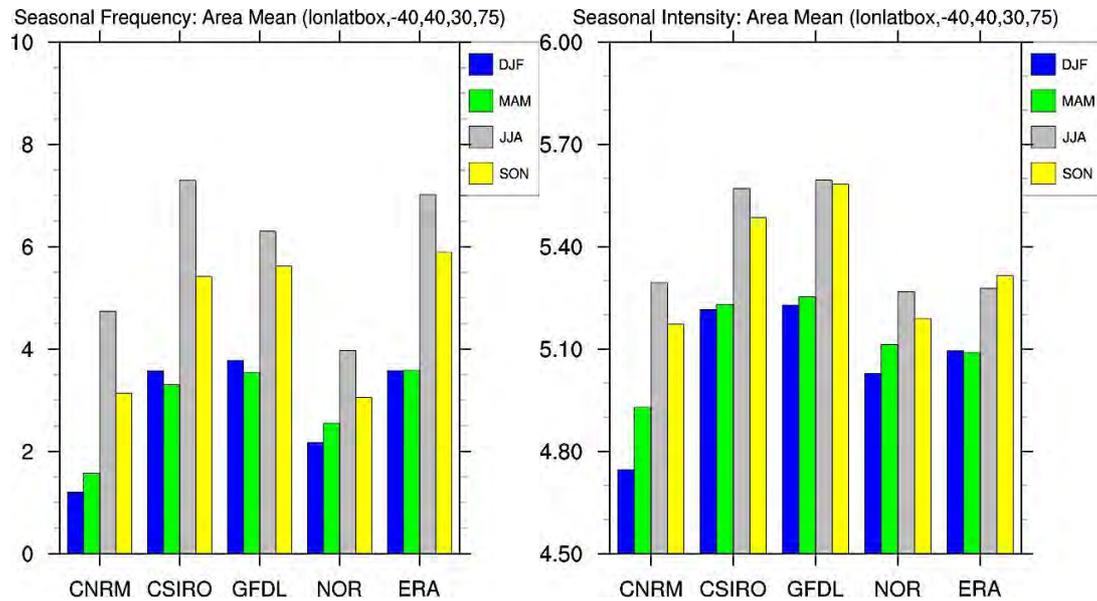


Abbildung 7: Mittlere saisonale Frontenhäufigkeiten in % (links) und Intensität in K/100 km (rechts) über Europa für die vier betrachteten Klimamodelle und ERA-Interim für die Referenzperiode 1979 – 2005.

Das Ergebnis zeigt für alle Klimamodelle einen einheitlichen Jahreszyklus. Fronten werden am Häufigsten im Sommer und Herbst erkannt, wobei im Sommer starke Feuchtegrenzen entlang von Küstenlinien als Fronten gezählt werden. Die stärkste Frontenintensität wird ebenfalls in den Sommer- und Herbstmonaten gefunden, wobei laut Reanalysen der Herbst die größte Intensität aufweist. Bei Modellen, welche die Häufigkeit im Winter stärker unterschätzen findet sich ein zu wenig stark zonal ausgeprägter Sturmzugbahn (siehe Anhang). Bei der Betrachtung der individuellen Resultate vor der Mittelung über eine Region (siehe Anhang) fällt auf, dass im Sommer Luftmassengrenzen, welche durch Gradienten in der Feuchte gekennzeichnet sind, tendenziell überschätzt werden. Insgesamt ist die Streuung zwischen den einzelnen Modellen groß und nicht zu vernachlässigen, jedoch auf Grund des ähnlichen Jahreszyklus nicht unbefriedigend.

Extremwertanalyse von Fronten

Um die Wiederkehrzeit von Frontereignissen abschätzen zu können, wurde eine Extremwertanalyse der Frontenstärke durchgeführt. Hierzu wurde zunächst eine Zeitreihe über alle für Rheinland-Pfalz (Abbildung 3) relevanten Frontendurchgänge berechnet. Zeitpunkte an denen sich keine Front in der gewählten Region befindet werden dabei ignoriert. Falls eine Front identifiziert wurde, wird für die Erstellung der Zeitreihe der Maximalwert der Front in der analysierten Region verwendet. Das statistische Verfahren lässt sich einfach als Anpassung („fit“) einer verallgemeinerten Extremwertverteilung durch die gewonnene Zeitreihe beschreiben. Um sicherzustellen dass sämtliche Werte in der Zeitreihe unabhängig sind wurde zunächst ein Schwellenwert von 6 K/100 km angenommen und sämtliche Ereignisse über diesem Schwellenwert extrahiert falls sie mindestens drei Tage auseinander liegen. Damit kann sichergestellt werden, dass es sich mit höchster Wahrscheinlichkeit bei jedem in der Zeitreihe verbleibenden Messwert um ein neues unabhängiges Frontereignis handelt.

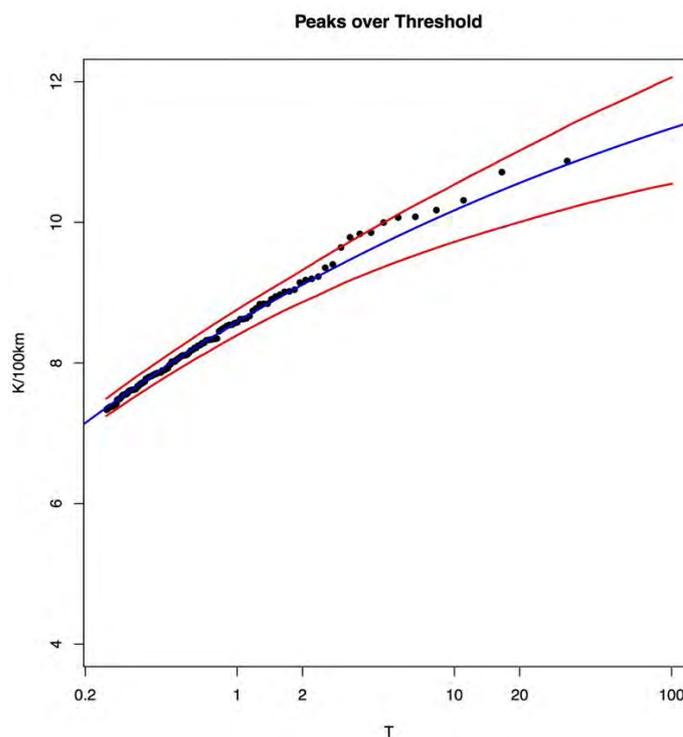


Abbildung 8: Angepasste Extremwertverteilung (blau) mit 5 % und 95 % Konfidenzintervallen (rot) in Jahren (T) basierend auf ERA-Interim (1979 – 2012) für die Region Rheinland – Pfalz (siehe Abbildung 3).

In Abbildung 8 ist die Stärke der so ermittelten Frontereignisse gegen die Wiederkehrperiode aufgetragen. Die blaue Kurve ist die durch die Messwerte gelegte

Pareto-Verteilung¹ und die Konfidenzintervalle sind mit roten Linien dargestellt. Zur Bestimmung der Formparameter der Verteilung wurde die Maximum-Likelihood-Methode verwendet. Die Wiederkehrperiode der einzelnen Frontereignisse ist in der untenstehenden Tabelle zusammengefasst.

In Abbildung 8 ist die Stärke der so ermittelten Frontenereignisse gegen die Wiederkehrperiode aufgetragen. Die blaue Kurve ist die durch die Messwerte gelegte Pareto-Verteilung und die Konfidenzintervalle sind mit roten Linien dargestellt. Zur Bestimmung der Formparameter der Verteilung wurde die Maximum-Likelihood-Methode verwendet. Die Wiederkehrperiode der einzelnen Frontereignisse ist in der untenstehenden Tabelle zusammengefasst.

Wiederkehrperiode (Jahre)	Stärke (K/100km)
1	8,5
5	9,7
10	10,2
20	10,5
30	10,8
100	11,3

Tabelle 1: Wiederkehrperioden für verschiedene Frontenstärken berechnet mit einer Extremwertanalyse der Zeitreihe 1979 – 2005 (ERA-Interim).

Darüber liegende Wiederkehrperioden sind aus zweierlei Gründen mit Vorsicht zu betrachten. Zum einen ist die Anzahl an vorhanden Events mit einer Stärke größer 10,5 K/100 km sehr klein, was die statistische Auswertung ungenau macht, zum anderen kann das der Reanalyse zugrunde liegende Modell vermutlich Gradienten ab einer gewissen Stärke nur ungenügend darstellen. Eine Verifikation mit Messdaten würde eine erstrebenswerte Ergänzung der Extremwertanalyse darstellen.

¹ Coles, S. (2001), An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, London: Springer.

Bekannte Stürme

Die Frage ob bekannte Stürme der letzten Jahre auch mit besonders starken und markanten Fronten verbunden waren stellt sich ganz offensichtlich.

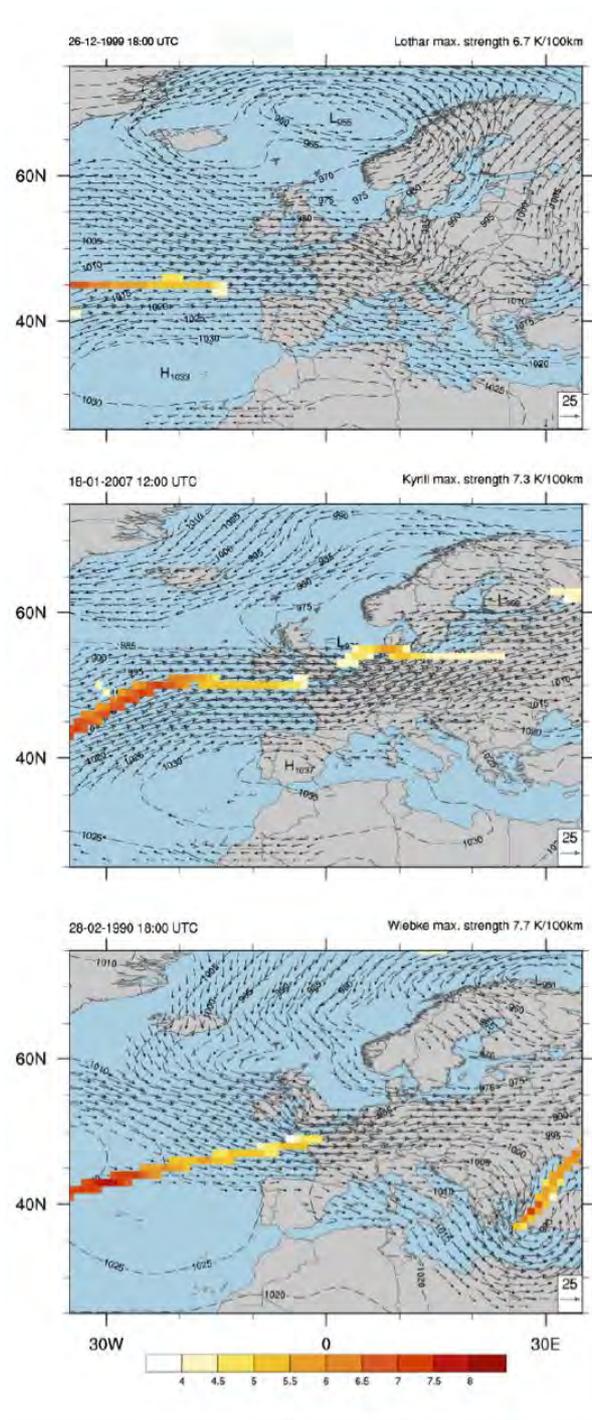


Abbildung 9: Bekannte Stürme mit Orkanstärke und ihre Fronten (a) Lothar am 26.12.1999, (b) Kyrill am 18.01.2007 und (c) Wiebke am 28.02.1990. Zu sehen sind der Bodendruck auf Meereshöhe (gestrichelt), Windvektoren auf 850 hPa sowie die detektierte Front eingefärbt mit dem Gradienten (in K/100 km).

Um dieser Frage nachzugehen, haben wir drei Stürme ausgewählt, die hohen Schaden in Teilen Deutschland hinterlassen haben. Dazu zählen das Orkantief Lothar (Dezember 1999) mit den höchsten Schäden, sowie die Orkane Kyrill (Januar 2007) und Wiebke (Februar/März 1990). In Abbildung 9 ist zu erkennen, dass sich die Wetterlagen in denen sich die genannten Stürme gebildet haben, eine hohe Ähnlichkeit aufweisen, mit einer stark zonalen Strömung sowie einer mittelstarken Front an dessen Ende sich das Tief befindet. Anhand der moderaten Frontenstärken von maximal 6,7 (Lothar), 7,3 (Kyrill) und 7,7 K/100 km (Wiebke) im Vergleich zur Winterklimatologie (ca. 5 K/100 km, siehe Abbildung 6) zeigt sich deutlich, dass keiner der drei Stürme eine überaus starke Front aufweist. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass sich in allen Situationen die maximale Frontenstärke am westlichen Ende der Front über dem Atlantik befindet und somit in großer Distanz zum Orkantief.

Im Anhang C finden sich alle drei Bilder aus Abbildung 9 noch einmal in höherer Auflösung.

Markante Fronten

In diesem Abschnitt untersuchen wir nun markante Fronten, indem wir die Zeitreihe aller Frontendurchgänge im Gebiet Rheinland-Pfalz nach den stärksten Ereignissen sortieren. In Abbildung 11 sind ausgewählte Ereignisse abgebildet.

Interessanterweise zeigt sich, dass diese Ereignisse nahezu ausschließlich im Sommer stattfinden, häufig verbunden mit hohen CAPE² Werten, was auf starke Niederschlags- oder Hagelereignisse schließen lässt. Der maximale 6-stündige Niederschlag entlang der Front ist mit Werten von max. 2 mm in sechs Stunden nicht sonderlich hoch. Die synoptische Situation weist in den drei Fällen eine hohe Ähnlichkeit auf. So befindet sich jeweils ein Tief nördlich der Britischen Inseln und die detektierten Fronten sind jeweils als Kaltfronten zu klassifizieren. Hinzu kommen hohe Werte von CAPE von über 2000 J/kg. Werte von über 1000 J/kg finden sich häufig in stark konvektiven Sommergewittern. Die ermittelten maximalen Frontenstärken liegen im Bereich von 10,7 – 11,7 K/100 km. Ein Wert von 11,7 K/100 km entspricht nach der Extremwertanalyse fast einem 100-jährigen Ereignis. Der Frontdurchgang am 28. Mai 2005 ist mit der größten Blitzhäufigkeit in Rheinland-Pfalz in der Periode 1999 – 2013 verbunden.

Im Anhang D finden sich erneut die Abbildungen in höherer Auflösung.

² CAPE – Convective Available Potential Energy

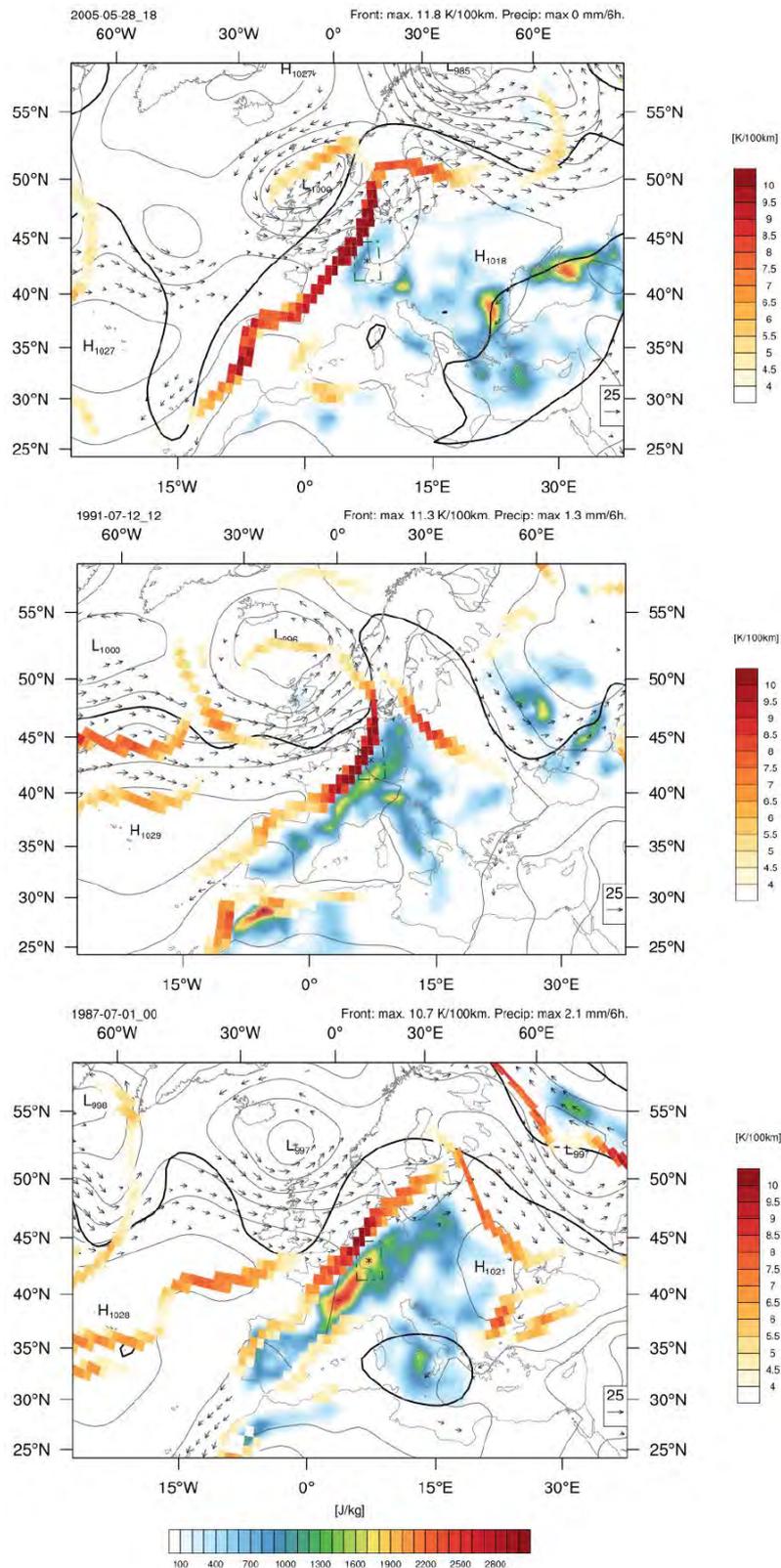


Abbildung 11: Markante Frontenereignisse über Rheinland- Pfalz in den Jahren 1979 - 2005, (a) 28. Mai 2005, (b) 12. Juli 1991 und (c) 1. Juli 1987. Mainz und die Region Rheinland-Pfalz sind eingezeichnet, des Weiteren der Bodendruck (grau), Fronten (Gradient als rötliche Färbung), CAPE (eingefärbt), Windvektoren auf 850 hPa und die Tropopause (schwarze Kontur).

Fronten und die Nordatlantische Oszillation

Die Nordatlantische Oszillation (NAO) beschreibt das Phänomen, dass die Luftdruckverteilung im Nordatlantik bevorzugt zwischen zwei Zuständen, auch Moden genannt, schwankt. In Jahren mit einem stark ausgeprägten Azorenhoch und einem Islandtief befindet sich der Strahlstrom besonders weit nördlich und feucht-warme Luftmassen werden nach Nordeuropa transportiert, man spricht von einer positiven NAO Phase (NAO+). Durch den Transport feucht-warmer Luftmassen nach Nordeuropa und einem starken Strahlstrom ergeben sich milde aber stürmische Winter. In einer negativen NAO Phase (NAO-) findet sich die mittlere Position des Strahlstroms in Breitengraden Mittel- und Südeuropas und sowohl Azorenhoch wie auch das Islandtief sind schwach ausgeprägt. Folglich dominiert über Nord- und Zentraleuropa kalte trockene Luft was erwartungsgemäß kalte Winter und weniger Niederschlag zur Folge hat. Hingegen dominieren nun im Mittelmeerraum feuchtere Luftmassen und eine Tendenz zu häufigeren Starkniederschlägen.³

In der Literatur finden sich viele Indizes welche den NAO Zustand beschreiben. Traditionell wird allerdings die Druckdifferenz zwischen einer Messstation in nördlicheren (z.B. Island) und südlicheren Breitengraden (z.B. Azoren oder Gibraltar) betrachtet, die mit der Standardabweichung über ein langjähriges Mittel normiert wird. Der hier verwendete NAO Index basiert auf der oben beschriebenen Methode von Stationsmessdaten und wird durch das NCAR bereitgestellt (siehe Referenzen). Die betrachtete Periode (1979 – 2005) wird unterteilt in Jahre mit starkem NAO+ (Index > 1) und mit starkem NAO- (Index < -1). Basierend auf dieser Unterteilung wird eine Klimatologie der Frontenhäufigkeit erstellt, wobei nicht weiter in einzelne Jahreszeiten unterschieden wird. Die Differenz beider Klimatologien ist in Abbildung 12 zu sehen.

Deutlich ist über dem Nordatlantik die Verschiebung der Frontenhäufigkeit von höheren Breitengraden (NAO+) zu südlicheren Breitengraden (NAO-) zu erkennen, was sich durch die Verschiebung des Strahlstroms erklären lässt. Zusätzlich kann man eine Verschiebung des Häufigkeitsmaximum nach Westen beobachten, von 30°W (NAO+) zu 50°W (NAO-). In Zentraleuropa erwarten wir folglich eine vermehrte Frontenhäufigkeit in NAO+ Jahren, was mit der Beobachtung, dass die NAO+ Phase häufig starke Wetterereignisse mit sich bringt, übereinstimmt.

³ Als weiterführende Literatur sei ProMet Jahrgang 34 Heft 3/4, die meteorologische Fortbildungszeitschrift des DWD empfohlen.

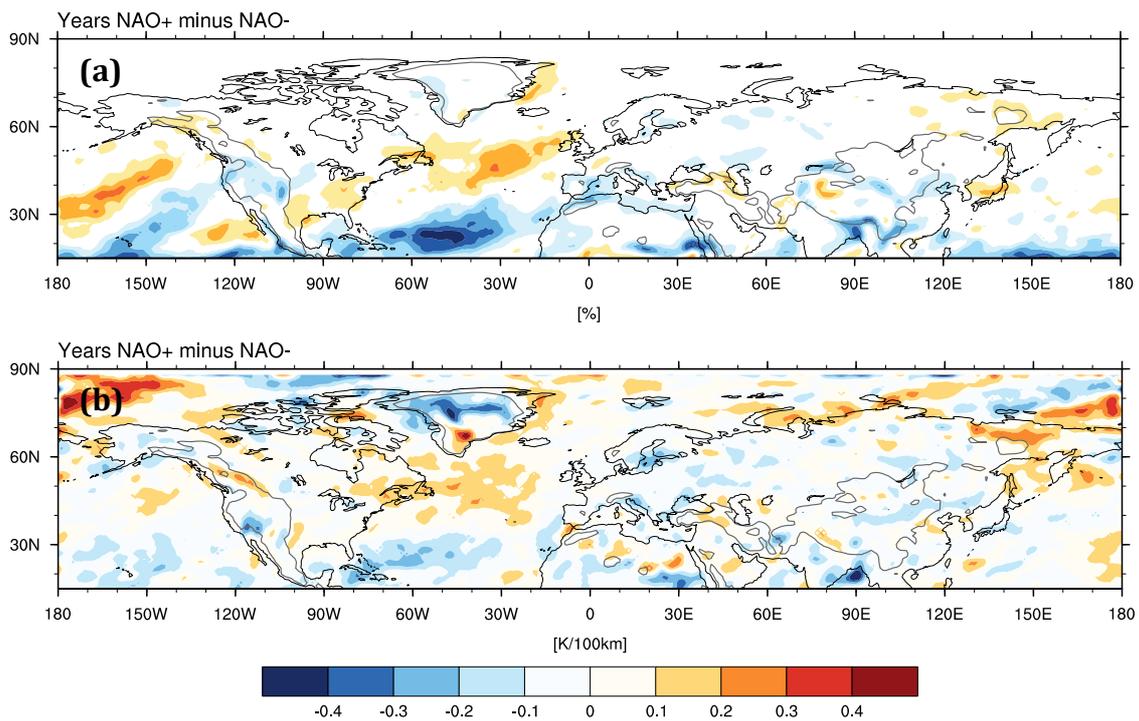


Abbildung 12: Differenz der (a) Frontenhäufigkeit und (b) Frontenstärke in Jahren mit hohem NAO+ (>1) und Jahren mit geringem NAO- (<1) Index.

Für die Frontenintensität finden wir ein ähnliches Bild (Abbildung 12b). Durch die Verschiebung des Strahlstroms finden wir ein Intensitätsmaximum in NAO+ Jahren weiter nordöstlich im Vergleich zu NAO- Jahren. Ein signifikanter Unterschied in der Frontenstärke findet sich jedoch nicht in der für uns interessanten Region über Mitteleuropa

Für die Klimaszenarien wird deshalb die Unterscheidung in NAO+ und NAO- Jahre nicht ausgeführt.

Klimaprojektionen: Szenario RCP8.5

Nahe Zukunft: 2021 - 2050

Im Folgenden betrachten wir die Periode 2021 – 2050 (nahe Zukunft) und vergleichen die Veränderungen der Frontenhäufigkeit und -intensität der einzelnen Modelle gegenüber deren Resultate in der Referenzperiode. Eine Zunahme der Frontenhäufigkeit um 1 %, z.B. von 3 auf 4 %, bedeutet, dass jeden 25sten Zeitschritt gegenüber jedem 33sten Zeitschritt eine Front auftritt, wobei ein Tag vier Zeitschritte umfasst. Die Ergebnisse sind in Abbildung 13 zusammengefasst.

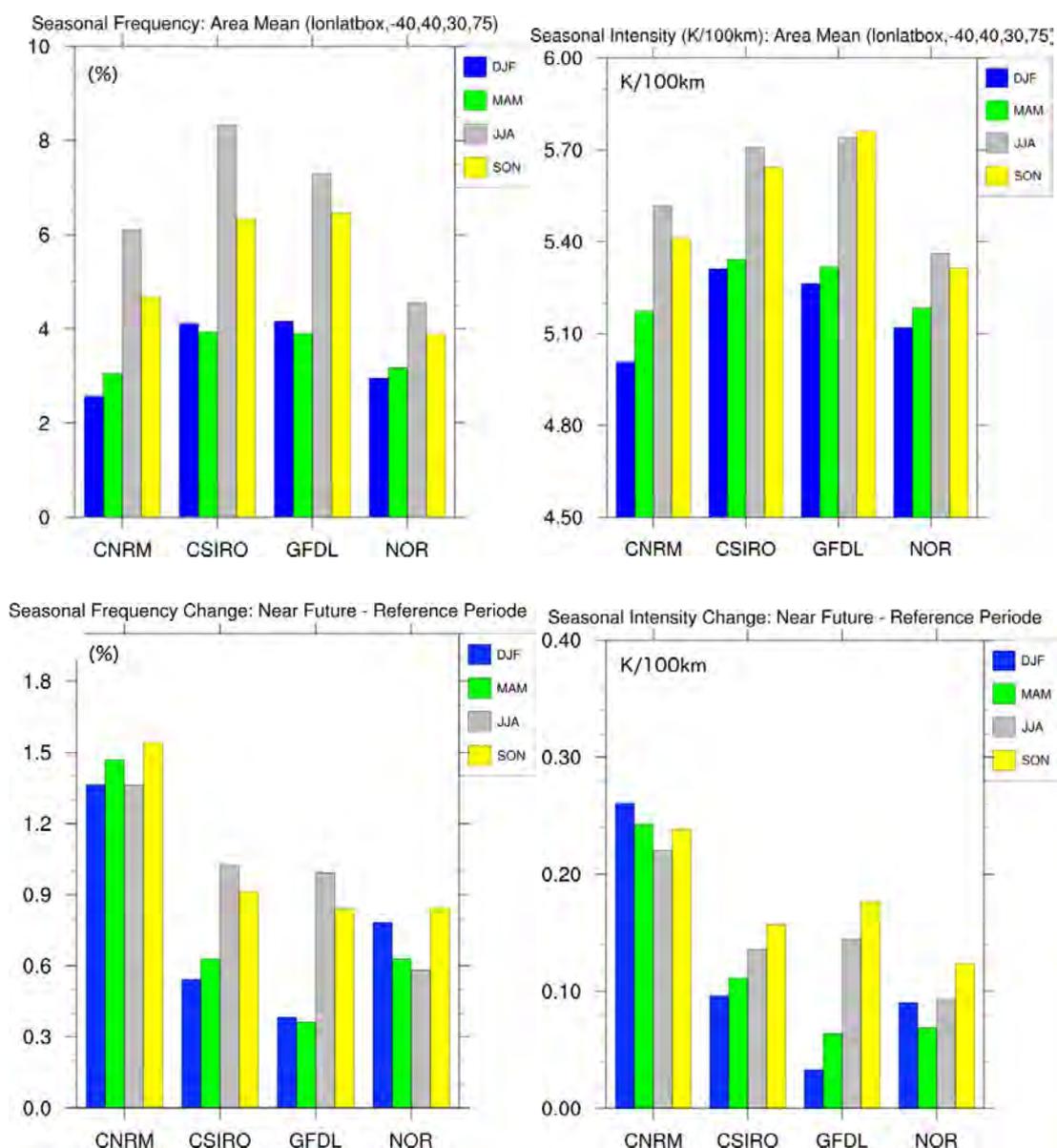


Abbildung 13: Mittlere saisonale Frontenhäufigkeiten in % (oben links), für die Periode 2021 – 2050 und Intensität in K/100 km (oben rechts). Unten: Differenz gegenüber den Resultaten in der Referenzperiode.

Alle Modelle zeigen eine Zunahme der Frontenhäufigkeit, wobei bei keinem der Modelle sich der Jahresgang verändert. Weiterhin beobachten wir bei allen Modellen im Sommer und Herbst die meisten Fronten. Zwei Modelle zeigen eine deutliche Verstärkung des Jahresganges (CSIRO und GFDL), vor allem durch eine verstärkte Zunahme in Herbst und Sommer, gegenüber Winter und Frühjahr. Im Gegensatz dazu simulieren die beiden Modelle CNRM und NorESM nahezu gleichmäßig über alle Jahreszeiten eine erhöhte Häufigkeit von jeweils ca. 1,3 % (CNRM) und 0,75 % (NorESM). In der Summe bedeutet das, dass sich die hier betrachteten Modelle in ihren Resultaten einander annähern. Bei der Intensität finden wir bei allen Modellen eine Zunahme vor allem im Sommer und Herbst mit Ausnahme des CNRM welches eine ähnlich starke Zunahme der Frontenintensität um ca. 0,25 K/100 km in allen Jahreszeiten zeigt.

Folglich finden wir für die nahe Zukunft eine Verstärkung des Jahresgangs und eine Annäherung der einzelnen Modelle.

Zu beachten ist hier, dass es sich in Abbildung 13 (untere Reihe) um die reine Differenz der absoluten Frontenhäufigkeit und -intensität handelt. Eine Zunahme um 1,5 % bei der Häufigkeit bedeutet folglich nur, dass Anstelle einer Häufigkeit von 10 % nun 11,5 % berechnet wurden. Relativ zu z.B. einer Frontenhäufigkeit von 10 % in der Referenzperiode ist dies bereits eine Zunahme um 15 %.

Ferne Zukunft: 2071 – 2100

Auch für die ferne Zukunft (2071 – 2100) greifen wir auf die kompakte Darstellung gemittelter Frontenhäufigkeiten und -stärken zurück. Wie bereits für die nahe Zukunft, sind die detaillierten geographischen Karten der Verteilungen von Frontenstärke und Häufigkeit für alle Modelle und alle Jahreszeiten im Anhang zu finden. In Abbildung 14 ist zu erkennen, dass sich die bereits in der nahen Zukunft angedeutete Tendenz der Frontenzunahme gegenüber der historischen Periode noch einmal verstärkt. In allen Modellen zeigt sich eine deutliche Zunahme des Jahresgangs, das bedeutet, dass die Frontenhäufigkeit in den Sommer- und Herbstmonaten stärker zunimmt als im Winter und Frühjahr. Die Zunahme der absoluten Frontenhäufigkeit erreicht Werte von bis zu 3 % (CNRM und CSIRO) gegenüber der Periode 1979 – 2005, sowie einer Zunahme der Intensität um 0,35 K/100 km.

Bei der Differenz der Intensität beobachten wir eine Zunahme in allen Jahreszeiten, jedoch insbesondere in den Sommer-/Herbstmonaten. Auch hier ist wieder deutlich eine Annäherung der Modelle zu sehen.

Um zu verdeutlichen, wie stark die Veränderungen relativ zur Referenzperiode ausfallen, ist in der unteren Reihe von Abbildung 14 die relative Veränderung gegenüber 1979 – 2005 dargestellt. Interessanterweise liegen alle Modelle bei der relativen Zunahme der Frontenstärke sehr nahe zusammen. Wir können festhalten, dass die Frontenstärke sich in allen Jahreszeiten um 5 – 10 % erhöht. Die Häufigkeit hingegen nimmt um 20 % (GFDL, DJF) bis über 100 % (CNRM, DJF) zu.

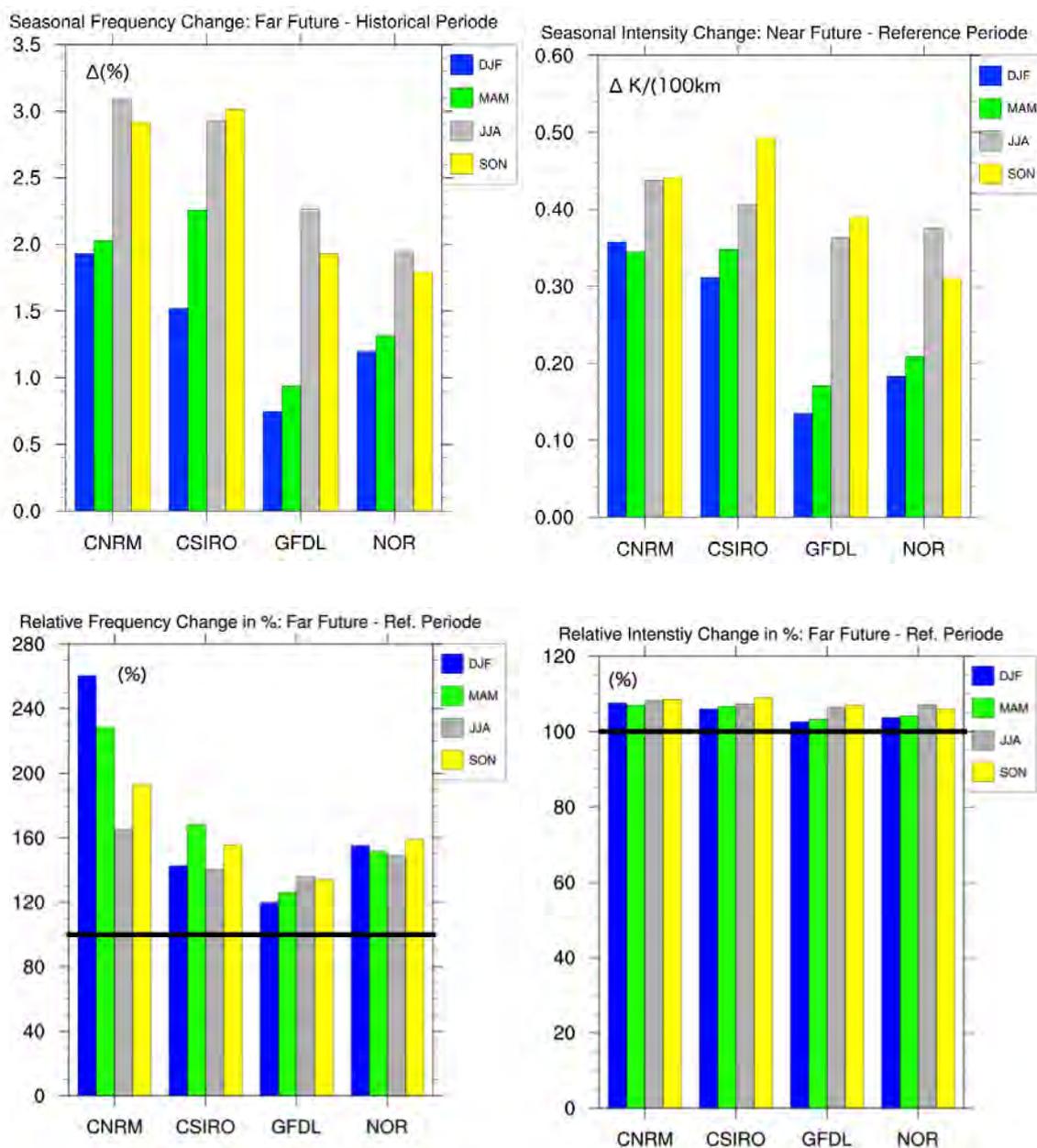


Abbildung 14: Obere Reihe wie in Abbildung 9: absolute Differenz der Frontenhäufigkeit (Intensität) zwischen der fernen Zukunft und der Referenzperiode. Untere Reihe: Relative Veränderung der Häufigkeit (Intensität), zur Referenzperiode. Der schwarze Querbalken steht für den Wert der Referenzperiode.

Verteilung der Frontenstärke

Eine einfache Methode, die Verteilung der Frontenstärke zu vergleichen, ist in Abbildung 15 gezeigt. Die Histogramme zeigen die gemittelte Frontenstärke (gemittelt über die Domain in Abbildung 3 für alle Modelle und allen Perioden, sowie für ERA-Interim. Deutlich zu erkennen ist, wie die Verteilung der Frontenstärke in der Referenzperiode von allen Modellen nicht korrekt simuliert wird. Tendenziell ist die Abnahme der Häufigkeit zu starken Gradienten hin nicht schnell genug. Es zeigt sich schön, wie im Verlauf der Simulationen (Referenz, nahe und ferne Zukunft) die Häufigkeit schwacher Fronten ebenso zunimmt wie die Häufigkeit der sehr ausgeprägten Fronten mit Werten von über 10 K/100 km.

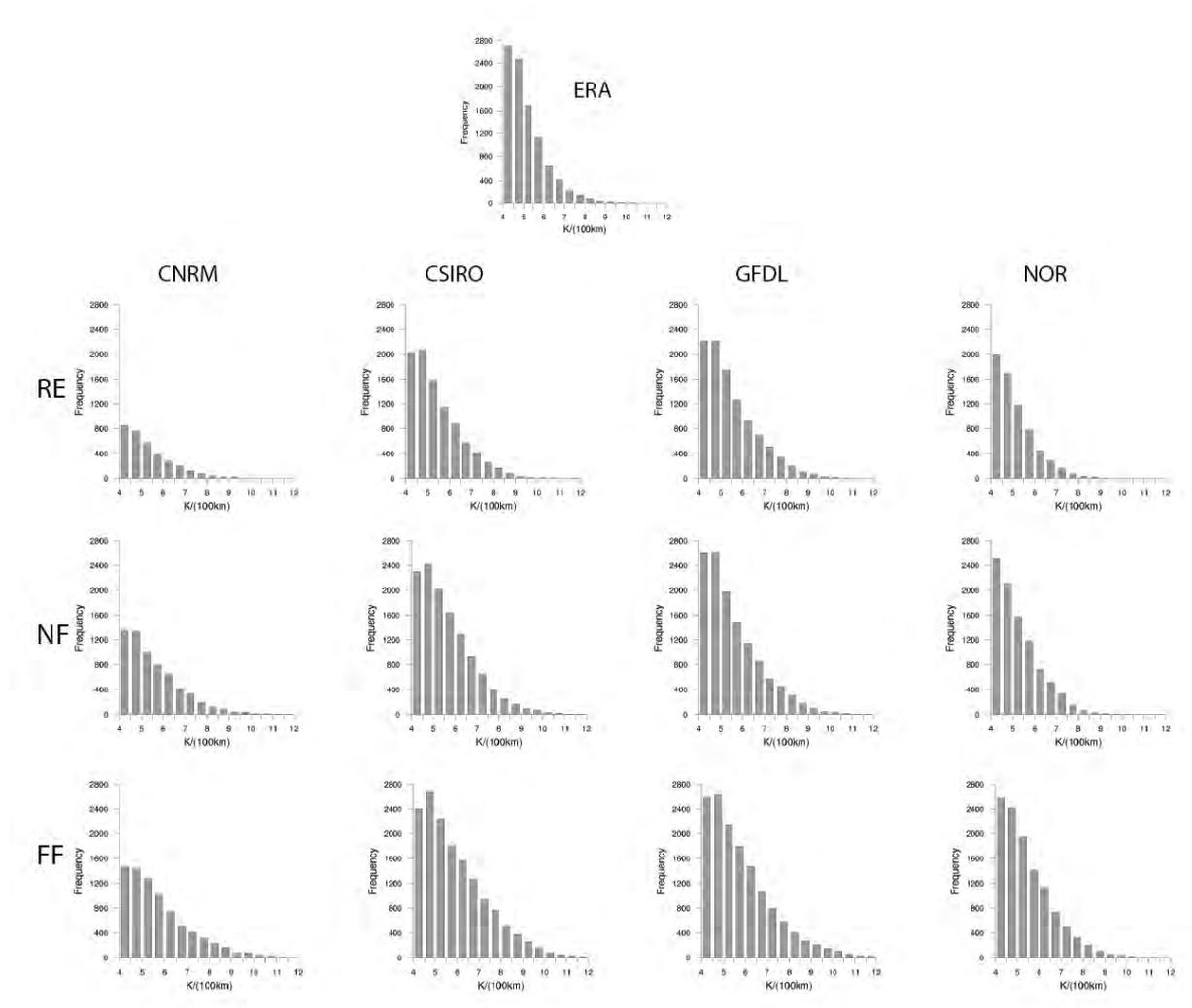


Abbildung 15: Histogramme der mittleren Frontenstärke für alle Modelle (Spalten) und Perioden (Zeilen, RE = Referenzperiode, NF = Nahe Zukunft, FF = Ferne Zukunft). ERA-Interim ist oberhalb der Modelle zu finden. Die y-Achse läuft bis zu einer Häufigkeit von 2400 (Anzahl der Ereignisse mit der gegebenen Stärke), die x-Achse bis zu einer Stärke von 12 K/100 km mit einer Schrittweite von 0,5 K.

Im Anhang B befinden sich die einzelnen Histogramme noch einmal in höherer Auflösung.

Extremwertanalyse der Klimaprojektionen

In diesem Unterkapitel führen wir eine Extremwertanalyse der Frontenstärke für alle Modelle und alle Zeitperioden durch. Die Frage, die sich dabei stellt ist, ob und wie sich die Wiederkehrperioden von z.B. 15- oder 30-jährigen Ereignissen in der nahen und fernen Zukunft verändern. Verstehen wir heute unter einem 50-jährigen Ereignis was in 2071 – 2100 nur mehr ein 30-jähriges Ereignis ist?

Nachfolgend sind die Resultate für die Referenzperiode (Abbildung 16), die „Nahe Zukunft“ (Abbildung 17) und die „Ferne Zukunft“ (Abbildung 18) dargestellt.

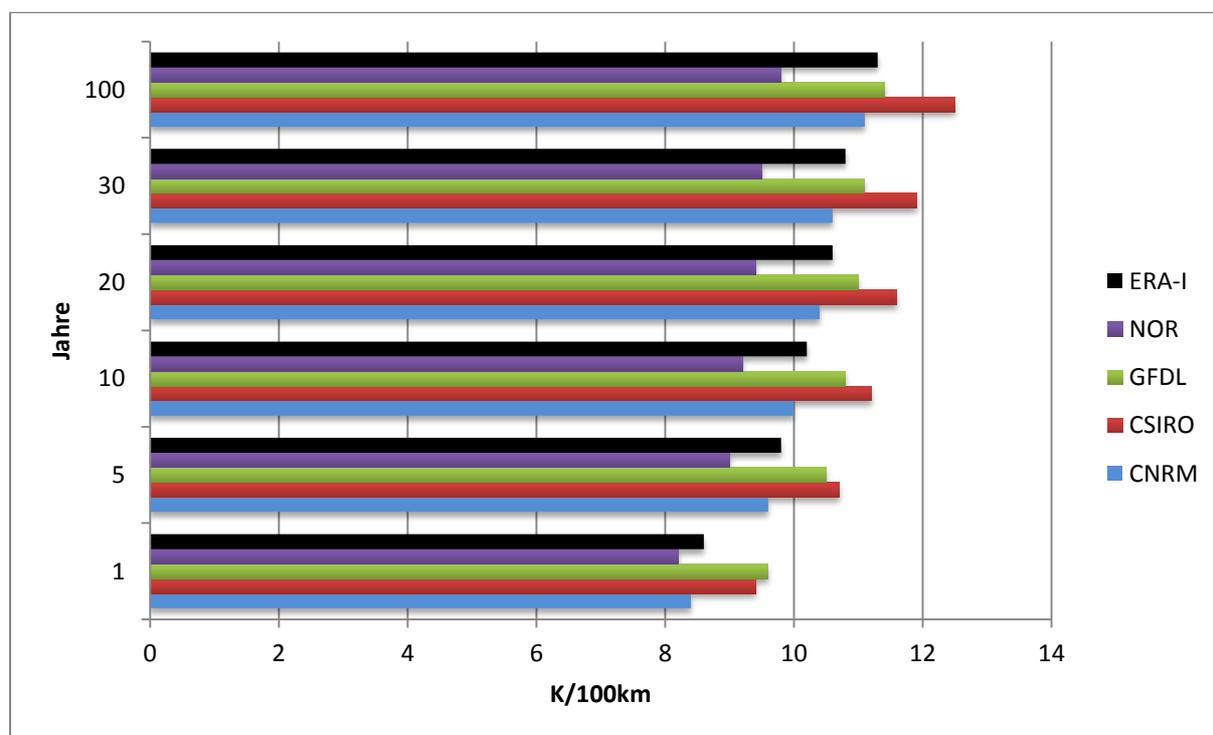


Abbildung 16: Wiederkehrperioden der Frontenintensität der einzelnen Modelle berechnet für die Referenzperiode.

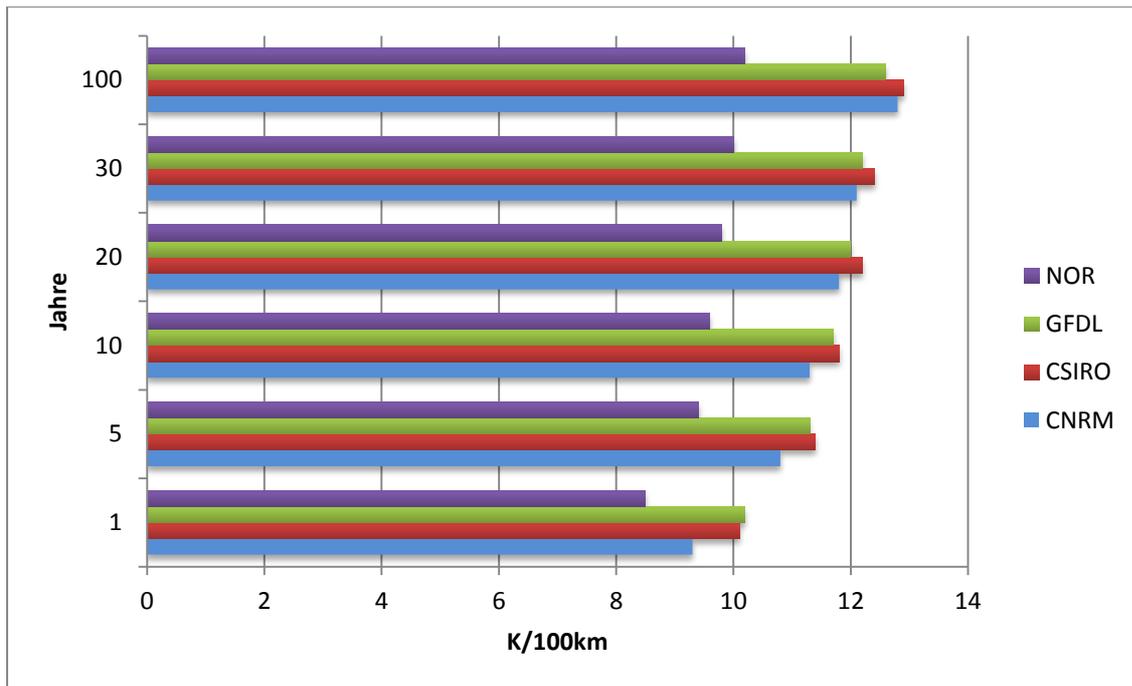


Abbildung 17: Wiederkehrperioden der Frontenintensität der einzelnen Modelle berechnet für die Periode „Nahe Zukunft (2021 – 2050)“.

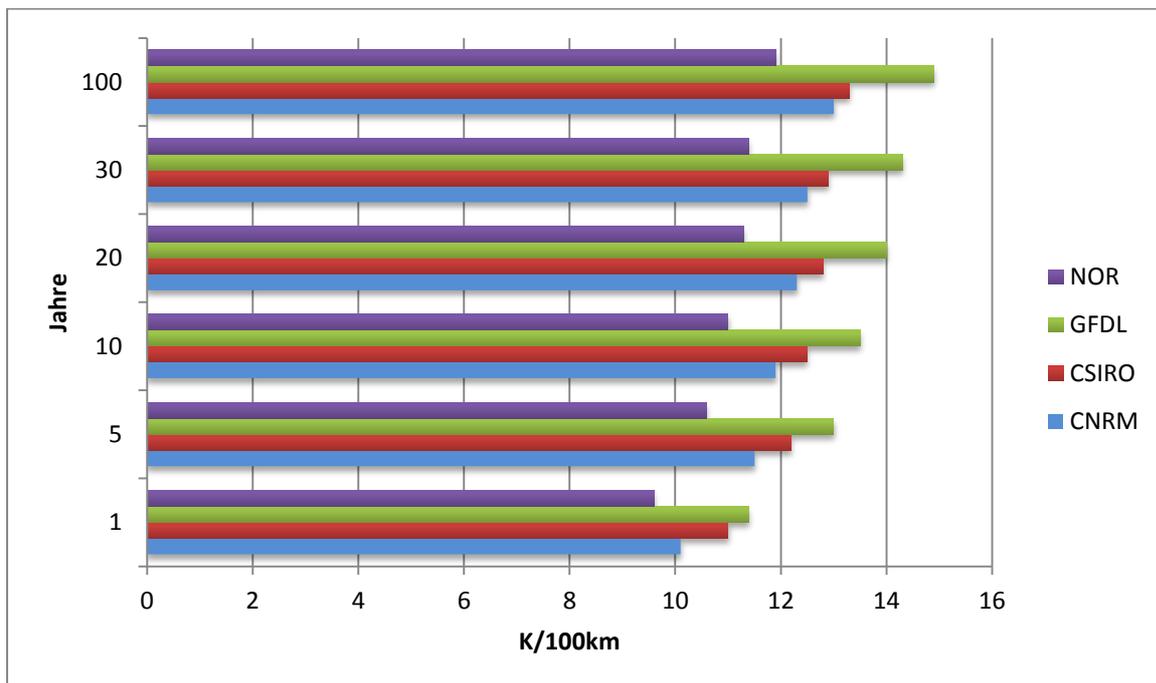


Abbildung 18: Wiederkehrperioden der Frontenintensität der einzelnen Modelle berechnet für die Periode „Ferne Zukunft (2071 – 2100)“.

Schlussfolgerung

Zusammenfassen lässt sich Folgendes festhalten. Im Rahmen dieser Pilotstudie wurden bodennahe Fronten mit Hilfe einer automatisierten Erkennungsmethode für drei verschiedene Zeitperioden identifiziert und ausgewertet, sowie deren zukünftige Auftrittshäufigkeit und Intensität mit Hilfe von vier Klimaprojektionen bestimmt.

Im klimatologischen Mittel des ERA-Interim Datensatzes haben Fronten über Mitteleuropa in den Wintermonaten eine Stärke von 5 K/100 km sowie von 5,8 K/100 km in den Sommermonaten. Eine Extremwertanalyse der identifizierten Fronten über Europa ergab, dass Fronten-stärken von 10,8 K/100 km bereits eine Wiederkehrperiode von 30 Jahren besitzen. Dabei ist eine Stärke von 8,5 K/100 km durchaus einmal jährlich zu erwarten

Starke Fronten fallen in der Regel nicht mit starken Tiefdruckgebieten zusammen, so waren weder Lothar, Wiebke noch Kyrill mit besonders starken Fronten verbunden, sondern wiesen durchschnittlich Frontenstärken zwischen 5 – 6 K/100 km auf. Jedoch bleibt festzuhalten, dass starke Fronten in der Regel sehr häufig mit markanten Wetterereignissen und Gefahren wie hoher Blitzfrequenz und Sommergewittern verbunden sind. Eine genauere Analyse einzelner starker Fronten bietet sich daher als Folgeprojekt an. Interessanterweise lässt sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen NAO-Phase sowie der Stärke und Häufigkeit von Fronten nachweisen.

Die Aufbereitung der CMIP5 Klimaprojektionsdaten gestaltete sich technisch wie zeitlich aufwendig. Für ein weiterführendes Projekt, in welchem sämtliche Ensemble Mitglieder untersucht werden sollen, wird daher dringend empfohlen die dafür nötigen Ressourcen im Voraus detailliert zu planen. Zudem stellen nicht alle Modelle die benötigten Daten in der geforderten zeitlichen Auflösung zur Verfügung, darunter fällt auch das MPI-ESM (ECHAM).

Die Untersuchung von vier Modellen lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Streuung der Ergebnisse zwischen den Modellen ist hoch. So schwankt das Resultat für eine dreißigjährige Wiederkehrperiode der Frontstärke zwischen 9,5 (NOR-ESM) und 11,9 K/100 km (CSIRO).
- Durch den Einfluss der Feuchte werden mehr Fronten im Sommer als im Winter identifiziert. Diese erweisen sich jedoch häufig als quasi-stationär und prägen die Klimatologie. Meist sind diese quasi-stationären Fronten jedoch von geringerer

Intensität. Eine Unterscheidung zwischen mobilen synoptisch-skaligen und quasi-stationären Fronten ist folglich erstrebenswert

- Keines der Modelle stimmt mit den Resultaten der Reanalyse für die Referenzperiode überein. Allerdings geben alle Modelle die jahreszeitliche Charakteristik (Maximum im Sommer sowie Minimum im Winter) grundsätzlich wieder.
- Alle Modelle zeigen eine Zunahme der Frontenhäufigkeit, besonders für die Periode 2071 – 2100. Die Zunahme der Frontenhäufigkeit relativ zur Modell eigenen Simulation der Referenzperiode (1979 – 2005) schwankt zwischen 20 % (GFDL, DJF) und 100 % (CNRM, DJF).
- Alle Modelle zeigen eine Zunahme der Frontenstärke um ca. 5 – 10 % für die Periode 2071 – 2100 im Vergleich zur Referenzperiode.

Besonders deutlich zeigt sich eine Zunahme der Saisonalität. Dies bedeutet vor allem eine Zunahme der Fronten im Sommer und Herbst. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich, dass erneut die Klimatologie der Sommermonate stark durch den Einfluss der quasi-stationären Fronten geprägt ist. Eine Zunahme dieser lässt sich, unter anderem, mit einem potentiell erhöhten Feuchtegehalt der Atmosphäre erklären. Eine weitere Ursache ist, vor allem bezüglich der Modellvariabilität, in der unterschiedlichen Ausrichtung der Sturmzugbahnen zu finden. Projektionen mit einer stark zonal ausgerichteten Sturmzugbahn zeigen auch verstärkte Frontenhäufigkeiten.

Referenzen

Bolton, D. (1980): The computation of equivalent potential temperature, *Monthly Weather Review*, p. 1046-1053.

Dee, D. P., S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Hólm, L. Isaksen, P. Kållberg, M. Köhler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubev, P. De Rosnay, C. Tavolato, J.-N. Thépaut and F. Vitart (2011): The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, p. 553-597.

Jenkner, J., M. Sprenger, I. Schwenk, C. Schwierz, S. Dierer, D. Leuenberger (2010): Detection and climatology of fronts in a high-resolution model reanalysis over the Alps, *Meteorological Applications*, p. 1–18.

Meinshausen, M., S. J. Smith, K. Calvin, J. S. Daniel, M. L. T. Kainuma, J.-F. Lamarque, K. Matsumoto, S. A. Montzka, S. C. B. Raper, K. Riahi, A. Thomson, G. J. M. Velders, D. P. van Vuuren (2011): The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, DOI 10.1007/s10584-011-0156-z.

NAO Index Data provided by the Climate Analysis Section, NCAR, Boulder, USA, Hurrell (1995). Updated regularly. Accessed July 2013.

ProMet, 34. Jahrgang, Heft 3 / 4, 2008. Herausgeber: Deutscher Wetterdienst, ISSN 0340-4552. Bezug: DWD, Deutsche Meteorologische Bibliothek, Frankfurter Str. 135, 63067 Offenbach a. M.

Schemm, S., H. Wernli, and L. Papritz (2013): Warm conveyor belts in idealized moist baroclinic wave simulations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 70, No. 2, p. 627-652.

van Vuuren, D. P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G. C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.-F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S. J. Smith, S. K. Rose (2011): The representative concentration pathways: an overview, *Climatic Change*, DOI 10.1007/s10584-011-0148-z.



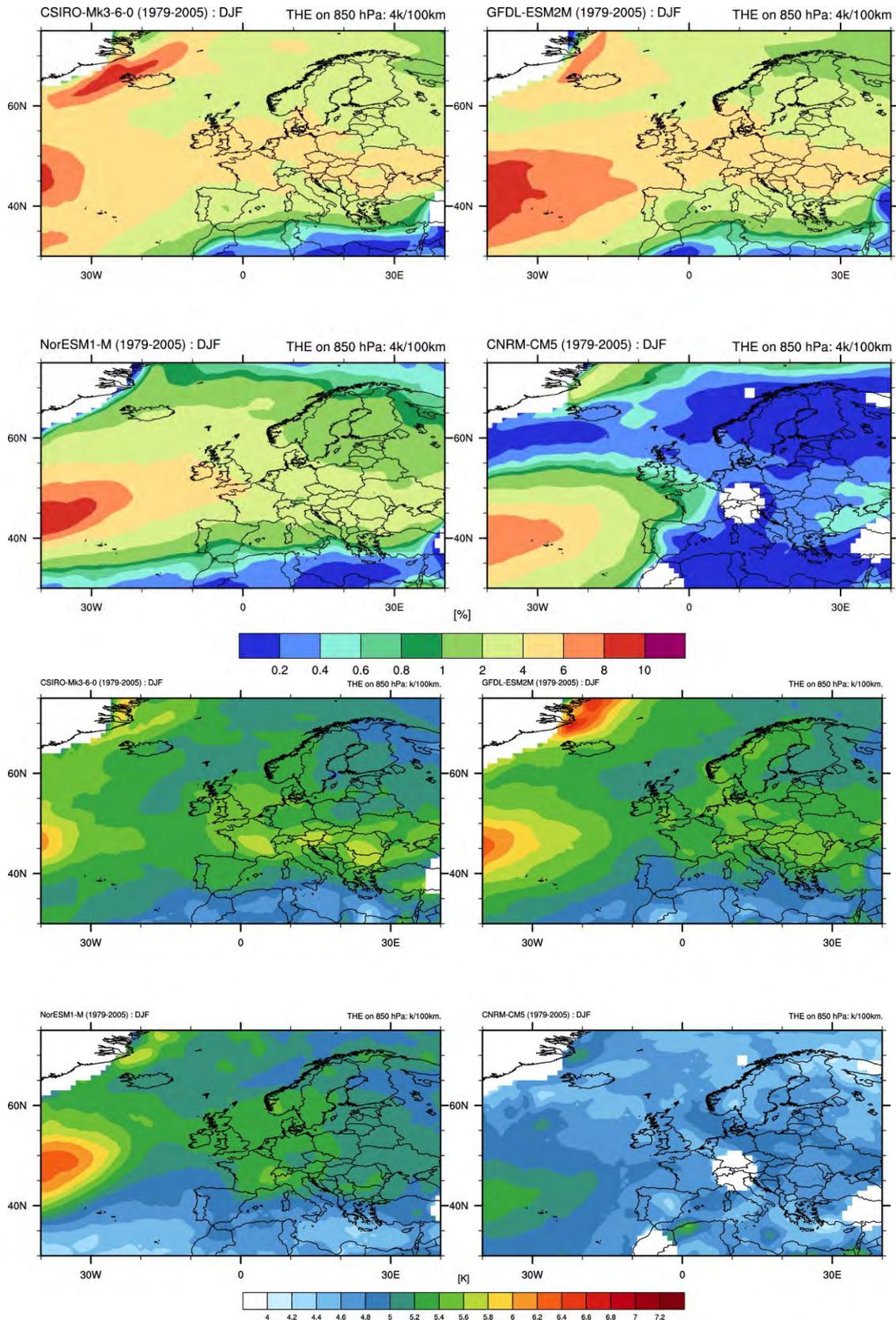
Anhang A – Frontenhäufigkeit und -intensität

Der Anhang A enthält die geographische Darstellung der Frontenhäufigkeit und -intensität, in der Referenzperiode (1979 – 2005) sowie für die nahe Zukunft (2021 – 2050) und die ferne Zukunft (2071 – 2100) für alle betrachteten Klimamodelle. Die Anordnung der Abbildungen ist sortiert nach Jahreszeiten. Regionen welche aufgrund der Modelltopographie nicht in die Analyse mit einbezogen werden konnten, sind weiß eingefärbt.

Die Anordnung der anschließenden Abbildungen ist wie folgt: Die oberen vier Grafiken bilden für die jeweilige Jahreszeit die Frontenhäufigkeit und die unteren vier Grafiken die Frontenintensität ab.

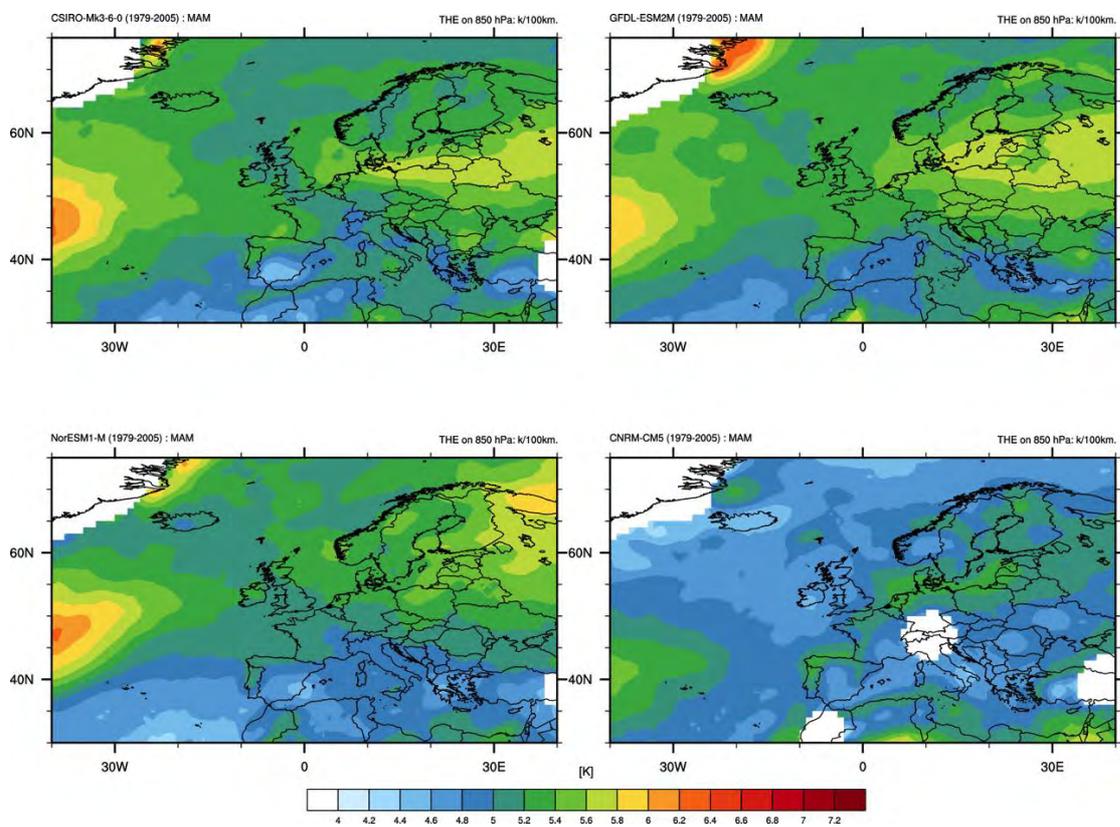
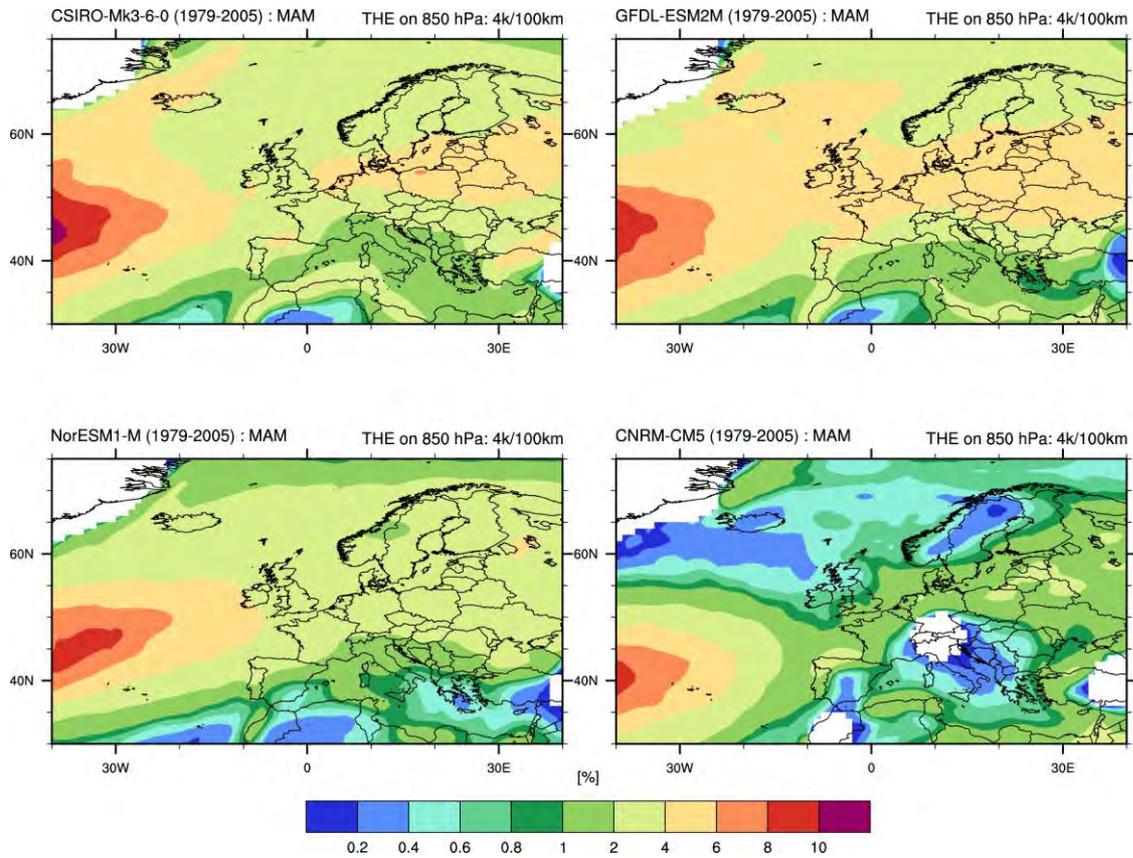
Anhang A1: Referenzperiode (1979 - 2005)

DJF

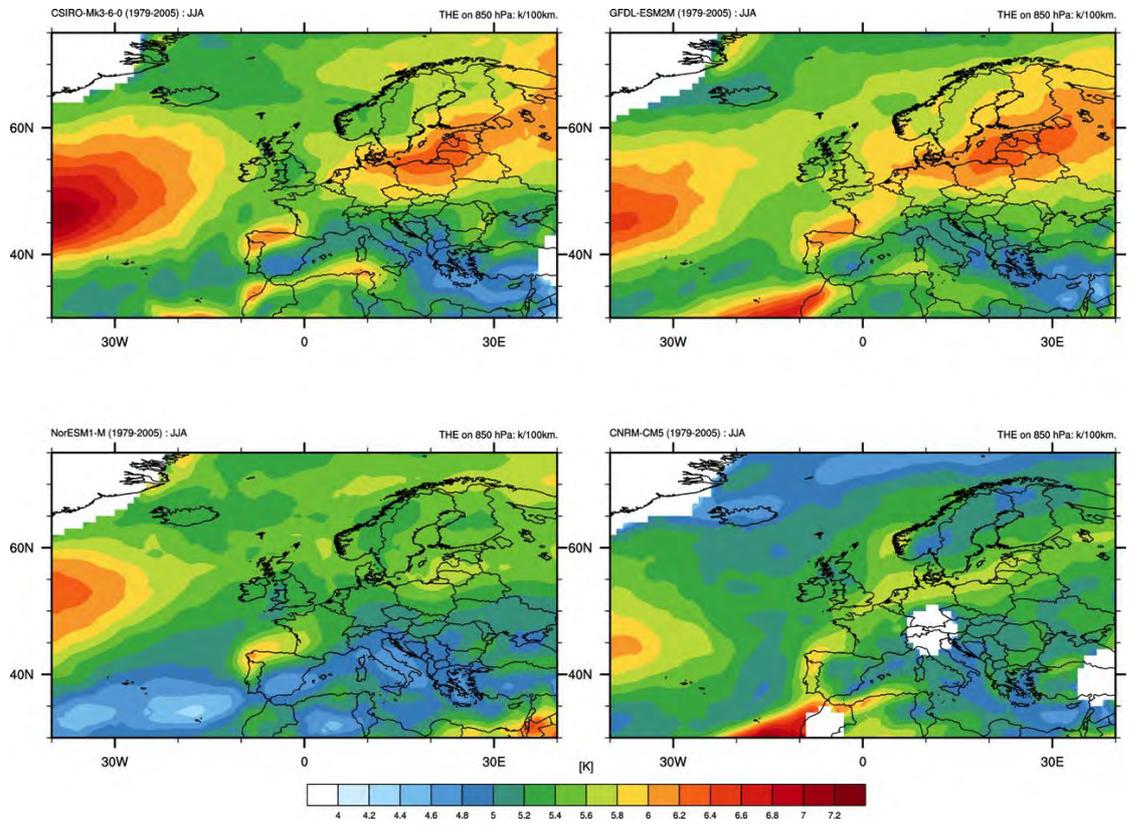
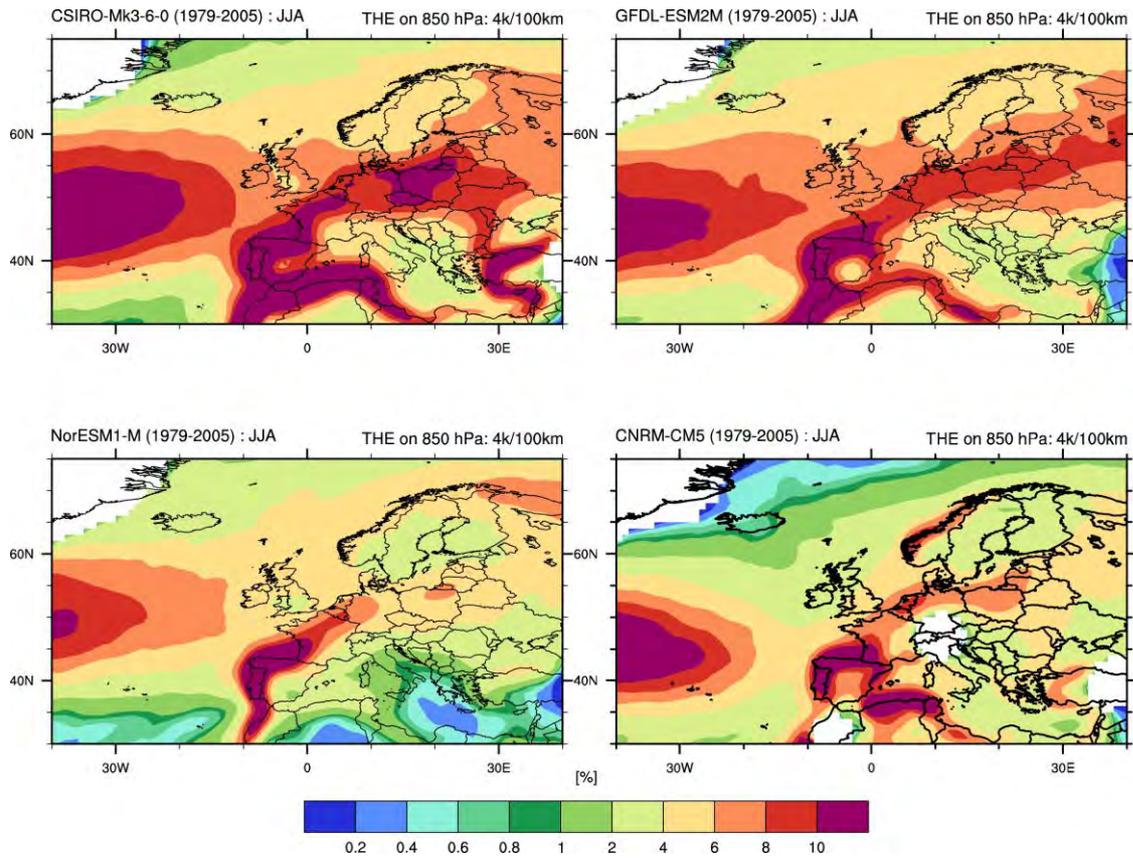


Anhang A – Frontenhäufigkeit und -intensität

MAM

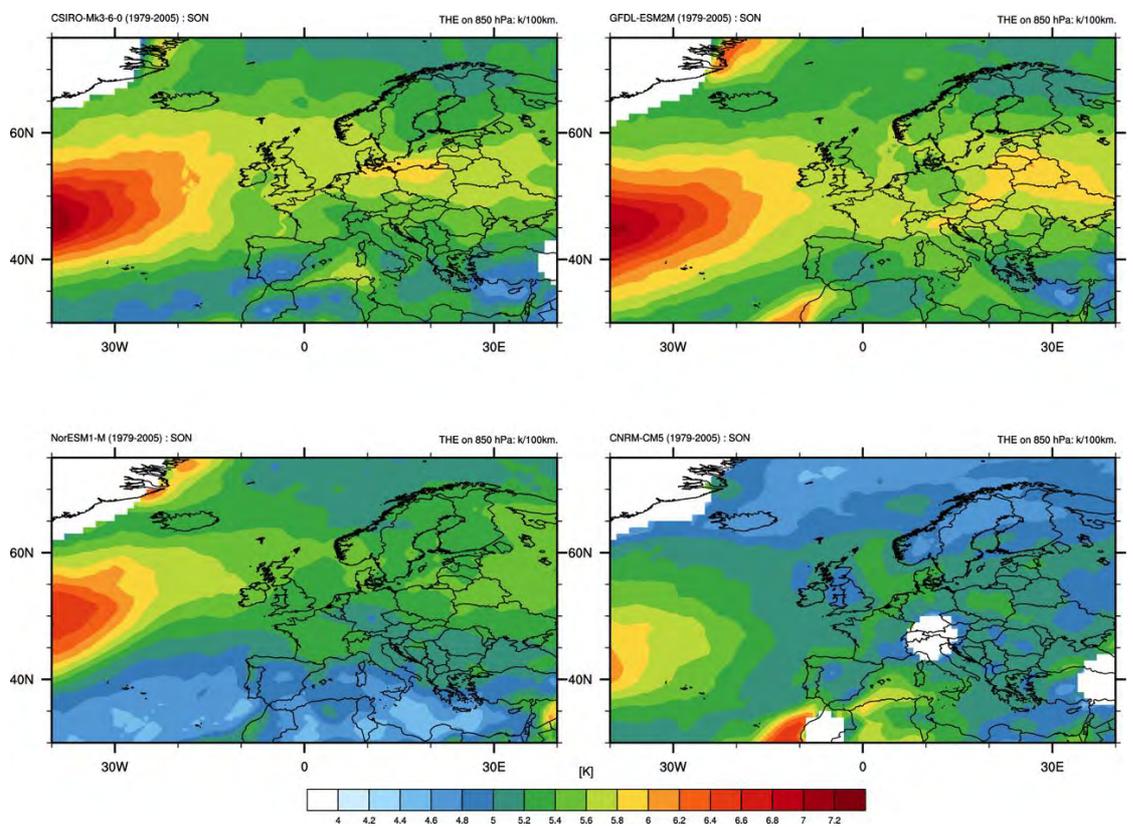
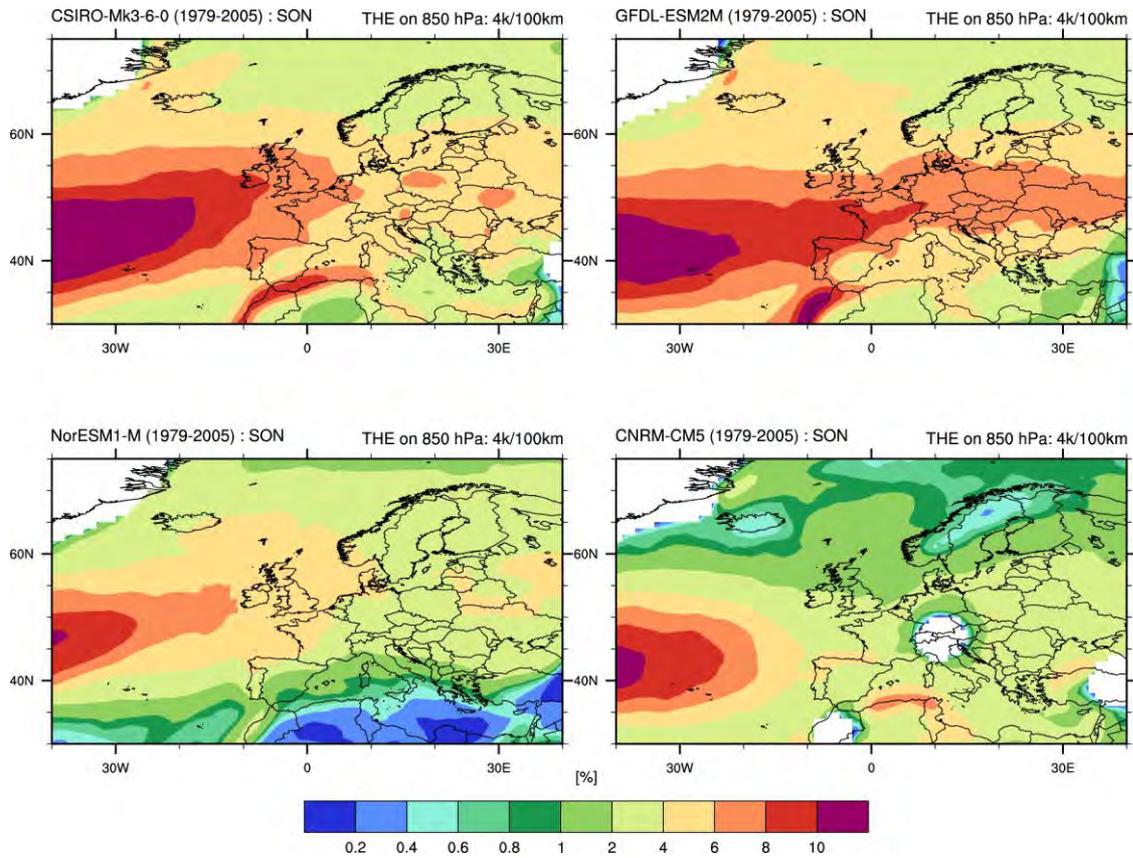


JJA



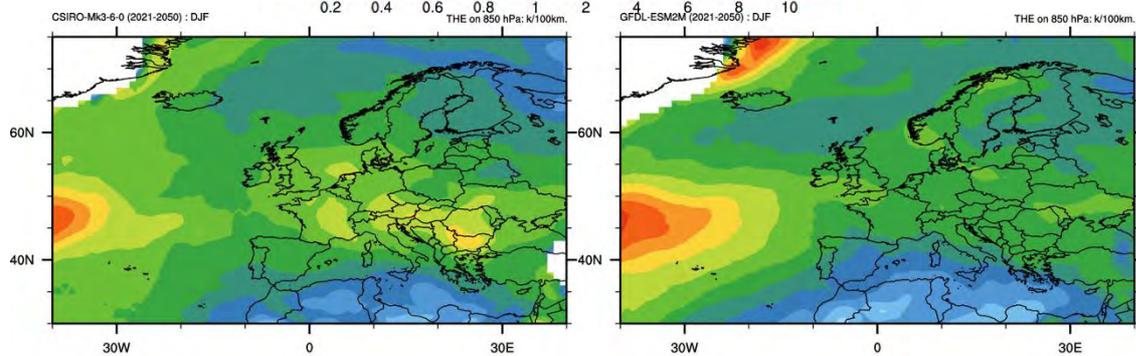
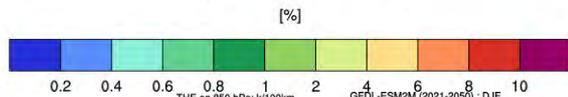
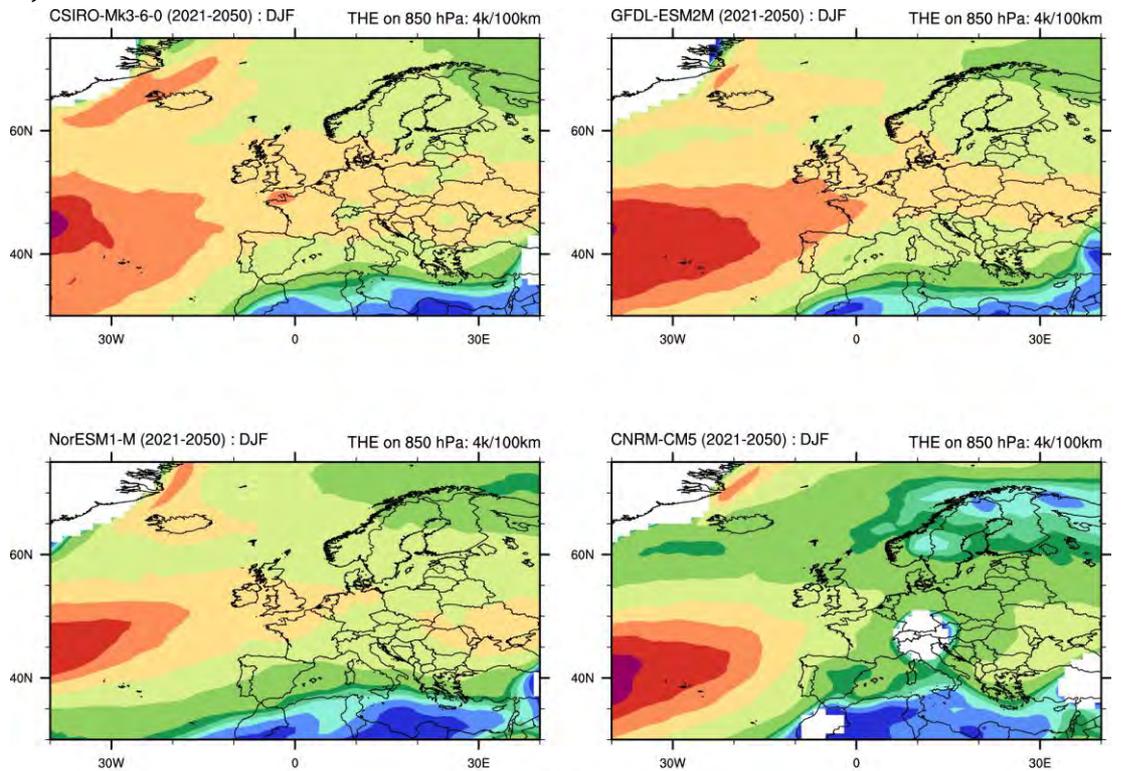
Anhang A – Frontenhäufigkeit und -intensität

SON

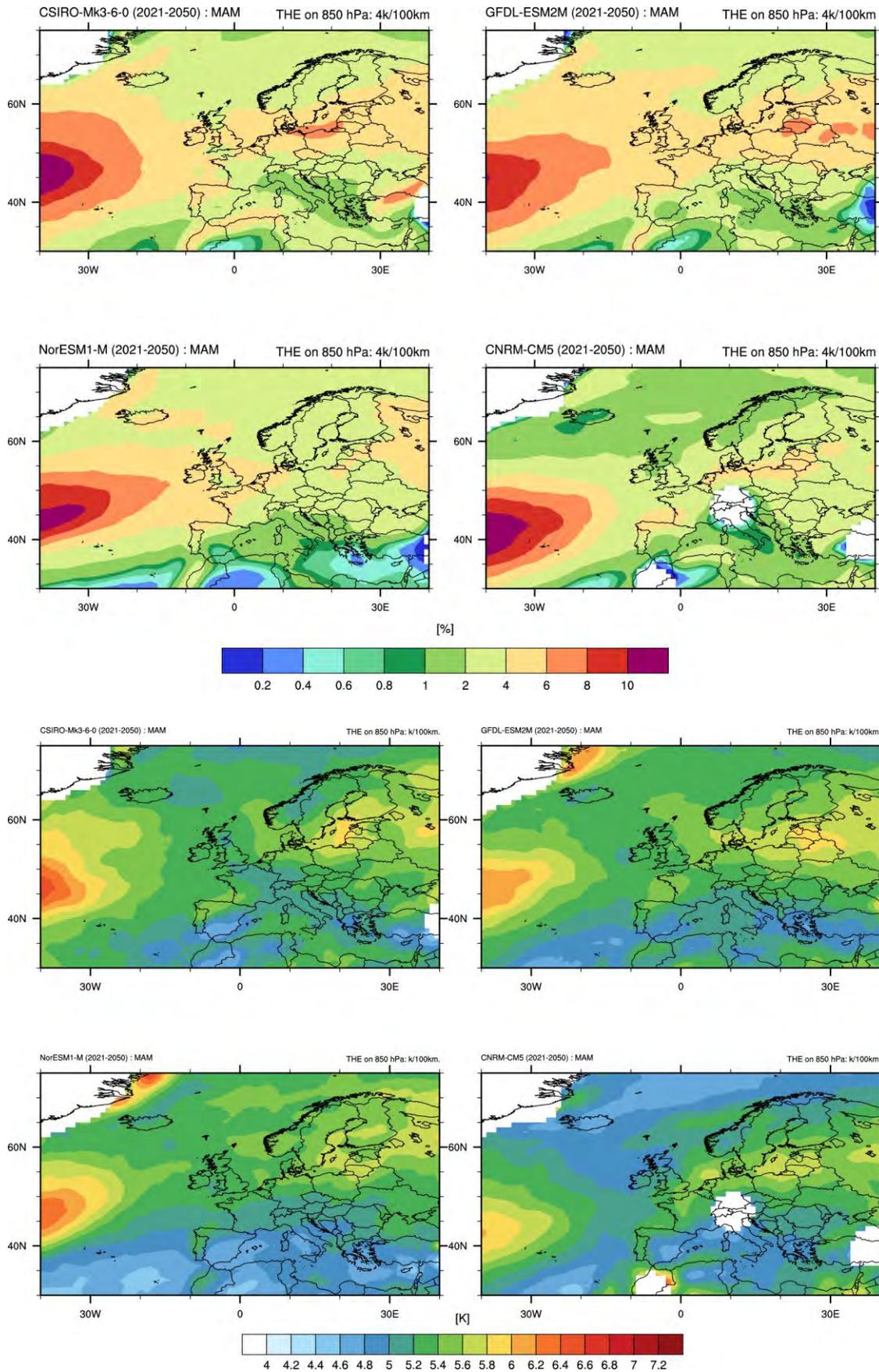


Anhang A2: Nahe Zukunft (2021 - 2050)

DJF

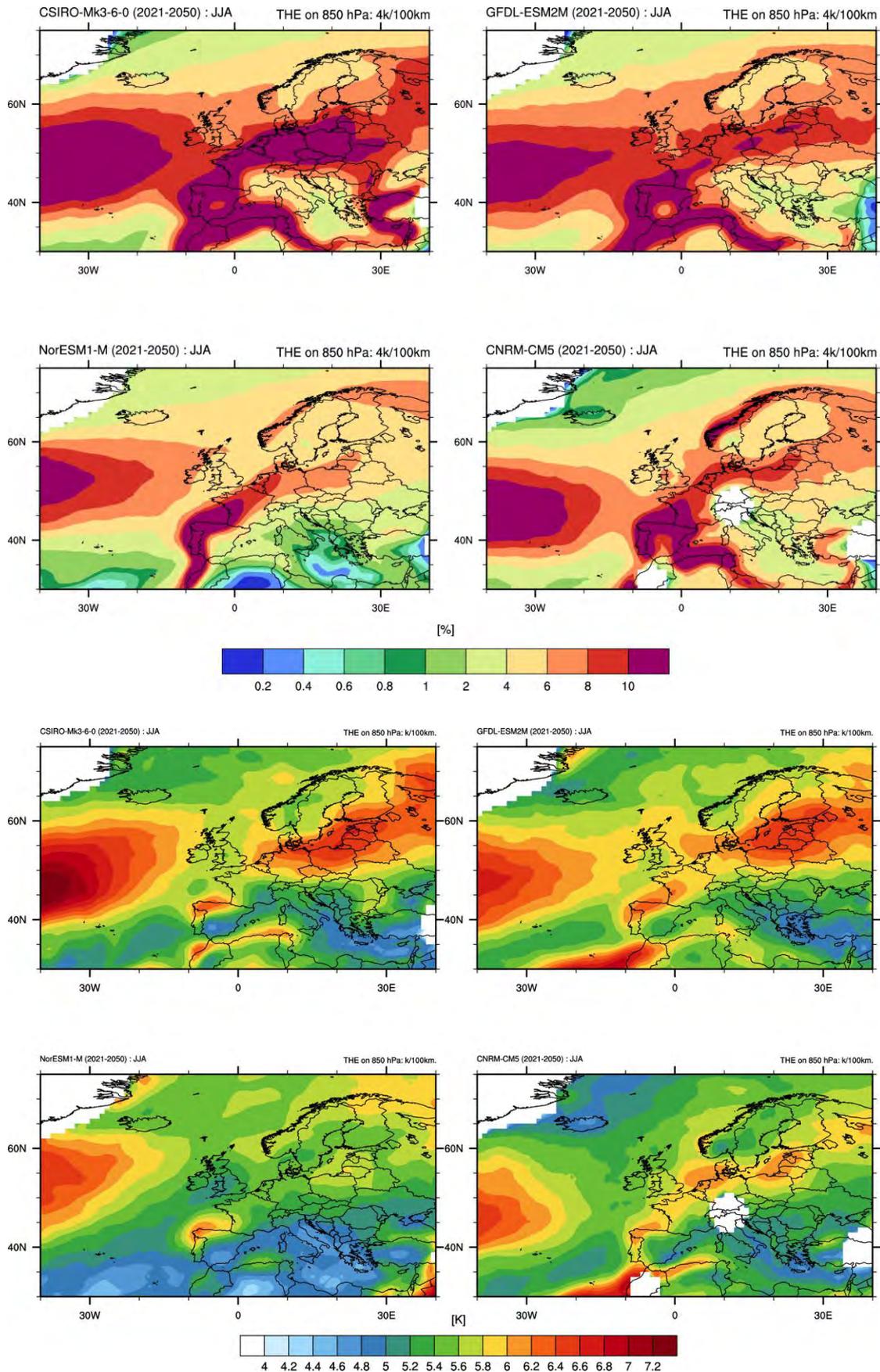


MAM

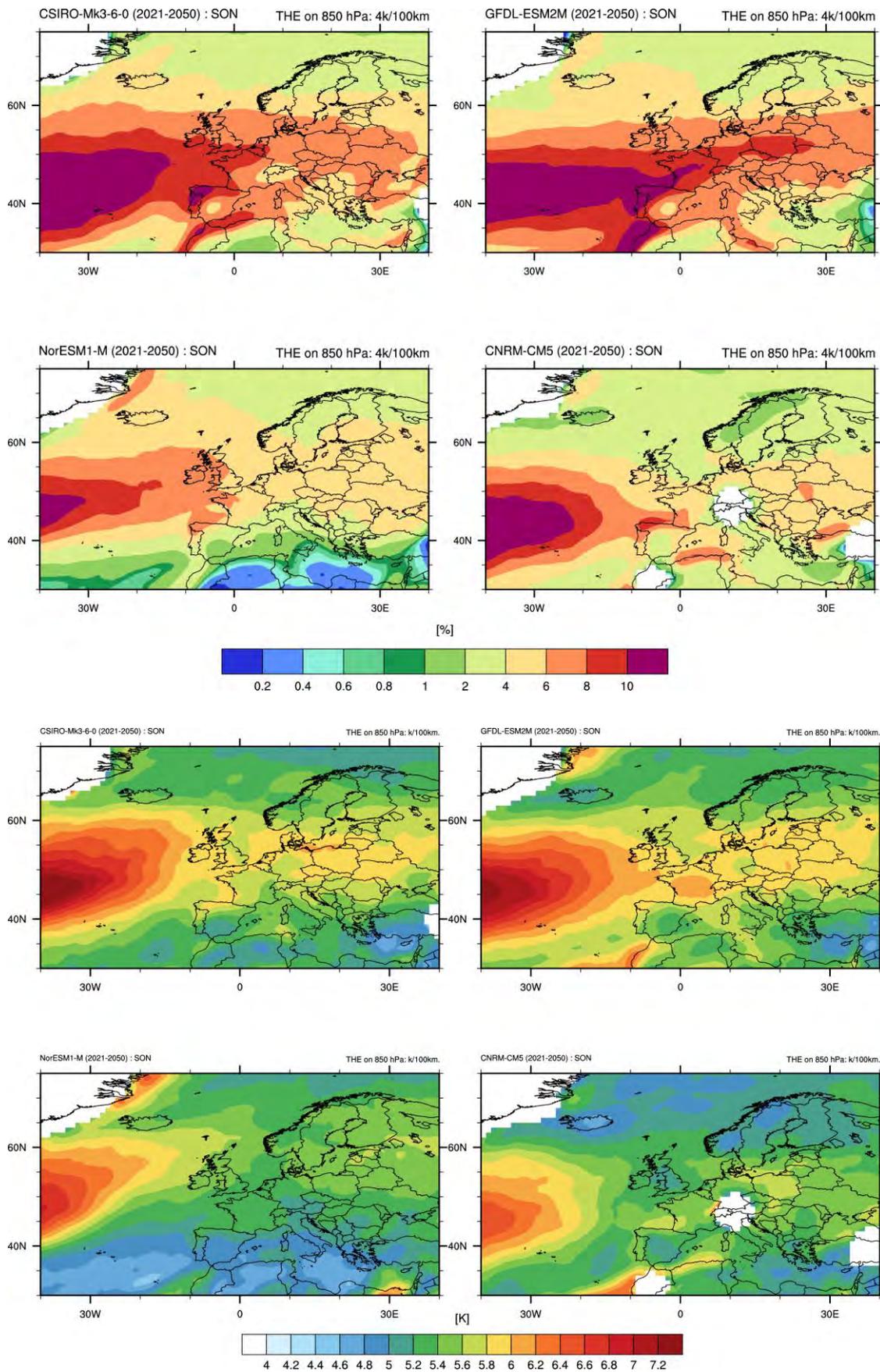


Anhang A – Frontenhäufigkeit und -intensität

JJA

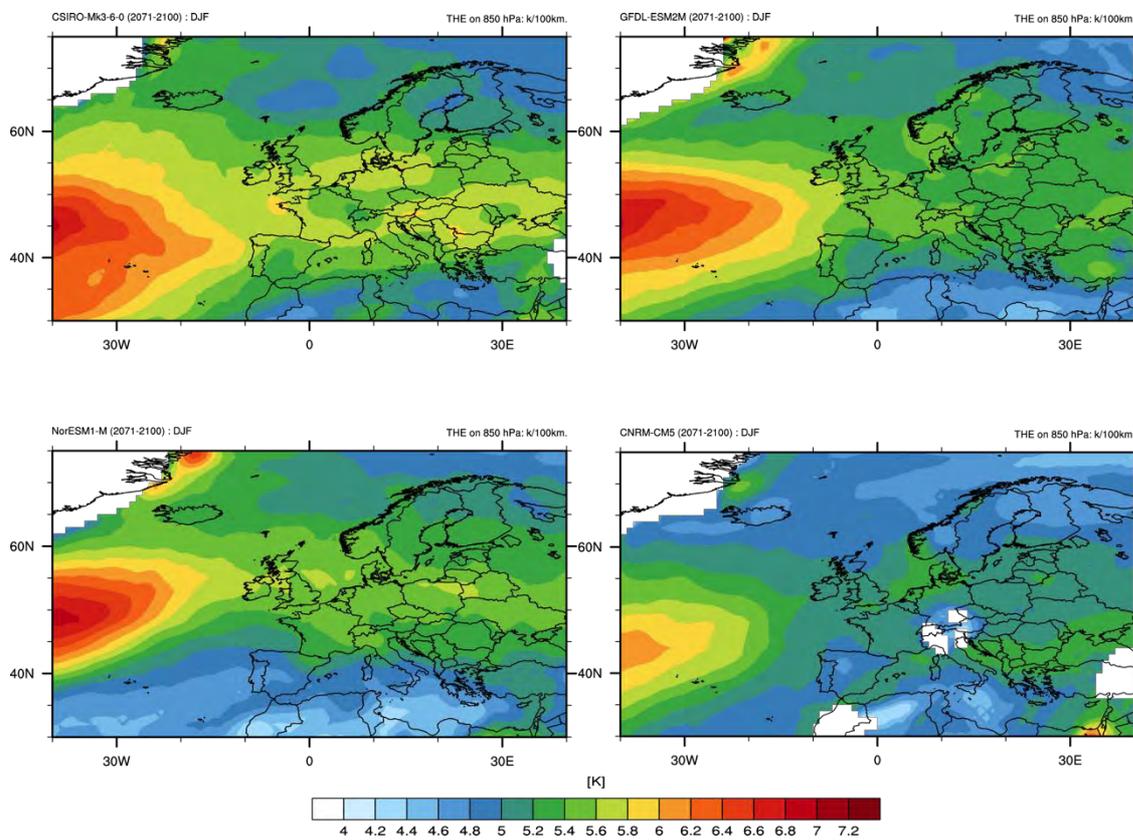
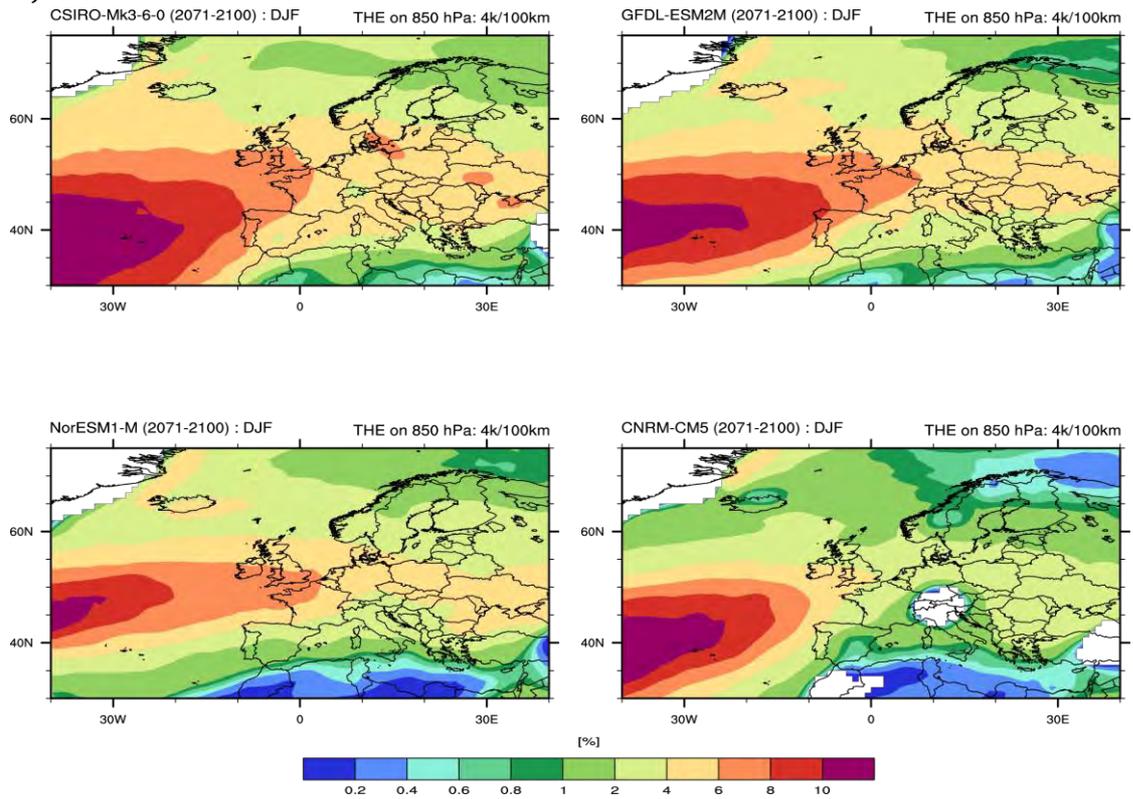


SON

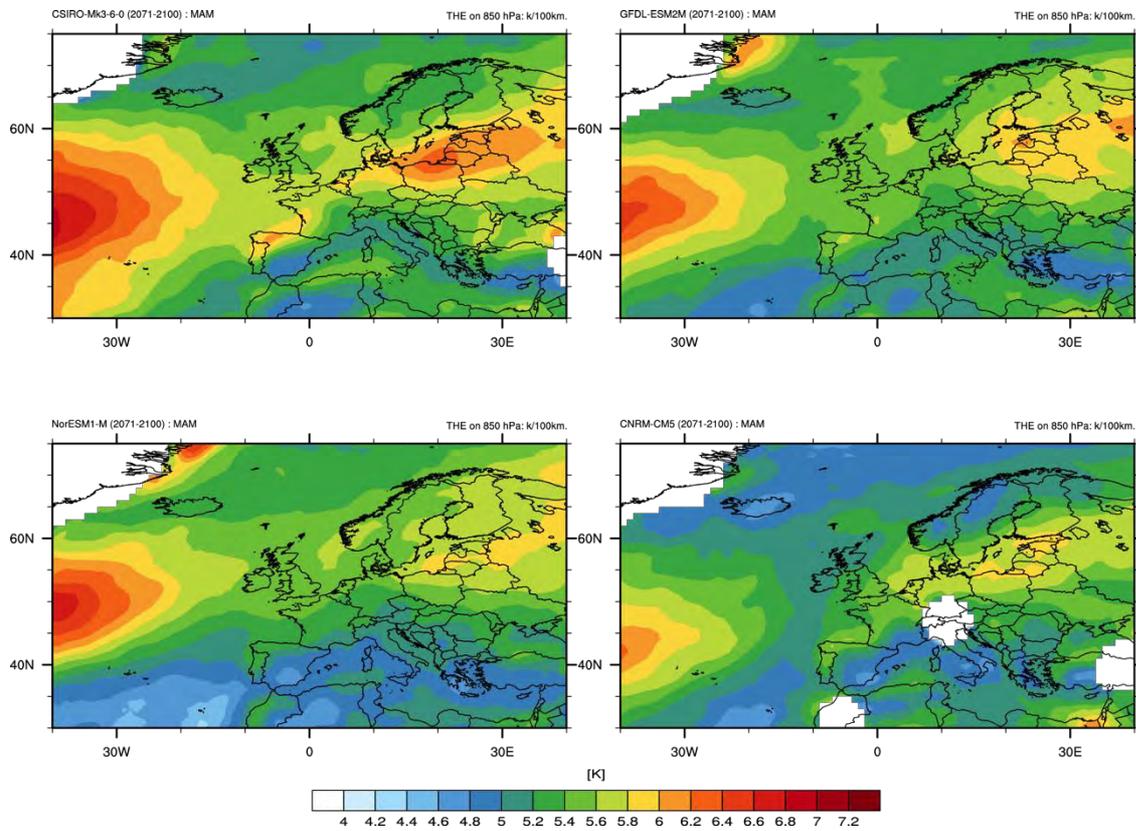
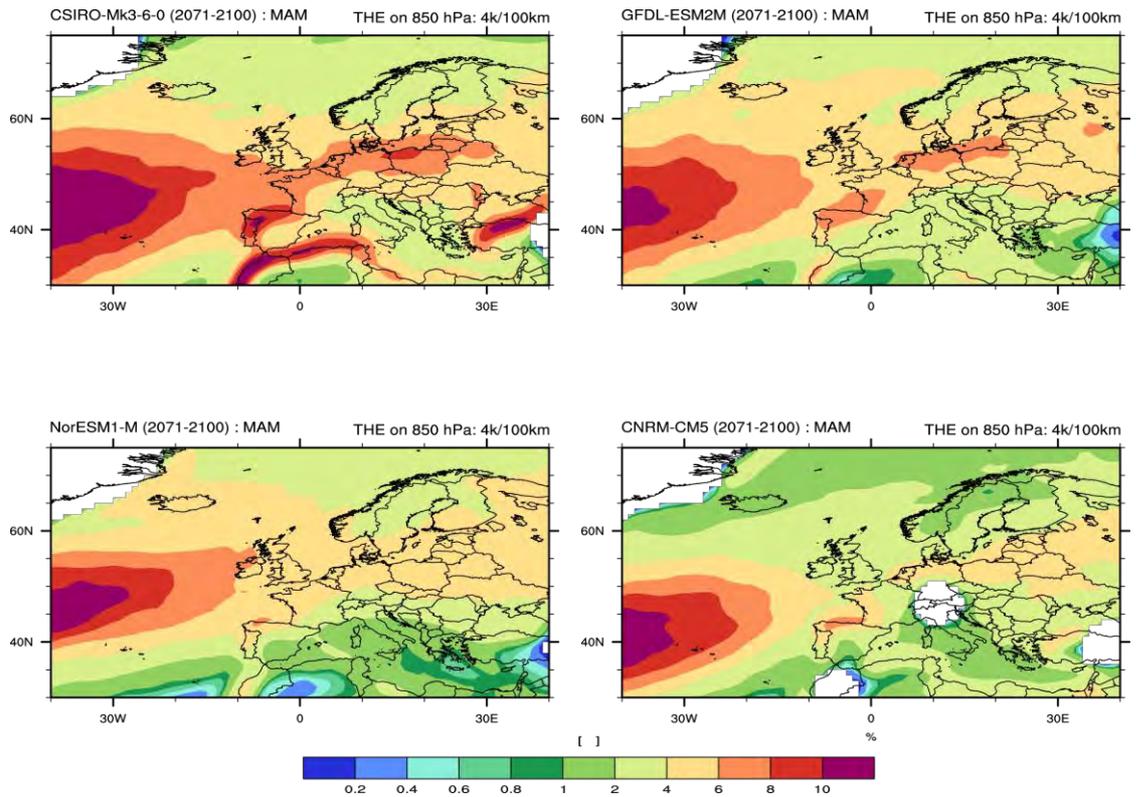


Anhang A3: Ferne Zukunft (2071 – 2100)

DJF

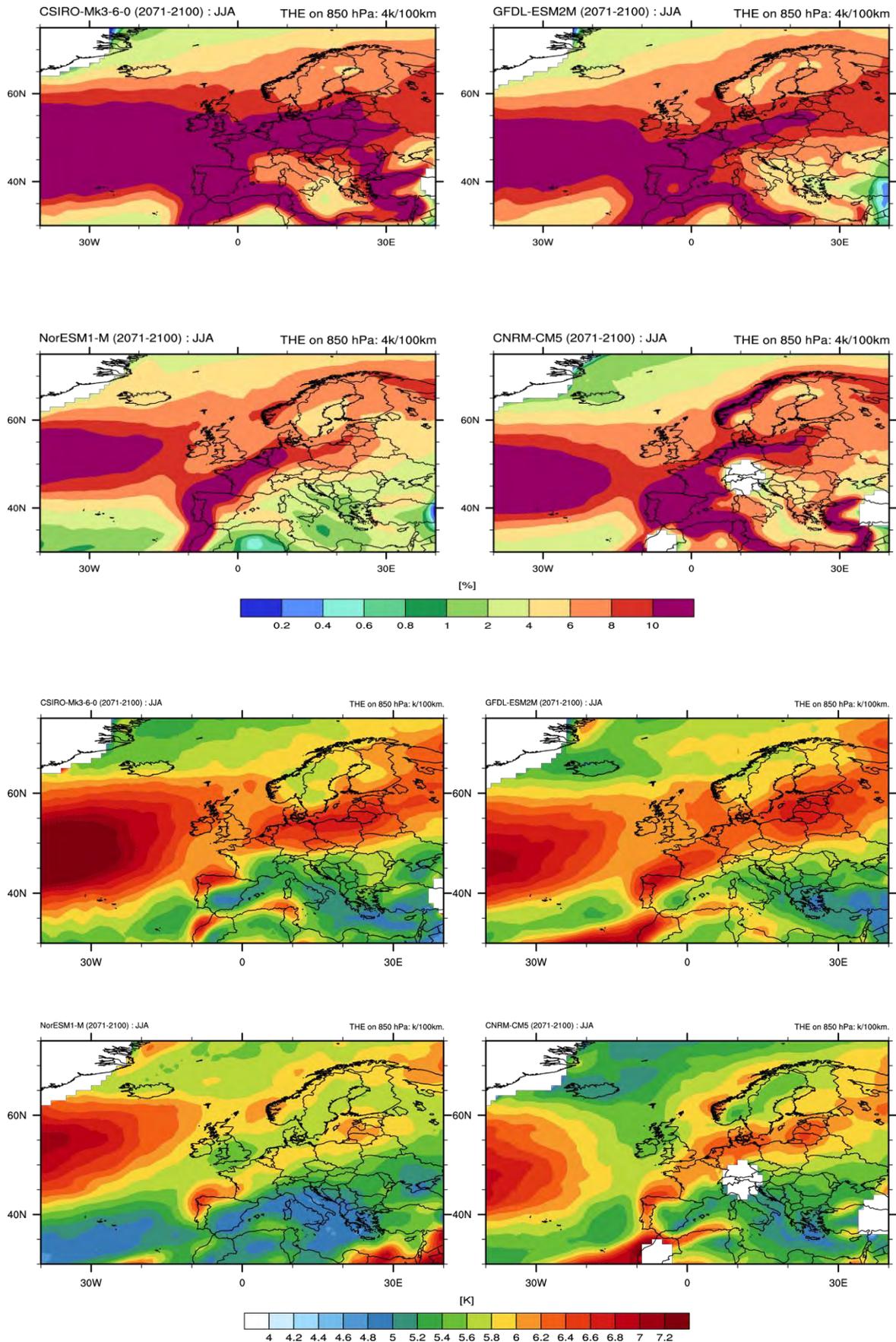


MAM

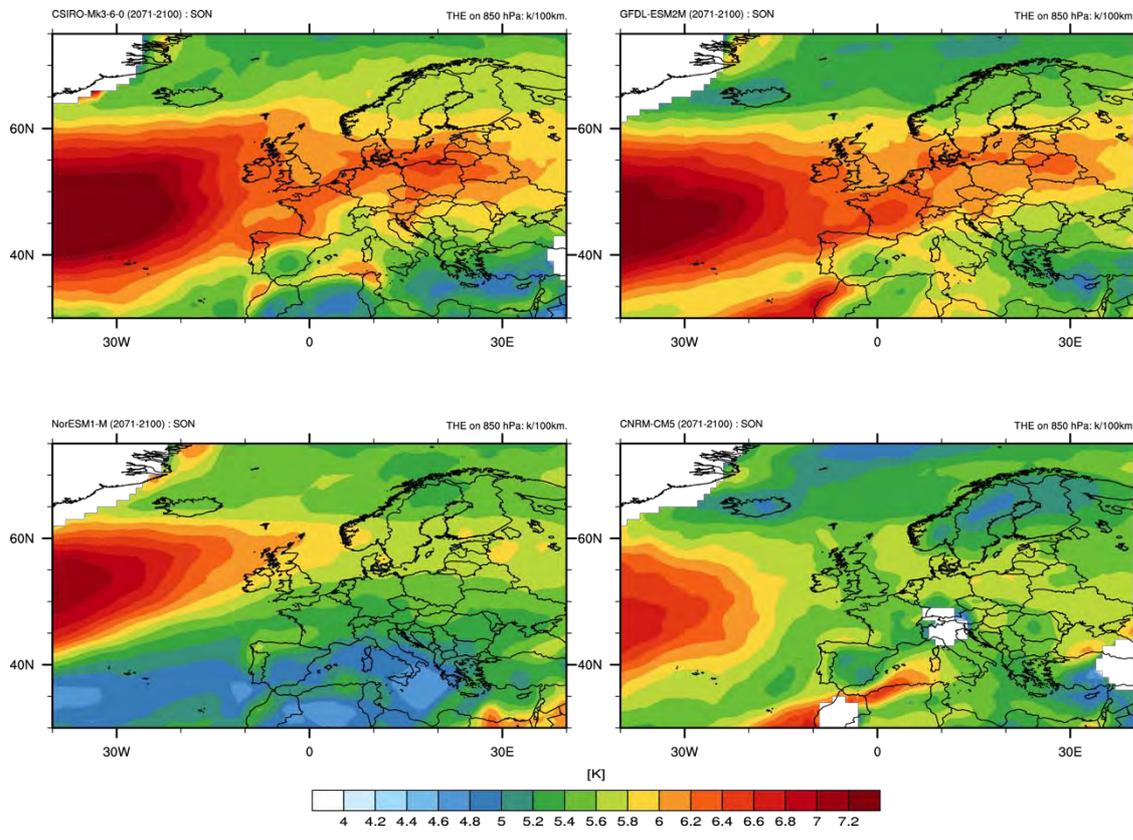
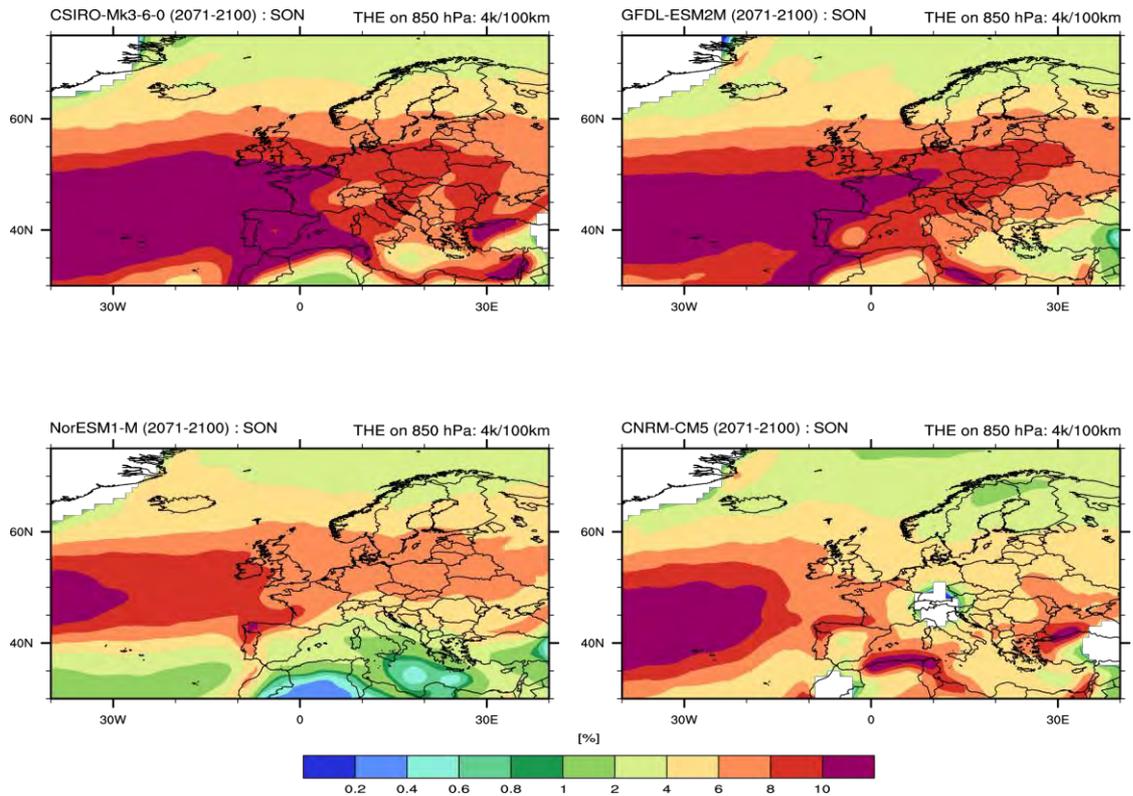


Anhang A - Frontenhäufigkeit und -intensität

JJA



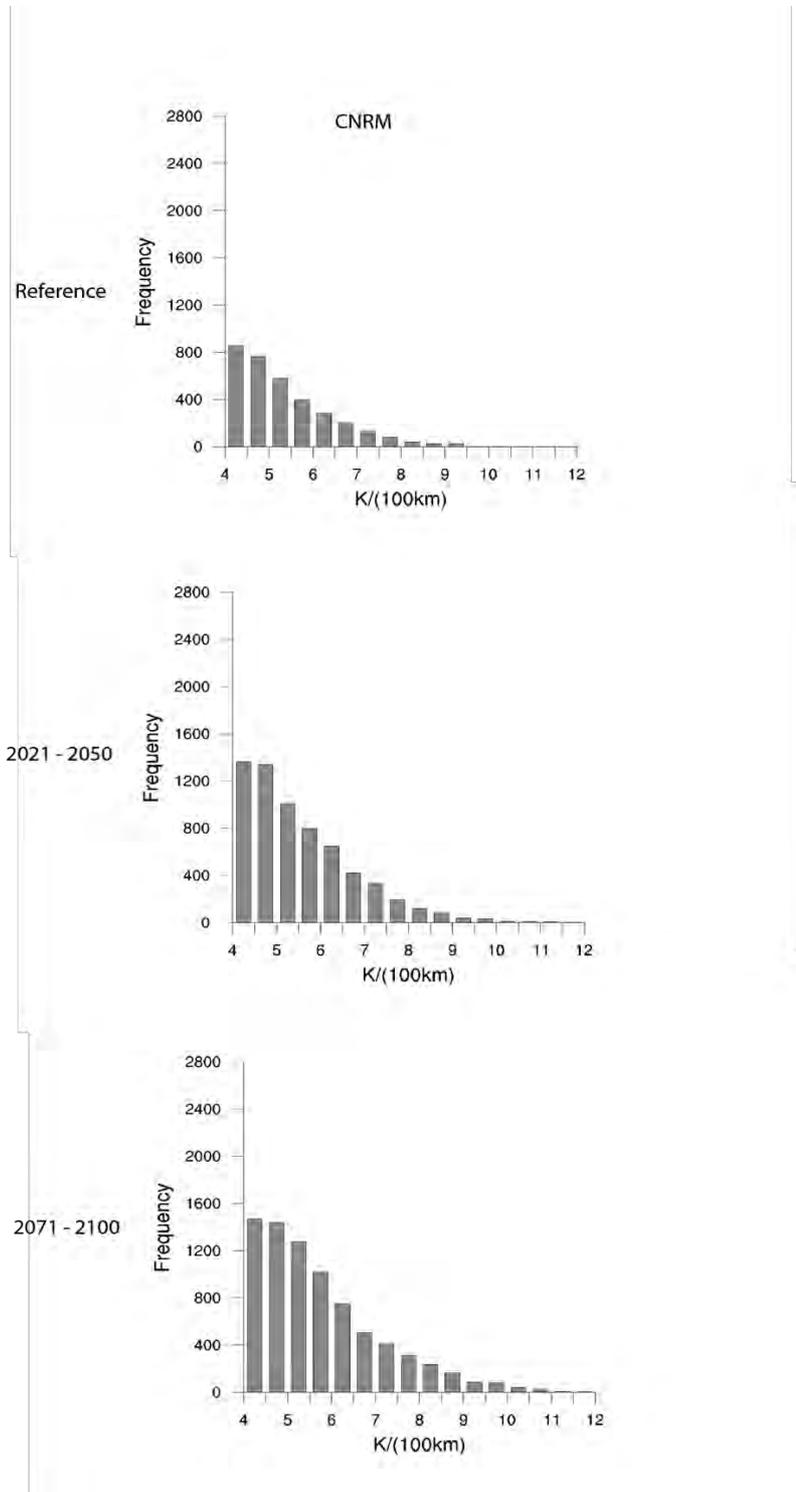
SON



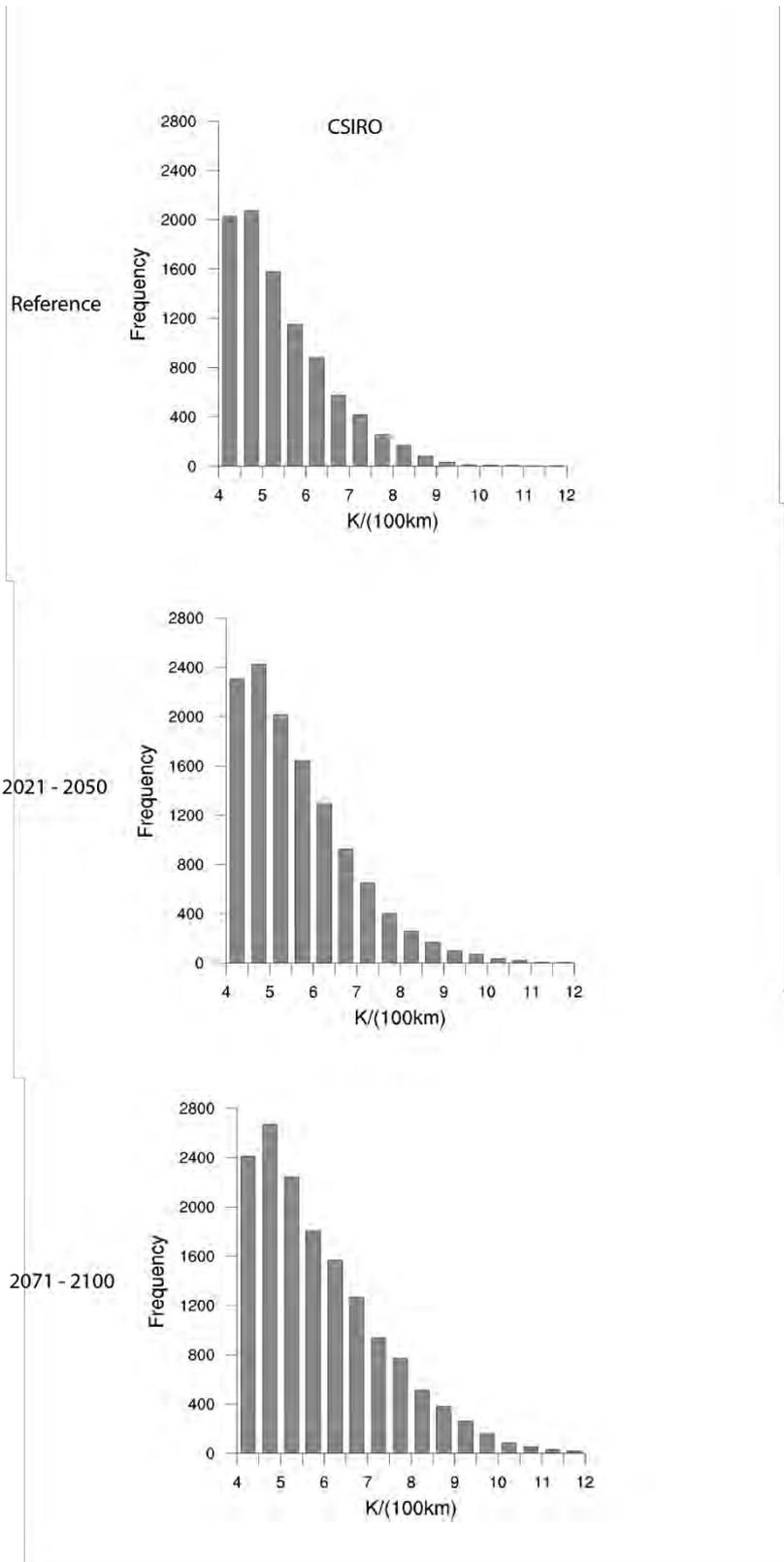
Anhang B – Histogramme der Frontenstärke

Die im Hauptteil abgebildeten Histogramme der Verteilung der Frontenstärke sind hier nach Modell sortiert noch einmal in höherer Auflösung dargestellt.

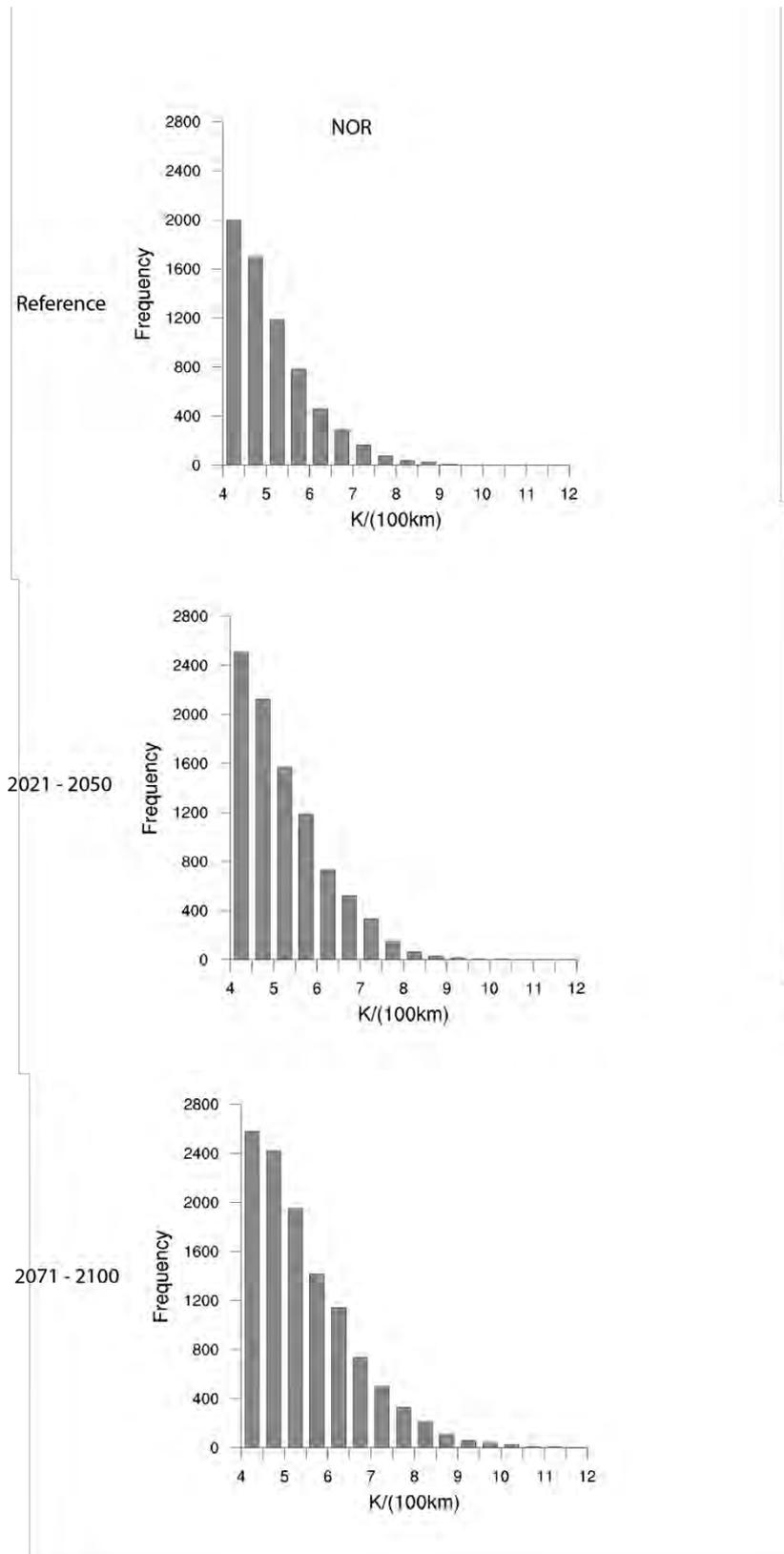
CNRM



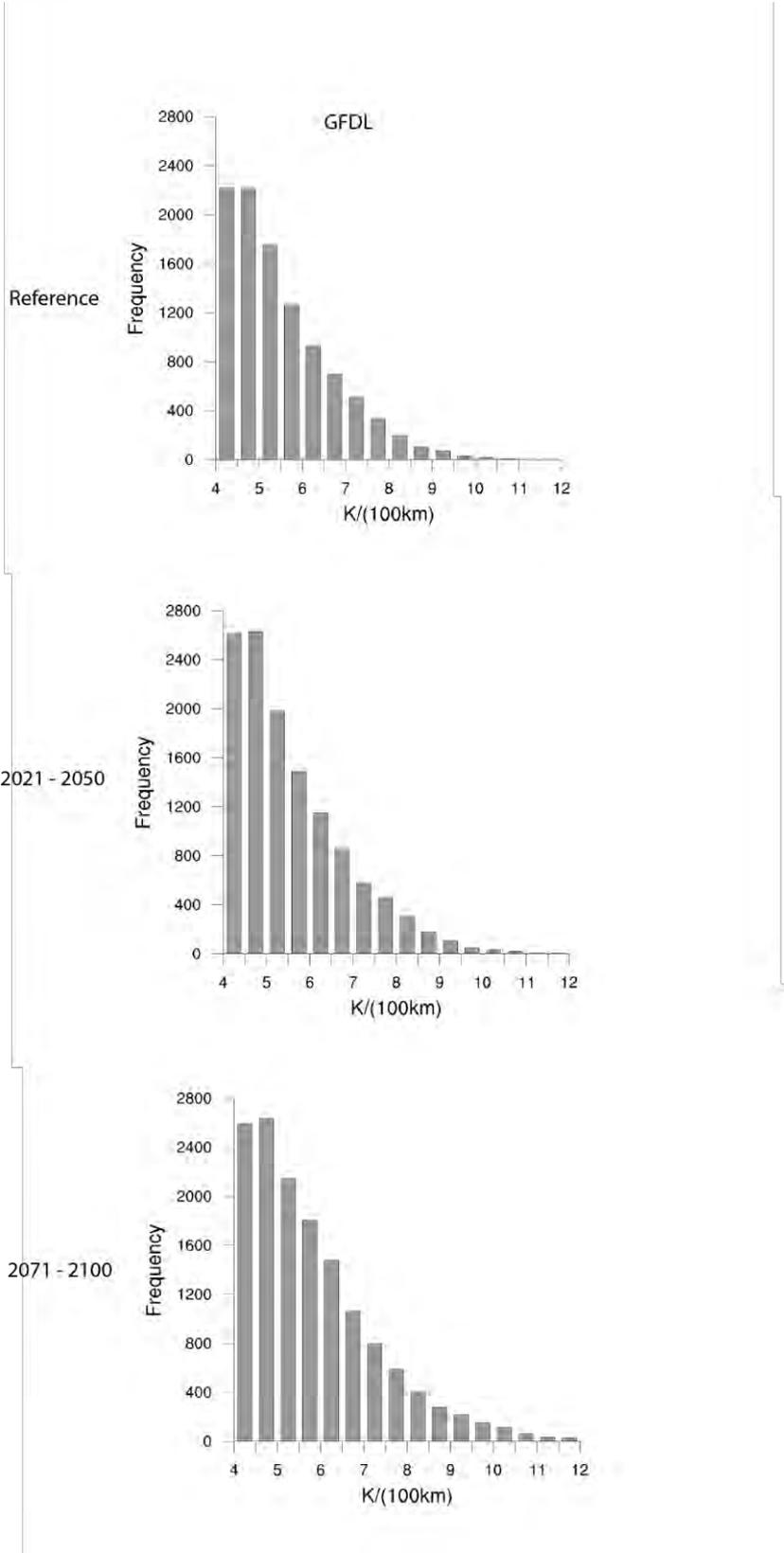
CSIRO



NOR



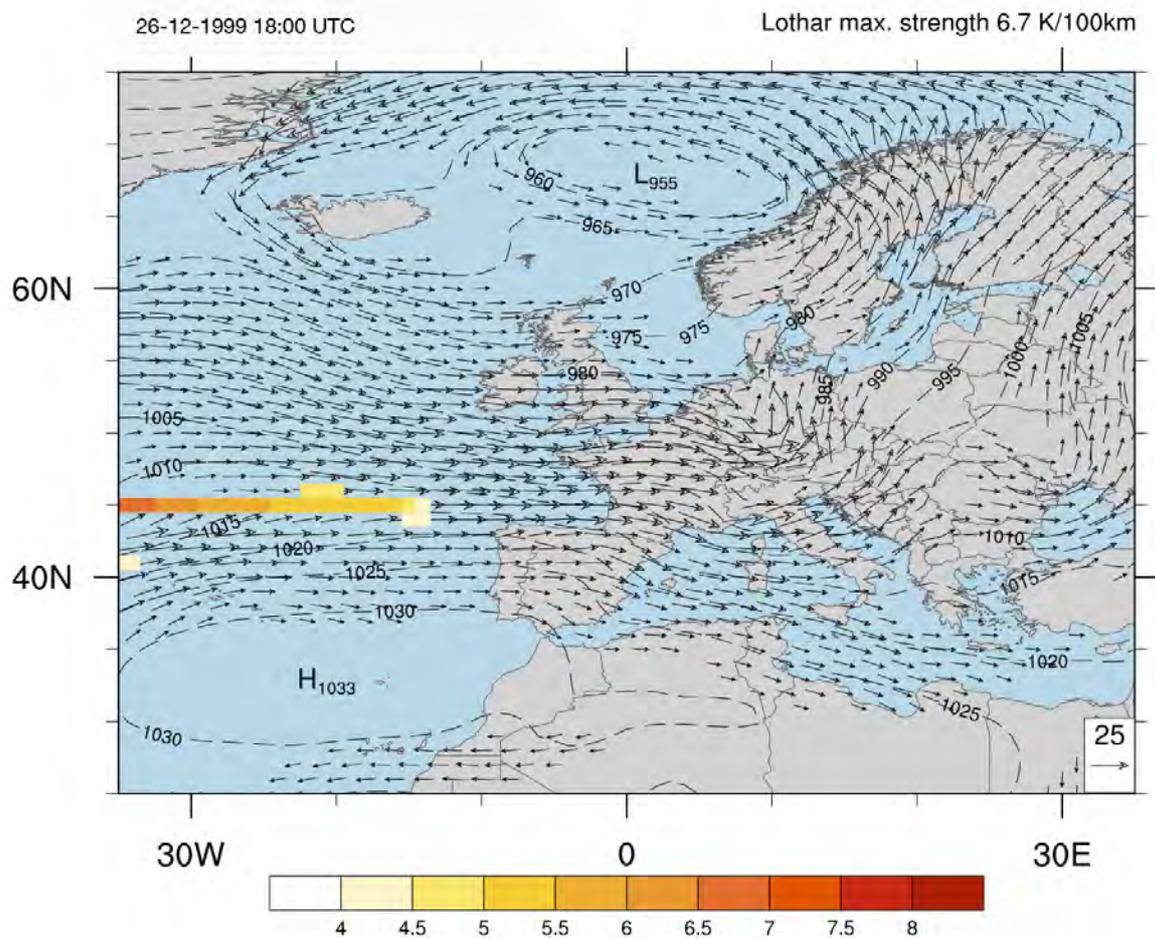
GFDL



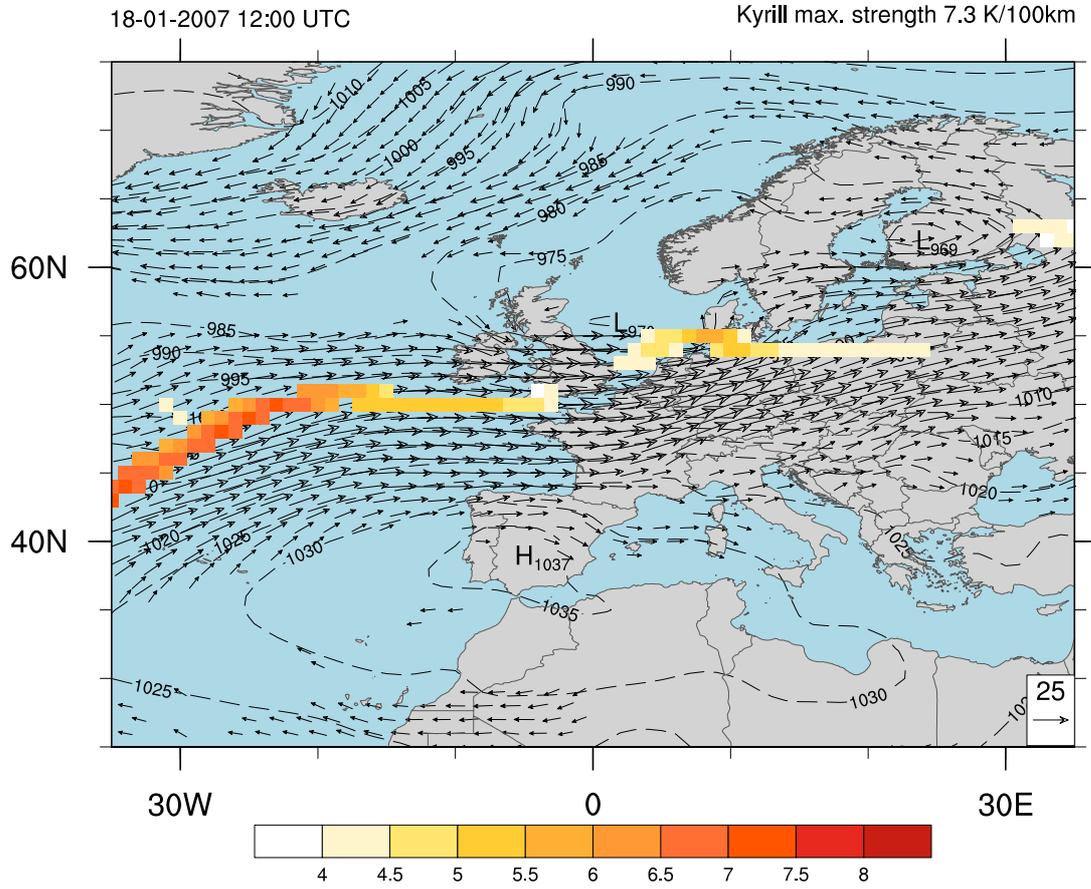
Anhang C - Bekannte Stürme

Die Abbildungen dreier bekannter Winterstürme (Lothar, Wiebke und Kyrill) sind hier noch einmal in höherer Auflösung dargestellt.

Lothar

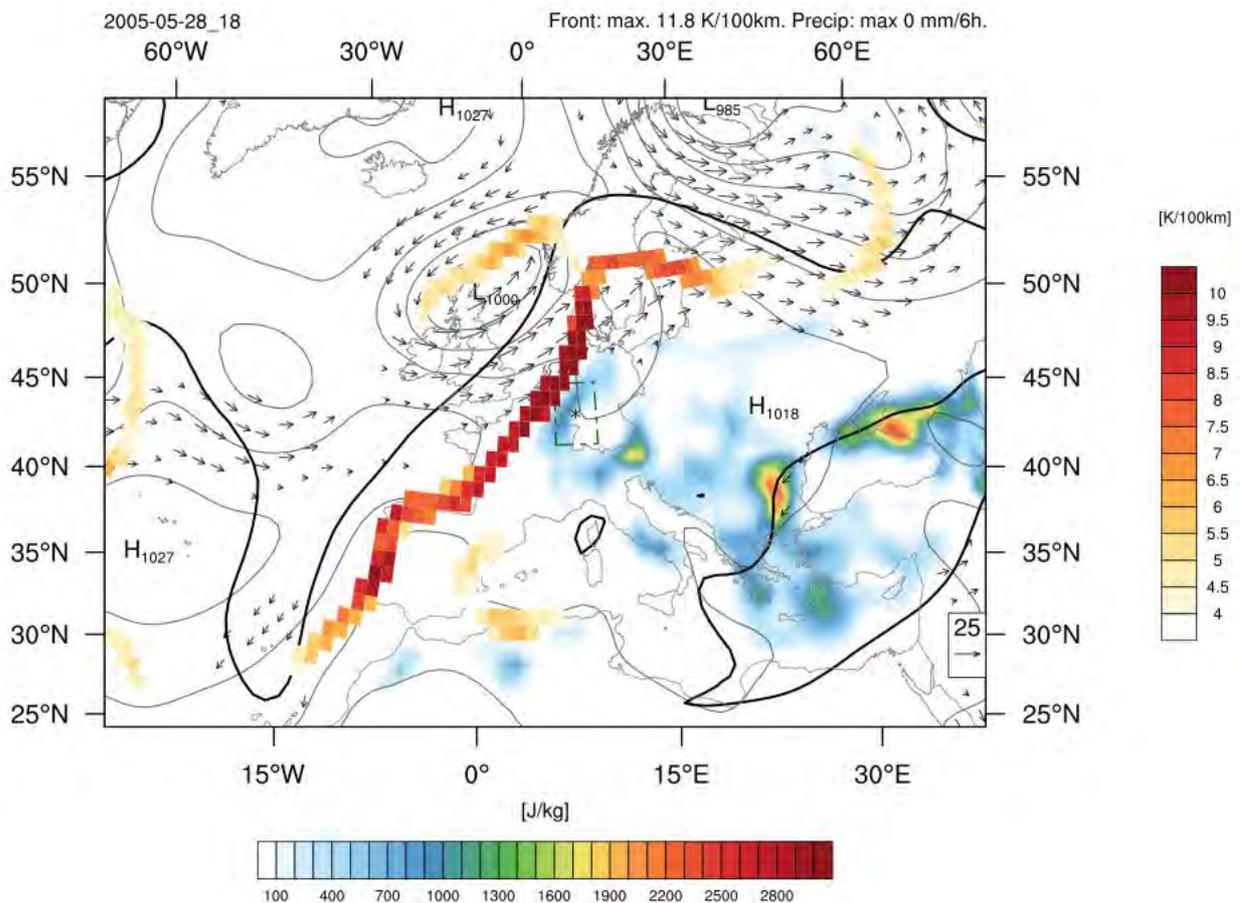


Kyrill



Anhang D – Starke Fronten (1979 – 2005) über Rheinland-Pfalz

Die Abbildungen dreier markanter Frontereignisse aus dem Referenzzeitraum sind hier noch einmal in höherer Auflösung dargestellt.



Zu sehen sind: Bodendruck auf Meereshöhe (graue Linien), Windvektoren auf 850 hPa, Tropopause (dicke schwarze Linien), CAPE (farbig, J/kg), Front (rötlich eingefärbt mit Stärke in K/100 km). Rechts oberhalb der Abbildung: 6-stündiger Niederschlag in Rheinland-Pfalz Region (grünlich-gestrichelte Box), sowie die max. Frontenstärke.

