

TEXTE

84/2016

KLENOS - Einfluss einer Änderung der Energiepolitik und des Klimas auf die Luftqualität sowie Konsequenzen für die Einhaltung von Immissionsgrenzwerten und Prüfung weitergehender emissionsmindernder Maßnahmen

Endbericht

TEXTE 84/2016

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3712 43 243
UBA-FB 002395

KLENOS - Einfluss einer Änderung der Energiepolitik und des Klimas auf die Luftqualität sowie Konsequenzen für die Einhaltung von Immissionsgrenzwerten und Prüfung weitergehender emissionsmindernder Maßnahmen

von

Dirk Pavlik, Majana Heidenreich
Technische Universität Dresden
Institut für Hydrologie und Meteorologie
Professur für Meteorologie

Ralf Wolke
Detlef Hinneburg
Leibniz-Institut für Troposphärenforschung, Leipzig

Rainer Stern
Freie Universität Berlin
Institut für Meteorologie, Troposphärische Umweltforschung

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Technische Universität Dresden
Fakultät Umweltwissenschaften
Professur für Meteorologie
Pienner Straße 23
01737 Tharandt

Abschlussdatum:

März 2016

Redaktion:

II 4.2 Beurteilung der Luftqualität
Susan Kessinger

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Dezember 2016

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Forschungskennzahl 3712 43 243 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Hohe Konzentrationen von Luftschadstoffen, insbesondere von Feinstaub (PM₁₀) und bodennahem Ozon, gefährden die Gesundheit und können im Falle von Ozon auch die Vegetation schädigen. Als Mitglied der Europäischen Union ist die Bundesrepublik Deutschland verpflichtet die Einhaltung der Immissionsgrenzwerte für Luftschadstoffe entsprechend der Richtlinie über die Luftqualität und saubere Luft für Europa 2008/50/EG und der 39. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes, Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen (BImSchV), sicherzustellen. Damit frühzeitig mit emissionsmindernden Maßnahmen steuernd eingegriffen werden kann, ist eine Abschätzung der zukünftigen Luftqualität erforderlich. Einen wesentlichen Einfluss auf die Luftqualität und die Einhaltung geltender Immissionsgrenzwerte haben einerseits energiepolitische Entscheidungen, die sich auf die Emissionen konventioneller Schadstoffe auswirken, und andererseits die mit dem Klimawandel verbundenen Änderungen meteorologischer Größen. Die Bedeutung beider Faktoren auf die Entwicklung von Immissionen, sowie ihre gekoppelte Wirkung können nur mit Hilfe von Klimawandel- und Emissionsszenarien analysiert werden. Daher ist ein Ziel des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens **KLENOS (KLimaENERgieOzonStaub)**, die Wirkung der Einflussgrößen Klimawandel und Energiepolitik auf die zukünftige Luftqualität und die Einhaltung der Grenzwerte in Form eines Szenarioansatzes zu quantifizieren. Dies beinhaltet die Durchführung von regionalen Klimasimulationen und einer anschließenden Chemie-Transport-Modellierung. Ein weiteres Ziel ist die Identifikation von typischen Wetterlagen, die in Zusammenhang mit der Überschreitung der zulässigen Grenz- und Zielwerte für PM₁₀ und Ozon stehen. Mit Hilfe langer Klimasimulationen lassen sich Auftretenshäufigkeiten dieser typischen Wetterlagen in der Zukunft abschätzen und damit auch Tendenzen des zukünftigen Auftretens von Überschreitungstagen für PM₁₀ und Ozon.

Abstract

High concentrations of air pollutants, especially particulate Matter (PM₁₀) and ground-level ozone, are known for their negative impacts on human health and in the case of ozone even on vegetation. As a member of the European Union, the Federal Republic of Germany is responsible for ensuring the compliance of immission limits according to the Directive on Ambient Air Quality and Clean Air for Europe (2008/50/EG) and the 39th Ordinance for Implementing the Federal Immission Control Act. To intervene at an early stage with emission-reducing measures an estimation of future air quality is required. Changes of meteorological parameters associated with climate change and political decisions that affect the emissions of conventional pollutants have a considerable impact on future air quality. Thus, both factors directly affect the compliance of applicable immission limit values in future. The importance of these factors on the development of air pollution, as well as their coupled impacts, can only be investigated with an analysis of appropriate climate change and emission scenarios. The aim of this research and development project KLENOS is to quantify the impacts of climate change and energy policy change on air quality with a scenario approach. It involves the implementation of regional climate and subsequent chemical transport simulations. A further objective is the identification of typical weather types, which are related to the exceedance of limit values for PM₁₀ and ozone. Based on long climate simulations future frequency of these typical weather types and therefore future tendencies of the exceedance of limit values for PM₁₀ and ozone can be estimated.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis.....	29
Abkürzungsverzeichnis.....	33
Zusammenfassung	35
1 Einleitung.....	58
2 Forschungsansatz	60
2.1 Modul 1	60
2.2 Modul 2	60
2.2.1 Aufgabe 2.1	60
2.2.2 Aufgabe 2.2	62
2.2.3 Aufgabe 2.3	62
3 Regionale Klimamodellierung	63
3.1 Modellkonfiguration	63
3.2 Modellansatz	65
3.3 Evaluierung der Klimamodellergebnisse.....	66
3.3.1 Vergleich des 1. Nestings (Europa) mit Beobachtungsdaten.....	67
3.3.1.1 Temperatur	67
3.3.1.2 Niederschlag	69
3.3.2 Vergleich des 2. Nestings (Deutschland) mit Beobachtungsdaten	71
3.3.2.1 Temperatur	72
3.3.2.2 Niederschlag	75
3.3.2.3 Wind	77
3.4 Klimatische Änderungen bis 2050	79
3.4.1 Erfassung klimatischer Änderungen.....	79
3.4.2 Temperatur	79
3.4.2.1 Mittlere langjährige jährliche und monatliche Klimaänderungen	79
3.4.2.2 Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte	80
3.4.2.3 Langjährige mittlere Tagesgänge	81
3.4.2.4 Häufigkeitsverteilungen	82
3.4.3 Niederschlag.....	82
3.4.3.1 Mittlere langjährige jährliche und monatliche Klimaänderungen	82
3.4.3.2 Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte	83
3.4.3.3 Langjährige mittlere Tagesgänge	84

3.4.3.4	Häufigkeitsverteilungen	84
3.4.4	Wind.....	85
3.4.4.1	Mittlere langjährige jährliche und monatliche Klimaänderungen	85
3.4.4.2	Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte	86
3.4.4.3	Langjährige mittlere Tagesgänge	87
3.4.4.4	Häufigkeitsverteilungen	87
3.4.5	Bewölkung.....	88
3.4.5.1	Mittlere langjährige jährliche und monatliche Klimaänderungen	88
3.4.5.2	Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte	89
3.4.5.3	Langjährige mittlere Tagesgänge	90
3.4.5.4	Häufigkeitsverteilungen	90
3.4.6	Höhe der atmosphärischen Grenzschicht	91
3.4.6.1	Mittlere langjährige jährliche und monatliche Klimaänderungen	91
3.4.6.2	Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte	92
3.4.6.3	Langjährige mittlere Tagesgänge	93
3.4.6.4	Häufigkeitsverteilungen	93
3.5	Diskussion der Ergebnisse der regionalen Klimamodellierung	94
3.5.1	Modellevaluierung.....	94
3.5.2	Klimawandel	96
4	Chemie-Transport-Modellierung mit RCG	97
4.1	Überblick.....	97
4.2	Modellbeschreibung und Setup	99
4.2.1	Modellgebiete	99
4.2.2	Emissionen	101
4.3	Testen des Gesamtsystems am Jahre 2005 mit TRAMPER-Daten 2005, Re-Analyse-Daten, CCLM-Daten 2005, Vergleich mit Beobachtungen in Deutschland.....	102
4.3.1	Europa: NO ₂ und PM.....	102
4.3.2	Europa: Ozon	108
4.3.3	Deutschland: NO ₂ und PM ₁₀	112
4.3.4	Deutschland: Ozon	117
4.3.5	Vergleich mit Beobachtungen.....	129
4.4	Evaluierungs- und Kontrolllauf 30 Jahre: CCLM_ERA und CCLM_EHIST	137
4.4.1	Überblick	137
4.4.2	Deutschland: NO ₂ und PM ₁₀	137
4.4.3	Deutschland: Ozon	142

4.4.3.1	30-jährige Mittelwerte	142
4.4.3.2	Gleitende 5-jährige Mittelwerte	155
4.5	Die Luftqualität für den Zeitraum 2021 bis 2050	158
4.5.1	Klimasignal.....	158
4.5.1.1	Überblick	158
4.5.1.2	Deutschland: NO ₂ und PM10	158
4.5.1.3	Deutschland: Ozon	161
4.5.2	Kombiniertes Klima- und Emissionssignal	178
4.5.2.1	Emissionsänderung 2005 bis 2030	178
4.5.2.2	Deutschland: NO ₂ und PM10	178
4.5.2.3	Deutschland: Ozon	179
4.6	Diskussion der Ergebnisse der Chemie-Transport-Modellierung.....	187
5	Analyse des Zusammenhangs zwischen Wetterlagen und der Überschreitung von Grenz- und Zielwerten für die Luftschadstoffe PM10 sowie Ozon	196
5.1	Einleitung	196
5.2	Ziel und Methodik.....	196
5.3	Datengrundlage	198
5.3.1	Daten zur Luftqualität	198
5.3.2	Objektive Wetterlagenklassifikation des DWD.....	199
5.4	Ergebnisse.....	200
5.4.1	Überschreitungen von Feinstaub und Ozon.....	200
5.4.2	Wetterlagen an Tagen mit Grenzwertüberschreitungen.....	203
5.4.3	Änderung der Überschreitungswetterlagen bis zum Ende des Jahrhunderts	211
5.5	Diskussion der Ergebnisse	213
6	Zeitlich hochaufgelöste Simulationen mit dem Modellsystem COSMO-MUSCAT.....	214
6.1	Ziel und Methodik der Untersuchungen.....	214
6.2	Modellbeschreibung und Setup	215
6.2.1	Das Modellsystem COSMO-MUSCAT.....	215
6.2.2	Beschreibung der durchgeführten Modellsimulationen	217
6.2.2.1	Modellgebiete und Rechengitter	217
6.2.2.2	Simulationsregime	218
6.2.2.3	Auflistung der durchgeführten COSMO-MUSCAT-Simulationen	220
6.3	Vergleich mit RCG-CCLM-Ergebnissen und Messungen für das Jahr 2005	220
6.3.1	Meteorologie: Temperatur und Niederschlag	221
6.3.1.1	Vergleich der Europa-Simulationen	221

6.3.1.2	Vergleich zwischen den Deutschland-Simulationen und mit Referenzdatensätzen	223
6.3.1.3	Vergleich der Modellergebnisse mit Messdaten für die Jahressimulation 2005	225
6.3.2	PM, NO ₂ und Ozon	228
6.3.2.1	Vergleich der Europa-Simulationen	228
6.3.2.2	Vergleich der Deutschland-Simulationen	229
6.3.2.3	Vergleich mit Messungen	233
6.4	Untersuchung des Einflusses der meteorologischen Bedingungen auf hohe Schadstoffkonzentrationen	240
6.4.1	PM10-Episode: 03. – 12. Februar 2005	240
6.4.1.1	Meteorologische Situation	240
6.4.1.2	Entwicklung der PM-Konzentration	241
6.4.1.3	Vergleich mit Messungen	243
6.4.1.4	Diskussion möglicher Ursachen für PM10-Hotspots und der Wechselwirkungen	245
6.4.2	Ozon-Episode: 24. – 31. Mai 2005	249
6.4.2.1	Meteorologische Situation	249
6.4.2.2	Vergleich mit Messungen	251
6.4.2.3	Diskussion möglicher Ursachen für hohe Ozon-Konzentrationen	252
7	„Lessons Learned“ und Empfehlungen für Folgeuntersuchungen	255
8	Quellenverzeichnis.....	258
9	Anhang	262
9.1	Konventionen zur Darstellung von Box-Whisker-Plots im Kapitel 3	262
9.2	RCG Modellierung.....	262
9.2.1	Definition der Bevölkerungsklassen	262
9.3	Anpassung des RCG-Modells an die Fragestellung	263
9.3.1	Interne Berechnung der Grenzschichtvariablen.....	263
9.3.2	Erweiterung der trockenen Depositionsansätze für Ozon	265
9.3.3	Adaption der RCG-Abläufe an langjährige Berechnungen	267
9.3.3.1	Zusammenfassung der Aerosol-Spezies zu PM10 und PM2.5 während des Modelllaufes	267
9.3.3.2	Optimierung der Datenübergabe zwischen Europa-Lauf und Deutschland-Lauf	268
9.3.3.3	Festlegung der hemisphärischen Hintergrundkonzentrationen (Randbedingungen Europa-Lauf)	268
9.4	Für die Ausbreitungsrechnung verwendete Emissionen in Deutschland: Referenzjahre 2005 und 2030	269

9.5	Schnittstelle zwischen Regionalem Klimamodell CCLM und Chemie-Transport-Modell RCG	272
9.5.1	Bodenfeuchte.....	273
9.5.2	Luftdichte	274
9.5.3	Luftdruck auf z-levels.....	274
9.5.4	Virtuelle Temperatur	274
9.5.5	Gaskonstante feuchter Luft	274
9.5.6	Sättigungsdampfdruck	275
9.5.7	Spezifische Luftfeuchte.....	275
9.5.8	Lage der Windvariablen im Modellgitter	275
9.5.9	Windgeschwindigkeit.....	276
9.5.10	Remapping rotierter Felder auf ein unrotiertes, geographisches Gitter.....	276
9.5.11	Umwandlung in das binäre GrADS-Format	278
9.6	PM10- und Ozon Messstationen in den Bundesländern und Deutschland	281
9.7	Objektive Wetterlagenklassen des DWD	282
9.8	Jahresgang der PM10-Grenzwertüberschreitungen in Abhängigkeit des Stationsregimes	283
9.9	Jahresgang der Ozon-Zielwertüberschreitungen in Abhängigkeit des Stationsregimes	284
9.10	Jahresgang der PM10-Grenzwertüberschreitungen pro Bundesland	285
9.11	Jahresgang der Ozon-Zielwertüberschreitungen pro Bundesland	286
9.12	Auftretenshäufigkeit von Wetterlagenindizes an Tagen mit Überschreitung des Grenzwertes für Tagesmittelwerte der PM10-Konzentration (2000-2012, DJFM, Deutschland)	287
9.13	Auftretenshäufigkeit von Wetterlagenindizes an Tagen mit Überschreitung des Grenzwertes für das Maximum der 8h-Mittelwerte der O3-konzentration (1990-2012, MJJA, Deutschland).....	288

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Benennung der Modellläufe und simulierte Zeiträume der Regionalen Klimamodellierung.....	61
Abbildung 2:	Schematische Darstellung der Modellkette	62
Abbildung 3:	a) Erdkugel mit unrotiertem Längen-Breiten-Gradnetz, b) Erdkugel mit rotiertem Längen-Breiten-Gradnetz; der schwarze Punkt markiert die Kreuzung von Äquator und Nullmeridian.	64
Abbildung 4:	Lage und Ausdehnung der Modellgitter für die Simulationen des Regionalen Klimamodells in rotierten Koordinaten. Die grauen Linien markieren die sogenannte „sponge zone“ und die weißen Linien die jeweils verbleibende Gitterausdehnung.....	64
Abbildung 5:	Differenz der langjährigen Mitteltemperatur 1976–2005, a) E-OBS - EU_CCLM_ERA, b) E-OBS – EU_CCLM_EHIST	68
Abbildung 6:	Differenz der langjährigen monatlichen Mitteltemperatur 1976–2005, a) E-OBS - EU_CCLM_ERA, b) E-OBS - EU_CCLM_EHIST	69
Abbildung 7:	Differenz der langjährigen mittleren Niederschlagssummen 1976–2005, a) E-OBS - EU_CCLM_ERA, b) E-OBS - EU_CCLM_EHIST	70
Abbildung 8:	Differenz der langjährigen mittleren monatlichen Niederschlagssummen 1976–2005, a) E-OBS - EU_CCLM_ERA, b) E-OBS – EU_CCLM_EHIST	71
Abbildung 9:	Lage der verwendeten Klimastationen für die Bewertung der mittleren Windgeschwindigkeit (links), schematische Darstellung der verwendeten Gitterpunkte zur Interpolation der Modellwerte (rechts).....	72
Abbildung 10:	Differenz der langjährigen Mitteltemperatur 1976–2005, a) HYRAS - DE_CCLM_ERA, b) HYRAS - DE_CCLM_EHIST	73
Abbildung 11:	Differenz der langjährigen monatlichen Mitteltemperatur 1976–2005, a) HYRAS - DE_CCLM_ERA, b) HYRAS - DE_CCLM_EHIST ...	74
Abbildung 12:	Differenz der langjährigen mittleren Niederschlagssummen 1976–2005, a) REGNIE - DE_CCLM_ERA, b) REGNIE - DE_CCLM_EHIST.....	75
Abbildung 13:	Differenz der langjährigen mittleren monatlichen Niederschlagssummen 1976–2005, a) REGNIE - DE_CCLM_ERA, b) REGNIE - DE_CCLM_EHIST.....	76
Abbildung 14:	Änderung der langjährigen mittleren Temperatur, 2021-2050; links jährliche Änderung, rechts monatliche Änderung.....	80
Abbildung 15:	Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte der Temperatur, a) DE_CCLM_EHIST 1976–2005, b) DE_CCLM_RCP85 2021–2050. Die durchgezogenen Linien zeigen den jeweiligen 30-jährigen Mittelwert.....	81
Abbildung 16:	30-jähriger mittlerer Tagesgang der Temperatur von DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85	81

Abbildung 17:	Häufigkeitsverteilung der mittleren täglichen Temperaturen (Flächenmittelwerte), DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85 ...	82
Abbildung 18:	Änderung der langjährigen mittleren Niederschlagssumme, 2021–2050; links jährliche Änderung, rechts monatliche Änderung	83
Abbildung 19:	Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte der jährlichen Niederschlagssummen, a) DE_CCLM_EHIST 1976–2005, b) DE_CCLM_RCP85 2021–2050. Die durchgezogenen Linien zeigen den jeweiligen 30-jährigen Mittelwert.	84
Abbildung 20:	30-jähriger mittlerer Tagesgang des Niederschlags von DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85	84
Abbildung 21:	Häufigkeitsverteilung der mittleren täglichen Niederschlagssumme (Flächenmittelwerte), DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85.....	85
Abbildung 22:	Änderung der langjährigen mittleren Windgeschwindigkeit, 2021-2050; links jährliche Änderung, rechts monatliche Änderung.	86
Abbildung 23:	Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte der Windgeschwindigkeit, a) DE_CCLM_EHIST 1976–2005, b) DE_CCLM_RCP85 2021–2050. Die durchgezogenen Linien zeigen den jeweiligen 30-jährigen Mittelwert.....	86
Abbildung 24:	30-jähriger mittlerer Tagesgang der Windgeschwindigkeit von DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85	87
Abbildung 25:	Häufigkeitsverteilung der mittleren täglichen Windgeschwindigkeiten (Flächenmittelwerte), DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85.	88
Abbildung 26:	Änderung des langjährigen mittleren Bedeckungsgrades der Bewölkung, 2021-2050; links jährliche Änderung, rechts monatliche Änderung.	89
Abbildung 27:	Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte des Wolkenbedeckungsgrades, a) DE_CCLM_EHIST 1976–2005, b) DE_CCLM_RCP85 2021–2050. Die durchgezogenen Linien zeigen den jeweiligen 30-jährigen Mittelwert.....	89
Abbildung 28:	30-jähriger mittlerer Tagesgang des Wolkenbedeckungsgrades von DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85.	90
Abbildung 29:	Häufigkeitsverteilung des mittleren täglichen Bedeckungsgrades (Flächenmittelwerte), DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85. ..	91
Abbildung 30:	Änderung der langjährigen mittleren Höhe der atmosphärischen Grenzschicht, 2021-2050; links jährliche Änderung, rechts monatliche Änderung.	92
Abbildung 31:	Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte der Höhe der Atmosphärischen Grenzschicht, a) DE_CCLM_EHIST 1976–2005, b) DE_CCLM_RCP85 2021–2050. Die durchgezogenen Linien zeigen den jeweiligen 30-jährigen Mittelwert.	93

Abbildung 32:	30-jähriger mittlerer Tagesgang der Höhe der Atmosphärischen Grenzschicht von DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85	93
Abbildung 33:	Häufigkeitsverteilung der mittleren täglichen Höhe der Atmosphärischen Grenzschicht (Flächenmittelwerte), DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85	94
Abbildung 34:	Tendenzen der klimatischen Änderungen im Vergleich 1976–2005 und 2021–2050	97
Abbildung 35:	Modellgebiet der Europaskala. Das Gebiet reicht von 9° West bis 25° Ost und von 35.75° N bis 64° Nord. Die Gitterauflösung beträgt 0.5° Länge und 0.25° Breite. Gezeigt sind die NO _x -Emissionen des Jahres 2005 in t/J, die für die Berechnung des 30-jährigen Vergangenheitslaufes verwendet wurden. Die Emissionen entsprechen denen des Aktuellen Politik Szenario (APS), siehe Kapitel 4.2.2.	100
Abbildung 36:	Modellgebiet der Deutschlandskala. Das Gebiet reicht von 5.5° Ost bis 15.5° Ost und von 47.25° N bis 55° Nord. Die Gitterauflösung beträgt 0.125° Länge und 0.0625° Breite. Gezeigt sind die NO _x -Emissionen des Jahres 2005, die für die Berechnung des 30-jährigen Vergangenheitslaufes verwendet wurden. Die Emissionen entsprechen dem Aktuellen Politik Szenario (APS), siehe Kapitel 4.2.2.....	101
Abbildung 37:	NO ₂ -Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Europa-Lauf.	103
Abbildung 38:	PM10-Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Europa-Lauf.	104
Abbildung 39:	PM2.5-Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Europa-Lauf.	105
Abbildung 40:	Sulfat-Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Europa-Lauf.	106
Abbildung 41:	PMCO-Jahresmittelwerte (Grobstaub) 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Europa-Lauf.....	107
Abbildung 42:	Ozon-Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Europa-Lauf	109
Abbildung 43:	Ozon-AOT40 Vegetation 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Europa-Lauf.	110
Abbildung 44:	Mittelwert 2005 des Maximums der täglichen gleitenden 8-Stunden-Mittelwerte berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie	

	(oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Europa-Lauf.....	111
Abbildung 45:	NO ₂ -Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Deutschland-Lauf.	113
Abbildung 46:	Spannbreite der NO ₂ -Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (links), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Jahresmittelwert in Deutschland, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf.	114
Abbildung 47:	PM ₁₀ -Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Deutschland-Lauf.	115
Abbildung 48:	Spannbreite der PM ₁₀ -Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (links), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Jahresmittelwert in Deutschland, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf.	116
Abbildung 49:	Spannbreite der PM ₁₀ -Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie unterteilt nach 4 Bevölkerungsklassen (BVK). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Jahresmittelwert in Deutschland, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf.	116
Abbildung 50:	Spannbreite der PM ₁₀ -Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (links), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Jahresmittelwert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf, Bevölkerungsklasse 1 (ländliche Regionen, linke Grafik) und Bevölkerungsklasse 4 (Ballungsgebiete, rechte Grafik).....	117
Abbildung 51:	O ₃ -Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Deutschland-Lauf.	120
Abbildung 52:	Spannbreite der O ₃ -Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (links), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Jahresmittelwert in Deutschland, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf.	121

Abbildung 53:	Mittelwerte der Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel im Zeitraum April bis September 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Deutschland-Lauf.....	122
Abbildung 54:	Spannbreite der Mittel des Maximums der täglichen gleitenden Ozon 8-Std.-Mittel im Zeitraum April bis September 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (links), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Mittelwert in Deutschland, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf.	123
Abbildung 55:	Auftrittshäufigkeit der Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Stundenmittelwerte im Zeitraum April bis September 2005 in Deutschland.	123
Abbildung 56:	Häufigkeiten der Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Stundenmittelwerte im Zeitraum April bis September 2005 für die Bereiche > 120 µg/m ³ unterteilt in Norddeutschland (oben), Mitteldeutschland (Mitte) und Süddeutschland (unten).....	124
Abbildung 57:	O ₃ -AOT ₄₀ -Werte 2005 für Vegetation berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Deutschland-Lauf.....	125
Abbildung 58:	Spannbreite der O ₃ -AOT ₄₀ Werte 2005 für Vegetation berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (links), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete AOT ₄₀ -Wert in Deutschland, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf.	126
Abbildung 59:	O ₃ -SOMO ₃₅ -Werte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Deutschland-Lauf.....	127
Abbildung 60:	Spannbreite der O ₂ -SOMO ₃₅ Werte 2005 für Vegetation berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (links), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete SOMO ₃₅ Wert in Deutschland, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf.	128
Abbildung 61:	Anteile der Bewölkung (%) im Modellgebiet Deutschland unterteilt in 3 Klassen: geringe Bewölkung 0 bis 3/10, mittlere Bewölkung 4/10 bis 6/10, dichte Bewölkung: 7/10 bis 10/10. Auswertejahr: 2005...	128
Abbildung 62:	Anteile der Bodentemperaturen (%) über 20°C im Modellgebiet Deutschland in Klassen zu 1 °C. Tagesstunden im Sommer 2005. .	129

Abbildung 63:	Berechnete und beobachtete NO ₂ -Jahresmittelwerte 2005. Tramper-Meteorologie (oben), CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) und CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Ländliche und städtische Hintergrundstationen in Deutschland. Keine Bergstationen.	132
Abbildung 64:	Berechnete und beobachtete PM10-Jahresmittelwerte 2005. Tramper-Meteorologie (oben), CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) und CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Ländliche und städtische Hintergrundstationen in Deutschland. Keine Bergstationen.	133
Abbildung 65:	Berechnete und beobachtete Sulfat-Jahresmittelwerte 2005. Tramper-Meteorologie, CCLM_ERA-Meteorologie und CCLM_EHIST-Meteorologie. Hintergrundstationen in Deutschland.....	134
Abbildung 66:	Berechnete und beobachtete Ozon-Jahresmittelwerte 2005. Tramper-Meteorologie (oben), CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) und CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Ländliche und städtische Hintergrundstationen in Deutschland. Keine Bergstationen.	135
Abbildung 67:	Berechnete und beobachtete Ozon-AOT40-Werte für Vegetation 2005. Tramper-Meteorologie (oben), CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) und CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Ländliche und städtische Hintergrundstationen in Deutschland. Keine Bergstationen.	136
Abbildung 68:	Berechnete und beobachtete mittlere Ozon-Tagesgänge 2005 für Sommer (links) und Winter (rechts). Tramper-Meteorologie, CCLM_ERA-Meteorologie und CCLM_EHIST-Meteorologie. Ländliche Hintergrundstationen in Deutschland. Keine Bergstationen.	137
Abbildung 69:	30-jährige NO ₂ -Mittelwerte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie (links) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005.	138
Abbildung 70:	Spannbreite der 30-jährigen NO ₂ -Mittelwerte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie (links) und der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert in Deutschland, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Oben: Alle Zellen Deutschland, Mitte: Zellen mit BVK1, unten: Zellen mit BVK4....	139
Abbildung 71:	30-jährige PM10-Mittelwerte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie (links) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005.	140
Abbildung 72:	Spannbreite der 30-jährigen PM10-Mittelwerte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie (links) und der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert in Deutschland (obere Abbildung), das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante). Mitte: Auswertung für Bevölkerungsklasse, unten: Auswertung für Bevölkerungsklasse 4.	141

Abbildung 73:	Gleitende 5-Jahresmittelwerte über Deutschland von 1976 bis 2005. Links: PM10, rechts NO ₂ 142
Abbildung 74:	30-jährige O ₃ -Mittelwerte April-September 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie (links) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005. 146
Abbildung 75:	Absolute (links) und relative Abweichungen (rechts) der 30-jährigen O ₃ -Mittelwerte April-September 1976–2005 berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie von denjenigen berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie. Deutschland-Lauf. Emissionen 2005. 147
Abbildung 76:	Spannbreite der 30-jährigen O ₃ -Mittelwerte April bis September 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie und der CCLM_EHIST-Meteorologie. Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Oben: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). 147
Abbildung 77:	30-jährige Mittelwerte April-September 1976–2005 der Maxima der tägl. gleitenden Ozon 8-Std-Mittel berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie (links) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005. 148
Abbildung 78:	Absolute (links) und relative Abweichungen (rechts) der 30-jährigen Mittelwerte April-September 1976–2005 der max. tägl. Ozon 8-Std-Mittel berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie von denjenigen berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie. Deutschland-Lauf. Emissionen 2005. 148
Abbildung 79:	Spannbreite der 30-jährigen Mittelwerte April bis September 1976–2005 der max. tägl. Ozon 8-Std-Mittel berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie und der CCLM_EHIST-Meteorologie. Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). 149
Abbildung 80:	30-jährige Mittel der O ₃ -SOMO35-Werte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie (links) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005. 149
Abbildung 81:	Absolute (links) und relative Abweichungen (rechts) der 30-jährigen O ₃ -SOMO35-Werte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie von denjenigen berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie. Deutschland-Lauf. Emissionen 2005. 150
Abbildung 82:	Spannbreite der 30-jährigen O ₃ -SOMO35-Werte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie und der CCLM_EHIST-Meteorologie. Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median und das 3. Quartil

- (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf.
Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25°
Breite (N) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts:
Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). 150
- Abbildung 83: 30-jährige Mittel der O₃-AOT40-Werte für Vegetation 1976–2005
berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie (links) sowie der
CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen
2005. 151
- Abbildung 84: Absolute (links) und relative Abweichungen (rechts) der 30-jährigen
O₃-AOT40-Werte für Vegetation 1976–2005 berechnet mit der
CCLM_EHIST-Meteorologie von denjenigen berechnet mit der
CCLM_ERA-Meteorologie. Deutschland-Lauf. Emissionen 2005. 151
- Abbildung 85: Spannbreite der 30-jährigen O₃-AOT40-Werte für Vegetation 1976–
2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie und der
CCLM_EHIST-Meteorologie. Dargestellt sind der kleinste und der
größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median,
und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den
Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen
nördlich von 52.25° Breite (N) und alle Zellen südlich von 50.25°
Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4
(Ballungsräume). 152
- Abbildung 86: 30-jährige Mittel der Anzahl der Ozon Überschreitungstage (max.
tägl. 8-std-Mittel > 120 µg/m³) 1976–2005 berechnet mit der
CCLM_ERA-Meteorologie (links) sowie der CCLM_EHIST-
Meteorologie (rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005. 152
- Abbildung 87: Absolute (links) und relative Abweichungen (rechts) der 30-jährigen
Mittel der Anzahl der Ozon Überschreitungstage (max. tägl. 8-std-
Mittel > 120 µg/m³) 1976–2005 berechnet mit der CCLM_EHIST-
Meteorologie von denjenigen berechnet mit der CCLM_ERA-
Meteorologie. Deutschland-Lauf. Emissionen 2005. 153
- Abbildung 88: Spannbreite der 30-jährigen der Anzahl der Ozon Überschreitungstage
(max. tägl. 8-std-Mittel > 120 µg/m³) 1976–2005 berechnet mit der
CCLM_ERA-Meteorologie und der CCLM_EHIST-Meteorologie.
Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1.
Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil
(Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf.
Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25°
Breite (N) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts:
Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). 153
- Abbildung 89: Häufigkeit der maximalen täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel >
120 µg/m³ gemittelt über den Zeitraum April-September, 1976–2005.
Mittel über Norddeutschland (alle Zellen nördlich von 52.25° Breite),
Mitteldeutschland (Alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich
von 50.25° Breite) und Süddeutschland (Alle Zellen südlich von
50.25° Breite)..... 154
- Abbildung 90: Spannbreite der Anzahl der Ozon Überschreitungstage (max. tägl. 8-
std-Mittel > 120 µg/m³) 1976–2005 in Deutschland berechnet als

	gleitende 5-Jahresmittelwerte mit der CCLM_ERA-Meteorologie (links) und der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf.....	155
Abbildung 91:	Gleitende 5 Jahresmittelwerte gemittelt über Deutschland. 1976–2005. Links: Ozonmittelwert April bis September, rechts maximales tägliches gleitendes 8-Std.-Mittel.....	156
Abbildung 92:	Gleitende 5 Jahresmittelwerte gemittelt über Deutschland. 1976–2005. Oben: SOMO35, Mitte: AOT40 für Vegetation, unten: Summe der Überschreitungstage (Max. tägl. gleitender 8-Std-Mittel > 120 µg/m3).....	157
Abbildung 93:	30-jährige NO ₂ -Mittelwerte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie (links) sowie 30-jährige NO ₂ -Mittelwerte 2021–2050 berechnet mit der CCLM_RCP85-Meteorologie (rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.....	159
Abbildung 94:	Absolute (links) und relative Abweichung (rechts) der 30-jährigen NO ₂ -Mittelwerte 2021–2050 berechnet mit der CCLM_RCP85-Meteorologie von den 30-jährigen NO ₂ -Mittelwerte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie. Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.....	159
Abbildung 95:	30-jährige PM10-Mittelwerte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie (oben) sowie 30-jährige PM10-Mittelwerte 2021–2050 berechnet mit der CCLM_RCP85-Meteorologie (unten). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.....	160
Abbildung 96:	Absolute (links) und relative Abweichung (rechts) der 30-jährigen PM10-Mittelwerte 2021–2050 berechnet mit der CCLM_RCP85-Meteorologie von den 30-jährigen PM10-Mittelwerte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie. Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.....	160
Abbildung 97:	Spannbreite der 30-jährigen NO ₂ - (links) und PM10-Mittelwerte (rechts) berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie (1976–2005) und der CCLM_RCP85-Meteorologie (2021–2050). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert , das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). Alle Jahre mit Emissionen 2005.	161
Abbildung 98:	Gleitende 5-Jahresmittelwerte über Deutschland von 1976 bis 2005 (CCLM_EHIST) und von 2021 bis 2050 (CCLM_RCP85). Links: NO ₂ , rechts: PM10. Emission 2005 für alle Jahre. Die durchgezogenen Linien kennzeichnen das jeweilige 30-jährige Mittel.....	161
Abbildung 99:	30-jährige O ₃ -Mittelwerte April bis September 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie, links) sowie 30-jährige O ₃ -Mittelwerte April bis September 2021–2050 (CCLM_RCP85-	

	Meteorologie, rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.....	163
Abbildung 100:	Absolute (links) und relative Abweichung (rechts) der 30-jährigen O3-Mittelwerte April-September 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie) von den 30-jährigen O3-Mittelwerten April bis September 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.....	163
Abbildung 101:	Spannbreite der 30-jährigen Ozonmittel April bis September 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). Alle Jahre mit Emission 2005.	164
Abbildung 102:	30-jährige Mittelwerte der maximalen täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie, links), sowie die entsprechenden 30-jährigen-Mittelwerte 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie, rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.....	164
Abbildung 103:	Absolute (links) und relative Abweichung (rechts) der 30-jährigen Mittelwerte der maximalen täglichen 8-Std-Mittel 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie) von den entsprechenden 30-jährigen O3-Mittelwerten 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.....	165
Abbildung 104:	Spannbreite der 30-jährigen Mittel der max. tägl. 8-Std-Mittel, April bis September 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). Alle Jahre mit Emission 2005.	165
Abbildung 105:	30-jährige Mittelwerte der O ₃ SOMO35-Werte 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie, links) sowie die entsprechenden 30-jährigen-Mittelwerte 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie, rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.....	166
Abbildung 106:	Absolute (links) und relative Abweichung (rechts) der 30-jährigen Mittelwerte der O ₃ SOMO35 Werte 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie) von den entsprechenden 30-jährigen Mittelwerten 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.....	166

- Abbildung 107: Spannweite der 30-jährigen Mittel der O₃ SOMO35-Werte 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). Alle Jahre mit Emission 2005. 167
- Abbildung 108: 30-jährige Mittelwerte der O₃ AOT40-Werte für Vegetation 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie, links) sowie die entsprechenden 30-jährigen-Mittelwerte 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie, rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre..... 167
- Abbildung 109: Absolute (rechts) und relative Abweichung (links) der 30-jährigen Mittelwerte der O₃ AOT40 Werte 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie) von den entsprechenden 30-jährigen Mittelwerten 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre..... 168
- Abbildung 110: Spannweite der 30-jährigen Mittel der AOT40-Werte für Vegetation 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). Alle Jahre mit Emission 2005. 168
- Abbildung 111: 30-jährige Mittelwerte der O₃ Überschreitungssumme (Differenzsumme der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel > 120 µg/m³ und dem Schwellenwert 120 µg/m³) 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie, links) sowie die entsprechenden 30-jährigen-Mittelwerte 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie, rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre..... 169
- Abbildung 112: Absolute (links) und relative Abweichung (rechts) der 30-jährigen Mittelwerte der O₃ Überschreitungssumme (Differenzsumme der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel > 120 µg/m³ und dem Schwellenwert 120 µg/m³) 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie) von den entsprechenden 30-jährigen Mittelwerten 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre..... 169
- Abbildung 113: Spannweite der Ozon Überschreitungssumme (Differenzsumme der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel > 120 µg/m³ und dem Schwellenwert 120 µg/m³), Mittel 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil

(Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf.
 Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25°
 Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von
 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S).
 Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). Alle
 Jahre mit Emission 2005. 170

- Abbildung 114: Häufigkeit der maximalen täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel > 120 µg/m³ gemittelt über den Zeitraum April-September, 1976–2005 (EHIST) und 2021–2050 (RCP8.5). Mittel über Norddeutschland (alle Zellen nördlich von 52.25° Breite), Mitteldeutschland (Alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite) und Süddeutschland (Alle Zellen südlich von 50.25° Breite). Alle Jahre Emissionen 2005. 171
- Abbildung 115: Gleitende 5-Jahresmittelwerte 1976–2005 (EHIST) und 2021–2050 (RCP8.5). Ozonmittelwert April bis September. Auswertung für das Mittel über Deutschland, Norddeutschland (alle Zellen nördlich von 52.25° Breite) und Süddeutschland (Alle Zellen südlich von 50.25° Breite). Die durchgezogenen Linien kennzeichnen die 30-jährigen Mittelwerte. Alle Jahre mit Emissionen 2005. 173
- Abbildung 116: Gleitende 5-Jahresmittelwerte 1976–2005 (EHIST) und 2021–2050 (RCP8.5). Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel, April bis September. Auswertung für das Mittel über Deutschland, Norddeutschland (alle Zellen nördlich von 52.25° Breite) und Süddeutschland (Alle Zellen südlich von 50.25° Breite). Die durchgezogenen Linien kennzeichnen die 30-jährigen Mittelwerte. Alle Jahre mit Emissionen 2005. 174
- Abbildung 117: Gleitende 5-Jahresmittelwerte 1976–2005 (EHIST) und 2021–2050 (RCP8.5). SOMO35-Werte. Auswertung für das Mittel über Deutschland, Norddeutschland (alle Zellen nördlich von 52.25° Breite) und Süddeutschland (Alle Zellen südlich von 50.25° Breite). Die durchgezogenen Linien kennzeichnen die 30-jährigen Mittelwerte. Alle Jahre mit Emissionen 2005. 175
- Abbildung 118: Gleitende 5-Jahresmittelwerte 1976–2005 (EHIST) und 2021–2050 (RCP8.5). AOT40-Werte für Vegetation. Auswertung für das Mittel über Deutschland, Norddeutschland (alle Zellen nördlich von 52.25° Breite) und Süddeutschland (Alle Zellen südlich von 50.25° Breite). Die durchgezogenen Linien kennzeichnen die 30-jährigen Mittelwerte. Alle Jahre mit Emissionen 2005. 176
- Abbildung 119: Gleitende 5-Jahresmittelwerte 1976–2005 (EHIST) und 2021–2050 (RCP8.5). O₃ Überschreitungssumme (Summe der Differenzen der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel > 120 µg/m³ und dem Schwellenwert 120 µg/m³). Auswertung für das Mittel über Deutschland, Norddeutschland (alle Zellen nördlich von 52.25° Breite) und Süddeutschland (Alle Zellen südlich von 50.25° Breite). Die durchgezogenen Linien kennzeichnen die 30-jährigen Mittelwerte. Alle Jahre mit Emissionen 2005. 177

- Abbildung 120: Spannweite der 30-jährigen NO₂- (links) und PM10-Mittelwerte (rechts) berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie (1976–2005, Emission 2005) und der CCLM_RCP85-Meteorologie (2021–2050, Emission 2005 und 2030). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). 179
- Abbildung 121: Gleitende 5-Jahresmittelwerte über Deutschland von 1976 bis 2005 (CCLM_EHIST, Emission 2005) und von 2021 bis 2050 (CCLM_RCP85, Emission 2005 und 2030). Links: NO₂, rechts: PM10. Emission 2005 für alle Jahre 179
- Abbildung 122: Spannweite der 30-jährigen Ozonmittel April bis September 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie mit Emission 2005) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie mit Emission 2005 und Emission 2030). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). . 181
- Abbildung 123: Spannweite der 30-jährigen Mittel der max. tägl. 8-Std-Mittel, April bis September 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie mit Emission 2005) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie mit Emission 2005 und Emission 2030). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). 181
- Abbildung 124: Gleitende 5-Jahresmittelwerte gemittelt über Deutschland. 1976–2005 (EHIST mit Emissionen 2005) und 2021–2050 (RCP8.5 mit Emissionen 2005 und Emissionen 2030). Links: Ozonmittelwert April bis September, rechts maximaler tägliches gleitendes 8-Std.-Mittel..... 182
- Abbildung 125: Spannweite der 30-jährigen Mittel der O₃ SOMO35-Werte 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie mit Emission 2005) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie mit Emission 2005 und Emission 2030). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). . 184

- Abbildung 126: Spannweite der 30-jährigen Mittel der AOT40-Werte für Vegetation 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie mit Emission 2005) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie mit Emission 2005 und Emission 2030). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). .185
- Abbildung 127: Spannweite der 30-jährigen Mittel der O₃ Überschreitungssumme (Summe der Differenzen der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel > 120 µg/m³ und dem Schwellenwert 120 µg/m³). 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie mit Emission 2005) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie mit Emission 2005 und Emission 2030). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). .185
- Abbildung 128: Gleitende 5 Jahresmittelwerte gemittelt über Deutschland. 1976–2005 (EHIST mit Emission 2005) und 2021–2050 (RCP8.5 mit Emission 2005 und Emission 2030). Links: SOMO35, Mitte: AOT40 für Vegetation, Rechts: Mittlere Summe der Überschreitungen eines max. tägl. gleitender 8-Std-Mittel > 120 µg/m³ 186
- Abbildung 129: Auftrittshäufigkeit der maximalen täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel > 120 µg/m³ in Klassen zu 10 µg/m³ gemittelt über den Zeitraum April-September, 1976–2005 (EHIST mit Emission 2005) und 2021–2050 (RCP8.5 mit Emission 2005 und Emission 2030). Mittel über Deutschland. 187
- Abbildung 130: Summenhäufigkeit (%) der maximalen täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel > 120 µg/m³ gemittelt über den Zeitraum April-September, 1976–2005 (ERA und EHIST mit Emission 2005) und 2021–2050 (RCP8.5 mit Emission 2005 und Emission 2030) . Mittel über Deutschland. 187
- Abbildung 131: 30-jährige Mittelwerte 2021–2050 normiert mit den 30-jährigen Mittelwerten 1976–2005 (=100%). Beide Berechnungen unter den Emissionsbedingungen 2005. Mittlere Auswertung für ganz Deutschland. PM10- und NO₂-Jahresmittelwerte. O₃-Mittelwerte April-September (O3_Apr-Sept), Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel (O3_Max8STD), O₃ AOT40-Werte für Vegetation (O3_AOT40), O₃ SOMO35-Werte (O3_SOMO35), O₃ Überschreitungstage (O3_UEBT= Anzahl der Tage mit einem max. gleitend 8-Std-Mittel > 120 µg/m³), O₃ Überschreitungssumme (O3_DEL120=Summe der Differenzen

der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel $> 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und dem Schwellenwert $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$). 191

Abbildung 132: 30-jährige Mittelwerte 2021–2050 normiert mit den 30-jährigen Mittelwerten 1976–2005 (=100%). Beide Berechnungen unter den Emissionsbedingungen 2005. Mittlere Auswertung für die Bevölkerungsklassen 1 bis 4. PM10- und NO₂-Jahresmittelwerte..... 192

Abbildung 133: 30-jährige Mittelwerte 2021–2050 normiert mit den 30-jährigen Mittelwerten 1976–2005 (=100%). Beide Berechnungen unter den Emissionsbedingungen 2005. Mittlere Auswertung für Norddeutschland, Mitteldeutschland und Süddeutschland. O₃-Mittelwerte April-September (O₃_Apr-Sept), Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel (O₃_Max8STDM), O₃ AOT40-Werte für Vegetation (O₃_AOT40), O₃ SOMO35-Werte (O₃_SOMO35), O₃ Überschreitungstage (O₃_UEBT= Anzahl der Tage mit einem max. gleitend 8-Std-Mittel $> 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$), O₃ Überschreitungssumme (O₃_DEL120=Summe der Differenzen der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel $> 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und dem Schwellenwert $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$). 192

Abbildung 134: 30-jährige Mittelwerte 2021–2050 normiert mit den 30-jährigen Mittelwerten 1976–2005 (=100%). Mittelwerte 2021–2050 unter den Emissionsbedingungen 2030, Mittelwerte 1976–2005 unter den Emissionsbedingungen 2005. Mittlere Auswertung für ganz Deutschland. PM10- und NO₂-Jahresmittelwerte. O₃-Mittelwerte April-September (O₃_Apr-Sept), Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel (O₃_Max8STD), O₃ AOT40-Werte für Vegetation (O₃_AOT40), O₃ SOMO35-Werte (O₃_SOMO35), O₃ Überschreitungstage (O₃_UEBT= Anzahl der Tage mit einem max. gleitend 8-Std-Mittel $> 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$), O₃ Überschreitungssumme (O₃_DEL120=Summe der Differenzen der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel $> 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und dem Schwellenwert $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$). 193

Abbildung 135: 30-jährige Mittelwerte 2021–2050 normiert mit den 30-jährigen Mittelwerten 1976–2005 (=100%). Mittelwerte 2021–2050 unter den Emissionsbedingungen 2030, Mittelwerte 1976–2005 unter den Emissionsbedingungen 2005. Mittlere Auswertung für die Bevölkerungsklassen 1 bis 4. PM10- und NO₂-Jahresmittelwerte..... 194

Abbildung 136: 30-jährige Mittelwerte 2021–2050 normiert mit den 30-jährigen Mittelwerten 1976–2005 (=100%). Mittelwerte 2021–2050 unter den Emissionsbedingungen 2030, Mittelwerte 1976–2005 unter den Emissionsbedingungen 2005. Mittlere Auswertung für Norddeutschland, Mitteldeutschland und Süddeutschland. O₃-Mittelwerte April-September (O₃_Apr-Sept), Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel (O₃_Max8STDM), O₃ AOT40-Werte für Vegetation (O₃_AOT40), O₃ SOMO35-Werte (O₃_SOMO35), O₃ Überschreitungstage (O₃_UEBT= Anzahl der Tage mit einem max. gleitend 8-Std-Mittel $> 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$), O₃

	Überschreitungssumme (O ₃ _DEL120=Summe der Differenzen der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel > 120 µg/m ³ und dem Schwellenwert 120 µg/m ³).	195
Abbildung 137:	Anzahl der Messstationen pro Bundesland und Stationstyp Verkehr, Industrie und Hintergrund für PM10 (oben) und Ozon (unten).	199
Abbildung 138:	Häufigkeitsverteilung der Überschreitung des Grenzwertes für Tagesmittelwerte der PM10-Konzentration (2000-2012) und der Überschreitung des Grenzwertes für das Tagesmaximum der gleitenden 8h-Mittelwerte der Ozonkonzentration (1990-2012) in Deutschland	202
Abbildung 139:	Teilgebiete für die Auswertung der Überschreitungen des PM10-Grenzwertes (links) und des Ozon-Zielwertes (rechts). Die Farben geben das Gruppierungsergebnis des LSD-Tests wieder.....	203
Abbildung 140:	Auftretenshäufigkeit von Wetterlagenklassen an Tagen mit Überschreitung des Grenzwertes für Tagesmittelwerte der PM10-Konzentration (2000-2012) – links – sowie für das Maximum der 8h-Mittelwerte der O ₃ -konzentration (1990-2012) – rechts....	204
Abbildung 141:	Auftretenshäufigkeit von Wetterlagenklassen an Tagen mit Überschreitung des Grenzwertes für Tagesmittelwerte der PM10-Konzentration (2000-2012, DJFM) für das Teilgebiet Nord.	205
Abbildung 142:	Auftretenshäufigkeit von Wetterlagenklassen an Tagen mit Überschreitung des Grenzwertes für Tagesmittelwerte der PM10-Konzentration (2000-2012, DJFM) für das Teilgebiet Mitte.....	206
Abbildung 143:	Auftretenshäufigkeit von Wetterlagenklassen an Tagen mit Überschreitung des Grenzwertes für Tagesmittelwerte der PM10-Konzentration (2000-2012, DJFM) für das Teilgebiet Süd.....	207
Abbildung 144:	Auftretenshäufigkeit von Wetterlagenklassen an Tagen mit Überschreitung des Grenzwertes für das Maximum der 8h-Mittelwerte der O ₃ -konzentration (1990-2012, MJJA) für das Teilgebiet West.	208
Abbildung 145:	Auftretenshäufigkeit von Wetterlagenklassen an Tagen mit Überschreitung des Grenzwertes für das Maximum der 8h-Mittelwerte der O ₃ -konzentration (1990-2012, MJJA) für das Teilgebiet Mitte.....	209
Abbildung 146:	Auftretenshäufigkeit von Wetterlagenklassen an Tagen mit Überschreitung des Grenzwertes für das Maximum der 8h-Mittelwerte der O ₃ -konzentration (1990-2012, MJJA) für das Teilgebiet Ost.	210
Abbildung 147:	Mittlere Änderung der Auftretenshäufigkeit von ausgewählten Wetterlagenklassen im Vergleich zu 1961-1990 an Tagen mit Überschreitungen von PM10-Grenz- und Ozon-Zielwerten. Die Mittelwerte beziehen sich auf das Ensemble der vorhandenen Modellläufe (Tabelle 31), die Fehlerbalken decken die Spannweite des Modellensembles ab – a) Änderungen für 2021–	

	2050, b) für 2070–2099, für die SRES Szenarien A1B, A2 und B1.....	212
Abbildung 148:	Modellierungsgebiete und Gitterauflösungen.....	217
Abbildung 149:	Schematischer Ablauf der zyklischen COSMO-MUSCAT-Simulationen im “Vorhersage-Regime” (meteorologischer Antrieb nur über die Randwerte, ohne Datenassimilation und “Nudging”)......	219
Abbildung 150:	Simulierte Jahresmittelwerte 2005 der Temperatur [K] für (a) N1_ERA und (c) N1_EHIST. Berechnete Niederschlagsmenge [mm] für 2005 für (b) N1_ERA und (d) N1_EHIST. Differenzen N1_ERA – EU_CCLM_ERA für die berechneten Jahresmittelwerte 2005 der (e) Temperatur [K] und der (f) Niederschlagsraten [mm/Tag] dargestellt auf dem N2-Gebiet.....	222
Abbildung 151:	Simulierte Jahresmittelwerte 2005 der Temperatur [K] und die jährliche Niederschlagsmenge [mm] für N2_ERA, N2_EHIST und die entsprechenden Differenzen zu DE_CCLM_ERA.....	223
Abbildung 152:	Differenzen zwischen den N2_ERA Jahresmittelwerten 2005 und den Referenzdatensätzen HYRAS für die Temperatur [K] (a) und REGNIE für die jährliche Niederschlagsmenge [mm].	224
Abbildung 153:	Box-Whisker-Plots für die mittlere Temperatur (a) und die Niederschlagsrate (b) für das Jahr 2005.	224
Abbildung 154:	Vergleich der simulierten Temperatur an ausgewählten Messstationen für das Jahr 2005.	226
Abbildung 155:	Vergleich gemessener und simulierter meteorologischer Zeitreihen für das Jahr 2005 am Standort Müncheberg.....	227
Abbildung 156:	Jahresmittel der PM-, NO ₂ - und Ozon-Konzentration 2005 für Europa und die CCLM_ERA-Antriebsdaten.	229
Abbildung 157:	Jahresmittel der PM- und NO ₂ -Konzentration 2005 für Deutschland und die CCLM_ERA-Antriebsdaten.	230
Abbildung 158:	Vergleich der modellierten Mittelwerte für April-September 2005 der Ozon-Konzentrationen für Deutschland.	231
Abbildung 159:	Box-Whisker-Plots für die PM ₁₀ (a), PM _{2.5} (b) und die NO ₂ (c) Konzentrationen für das Jahr 2005. Für O ₃ erfolgte die statistische Auswertung nur für das Sommerhalbjahr (April-September 2005).	232
Abbildung 160:	Simulierte Jahresmittel der PM-, NO ₂ - und Ozon-Konzentration 2005 für Deutschland und die CCLM_EHIST-Antriebsdaten.	233
Abbildung 161:	Vergleich gemessener und simulierter Zeitreihen für PM ₁₀ [µg/m ³] an ausgewählten Messstationen für das Jahr 2005 (Tagesmittelwerte).	236
Abbildung 162:	Vergleich gemessener und simulierter Zeitreihen für die PM ₁₀ -Zusammensetzung an ausgewählten Messstationen für das Jahr 2005 (Tagesmittelwerte).....	237

Abbildung 163:	Vergleich gemessener und simulierter Zeitreihen für die Ozon-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] an ausgewählten Messstationen für das Jahr 2005.	239
Abbildung 164:	Meteorologische Situation während der Episode mit hohen PM10-Konzentrationen (3. – 12. Februar 2005): (a) Druckkarte für den 03.02.2005, (b) Druckkarte für den 05.02.2005, (c) Druckkarte 10.02.2005, (d) Druckkarte 12.02.2005, (e) bodennaher Druck und Wind am 06.02.2005, (f) bodennaher Druck und Wind 12.02.2005.	241
Abbildung 165:	Entwicklung der PM10-Verteilung in Europa während der PM-Episode im Februar 2005 für die N1_GME-Simulation.	242
Abbildung 166:	Vergleich von simulierten Stunden- und gemessenen Tagesmittelwerten der PM10-Konzentration für unterschiedliche Modellkonfigurationen: (a) Melpitz, (b) Neuglobsow, (c) Waldhof. Dargestellt ist jeweils der Zeitraum vom 02.02.2005, 0:00 Uhr bis zum 15.02.2005, 24:00 Uhr.....	243
Abbildung 167:	Zusammensetzung der in N2_ERA simulierten stündlichen PM10-Konzentrationen für unterschiedliche Standorte: (a) Melpitz, (b) Neuglobsow, (c) Waldhof. Die Konzentrationen sind im Vergleich mit den gemessenen PM10-Tagesmittelwerten für den Zeitraum vom 02.02.2005, 0:00 Uhr bis zum 15.02.2005, 24:00 Uhr dargestellt.....	244
Abbildung 168:	Mittlere Partikelzusammensetzung während der PM-Episode im Februar 2005.	247
Abbildung 169:	Vergleich von simulierten meteorologischen Größen mit Messungen in Melpitz für ein Ensemble unterschiedlicher Modellkonfigurationen und die Februar-Episode: (a) Temperatur, (b) Windgeschwindigkeit, (c) relative Feuchte.....	248
Abbildung 170:	Meteorologische Situation während der Ozonepisode (24. – 31. Mai 2005): (a) Druckkarte für den 25.05.2005, (b) Bodenwetterkarte-DWD für den 28.05.2005, (c) Druckkarte für den 31.05.2005, (d) bodennaher Druck und Wind am 26.05.2005, (e) bodennaher Druck und Wind am 30.05.2005, (f) Bodennaher Druck und Wind 31.05.2005.....	250
Abbildung 171:	Vergleich von simulierten O3-Konzentrationen mit Messungen für unterschiedliche Modellkonfigurationen in (a) Waldhof und (b) Melpitz. Außerdem wird in (c) der Verlauf der modellierten und gemessenen NO ₂ -Konzentrationen in Melpitz verglichen. Dargestellt ist jeweils der Zeitraum vom 25.05.2005, 0:00 Uhr bis zum 01.06.2005, 24:00 Uhr.....	251
Abbildung 172:	Vergleich von simulierten meteorologischen Größen mit Messungen für ein Ensemble unterschiedlicher Modellkonfigurationen und die Mai-Episode: (a) Temperatur in Greifswald, (b) Windgeschwindigkeit in Greifswald, (c) Solarstrahlung am Boden. Dargestellt ist jeweils der	

	Zeitraum vom 22.05.2005, 0:00 Uhr bis zum 30.05.2005, 24:00 Uhr.....	253
Abbildung 173:	Konventionen zur Darstellung von Box-Whisker-Plots.....	262
Abbildung 174:	Abbildung 175 Bevölkerungsdichte in Einwohner/km ² in 4 Klassen. Zur Klassendefinition siehe Text. Die Auflösung entspricht der Auflösung des Nestes Deutschland: 0.0625° Breite, 0.125° Länge, circa 8 km x 7 km.	263
Abbildung 176:	Gitterzelle des Arakawa-C-Gitters im CCLM mit Speicherung von skalaren Variablen in der Zellmitte und von Impuls- und Geschwindigkeitsvariablen auf den Zellkanten (Schättler et al. 2009).	276
Abbildung 177:	Unrotierte CCLM-Daten, Temperatur, vollständige Abbildung (z=4m, t=1).	277
Abbildung 178:	Unrotierte CCLM-Daten, Temperatur, resultierende Abbildung ohne missing values (z=4m, t=1).....	277

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Erforderliche Modellläufe für die Chemie-Transport-Modellierung mit RCG	62
Tabelle 2:	Grundlegende Modellkonfiguration des CCLM	65
Tabelle 3:	Bezeichnung und Zeitraum der CCLM Modellläufe	65
Tabelle 4:	Gütemaße für EU_CCLM_ERA und EU_CCLM_EHIST vs. E-OBS, langjährige Monatliche Mittelwerte der Temperatur [K]	68
Tabelle 5:	Gütemaße für EU_CCLM_ERA und EU_CCLM_EHIST vs. E-OBS ...	70
Tabelle 6:	Gütemaße für EU_CCLM_ERA und EU_CCLM_EHIST vs. E-OBS, langjährige mittlere monatliche Niederschlagssummen [mm]...	71
Tabelle 7:	Gütemaße für DE_CCLM_ERA und DE_CCLM_EHIST vs. HYRAS und REGNIE	73
Tabelle 8:	Gütemaße für DE_CCLM_ERA und DE_CCLM_EHIST vs. HYRAS, langjährige monatliche Mitteltemperaturen [K].....	74
Tabelle 9:	Gütemaße für DE_CCLM_ERA und DE_CCLM_EHIST vs. REGNIE, langjährige monatliche Niederschlagssummen [mm]	76
Tabelle 10:	Langjähriger mittlerer BIAS der Windgeschwindigkeit [m/s] 1976–2005 zwischen Modelldaten und Stationsdaten.....	77
Tabelle 11:	BIAS der langjährigen monatlichen Mittelwerte der Windgeschwindigkeit, 1976 - 2005, DE_CCLM_ERA -Stationen .	78
Tabelle 12:	BIAS der langjährigen monatlichen Mittelwerte der Windgeschwindigkeit, 1976 - 2005, DE_CCLM_EHIST - Stationen	78
Tabelle 13:	PM10-Jahresmittelwerte 2005 gemittelt über Deutschland, alle Flächen der Bevölkerungsklasse 1 und alle Flächen der Bevölkerungsklasse 4.	112
Tabelle 14:	30-jährige (1976–2005) NO ₂ -Mittelwerte im Mittel über Deutschland, die ländlichen Gebiete (BVK1) sowie die Ballungsräume (BVK4).....	137
Tabelle 15:	30-jährige (1976–2005) PM10-Mittelwerte im Mittel über Deutschland, die ländlichen Gebiete (BVK1) sowie die Ballungsräume (BVK4).	138
Tabelle 16:	30-jährige O ₃ -Mittelwerte April bis September jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen > 52.25° Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen < 52.25° und > 50.25° Breite), in Süddeutschland (alle Zellen < 50.25° Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf ERA und EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005.	143
Tabelle 17:	30-jährige O ₃ -Mittelwerte April bis September der Maxima der tägl. gleitenden Ozon 8-Std-Mittel jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen > 52.25° Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen < 52.25° und > 50.25° Breite), in Süddeutschland (alle	

	Zellen < 50.25° Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf ERA und EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005.	143
Tabelle 18:	30-jährige Mittelwerte der O3-SOMO35-Werte jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen > 52.25° Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen < 52.25° und > 50.25° Breite), in Süddeutschland (alle Zellen < 50.25° Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf ERA und EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005.	144
Tabelle 19:	30-jährige Mittelwerte der O3-AOT40-Werte für Vegetation jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen > 52.25° Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen < 52.25° und > 50.25° Breite), in Süddeutschland (alle Zellen < 50.25° Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf ERA und EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005.	144
Tabelle 20:	30-jährige Mittelwerte der Summe der positiven Konzentrationsdifferenz zwischen dem maximalen gleitenden 8-Stundenmittelwert und dem Schwellenwert 120 µg/m ³ jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen > 52.25° Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen < 52.25° und > 50.25° Breite), in Süddeutschland (alle Zellen < 50.25° Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf ERA und EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005.	146
Tabelle 21:	Relative Änderungen der Emissionen 2030 bezogen auf die Emissionen 2005. Mittlere Änderungen in Deutschland und in Europa.....	178
Tabelle 22:	30-jährige NO ₂ -Mittelwerte in Deutschland jeweils im Mittel über Bevölkerungsklasse 1 bis 4. Lauf EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005, Lauf RCP8.5 2021–2050 mit Emissionen 2005 und Emissionen 2030.	178
Tabelle 23:	30-jährige PM10-Mittelwerte in Deutschland jeweils im Mittel über Bevölkerungsklasse 1 bis 4. Lauf EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005, Lauf RCP8.5 2021–2050 mit Emissionen 2005 und Emissionen 2030.	178
Tabelle 24:	30-jährige O ₃ -Mittelwerte April bis September jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen > 52.25° Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen < 52.25° und > 50.25° Breite), in Süddeutschland (alle Zellen < 50.25° Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005, Lauf RCP8.5 2021–2050 mit Emissionen 2005 und Emissionen 2030.	180
Tabelle 25:	30-jährige O ₃ -Mittelwerte April bis September der max. tägl. 8-Std-Mittel jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen > 52.25° Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen < 52.25° und > 50.25° Breite), in Süddeutschland (alle Zellen < 50.25° Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005, Lauf RCP8.5 2021–2050 mit Emissionen 2005 und Emissionen 2030.	180

Tabelle 26:	30-jährige O ₃ -Mittelwerte SOMO35 jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen > 52.25° Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen < 52.25° und > 50.25° Breite), in Süddeutschland (alle Zellen < 50.25° Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005, Lauf RCP8.5 2021–2050 mit Emissionen 2005 und Emissionen 2030.....	182
Tabelle 27:	30-jährige O ₃ -Mittelwerte AOT40 für Vegetation jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen > 52.25° Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen < 52.25° und > 50.25° Breite), in Süddeutschland (alle Zellen < 50.25° Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005, Lauf RCP8.5 2021–2050 mit Emissionen 2005 und Emissionen 2030.	183
Tabelle 28:	30-jährige Mittel der O ₃ Überschreitungssumme (Summe der Differenzen der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel > 120 µg/m ³ und dem Schwellenwert 120 µg/m ³) jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen > 52.25° Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen < 52.25° und > 50.25° Breite), in Süddeutschland (alle Zellen < 50.25° Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005, Lauf RCP8.5 2021–2050 mit Emissionen 2005 und Emissionen 2030.....	183
Tabelle 29:	PM10 Grenzwerte und Ozonzielwerte (39. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG): Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 02.08.2010 (BGBl. I S. 1065)	197
Tabelle 30:	Verwendete Klassifikation der Stationsumgebung nach RL 2011/850/EU sowie die entsprechenden Kriterien nach Anhang VIII Richtlinie 2008/50/EG (Ozon) (siehe auch Handbuch „Luftqualitätsdaten- und Informationsaustausch in Deutschland“, Umweltbundesamt II 4.2, Version V3.0).....	198
Tabelle 31:	Übersicht der für die Wetterlagenklassifizierung (Krahe et al. 2010) verwendeten globalen Klimamodell-Läufe und Szenarien	201
Tabelle 32:	Durchgeführte Modellsimulationen mit COSMO-MUSCAT.	220
Tabelle 33:	Statistische Gütemaße (vgl. Abschnitt 3.3, STW = Standardabweichung) für N1_ERA, N2_ERA und DE_RCG_CCLM_ERA vs. gemessene Stundenwerte an ausgewählten Messstationen für das Jahr 2005. Für Ozon wurde die Statistik nur für das Sommerhalbjahr (April – September 2005) erstellt.....	234
Tabelle 34:	Generischer Pflanzentyp und zugeordnete Landnutzungs-kategorie im RCG-Modell.....	267
Tabelle 35:	Permanenter Welkepunkt und Feldkapazität für verschiedene Bodentypen	267
Tabelle 36:	Emissionen (t/Jahr) APS-Referenz 2005, Deutschland für 15 Verursachergruppen	269

Tabelle 37:	Emissionen (t/Jahr) APS-Referenz 2030, Deutschland für 15 Verursachergruppen	270
Tabelle 38:	Änderung (%) der Emissionen der APS-Referenz 2030 bezogen auf die APS-Referenz 2005, Deutschland.	271
Tabelle 39:	Benötigte RCG Input-Variablen und verfügbare CCLM Output-Variablen (x = nicht vorhanden)	272
Tabelle 40:	Zusätzlich für Berechnungen benötigte Variablen und Konstanten	273

Abkürzungsverzeichnis

AOT40	Accumulated Ozone Exposure over a threshold of 40 ppb
APS	Aktuelles Politik-Szenario
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BVK	Bevölkerungsklasse
CCLM	COSMO-Climate Local Model
COSMO	Consortium for Small-Scale Modeling
CTM	Chemie-Transport-Modell
DE_CCLM_EHIST	Deutschland-Lauf mit CCLM, Antrieb: ECHAM6 (1976–2005)
DE_CCLM_ERA	Deutschland-Lauf mit CCLM, Antrieb: Reanalsedaten (ERA)
DE_CCLM_RCP85	Deutschland-Lauf mit CCLM, Antrieb: ECHAM6 (2021–2050), Szenario RCP8.5
DWD	Deutscher Wetterdienst
EC	Elemental Carbon
ECHAM	Globales Zirkulationsmodell (Akronym aus EC MWF und Hamb urg)
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERA	E uropean R eanalysis
EU	European Union (Europäische Union)
EU_CCLM_EHIST	Europa-Lauf mit CCLM, Antrieb: ECHAM6 (1976–2005)
EU_CCLM_ERA	Europa-Lauf mit CCLM, Antrieb: Reanalsedaten (ERA)
EU_CCLM_RCP85	Europa-Lauf mit CCLM, Antrieb: ECHAM6 (1921–2050), Szenario RCP8.5
GCM	Global Circulation/Climate Model (Globales Zirkulationsmodell/Klimamodell)
GME	Globalmodell des Deutschen Wetterdienstes
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LSD Test	least significant difference test
MPI-ESM	Max-Planck-Institute – Earth System Model
MUSCAT	Multi-Scale Chemistry Aerosol Transport
NOx	Stickstoffoxide
OC	Organic Carbon
oWLK	objektive Wetterlagenklassifikation
PM10	Particulate Matter (Feinstaub) mit einem maximalen Durchmesser von 10 µm
RACM	Regional Atmospheric Chemistry Mechanism
RCG	REM-CALGRID
RCM	Regional Climate Model (Regionales Klimamodell)

RCP8.5	Repräsentativer Konzentrationspfad (Representative Concentration Pathway) mit einem Strahlungsantrieb von 8,5 W/m ² in 2100
SIA	Secondary Inorganic Aerosols
SOA	Secondary Organic Aerosols
SOM035	S um of O zone M eans O ver 35 ppb
SORGAM	Secondary Organic Aerosol Model
TKE	Turbulente Kinetische Energie
TRAMPER	T roposphärische A nalyse m eteorologischer P arameter
UBA	Umweltbundesamt
UTC	Coordinated Universal Time (koordinierte Weltzeit)
VOC	volatile organic compound (flüchtige organische Verbindung)
WHO	World Health Organization (Weltgesundheitsorganisation)

Zusammenfassung

Hohe Konzentrationen von Luftschadstoffen sind für ihre negativen Eigenschaften auf die menschliche Gesundheit allgemein bekannt. Besonders oberflächennahes Ozon und Feinstaub (PM – „particulate matter“) besitzen ein hohes Gesundheit gefährdendes Potenzial. Hohe Ozonkonzentrationen treten besonders in den Sommermonaten aufgrund der fotochemischen Eigenschaften auf. Senken für Ozon sind einerseits die Photolyse (=Lichtspaltung) und andererseits die trockene Deposition. Die Verweilzeit von Ozon reicht von wenigen Tagen in der planetaren Grenzschicht bis zu mehreren Wochen in der freien Troposphäre. Der Einfluss meteorologischer Größen auf Ozon ist vielfältig. So sind Ozonkonzentrationen an der Erdoberfläche abhängig von der Temperatur, der Sonneneinstrahlung, der Bewölkung, der Windgeschwindigkeit und der Mächtigkeit der Durchmischungsschicht. Die stärkste Korrelation zeigt Ozon mit der Temperatur, wobei es mit zunehmenden Temperaturen in städtischen und ländlichen Umgebungen ansteigt. Hohe Ozonkonzentrationen zeigen eine ausgesprochene Saisonalität und treten mit großer Häufigkeit in den Sommermonaten auf.

Feinstaub zählt zu den Aerosolen, welche in primäre und sekundäre Aerosole unterteilt werden können. Primäre Aerosole werden direkt in die Atmosphäre emittiert und sekundäre Aerosole durch chemische Reaktionen aus gasförmigen Substanzen gebildet. Feinstaub besteht aus einer Vielzahl von Stoffgruppen und beinhaltet hauptsächlich Sulfat, Nitrat, organischen Kohlenstoff, Bodenpartikel und Seesalz. Hohe Feinstaubbelastungen können das ganze Jahr über auftreten und werden hauptsächlich durch Niederschlag minimiert. Dabei spielt weniger die Niederschlagsintensität als die Häufigkeit eine Rolle. Die Verweilzeit von PM reicht, wie die von Ozon, ebenfalls von wenigen Tagen in der planetaren Grenzschicht bis zu mehreren Wochen in der freien Troposphäre. Die Korrelation von Feinstaub mit meteorologischen Variablen ist schwächer als für Ozon aufgrund der unterschiedlichen Feinstaub-Komponenten, der komplexen Kopplung mit dem Wasserkreislauf und verschiedenen, sich gegenseitig beeinflussenden und kompensierenden Effekten. Es besteht ein deutlicher Zusammenhang zwischen hohen Feinstaubbelastungen und dem Auftreten austauscharmer Wetterlagen.

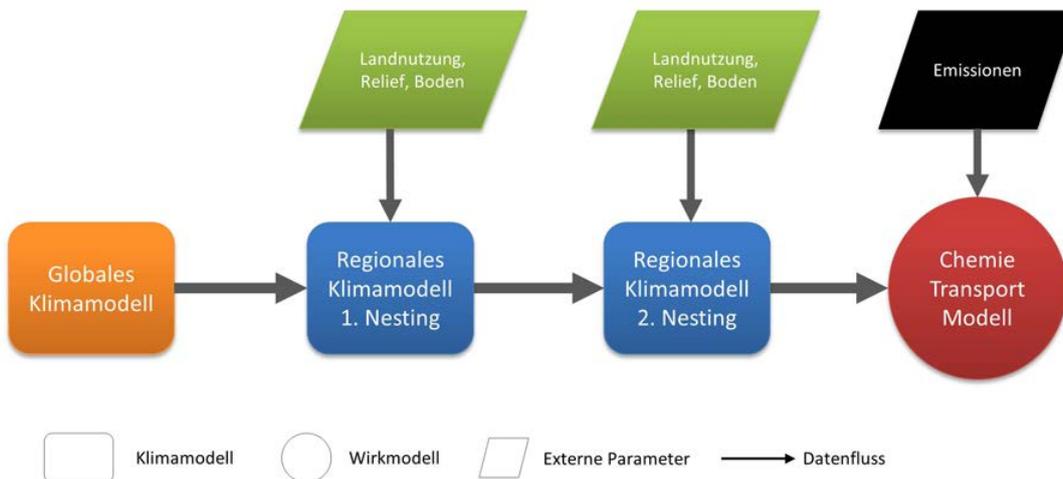
Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts werden nachhaltige Änderungen des Klimas erwartet. Je nach sozioökonomischer Entwicklung und zukünftigen Klimapolitikmaßnahmen variieren die Szenarien über zukünftige Treibhausgasemissionen stark. Die vom IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change) untersuchten Szenarien, die von strengem Klimaschutz bis zu ungebremsten Emissionen reichen, zeigen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine wahrscheinliche Erwärmung der mittleren globalen Oberflächentemperatur um 0,9 bis 5,4 °C gegenüber vorindustriellen Bedingungen. Die mit der globalen Erwärmung verbundenen Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft können auf der regionalen Skala wesentlich dramatischer ausfallen als im globalen Mittel. Bei Änderungen der Wertebereiche und Ausprägungen der mit Luftbelastungen verknüpften meteorologischen Variablen ist auch mit Änderungen der Häufigkeit von Luftschadstoffepisoden und somit der Konzentrationen von Ozon und Feinstaub zu rechnen. Verschiedene Studien mit globalen gekoppelten Klima- und Chemie-Transportmodellen zeigen aufgrund des Temperaturanstiegs einen Anstieg der Ozonkonzentration in den mittleren Breiten in der Zukunft. Während das Änderungssignal der Temperatur sehr robust in den verschiedenen Klimaprojektionen ist, zeigen die projizierten Niederschlagsänderungen für Mitteleuropa, aufgrund der hohen zeitlichen und räumlichen Variabilität des Niederschlages und der damit verbundenen Unsicherheiten in der Modellierung durch Klimamodelle, größere räumliche und saisonale Unterschiede als die Temperaturänderungen.

Ausgehend von den zu erwartenden Änderungen des Klimas und dem Zusammenhang zwischen Klimawandel, Emissionspolitik und Luftqualität stellt sich die Frage nach den Auswirkungen zukünftiger klimatischer und emissionspolitischer Änderungen auf die Luftqualität. In der hier vorliegenden Studie wird dieser Frage mit drei verschiedenen Untersuchungsansätzen nachgegangen.

Untersuchungsansätze

Der erste Ansatz umfasst die numerische Modellierung zukünftiger Konzentrationen von Ozon und PM10 für das Gesamtgebiet Deutschlands, basierend auf einem ausgewählten Klimaszenario. Dazu wurde das Chemie-Transport-Modell REM CALGRID (RCG) mit den Ergebnissen aus dem Regionalen Klimamodell COSMO-CLM (CCLM) angetrieben (Abbildung I). Die Simulation der Luftschadstoffentwicklung unter dem Einfluss des Klimawandels und energiepolitischer Änderungen (Emissionszenarien) erfolgte für eine 30-jährige Vergangenheits- (1976–2005) sowie eine 30-jährige Zukunftsperiode (2021–2050). Es wurden einerseits Emissionen des Jahres 2005 und andererseits prognostizierte Emissionen des Jahres 2030 als Eingangsdaten verwendet, um darzustellen, welchen Einfluss der Klimawandel und welchen Einfluss die Luftreinehaltepolitik im Zusammenspiel mit dem Klimawandel auf die zu erwartenden Luftschadstoffkonzentrationen haben könnte.

Abbildung I: Schematische Darstellung der Modellkette.



Der zweite Untersuchungsansatz befasst sich mit dem Zusammenhang zwischen dem Auftreten typischer Wetterlagen und hohen Konzentrationen von Ozon und PM10. Der Klimawandel geht einher mit Änderungen der atmosphärischen Zirkulation. So wurde bereits für die vergangenen Jahre eine Änderung in der Häufigkeit des Auftretens bestimmter Wetterlagen für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland beobachtet. Auf Basis einer statistischen Analyse hoher Luftschadstoffkonzentrationen und objektiver Wetterlagenklassen lassen sich typische Wetterlagen bestimmen, an denen gehäuft Überschreitungen der Grenz- und Zielwerte auftreten. Unter der Annahme der Eineindeutigkeit lässt sich im Umkehrschluss aus langen Klimasimulationen die Auftretenshäufigkeit dieser Wetterlagen in der Zukunft und damit auch das Auftreten von Überschreitungstagen für PM10 und Ozon abschätzen.

Der dritte Untersuchungsansatz beinhaltet räumlich und zeitlich hochaufgelöste Ausbreitungssimulationen mit dem gekoppelten Modellsystem COSMO-MUSCAT für ausgewählte Episoden hoher Luftschadstoffkonzentrationen. Durch die direkte Kopplung von Klima- und Chemietransportmodell können kleinere zeitliche und räumliche meteorologische Schwankungen sehr gut für die Ausbreitungsrechnung berücksichtigt werden. Mit den COSMO-MUSCAT-Simulationen werden zwei Ziele verfolgt: (i) Absicherung der RCG-Ergebnisse (ii) Detaillierte Untersuchung des Einflusses der meteorologischen Bedingungen auf hohe Schadstoffkonzentrationen. Der im zweiten Untersuchungsansatz betrachtete Zusammenhang zwischen bestimmten Wetterlagen und der Konzentration von Luftschadstoffen wurde durch eine numerische Simulation überprüft. Für zwei ausgewählte Episoden erfolgte eine genaue Analyse der Wirkung einzelner meteorologischer Kenngrößen (Mischungsschichthöhe,

Luftfeuchtigkeit) und Strömungsmuster auf die Schadstoffkonzentrationen. Dabei wurde untersucht, welche Mechanismen und Wechselwirkungen die hohen Konzentrationen beeinflussen.

Klimamodellierung: Evaluierung der Modellergebnisse

Das regionale Klimamodell CCLM (COSMO-Climate Local Model) wurde als meteorologischer Antrieb für das Chemie-Transport Modell RCG einmal für ganz Europa und einmal für Deutschland konfiguriert und angewendet. Für jede Region wurden jeweils zwei Modellläufe für den Referenzzeitraum von 1976 bis 2005 und ein Modelllauf für den Projektionszeitraum von 2021 bis 2050 durchgeführt. Die zwei Modellläufe des Referenzzeitraumes unterscheiden sich in den verwendeten Antriebsdaten, wobei einmal Reanalysedaten und einmal Daten des globalen Klimamodells ECHAM6 verwendet wurden. Reanalysedaten entsprechen in diesem Zusammenhang einem Antrieb mit „quasi“-Beobachtungsdaten und können zur Evaluierung der Güte und Leistungsfähigkeit des regionalen Klimamodells verwendet werden. Im Gegensatz dazu stellen die Daten von ECHAM6 auf einem „freien“ Klimalauf ohne weitere Anpassung oder Justierung dar. Als Antrieb für den Projektionszeitraum wurde das IPCC-Klimaszenario RCP 8.5, welches ebenfalls mit dem Globalmodell ECHAM6 gerechnet wurde, verwendet. Das Szenario geht von stark steigenden Treibhausgasemissionen infolge eines hohen Bevölkerungswachstum, geringer Steigerung der Energieeffizienz, keiner zusätzlichen Klimaschutzpolitik und einer weiterhin starken Nutzung fossiler Energieträger aus.

Die Modellergebnisse des CCLM wurden jeweils für Europa und für Deutschland durch einen Vergleich mit adäquaten gerasterten Beobachtungsdaten evaluiert, die aus Zeitreihen von Wetterstationen interpoliert wurden. Für das Gebiet von Europa zeigen beide Modellläufe für den Zeitraum von 1976 bis 2005 im langjährigen zeitlichen und räumlichen Mittel eine Unterschätzung von knapp 1 K, wobei die räumlichen Muster der langjährigen Mitteltemperaturen sehr gut wiedergegeben werden. Die größten Temperaturabweichungen treten in den Hochgebirgsregionen auf. Der mit Reanalysedaten angetriebene Modelllauf unterschätzt dabei eher die Wintertemperaturen als die Sommertemperaturen. Im Gegensatz dazu werden bei dem vom Modell ECHAM6 angetriebenen Modelllauf die Sommertemperaturen stärker unterschätzt als die Wintertemperaturen. Die beobachteten Niederschläge werden für weite Gebiete Europas von beiden Modellläufen überschätzt, wobei der auf Reanalysedaten basierende Modelllauf eine langjährige mittlere Abweichung von 13 % und der mit ECHAM6 angetriebene Lauf von 54 % aufzeigt. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die Beobachtungsdaten nicht windfehlerkorrigiert sind und somit in der Realität bis zu 20 % höher sein dürften. Dies relativiert die hohen Niederschlagsabweichungen zwar etwas, dennoch ist die durch das Globalmodell ECHAM6 herbeigeführte Überschätzung der Niederschläge eindeutig als zu hoch einzustufen. Beide Modellläufe haben in den Sommermonaten geringere Abweichungen des Niederschlages als in den Wintermonaten.

Die Evaluierung der Klimamodellergebnisse für das Gebiet von Deutschland zeigte ebenfalls eine Unterschätzung der langjährigen Mitteltemperaturen von 1 K für den mit Reanalysedaten angetriebenen Modelllauf und 0,8 K für den mit ECHAM6 angetriebenen Modelllauf. Wie bei den Europasimulationen weisen einerseits die Wintermonate die größeren Abweichungen auf als die Sommermonate (Modelllauf mit Reanalysedaten) und andererseits zeigt der zweite Modelllauf (Antrieb mit ECHAM6) im Gegensatz dazu geringere Abweichungen im Winter und die größeren Abweichungen im Sommer. Die räumlichen Muster werden gut wiedergegeben. Die Niederschläge werden für das Gebiet von Deutschland von beiden Modellläufen mit 22 % bzw. 56 % überschätzt. Dabei werden auch hier die Sommermonate besser abgebildet als die Wintermonate. Die Niederschlagsdaten des für Deutschland verwendeten Vergleichsdatensatzes sind ebenfalls nicht windfehlerkorrigiert. Somit sind die Abweichungen der Modellläufe für Deutschland in der Realität etwas niedriger.

Zusätzlich zu Niederschlag und Temperatur wurde für die Deutschlandläufe die Güte der klimatischen Variable Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, aufgrund ihrer großen Bedeutung für die Ausbreitung von Luftschadstoffen, ausgewertet. Als Referenz dienten Zeitreihen von Messstationen des

Deutschen Wetterdienstes. Die Windgeschwindigkeiten der im ostdeutschen Tiefland gelegenen Stationen werden von beiden Modellläufen am besten wiedergegeben. Der mit ECHAM6 angetriebene Modelllauf tendiert im Vergleich zu dem mit Reanalysedaten angetriebenen Modelllauf zu höheren positiven Abweichungen. Generelle zeitliche Muster der Abweichungen sind nicht erkennbar, wobei jedoch häufig Unterschiede zwischen Winter und Sommer festgestellt werden konnten.

Klimamodellierung: Klimatische Änderungen bis 2050

Die projizierten klimatischen Änderungen für Deutschland (Klimasignal) wurden durch den Vergleich der mit ECHAM6 angetriebenen Modellläufe für den Referenzzeitraum und den Projektionszeitraum ermittelt. Mit einem langjährigen Flächenmittelwert für Deutschland von +0,8 K zeigt die Temperatur das deutlichste Änderungssignal. Ein Anstieg der langjährigen Mitteltemperaturen wurde in allen Monaten ermittelt, mit den höchsten Zunahmen in den Wintermonaten. Die langjährigen mittleren Änderungen des Niederschlages sind mit +1,3 % nur sehr gering und können in Anbetracht der hohen Unsicherheiten bei der Niederschlagsmodellierung nicht als signifikante Klimaänderung eingestuft werden. Für das Gebiet von Deutschland zeigte sich eine Schwankungsbreite der projizierten Niederschlagsänderungen von -6 % bis +8 %. Die Änderungen der langjährigen monatlichen Niederschlagssummen weisen kein eindeutiges Muster auf und sind von einer hohen Variabilität gekennzeichnet. Räumlich zeigen sich im Nordosten und Westen bis hinein nach Thüringen Niederschlagsabnahmen und für das verbleibende Gebiet Deutschlands leichte Niederschlagszunahmen. Bei den ebenfalls betrachteten meteorologischen Variablen Windgeschwindigkeit, Wolkenbedeckungsgrad und Höhe der atmosphärischen Grenzschicht sind die erfassten langjährigen mittleren Änderungen äußerst gering und zeigen allenfalls Änderungstendenzen, jedoch keine signifikanten Änderungen auf.

Chemie-Transport-Modellierung: Evaluierung der Modellergebnisse

Die chemische Modellierung und Bewertung des Einflusses von klimatischen sowie energiepolitischen Änderungen auf die PM10- und Ozon-Luftqualität in Deutschland war ein zentrales Ziel des Projekts KLENOS. Dazu wurde das Chemie-Transport-Modell REM CALGRID (RCG) mit den modellierten meteorologischen Datensätzen des Regionalen Klimamodells COSMO CLM gekoppelt und zur Simulation der Luftschadstoffentwicklung unter dem Einfluss des Klimawandels und energiepolitischer Änderungen (Emissionsszenarien) für eine 30-jährige Vergangenheits- (1976–2005) sowie eine 30-jährige Zukunftsperiode (2021–2050) angewendet.

Das RCG wurde in zwei Skalen angewandt: Europa und Deutschland. Die Europaskala beschreibt ein Modellgebiet, das ganz West- und Südeuropa sowie einen Großteil Nord- und Osteuropas umfasst. Die Berechnungen in dieser Skala liefern die Schadstoffflüsse über die seitlichen und oberen Ränder des eigentlichen Untersuchungsgebietes Deutschland. Das Untersuchungsgebiet Deutschland wurde in einer Auflösung von circa 7 x 8 km² gerechnet. Die Randbedingungen für die europäische Skala wurden aus klimatologischen Konzentrationsanalysen abgeleitet und für die Vergangenheits- und Zukunftsperioden konstant gehalten. Außereuropäische Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Luftschadstoffkonzentrationen in Europa können dadurch nicht berücksichtigt werden.

Der eigentlichen Projektion der Luftschadstoffentwicklung vorgeschaltet wurden zwei Modellläufe für den Zeitraum 1976 bis 2005. Damit wurde untersucht, wie weit sich die Luftqualitätsberechnungen, die auf dem mit Reanalysedaten angetriebenen CCLM-Modelllauf (CCLM_ERA) beruhen von denjenigen unterscheiden, die mit dem von ECHAM6 angetriebenen Modelllauf (CCLM_EHIST) erstellt wurden. Es zeigte sich, dass die CCLM_EHIST-Meteorologie das Ozonbildungspotenzial im Vergleich zu der CCLM_ERA-Meteorologie unterschätzt, d. h. es wird weniger Ozon gebildet. Die stärkere Überschätzung des Niederschlages und stärkere Unterschätzung der sommerlichen Temperaturen von CCLM_EHIST im Vergleich zu CCLM_ERA tragen dazu bei, dass die CCLM_EHIST-Meteorologie ein geringeres Ozonbildungspotential beinhaltet als die CCLM_ERA-Meteorologie. Bei den NO₂- und den

PM10-Konzentrationen liefert die CCLM_EHIST-Meteorologie ebenfalls etwas geringere Konzentrationen als die CCLM_ERA-Meteorologie.

Chemie-Transport-Modellierung: Änderungen der Immissionen bis 2050 – Klimasignal

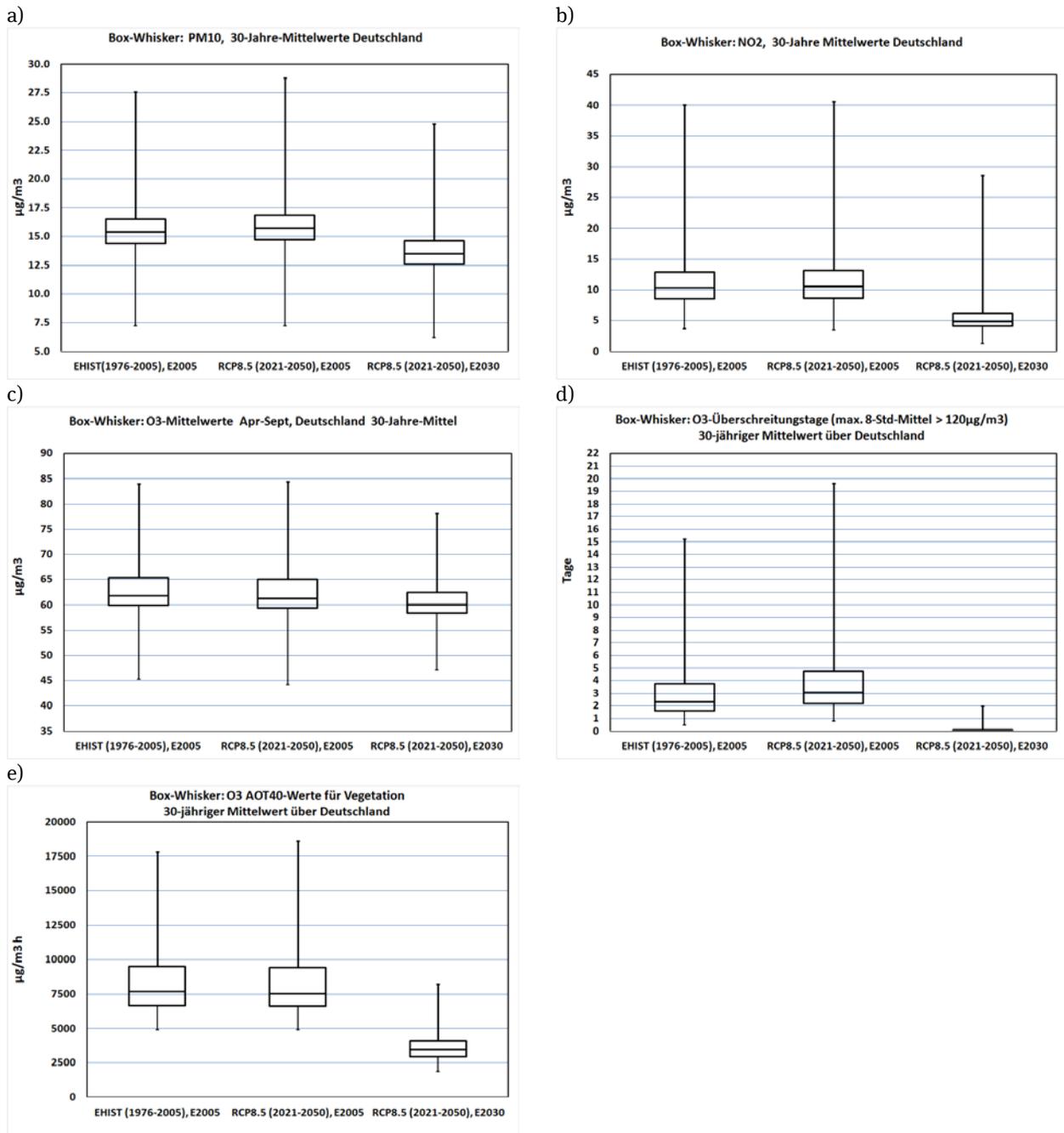
Das rein meteorologisch bedingte Klimasignal der Luftschadstoffentwicklung wurde ermittelt durch den Vergleich der RCG-Ergebnisse für den Referenzzeitraum 1976–2005, berechnet auf Basis der CCLM_EHIST-Meteorologie mit den Ergebnissen für den Projektionszeitraum 2021–2050, berechnet mit der so genannten CCLM_RCP85-Meteorologie. Die für alle berechneten Jahre als Eingangsgröße verwendeten Emissionen für den Referenzzeitraum und den Projektionszeitraum sind diejenigen des Jahres 2005, so dass die berechneten Änderungen vollständig auf die sich ändernden klimatischen Bedingungen zurückzuführen sind. Die Auswirkungen einer Klimaveränderung (projiziert vom CCLM für den Zeitraum 2021–2050 in Europa und Deutschland) auf die Konzentrationen von PM10 und NO₂ sind gering. Dies gilt in eingeschränktem Maße auch für Ozon, allerdings nicht für die Ozon-Auswertegrößen, die auf die Ozonspitzenwerte abheben. Die Änderung der PM10- und der NO₂-Jahresmittelwerte bewegen sich im 1 % bis 3 %-Bereich. Auch die Ozonmittelwerte von April-September, die Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Stunden-Mittel, die AOT40-Werte für Vegetation und die SOMO35-Werte ändern sich im langjährigen zeitlichen Mittel und im Mittel über Deutschland nur wenig. Allerdings zeigt eine flächenmäßige Auswertung, dass lokal größere Änderungen auftreten können als durch die zusammenfassende Auswertung impliziert wird. In Teilen von Brandenburg und Sachsen sowie in Südbayern erhöhen sich die AOT40-Werte im Projektionszeitraum im Vergleich zum Referenzzeitraum um bis zu 10 %. Ähnliches gilt für die zeitliche Mittelung: Selbst wenn sich im 30-jährigen Mittel kaum etwas ändert, so zeigt doch die Auswertung der gleitenden 5-Jahresmittel in einzelnen Perioden des Projektionszeitraums deutlich höhere AOT40-Werte als in vergleichbaren Perioden des Referenzzeitraumes.

Bei den Ozon-Überschreitungstagen (Tage mit einem maximalen gleitenden 8-Stunden-Mittel > 120 µg/m³) und den Ozon-Überschreitungssummen (Summe der Differenzen der täglich maximalen gleitenden 8-Stunden-Mittel > 120 µg/m³ und dem Schwellenwert 120 µg/m³) zeigt sich der Klimaeffekt bereits deutlich in der zeitlich und räumlich hoch aggregierten Auswertung. Nach der Projektion steigt die Anzahl der Überschreitungstage im 30-jährigen Mittel und im Mittel über die Fläche Deutschlands im Vergleich zum Referenzzeitraum um über 30 %. Die Überschreitungssumme, die nicht nur berücksichtigt, ob der Schwellenwert von 120 µg/m³ überschritten wird, sondern zusätzlich auch um wie viel er überschritten wird, erhöht sich sogar um mehr als 50 %. Lokal kann es sogar zu Erhöhungen um 100 bis 200 % kommen.

Bei den vorliegenden Auswertungen muss berücksichtigt werden, dass die mit dem Globalmodell ECHAM6 angetriebenen CCLM-Meteorologien, die zur Berechnung der Konzentrationen im Referenzzeitraum und im Projektionszeitraum verwendet wurden, ein geringeres Oxidantienbildungspotential aufweisen als die Evaluierungsmeteorologie CCLM_ERA. Es ist daher zu erwarten, dass der ermittelte Klimaeffekt für Ozon wahrscheinlich insgesamt unterschätzt wird. Dies gilt insbesondere für die auf einer Überschreitung von Schwellenwerten beruhenden Auswertegrößen. Eine quantitative Bewertung der Unterschätzung ist aber so unsicher, dass darauf verzichtet werden muss.

Ein weiterer Grund für die geringen Änderungen ist die innerjährliche Verteilung der Temperaturerhöhungen in den betrachteten Zeiträumen. Der meteorologische Vergleich des Referenzzeitraums (1976–2005) mit dem Projektionszeitraum (2021–2050) zeigt für das langjährige Mittel der Temperatur für Deutschland eine Zunahme um 0,8 K (Flächenmittelwert über Deutschland), mit den stärksten Zunahmen in den Wintermonaten und den schwächsten Zunahmen in den Sommermonaten, also in denjenigen Monaten in denen die Temperatur die Ozonbildung kontrolliert.

Abbildung II: Spannweite der 30jährigen Mittelwerte 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie mit Emission 2005) und 2021–2050 (CCLM_RCP8.5-Meteorologie mit Emission 2005 und Emission 2030). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für Deutschland. a) PM10-Jahresmittelwerte, b) NO₂-Jahresmittelwerte, c) O₃-Mittelwerte April bis September, d) Anzahl von Tagen mit einem maximalen gleitenden O₃-8-Stundenmittelwert > 120 µg/m³, e) O₃ AOT40-Werte für Vegetation



Chemie-Transport-Modellierung : Änderungen der Immissionen bis 2050 – Kombiniertes Klima- und Emissionssignal

Das kombinierte Klima- und Emissionssignal der Luftschadstoffentwicklung berücksichtigt neben den rein klimatologisch bedingten Auswirkungen zusätzlich die Auswirkungen der Emissionsänderungen im Zeitraum 2005 bis 2030. Dabei werden für den Referenzzeitraum die Emissionen des Jahres 2005 verwendet und für den Projektionszeitraum die prognostizierten Emissionen des Jahres

2030. In diesem Zeitraum nehmen die Ozonvorläuferemissionen NO_x und reaktive Kohlenwasserstoffe in Deutschland um fast 50 % bzw. 15 % ab. Die projizierte Abnahme der PM₁₀-Emissionen ist mit knapp 11 % geringer. Die Abnahme der Emissionen führt bei allen betrachteten Auswertegrößen zu Änderungen, die die durch das reine Klimasignal bewirkten Änderungen überdecken. Die PM₁₀- und NO₂-Jahresmittelwerte nehmen dabei um circa 10 % (Abbildung II-a) bzw. 50 % (Abbildung II-b) ab. Auch bei den Ozonauswertegrößen kommt es unter dem Einfluss der Minderung der Vorläuferemissionen zu Abnahmen, welche die durch das reine Klimasignal bewirkten Zunahmen durchweg aufheben. Die mittleren Sommer-Ozonkonzentrationen nehmen nach den Berechnungen im Mittel über Deutschland und auch regional unter dem Einfluss der prognostizierten Emissionsminderungen zwischen 2 % und 5 % ab (Abbildung II-c). Die stärksten Abnahmen werden bei den Ozonmetriken berechnet, die auf hohe Ozonkonzentrationen abheben (Ozon-Überschreitungstage: Tage mit einem maximalen gleitenden 8-Stunden-Mittel > 120 µg/m³, Abbildung II-d; AOT₄₀-Werte für Vegetation, Abbildung II-e).

Die in diesem Projekt erzielten Ergebnisse stimmen in der Tendenz überein mit anderen europäischen Studien zum Einfluss von Klimaänderungen auf die Luftqualität. Alle Studien zeigen, dass die durch ein sich änderndes Klima hervorgerufenen Ozonerhöhungen durch die prognostizierten Emissionsverminderungen in weiten Teilen Mitteleuropas aufgehoben werden. Die hier berechneten Emissionssignale zeigen ausschließlich die durch Änderung der europäischen und deutschen Emissionen bedingten Änderungen der Luftqualität. Tendenziell ansteigende hemisphärische Ozonkonzentrationen wie sie für das hier verwendete Szenario RCP8.5 zu erwarten sind, können einen Teil der ozonmindernden Wirkung der europäischen Emissionsprojektionen aufheben. Dies bedeutet, dass die hier berechneten positiven Auswirkungen einer Emissionsminderung auf die zukünftigen Ozonkonzentrationen durch steigende Hintergrundkonzentrationen abgeschwächt werden können.

Zusammenhang zwischen Wetterlagen und hohen Schadstoffkonzentrationen

Zusätzlich zu den Modellsimulationen wurde der Zusammenhang zwischen sehr hohen Schadstoffkonzentrationen an PM₁₀ und Ozon in der bodennahen Luftschicht und den vorherrschenden Wetterlagen untersucht. Dazu wurden aus langen Messreihen Tage mit Überschreitungen der Grenz- und Zielwerte für PM₁₀ und Ozon selektiert. Für PM₁₀ wurde der Tagesmittelgrenzwert von 50 µg/m³ und für Ozon der Zielwert von 120 µg/m³ für das Tagesmaximum der gleitenden 8-Stunden-Mittel verwendet. Dieser Gruppe wurden die objektiven Wetterlagenklassen (oWLK) des DWD zugeordnet. Dadurch konnte eine Verbindung zwischen hohen Schadstoffkonzentrationen und typischen Wetterlagen hergestellt werden. Unter der Annahme der Eineindeutigkeit lassen sich im Umkehrschluss aus langen Klimasimulationen die Auftretenshäufigkeit dieser Wetterlagen in der Zukunft und damit auch das Auftreten von Überschreitungstagen für PM₁₀ und Ozon abschätzen.

Die meteorologischen Kriterien zur Bestimmung der objektiven Wetterlagenklassen setzen sich aus der großräumigen Anströmrichtung (NO, SO, SW, NW, XX – unbestimmte Anströmung) der Luftmassen, den Zirkulationsformen der Atmosphäre (Zyklonalität, A - antizyklonal, Z - zyklonal) in 950 und 500 hPa sowie dem Feuchtegehalt (F - feucht, T - trocken) der Troposphäre zusammen. Die drei Indizes erlauben eine detailliertere Charakterisierung der Wetterlage. Für die Analyse möglicher klimatischer Änderungen und deren Bedeutung für zukünftige Überschreitungstage für PM₁₀ und Ozon wurde ein Datensatz mit diesen Wetterlagen von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) genutzt, der auf Grundlage von Modelldaten verschiedener Läufe globaler Klimamodelle unter den Emissionsszenarien A1B, B1 und A2 erstellt wurde. Die Auswertung der oWLK wurde aufgrund der starken Saisonalität von PM₁₀- und Ozon-Überschreitungstagen jeweils auf die Monate Dezember bis März (PM₁₀) und Mai bis August (Ozon) beschränkt. Der Zusammenhang zwischen Überschreitungstagen und Wetterlagen wurde sowohl für Gesamtdeutschland als auch für Teilgebiete untersucht. Die Abgrenzung der Teilgebiete erfolgte entsprechend der Häufigkeitsverteilung der Überschreitungen.

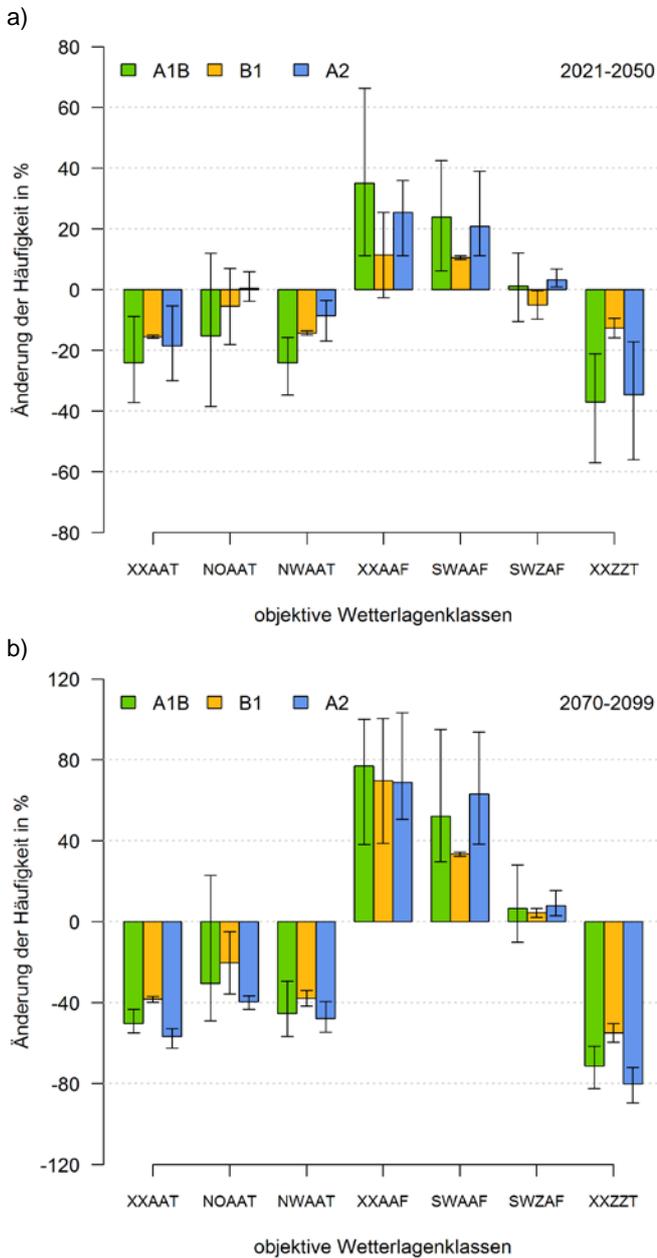
Überschreitungen des PM10-Grenzwertes treten vor allem bei trockenen Hochdrucklagen auf. Typische Wetterlagen sind XXAAT, NWAAT, NOAAT und XXZZT, die an 35 % aller Überschreitungstage vorherrschen. Nahezu dreiviertel aller an Überschreitungstagen auftretenden Wetterlagen haben den Feuchteindex „trocken“ (T). Wetterlagen mit antizyklonalem Index entweder in Bodennähe (950 hPa) oder in der mittleren Atmosphäre (500 hPa) machen jeweils 60 % aller Fälle aus.

Auch die Überschreitung des Ozon-Zielwertes tritt vor allem an Tagen mit hochreichenden antizyklonalen Verhältnissen auf, und an 88 % aller Überschreitungstage herrschen antizyklonale Verhältnisse in der mittleren Atmosphäre (500 hPa). Von den 40 Wetterlagenklassen treten die Lagen SWAAF und SWZAF besonders hervor. An einem Drittel aller Ozon-Überschreitungstage treten diese zwei Wetterlagen auf. Im Gegensatz zum Feinstaub dominieren im Sommer feuchte Wetterlagen (zwei Drittel aller Überschreitungswetterlagen). Diese sommerlichen Hochdrucklagen leiten feucht-warme Luft vor allem aus dem Südwest-Sektor nach Deutschland. Zusammen mit hohen Temperaturen und einer starken Einstrahlung führt das zu einer intensiven Ozonproduktion. Die zwei wichtigsten Ozon-Überschreitungswetterlagen SWAAF und SWZAF dominieren im östlichen Teilgebiet mit einer Häufigkeit von fast 40 % an Überschreitungstagen. Richtung Westen nimmt die Bedeutung der feuchten Wetterlagen ab und der antizyklonalen Verhältnisse in Bodennähe zu.

Für zwei Zeitscheiben (2021–2050 und 2070–2099) wurde die Änderung der Auftrittshäufigkeit ausgewählter Wetterlagen gegenüber der Referenzperiode 1961 bis 1990 dargestellt (Abbildung III). Die Änderungen sind Mittelwerte aus einem Ensemble von globalen Klimamodellen für die drei Emissionsszenarien A1B, B1, A2. Die trockenen Wetterlagenklassen XXAAT, NOAAT, NWAAT und XXZZT, die überdurchschnittlich häufig zu Überschreitungen des PM10-Grenzwertes führen, zeigen alle eine abnehmende Tendenz. Im Zeitraum 2021 bis 2050 hat die Schwankungsbreite über das Modellenensemble die gleiche Größenordnung wie das Änderungssignal, so dass bis Mitte des Jahrhunderts kein robustes Signal vorliegt. Für den Zeitraum 2070 bis 2099 bewegen sich die Änderungssignale für die Wetterlagenklassen XXAAT, NWAAT und XXZZT zwischen -40 und -70 % und sind deutlich größer als die Schwankungsbreite des Modellensembles. Das Szenario A2, welches der aktuellen Entwicklung der CO₂-Konzentration am nächsten kommt, zeigt zum Ende des Jahrhunderts das stärkste Änderungssignal. Die Abnahme der trockenen Wetterlagen erfolgt zugunsten einer Zunahme der feuchten Wetterlagen. Die Wetterlagenklassen SWAAF und SWZAF, die am häufigsten an Ozon-Überschreitungstagen auftreten, zeigen in der Zukunft unterschiedlich starke Änderungen. Während die Häufigkeit der Wetterlage SWAAF bis zum Ende des Jahrhunderts beim Szenario A2 im Mittel um ca. 60 % zunimmt, bleibt die Auftretenshäufigkeit der Wetterlage SWZAF unter Berücksichtigung des Schwankungsbereiches konstant. Auffällig ist, dass die Änderungssignale der feuchten Wetterlagen eine deutlich größere Spannbreite haben als die der trockenen Wetterlagen. Die Häufigkeiten der beiden trockenen Hochdrucklagen XXAAT und NWAAT, die jeweils 8 % Anteil an Ozonüberschreitungstagen hatten, nehmen bis zum Ende des Jahrhunderts im stärksten Szenario A2 jeweils um rund 50 % ab.

Die Ergebnisse zeigen, dass aus rein klimatischer Sicht die Wahrscheinlichkeit für Überschreitungen des Ozonzielwertes weiter zunimmt. Im Gegensatz dazu entschärft sich die Situation bei der Überschreitung des PM10-Grenzwertes infolge einer abnehmenden Häufigkeit trockener Wetterlagen im Winter. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass mit der Methode der Wetterlagenklassifikation ausschließlich der klimatische Einfluss auf die zukünftige Entwicklung der PM10- und Ozonkonzentrationen betrachtet wurde.

Abbildung III: Mittlere Änderung der Auftretenshäufigkeit von ausgewählten Wetterlagenklassen im Vergleich zu 1961-1990 an Tagen mit Überschreitungen von PM10-Grenz- und Ozon-Zielwerten. Die Mittelwerte beziehen sich auf das Ensemble der vorhandenen Modellläufe, die Fehlerbalken decken die Spannweite des Modellensembles ab – a) Änderungen für 2021–2050, b) für 2070–2099, für die SRES Szenarien A1B, A2 und B1.



Validierung der Chemie-Transport-Modellierung

Um die Unsicherheiten der RCG-Simulationen abschätzen zu können, wurde das Jahr 2005 zusätzlich mit dem Modellsystem COSMO-MUSCAT sowohl für die CCLM-Reanalyse-Antriebsdaten (CCLM_ERA) als auch für die CCLM_ECHAM6-Antriebsdaten (CCLM_EHIST) simuliert. Dabei konnten die Ergebnisse der RCG-Läufe im Wesentlichen bestätigt werden. Die räumlichen Muster der mittleren Konzentrationsverteilungen stimmten weitestgehend überein (Abbildung IV). Die Unterschiede in der Höhe der mittleren Jahreskonzentrationen für PM10, PM2.5 und NO₂ waren mit Werten $\leq 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ relativ gering und lagen damit im Bereich üblicher Schwankungen in Modellvergleichsstudien (Tabelle I).

Abbildung IV: Jahresmittel der PM10- und PM2.5-Konzentration 2005 für Deutschland. Links: Konzentrationsfelder mit dem Modell COSMO-MUSCAT berechnet. Rechts: Differenz zum Modell RCG. (Modellantrieb mit CCLM_ERA)

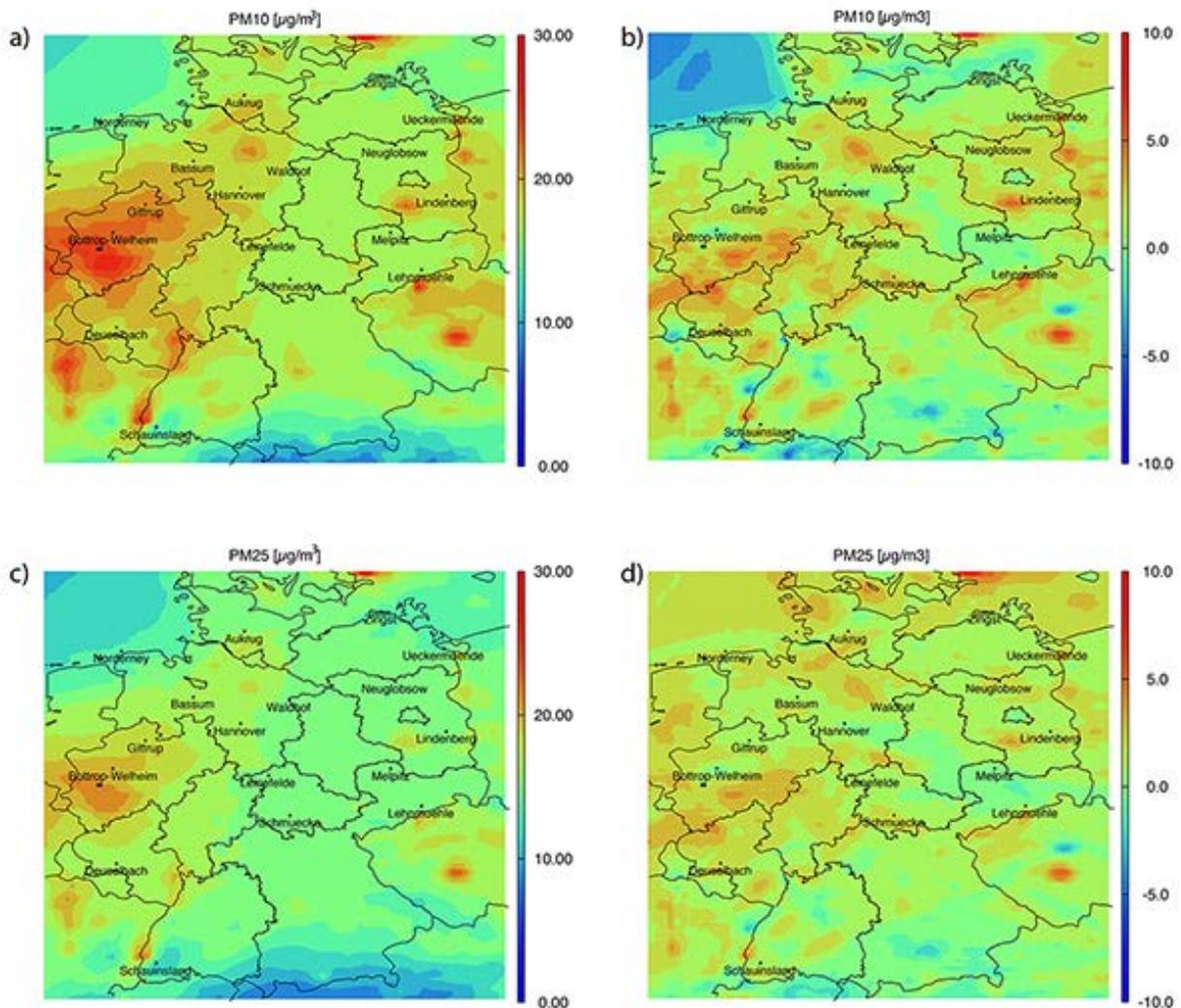


Tabelle I: Mittelwerte für PM10, NO₂ und Ozon für Deutschland (Modelle COSMO-MUSCAT und RCG mit CCLM_ERA-Antrieb) und gemessene Stundenwerte an ausgewählten Messstationen für das Jahr 2005 (Für Ozon wurde die Statistik nur für das Sommerhalbjahr (April – September) erstellt.).

Modelllauf	PM10	NO ₂	O ₃ (8h-MW)
Messung	18,7	11,7	79,4
COSMO-MUSCAT	17,4	9,9	78,7
RCG	16,1	11,9	75,5

Bei Ozon wurden durch COSMO-MUSCAT für das Sommerhalbjahr 2005 um ca. 10 µg/m³ höhere Konzentrationen simuliert. Der Vergleich mit Messungen zeigte eine Überschätzung der Konzentrationen.

onen während der Nachtstunden. Vergleicht man anstelle der Tagesmittelwerte die 8h-Mittel so liegen RCG und COSMO-MUSCAT im selben Bereich. Die CCLM_EHIST Simulation für 2005 beschreibt “nur“ ein statistisches Jahr im 30-jährigen Referenzzeitraum 1976–2005. Ein Vergleich mit Messungen oder den CCLM_ERA-Ergebnissen, die das reale Jahr 2005 beschreiben, erscheint zunächst wenig sinnvoll. Umso mehr überrascht daher die relativ gute Übereinstimmung der meteorologischen Jahresmittelwerte und der Konzentrationsverteilungen zwischen den mit CCLM_ERA angetriebenen und den mit CCLM_EHIST angetriebenen COSMO-MUSCAT-Simulationen. Die Unterschiede zwischen beiden Modellläufen sind für beide Chemie-Transport-Modelle sehr ähnlich. Insgesamt werden die RCG-Ergebnisse und damit die Aussagen dieser klimatologischen Studie durch die COSMO-MUSCAT-Simulationen gestützt. Viel größere Unsicherheiten liegen einerseits in den globalen Klimasimulationen mit ECHAM6 und andererseits im angenommenen Emissionsszenario.

Weiterhin wurden für zwei ausgewählte Episoden detailliert Ursachen und Wirkungsmechanismen untersucht, die zu hohen Belastungen an PM10 oder Ozon geführt haben. Dabei wurde der Einfluss des Ferntransports und einzelner meteorologischer Kenngrößen (Mischungsschichthöhe, Feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Sonneneinstrahlung) auf die Schadstoffkonzentrationen analysiert. Wie bereits andere Studien gezeigt haben, entstehen Episoden mit starker Schadstoffbelastung durch die Kombination von typischen meteorologischen Bedingungen und hohen Emissionen. Meist treten sie bei Schwachwind- und Inversionswetterlagen nach längeren Trockenperioden auf. Dies war auch bei den beiden hier analysierten Episoden der Fall.

Während der ersten Periode Anfang Februar 2010 kam es in Deutschland großflächig zu PM10-Konzentrationen von über $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dies führte nicht nur in den Ballungsräumen zur Überschreitung der Grenzwerte. Die hohe Partikelbelastung entstand nach starkem Ferntransport aus Osten mit anschließender Stagnationsphase (Schwachwind), in der eine weitere Aufladung durch lokale Emissionen erfolgte. Dabei war insbesondere die sekundäre Bildung anorganischer Partikelmasse (z. B. Sulfat, Nitrat, sekundäres organisches Aerosol) unter feucht-kalten Bedingungen dominant. Hingegen wurde die starke Ozon-Belastung während der zweiten Episode Ende Mai 2010 maßgeblich durch das typische Zusammentreffen von tagelanger intensiver Sonneneinstrahlung, Trockenheit, hohen Temperaturen und schwachem Wind verursacht. Unter diesen Bedingungen kommt außerdem eine erhöhte Emission biogener Kohlenwasserstoffe hinzu, die verstärkend in die Ozonbildung eingreifen.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Projekt KLENOS wurde mit drei verschiedenen Untersuchungsansätzen der Einfluss von Klimawandel und von Emissionsänderungen infolge energiepolitischer Maßnahmen auf die Entwicklung der Luftschadstoffe PM10 und Ozon untersucht und abgebildet. Die Ergebnisse zeigen, dass bis 2050 energiepolitische Maßnahmen einen größeren Einfluss auf die Konzentrationsentwicklungen von PM10 und Ozon haben als die Klimaänderungen in diesem Zeitraum. Damit eröffnet sich ein großer Handlungsspielraum, um mit einer deutlichen Reduktion der Emissionen wie in den angenommenen Szenarien die Luftqualität dauerhaft zu verbessern und die Zahl von Überschreitungen der PM10-Grenzwerte und Ozon-Zielwerte zu reduzieren. Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass sich ohne Emissionsreduktionen das Risiko, z. B. zu hoher Ozonkonzentrationen, infolge des anthropogenen Klimawandels stetig erhöht. Der Sommer 2015 war ein Beispiel und steht stellvertretend dafür, welche Temperaturen in Zukunft immer häufiger zu erwarten sein werden und wie diese zu langanhaltend großräumigen Überschreitungen der Ozonzielwerte führen. In diesem Zusammenhang ist speziell die Entwicklung biogener VOC-Emissionen von Bedeutung, die bei steigenden Temperaturen ebenfalls zunehmen. Häufige und vor allem lange Episoden hoher Ozonkonzentrationen infolge einer zunehmenden Persistenz von Wetterlagen verursachen zusätzlich relevante Schäden an landwirtschaftlichen Kulturen und Wäldern.

In KLENOS wurde bei der gekoppelten Klima- und Chemie-Transport-Modellierung der zukünftige Zeitraum von 2021 bis 2050 betrachtet, da das erforderliche Emissionsszenario nur bis zum Jahr 2030 reichte. Jedoch tritt das Klimasignal in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts wesentlich stärker und robuster in Erscheinung. In weiterführenden Untersuchungen ist eine Erweiterung des Zeithorizontes bis 2100 empfehlenswert. Die Verwendung unterschiedlicher Modellläufe und Klimaszenarien in Form von Ensemblesimulationen würde weiterhin ermöglichen, Unsicherheiten zu quantifizieren und Aussagen über die Bandbreite der zu erwartenden Veränderungen des Klima und der Luftqualität zu treffen. Um globale Einflüsse auf die Luftqualität in Deutschland zu berücksichtigen, sollten folgende Simulationen mit sich ändernden troposphärischen Ozonhintergrundkonzentrationen, z. B. aus einem globalen Chemie-Transport-Modell, durchgeführt werden.

Die Evaluierung der Klimamodellergebnisse hat, insbesondere bei den modellierten Niederschlägen, einen großen Bias in den Simulationsergebnissen aufgezeigt, der sich ungünstig auf die nachfolgende Chemie-Transport-Modellierung auswirkt. So stellt der Niederschlag eine Senke für PM₁₀ dar. Die aufgezeigte Unterschätzung der Temperaturen sowie die Überschätzung von Wolkenbedeckungsgrad und Feuchte führten zu einem zu geringen Ozonbildungspotenzial bei den mit dem Globalmodell ECHAM6 angetriebenen Modellläufen. Im Projekt KLENOS wurde bewusst auf die Anwendung von sogenannten Biaskorrekturen für einzelne meteorologische Variablen verzichtet, um den physikalischen Zusammenhang zwischen den Variablen zu erhalten, der in anschließenden Modellsimulationen notwendig ist. Die Entwicklung einer Methodik zur gleichzeitigen Biaskorrektur physikalisch voneinander abhängiger Variablen wäre somit ein wichtiger Beitrag zur Verwendung von Regionalmodellergebnissen in der Impaktmodellierung.

Infolge der großen Bedeutung von Extremereignissen (z. B. lange Trockenheit im Sommer 2003, Inversionswetterlage im November 2011) muss einerseits analysiert werden, ob diese zukünftig häufiger auftreten. Dazu könnten nicht nur eigene Klimasimulationen, sondern auch andere verfügbare Klimadatensätze, herangezogen und mit den innerhalb des Projekts entwickelten Methoden untersucht werden. Andererseits muss das Verständnis der Mechanismen und Wechselwirkungen zwischen Meteorologie, Ökosystem und anthropogenen Emissionen weiter vertieft werden. Nur damit lassen sich geeignete Gegenmaßnahmen ableiten, um die hohen Umweltbelastungen zu vermeiden. Mittelfristig muss auch an der numerischen Vorhersage von Extremereignissen gearbeitet werden.

Änderungen der Landnutzung, der Bebauung und von Ökosystemen (z. B. Renaturierung von Tagebauen) beeinflussen das regionale Klima sowie die Luftqualität – Luftschadstoffe werden in Ökosystemen deponiert, biogene Emissionen tragen zur Bildung von Ozon und SOA bei. Die Untersuchung des Einflusses und der Wechselwirkungen dieser Prozesse könnte weiterhin ein Schwerpunkt zukünftiger Forschungsprojekte sein.

Summary

High concentrations of air pollutants are well known for their negative impacts on human health. Especially ground-level ozone and particulate matter (PM) have a high health threat potential. Above-average ozone concentrations occur especially during summer due to photochemical properties of ozone. Sinks of ozone are on the one hand photolysis (= light decomposition) and on the other hand dry deposition. The residence time of ozone ranges from few days in the planetary boundary layer up to several weeks in the free troposphere. The influence of meteorological variables on ozone is diverse. Ozone concentrations at ground level are dependent on temperature, solar radiation, cloud cover, wind speed and thickness of the mixing layer. The strongest correlation exists between ozone and temperature. Ozone increases with increasing temperatures in urban and rural environments. High ozone concentrations show a marked seasonality and occur with great frequency in the summer months.

PM is one of the aerosols and which may be divided into primary and secondary aerosols. Primary aerosols are emitted directly into the atmosphere, and secondary aerosols are formed by chemical reactions from gaseous substances. PM consists of a multitude of groups of substances and contains mainly sulphate, nitrate, organic carbon, soil particles and sea salt. High PM pollutions can occur during the whole year and are mainly minimized by precipitation. More important than precipitation intensity is its frequency. The residence time of PM reaches, similar to ozone, from a few days in the planetary boundary layer up to several weeks in the free troposphere. The correlation of particulate matter with meteorological variables is weaker than for ozone, because of the different particulate components, the complex coupling with the water cycle and different effects, which influence and compensate each other. There is a clear correlation between PM pollution and the occurrence of low exchange weather conditions.

By the end of the 21st century, sustainable climate changes are expected. Depending on socio-economic development and climate policy measures in the future, the scenarios of greenhouse gas emissions vary widely. The scenarios studied by the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) range from severe climate protection to unmitigated emissions and point to a warming of global average surface temperature by 0.9 to 5.4 °C at the end of the 21st century compared to preindustrial conditions. The problems associated with global warming effects and its impacts on the environment and society can be more dramatic on the regional than on the global scale. Changes of the ranges of value and of the characteristics of meteorological variables that are associated with air pollution will probably lead to changes of the frequency of air pollution episodes and of the ozone and PM concentrations. Several studies with coupled GCM CTM models (Global Circulation Model-Chemical Transport Model) show an increase in ozone concentration due to temperature rise in the mid-latitudes in the future. While the change signal of temperature is very robust in various climate projections, projected precipitation changes show considerable spatial and seasonal differences for Central Europe. High temporal and spatial variability of precipitation and the associated uncertainties in its simulation are the reasons for this difference.

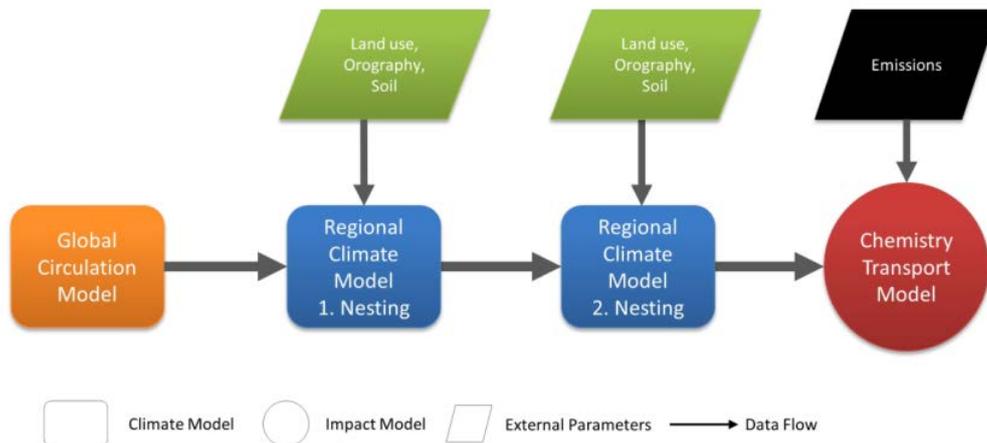
Based on expected climate changes and the link between climate change, emission policies and air quality arises the question of the impact of future climatic and emission policy changes on air quality. In the present study, this question will be pursued by three different study approaches.

Study approaches

The first approach involves the numerical modelling of future concentrations of ozone and PM₁₀ for the whole territory of Germany based on a selected climate scenario. The chemical transport model REM CALGRID (RCG) was forced by the Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM) (figure 1). The simulations of changes in air pollutants under the influence of climate and energy policy (emission scenarios) changes was carried out for two 30-year periods, one in the past (1976–2005) and one in

the future (2021–2050). On the one hand, emissions in 2005 and on the other hand projected emissions in 2030 were used as input data to illustrate the impact that might have climate change and climate policy (in terms of forecasted reduced emissions in 2030) on air pollutant concentrations.

Figure I: Schematic representation of the model chain.



The second study approach focuses on the link between occurrence of typical weather conditions and high concentrations of ozone and PM10. Climate change is accompanied by changes in the atmospheric circulation. For the past years, a change in the frequency of occurrence of certain weather conditions was observed for the area of the Federal Republic of Germany. The future frequency of ozone and PM10 exceedance days can be derived based on the relation between high air pollution levels and weather type for the past and the future frequencies of the occurrence of weather types determined from climate projections.

The third study approach includes high-resolution (spatially and temporally) transport simulations with the model system COSMO-MUSCAT for selected episodes of high concentrations of air pollutants. Through the direct coupling between climate and chemical transport model, smaller temporal and spatial meteorological fluctuations can be taken into account for the dispersion calculation. Simulations with the model system COSMO-MUSCAT pursue two objectives: (i) Validation of the RCG results (ii) Analysis of the influence of meteorological conditions on high concentrations of pollutants. The statistical relation between certain weather conditions and the concentration of air pollutants (from the second approach) was reviewed by a numerical simulation. Two episodes were re-modelled, and a detailed analysis of the effect of individual meteorological parameters (mixing layer height, air humidity) and flow pattern on the pollutant concentrations was carried out. It was investigated which mechanisms and interactions affect high concentrations of pollutants.

Climate modelling: Evaluation of model results

The regional climate model CCLM (COSMO-Climate Local Model) was used as meteorological driver for the chemical transport model RCG (REM CALGRID) and applied for Europe and Germany. Two model runs were carried out for the reference period from 1976 to 2005 and for the two model regions. For the projection period from 2021 to 2050, one model run was carried out. Both model runs of the reference period differ in their forcing – first reanalysis data and then data of the global climate model ECHAM6. Reanalysis data can be considered as quasi observations and can therefore be used to evaluate the quality and efficiency of the regional climate model. In contrast, the data from ECHAM6 constitute a "free" climate run of the reference period without any adjustment. The run of

the projection period was forced by data of ECHAM6 with the IPCC climate scenario RCP 8.5. This scenario is characterized by further increasing greenhouse gas emissions assuming population growth, low rate of technology development, no additional implementation of climate policies and heavy reliance on fossil fuels.

The model results for Europe and Germany were evaluated by comparisons with interpolated observation data based on time series from weather stations. Both model runs show for Europe and the period 1976–2005 an underestimation of the long-term temporal and spatial means of almost 1 K, whereby the spatial pattern of the long-term mean temperatures for Europe are well reproduced. The high mountain regions show the greatest temperature deviations. The reanalysis driven model run underestimates rather winter temperatures than summer temperatures. In contrast, the summer temperatures are more underestimated than the winter temperatures in the ECHAM6 driven model run. Precipitation is overestimated by the two model runs for wide areas of Europe. Long-term average deviations add up to 13 % for the reanalysis driven model run and up to 54 % for the ECHAM6 driven model run. However, it must be noted that the observed precipitation data are not corrected for wind-induced errors and therefore, in practice, should be about 20 % higher on average. This puts into perspective the high rainfall deviation somewhat, but nevertheless precipitation is clearly assessed as too high by the ECHAM6 driven model run. Both model runs have smaller deviations of precipitation in summer than in winter.

The evaluation of the climate model runs for the territory of Germany also showed an underestimation of long-term average temperatures of 1.1 K for the reanalysis driven model run and 0.8 K for the model run driven by ECHAM6. Similar to the simulations for Europe, the reanalysis model run underestimates the winter months more than the summer months, and the ECHAM6 model run shows smaller deviations in winter than in summer. The spatial patterns are well reproduced. Both model runs for Germany also overestimate precipitation with 22 % and 56 % respective. The summer months are better reproduced than the winter months. The observed precipitation data, which serves for comparison, are not corrected for wind-induced error. Thus, model deviations are slightly smaller in reality for the territory of Germany.

Wind speed at 10 m height was evaluated in addition to precipitation and temperature, because of its great importance for the dispersion of air pollutants. Stations of the German Weather Service distributed over Germany served as a reference. Both model runs represented wind speed for the stations located in eastern lowlands (1976–2005) best. The model run forced by ECHAM6 tends, compared with the reanalysis driven run, to higher positive deviations. General temporal patterns of deviations are not recognizable, but often differences between winter and summer were found.

Climate modelling: Climatic changes to 2050

The climatic change signals for Germany were determined by comparing the model runs of the reference period and of the projection period. The temperature shows the clearest change signal with a long-term area mean of 0.8 K for Germany. The increase was found in all months, most pronounced in the winter months. The long-term mean changes in precipitation of about 1.3 % are very low and cannot be classified as a significant climate change signal in view of the high degree of uncertainty in rainfall modelling. For the area of Germany, projected precipitation changes vary from - 6 % to + 8 %. The changes in the long-term monthly rainfall totals have no clear pattern and are characterized by high variability. The north-eastern and western parts of Germany as well parts of Thuringia show precipitation decreases, whereby the remaining area of Germany show slight increases. The long-term mean changes of wind speed, cloud coverage and height of the atmospheric boundary layer are minimal. They show slight tendencies, but no significant changes.

Chemistry-transport modelling: Evaluation of model results

The chemical modelling and the evaluation of the influence of climate and energy policy changes onto PM10 and ozone concentrations in Germany was a key objective of the project KLENOS. The chemical transport model REM CALGRID (RCG) was coupled with the modelled meteorological records of the regional climate model COSMO CLM to simulate the fate of air pollutants under the influence of climate and energy policy changes (emission scenarios) for two 30-year periods (1976–2005 and 2021–2050).

RCG was applied for the European and the German scale. The European scale describes a model area that includes western and southern Europe as well as main parts of northern and eastern Europe. The calculations in this scale provide air pollutant fluxes for the side and top edges of the actual investigation area Germany with a spatial resolution about 7 x 8 km². The boundary conditions for the European scale were derived from an analysis of climatological concentration and were kept constant for the past and future. Non-European impacts of climate change on the concentrations of air pollutants in Europe cannot be considered, therefore.

Two model runs were conducted for the period 1976–2005 before the simulation of projections of air pollutant development. It was examined, how far the air quality calculations based on reanalysis data driven CCLM (CCLM_ERA) differ from those of the ECHAM6 driven model run (CCLM_EHIST). It was found that the CCLM_EHIST meteorology underestimates the ozone forming potential in comparison to the CCLM_ERA meteorology, i.e. less ozone is formed. The stronger overestimation of precipitation and the greater underestimation of summer temperatures of CCLM_EHIST compared to CCLM_ERA are important reasons for lower ozone forming potential. Also for NO₂ and PM10 concentrations, the CCLM_EHIST meteorology produced slightly lower concentrations than the CCLM_ERA meteorology.

Chemistry-transport modelling: Changes of Immission to 2050 – Climate signal

The purely meteorologically induced signals of air pollutant concentrations were calculated by referencing the RCG results of the period 2021–2050 (CCLM_RCP85 meteorology) to the period 1976–2005 (CCLM_EHIST meteorology). The emissions of the year 2005 were used as input variable for 1976–2005 and 2021–2050. Thus, changes are entirely attributable to changing climatic conditions. The effects of climate change on the concentrations of PM10 and NO₂ are small. This does also apply to a limited extent for ozone, but not to the ozone variables regarding ozone peak values. Changes of annual mean values of PM10 and NO₂ amount to around 1 % and 3 %. In addition, the long-term and areal-averaged ozone concentrations from April to September, the maxima of the daily moving ozone 8-hour mean, the AOT40 values for vegetation and the SOMO35 values change only slightly for Germany. However, the areal analysis has shown that changes can be greater at the local scale. In parts of Brandenburg, Saxony and southern Bavaria increases of the AOT40 values up to 10 % were projected for the future. The same applies to temporal averaging. Even if changes are very small in the 30-year average, the analysis of sliding 5-year averages illustrates that periods with significantly higher AOT40 values than in the reference period can occur.

Analysing the ozone exceedance days (days with a maximum of gliding 8-hour mean > 120 µg/m³) and the ozone exceedance totals (sum of the differences of the maximum of gliding 8-hour mean > 120 µg/m³ and the threshold 120 µg/m³), the climate effect already gets evident in the highly temporally and spatially aggregated analysis. In the future, the number of exceedance days increases by more than 30 % (30-year average, spatial average of Germany). The ozone exceedance totals, which not only take into account whether the threshold of 120 µg/m³ is exceeded but also the exceeded amount, increased by more than 50 %. Relative changes of this index are more pronounced in southern Germany than in the other two climatic regions. Locally, even increases between 100 and 200 % are projected.

In the present analysis, it must be considered that the ECHAM6 driven CCLM meteorology that was applied to calculate the concentrations in the reference and projected period had a lower oxidant

forming potential than the meteorology from CCLM_ERA. This supports the assumption that the detected climate effect is probably underestimated for ozone, especially for parameters calculated on the basis of the exceedances of limit values. A quantitative assessment of this underestimation is very uncertain and will therefore be waived.

Another reason for the small changes is the inner-annual distribution of temperature increases. The comparison of the projection period (1976–2005) and the reference period (2021–2050) shows a long-term temperature increase of 0.8 K for Germany, with the highest increases in the winter months and the weakest increases in the summer months, when temperature controls the ozone formation.

Chemistry-transport modelling: Changes of Immission to 2050 – Combined climate and emission signal

The combined climate and emission signal of air pollutants considers besides the climatological related impacts also the effects of emission changes between 2005 and 2030. The emissions of 2005 are used for the reference period and the projected emissions in 2030 for the projection period. The emissions of ozone precursors NO_x and reactive hydrocarbons are projected to decline by almost 50 % and 15 % in Germany, respectively. The projected decrease in PM₁₀ emissions is lower (11 %). The decrease of emissions leads to changes which are more pronounced than the climatic induced changes. Annual mean values of PM₁₀ and NO₂ decrease by 10 % (figure II-a) respectively 50 % (figure II-b). The reduction of precursor emissions leads to reduced values of the chosen ozone indices, which overturn the climatologically induced increases. The mean ozone summer concentrations decrease over Germany and regional between 2% and 5% (figure II-c). Strongest decreases were simulated for the high-concentrations-ozone-metrics (see figures II-d and II-e).

The found results and tendencies are consistent with other European studies on the influence of climate change on air quality. All studies show that climatic induced increases of ozone concentrations will be repealed by the predicted emission reductions in many parts of Central Europe. The results of this project only show the changes of air quality as a consequence of emission changes in Germany and Europe. Tendency rising hemispheric ozone concentrations as would be expected for the scenario RCP8.5 may pick up partly the ozone-reducing effect of European emission reductions. This means that the calculated positive effects of emission reduction on future ozone concentrations can be diminished by rising background concentrations.

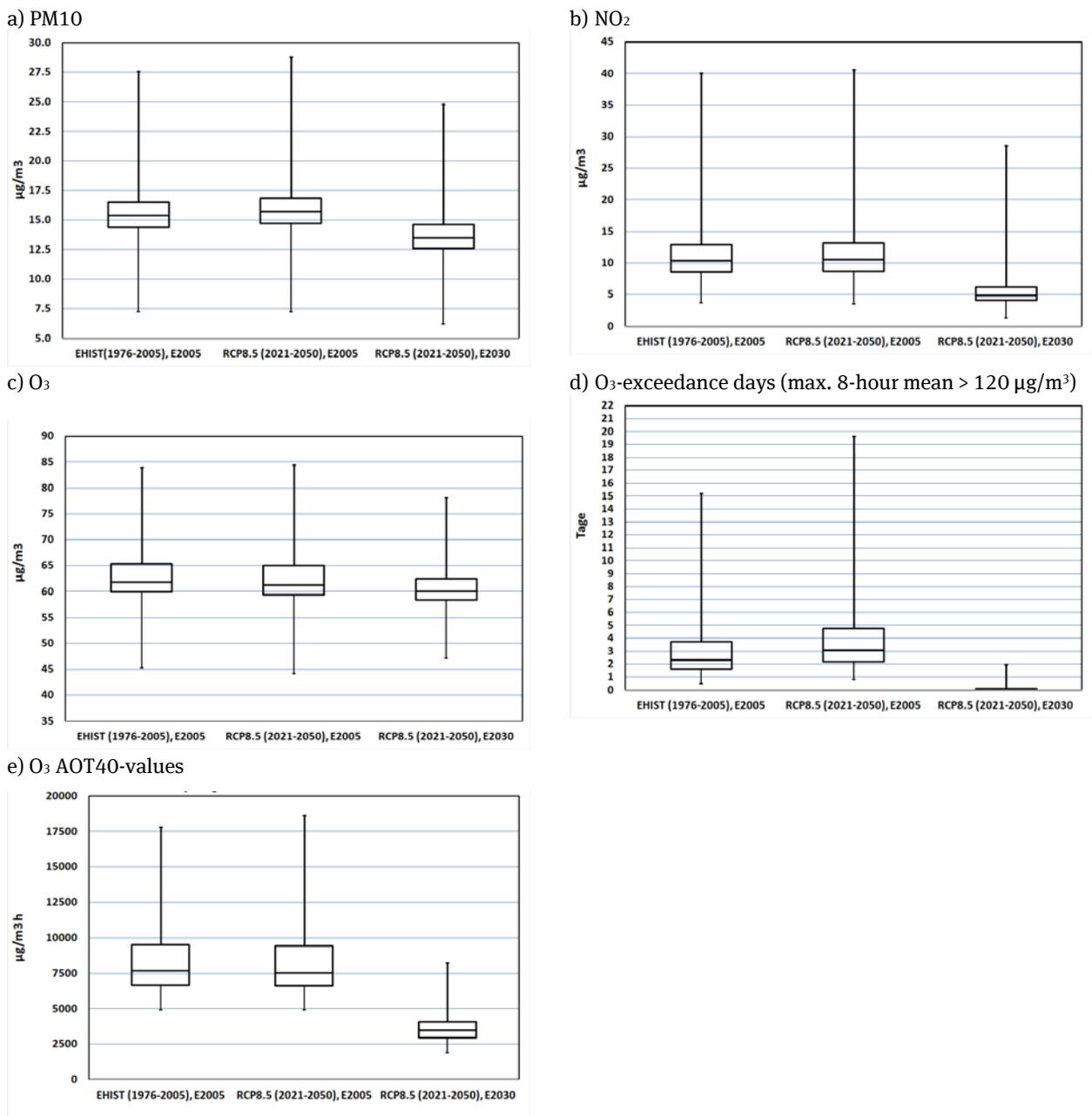
Relationship between weather types and high pollutant concentrations

In addition to the model simulations the relation between high concentrations of air pollutants (PM₁₀, ozone) and pre-ailing weather conditions were analysed. Therefore, days with exceedances of the limit and target values for PM₁₀ and ozone were selected from long time series. Daily guideline values of 50 µg/m³ for PM₁₀ and 120 µg/m³ (maximum 8-hour mean) for ozone were used. To this group of exceedance days the objective weather types of DWD were assigned. Thus, a relation between high pollutant concentrations and typical weather conditions was established. The future frequency of these exceedance weather types was estimated with long climate simulations and the general development of the frequency of exceedance days for PM₁₀ and ozone was concluded.

The meteorological criteria for the determination of the objective weather types are the advection of air masses (NO, SO, SW, NW, XX - indefinite flow), the cyclonality (A - anticyclonic, C - cyclonic) in 950 and 500 hPa, and the humidity of the troposphere (F - wet T - dry). The three indices allow a detailed characterization of the weather conditions. For the analysis of possible climatic changes and their implications for future exceedance days of PM₁₀ and ozone, a data record of weather types of the Federal Institute of Hydrology (BfG) was used. This data record was determined based on global climate model data under the emission scenarios A1B, B1 and A2. The analysis of oWLK was limited to

the months of December to March (for PM10) and May to August (for ozone) due to the strong seasonality of the frequency of exceedance days. The relation between exceedance days and weather types was studied for Germany and subareas. The subareas were derived according to the temporal occurrence of exceedances (frequency distribution).

Figure II: Range of 30 year averages 1976–2005 (CCLM_EHIST meteorology with emission 2005) and 2021–2050 (CCLM_RCP8.5 meteorology with emission 2005 and emission 2030). The box-and-whisker plots show the minimum and maximum value, the 1st quartile, the median and the 3th quartile of raster data for Germany.
 a) PM10-yearly average value, b) NO₂-yearly average value, c) O₃-average April to September, d) Number of days with max. O₃-8-hour mean > 120 µg/m³, e) O₃ AOT40-values for vegetation



Exceedances of the PM10 limit value occur mainly under anticyclonic weather conditions, especially during the weather types XXAAT, NWAAT, NOAAT and XXZZT. They represent 35 % of all exceedance

weather types. Almost three-quarters of all weather types occurring at exceedance days have the humidity index "dry" (T). Weather conditions with anticyclonic index either at ground level (950hPa) or in the middle atmosphere (500 hPa) account for 60 % of all cases, respectively.

The exceedance of the ozone target value also occurs especially on days with high reaching anticyclonic conditions. On 88 % of all exceedance days, anticyclonic conditions prevail in the middle atmosphere (500 hPa). Of the 40 weather types SWAAF and SWZAF dominate. One third of all exceedance days belong to these two weather types. In contrast to PM₁₀, in summer humid weather types dominate (two-thirds of all exceeding weather types). These anticyclones lead moist, warm air mainly from the Southwest sector to Germany. Together with high temperatures and solar irradiation, this leads to intense ozone production. The two most important weather types on ozone exceedance days, SWAAF and SWZAF dominate in the eastern subarea with almost 40 % of all cases. In the west direction, the importance of wet weather types decreases and of anticyclonic conditions at ground level increases.

For two time slices (2021–2051 and 2070–2099), frequency of selected weather types was compared to the reference period 1961–1990 (figure III). The change signals are averages of an ensemble of global climate models for the three emission scenarios A1B, B1, A2. The dry weather types XXAAT, NOAAT, NWAAT and XXZT, which very often lead to the exceedance of PM₁₀ limit value, show a decreasing tendency. In the period 2021–2050, the variation of the ensemble has the same magnitude as the change signal, so that by mid-century there is no robust change signal. For the period 2070–2099, the change signals for the weather types XXAAT, NWAAT and XXZT lie between -40 % to -70 % and are significantly greater than the variability of the model ensemble. The scenario A2, which is the most similar to the current development of CO₂ concentration, shows the strongest change signal by the end of this century. The decrease of dry weather types takes place in favour of an increase of wet weather types. The weather types SWAAF and SWZAF, which most frequently occurred at ozone exceedance days, show different changes in the future. While the frequency of SWAAF until the end of the century under the scenario A2 increases by about 60 % on average, the frequency of weather condition SWZAF remains constant considering the variability. The change signals of wet weather types show a wider range than the change signals of the dry weather types. The frequencies of the two dry anticyclonic weather types XXAAT and NWAAT, which had 8 % share in the ozone exceedance days, decreases until the end of the century under the strongest scenario A2 by around 50 %.

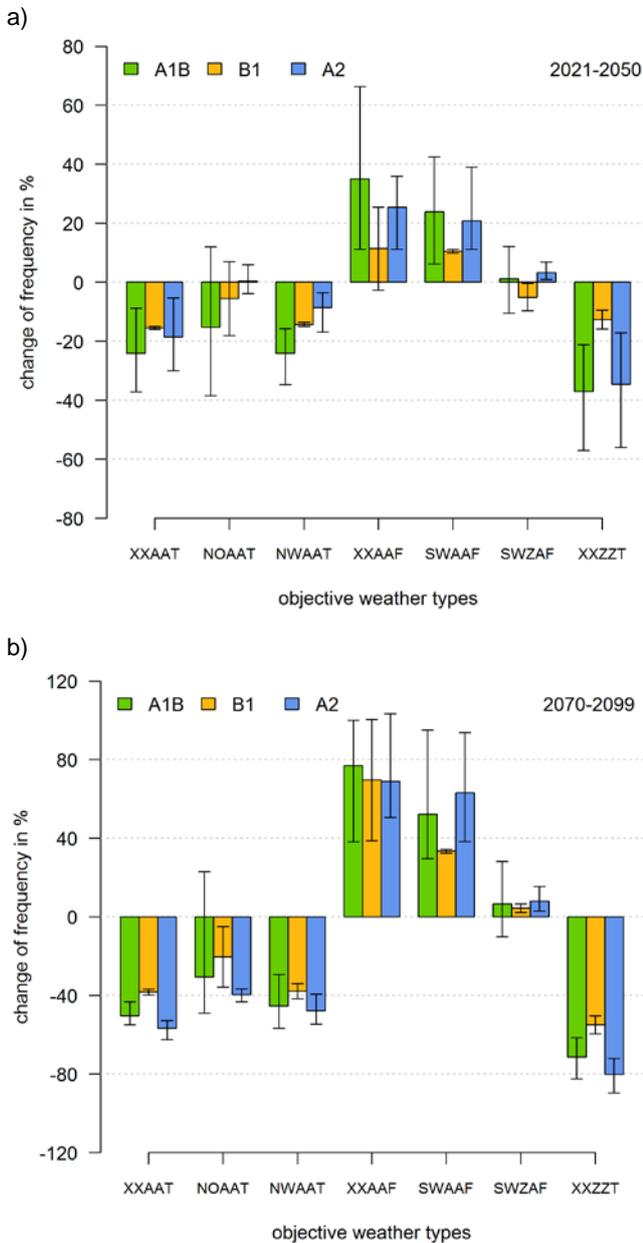
As a result, the exceedance probability of the ozone target value under continuously rising temperatures increases from a climate perspective. In contrast, less dry weather types defuse the situation regarding the exceedance of the PM₁₀ limit value in winter. When evaluating the results, one should note that with the application of the objective weather type classification only the climatic influence on the future development of PM₁₀ and ozone concentrations was considered.

Validation of the Chemistry-transport modelling

In order to estimate the uncertainty of the RCG CCLM simulations, the year 2005 was simulated by the model system COSMO-MUSCAT, driven by CCLM_ERA and by CCLM_EHIST. The results of the RCG results were essentially confirmed. The spatial pattern of the mean concentration distributions coincided largely (figure IV). The differences in the mean annual concentrations of PM₁₀, PM_{2.5} and NO₂ were relatively low (values $\leq 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and thus fell within the range of normal fluctuations in model comparison studies (table I). Higher concentrations (+10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) of ozone were simulated with COSMO-MUSCAT for the summer half of 2005. Comparing 8-hourly means instead of daily averages, RCG and COSMO-MUSCAT are in the same range. The CCLM_EHIST simulation for 2005 describes "only" one statistical year within the 30-year reference period. A comparison with measurements or CCLM_ERA results of the year 2005 seems to make little sense. Surprisingly, the agreement between

the COSMO-MUSCAT simulations driven by CCLM_ERA and CCLM_EHIST is relatively good. This applies to meteorological annual averages as well as to the distribution of pollutant concentrations. The differences between the two model runs are very similar for both chemistry-transport models.

Figure III: Mean change of frequency of selected weather types compared to 1961–1990 on days with exceedances of PM10 limit and ozone target values. The averages are calculated for an ensemble of the different model runs, the error bars cover the span of the model ensemble - a) changes for 2021–2050, b) for 2070–2099, for the SRES scenarios A1B, A2 and B1.



Overall, COSMO-MUSCAT simulations supported the RCG-results, and thus the statements of this climatological study. Much larger uncertainties arise from global climate simulations with ECHAM6 and the assumed emission scenario.

Furthermore, causes and action mechanisms have been studied for two selected episodes, which cause periods of high exposure of PM10 and ozone. The influence of long-range transport and single meteorological parameters (mixing layer height, humidity, wind speed, solar radiation) on pollutants concentrations was analysed. As other studies have shown, such episodes develop by the combination of certain meteorological conditions and high air pollutant emissions. They usually occur under conditions of low-wind and temperature inversion after a drought episode. This was also the case for the two analysed episodes.

Figure IV: Annual average of PM10- und PM2.5 concentration for 2005 and Germany. Left side: concentrations simulated with COSMO-MUSCAT. Right side: Difference between COSMO-MUSCAT and RCG (Forcing: CCLM_ERA)

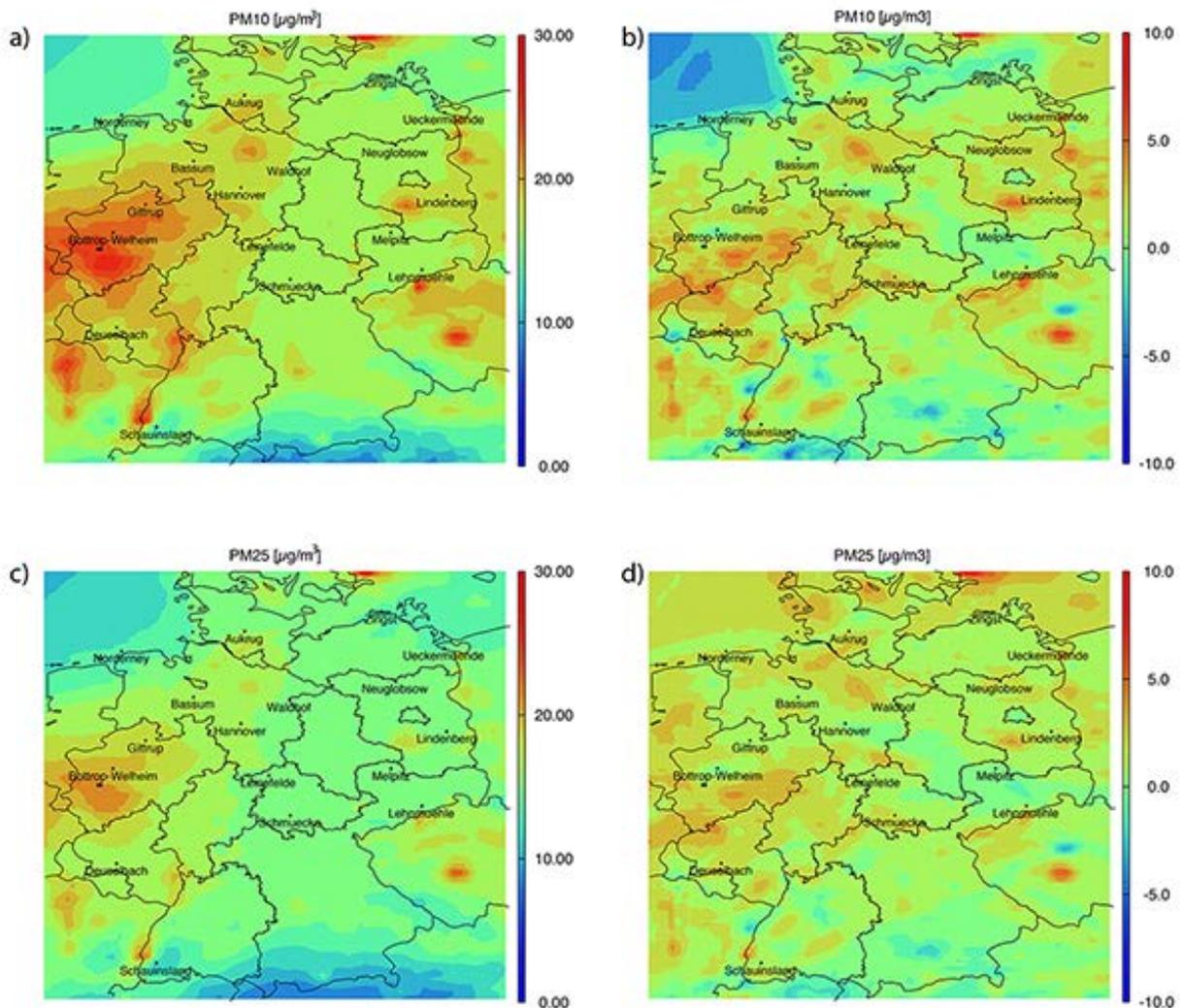


Table I: Average of PM10, NO₂ and ozone for Germany (models COSMO-MUSCAT and RCG with CCLM_ERA forcing) and observed hourly values of selected stations for the year 2005 (for ozone only summer half -year April–September).

Model run	PM10	NO ₂	O ₃ (8h-MW)
Observation	18,7	11,7	79,4
COSMO-MUSCAT	17,4	9,9	78,7
RCG	16,1	11,9	75,5

During the first period, beginning of February 2010, PM10 concentrations of 50 µg/m³ were exceeded in many areas of Germany. This resulted not only in the urban areas to exceedances of the limit value. The high particle load was caused by intense long-distance transport from the east followed by a stagnation phase (low wind) with additional local emissions. In particular, the secondary formation of inorganic particulate mass (e.g. sulphate, nitrate, secondary organic aerosol) under cold

and wet conditions was dominant. On the other hand, the strong ozone exposure during the second episode end of May 2010 was mainly caused by the typical coincidence of several days of intense sunlight, drought, high temperatures and low wind. Under these conditions, the emission of biogenic hydrocarbons also increases and intensifies the formation of ozone.

Conclusions and Outlook

The project KLENOS investigated the influence of climate change and emission changes due to energy policy measures on the concentrations of the pollutants PM₁₀ and ozone with three different study approaches. The results show that by 2050 energy policies measures have a greater impact on the concentration of PM₁₀ and ozone than climate change during this period. Thus, there is a significant scope of action to improve air quality, steadily and permanently and reduce exceedances of limit values by considerable emission reductions. However, the results also show that the risk of high ozone concentrations, because of anthropogenic climate change, increases steadily without emission reductions. The summer 2015 was an example and is representative for the expected future temperatures in summer and the large-scale exceedances of ozone target values. In this context, especially the development of biogenic VOC emissions is important, which also increase with rising temperatures. Frequent and especially long episodes of high ozone concentrations due to an increased persistence of weather conditions cause additional relevant damage to crops and forests.

In KLENOS, the future period 2021–2050 was considered for the coupled climate and chemical transport modelling, because of the availability of an emissions scenario for Germany to 2030. However, the climate signal is much stronger and robust in the second half of the century. In further studies, an extension of the time horizon to 2100 is recommended. The additional use of different model runs and climate scenarios in the form of ensemble simulations would allow quantifying uncertainties and the range of projected changes of climate and air quality. To consider global influences on air quality, further simulations should be performed with changing tropospheric background concentrations, e.g. from a global chemical transport model.

The evaluation of climate model results has shown, especially for precipitation, a large bias in the simulation results. This has negative impacts on the following chemical transport modelling. Precipitation is the main atmospheric sink for PM₁₀. The underestimation of temperatures and the overestimation of cloud cover and humidity cause a too low ozone creation potential of the model runs driven by ECHAM6. In KLENOS, it was decided not to apply so-called bias corrections for the individual meteorological variables in order to preserve the physical relationship between the variables. This is necessary in subsequent model simulations. The development of a bias correction method of physically dependent variables would be an important contribution to the use of regional model results in impact model models.

Due to the importance of extreme events (e.g. drought in the summer of 2003, temperature inversion in November 2011), it should be analysed whether extreme events occur in the future more frequently. This can be done not only with these climate simulations, but also with other available climate data sets applying the developed methods in KLENOS. Additionally, the understanding of the mechanisms and interactions between meteorology, ecosystem and anthropogenic emissions must be further deepened. Therefore, appropriate countermeasures can be derived in order to avoid the high environmental impact. In the medium term, the numerical prediction of extreme events is necessary.

Changes in land use, development and of ecosystems (e.g. restoration of open-cast mines) affect the regional climate and air quality – air pollutants are deposited in ecosystems, biogenic emissions contribute to the formation of ozone and SOA. The investigation of the influence and interactions of these processes could be a focus of future research projects.

1 Einleitung

Hohe Konzentrationen von Luftschadstoffen sind für ihre negativen Eigenschaften auf die menschliche Gesundheit allgemein bekannt. Besonders oberflächennahes Ozon und Feinstaub (PM – „particulate matter“) besitzen hohes Gesundheit gefährdendes Potenzial.

Oberflächennahes Ozon entsteht in der unteren Troposphäre durch fotochemische Oxidation von Stickstoffoxiden (NO_x) und flüchtigen Kohlenwasserstoffen (VOC). Hohe Ozonkonzentrationen treten besonders in den Sommermonaten aufgrund der fotochemischen Eigenschaften auf. Senken für Ozon sind einerseits die Photolyse (=Lichtspaltung) und andererseits die trockene Deposition. Bei der Photolyse wird durch die Einwirkung von Sonnenlicht ein Sauerstoffatom des Ozonmoleküls abgespalten, welches mit einem weiteren freien Sauerstoffatom wieder eine Bindung zu O₂ eingeht. Als trockene Deposition wird der Abbau von Ozon durch chemische Reaktionen mit Materialien (auch Pflanzen) an der Erdoberfläche bezeichnet. Ozon besitzt eine stark oxidierende Wirkung, wobei der Umfang der Deposition von Art und Ausmaß der Reaktionsfläche abhängt. Über Wasserflächen ist die Deposition von Ozon sehr gering und somit vernachlässigbar. Die Verweilzeit von Ozon reicht von wenigen Tagen in der planetaren Grenzschicht bis zu mehreren Wochen in der freien Troposphäre (Jacob und Winner 2009).

Der Einfluss meteorologischer Größen auf Ozon ist vielfältig. So sind Ozonkonzentrationen an der Erdoberfläche abhängig von der Temperatur, der Sonneneinstrahlung, der Bewölkung, der Windgeschwindigkeit und der Mächtigkeit der Durchmischungsschicht (mixing layer) (Racherla und Adams 2008; Dawson et al. 2009). Die stärkste Korrelation zeigt Ozon mit der Temperatur, wobei es mit zunehmenden Temperaturen in städtischen und ländlichen Umgebungen ansteigt (Racherla und Adams 2008; Jacob und Winner 2009). Hohe Ozonkonzentrationen zeigen eine ausgesprochene Saisonalität und treten mit großer Häufigkeit in den Sommermonaten auf.

Feinstaub zählt zu den Aerosolen, welche in primäre und sekundäre Aerosole unterteilt werden können. Primäre Aerosole werden direkt in die Atmosphäre emittiert und sekundäre Aerosole durch chemische Reaktionen aus gasförmigen Substanzen gebildet. Feinstaub besteht aus einer Vielzahl von Stoffgruppen und beinhaltet hauptsächlich Sulfat, Nitrat, organischen Kohlenstoff, Bodenpartikel und Seesalz. Feinstaubpartikel werden nach ihrem Größenspektrum klassifiziert, wobei Partikelgrößen < 10 µm (PM₁₀) als vom Menschen inhalierbar gelten und Partikelgrößen < 2,5 µm (PM_{2.5}) sogar von der Lunge aufgenommen werden können.

Hohe Feinstaubbelastungen können das ganze Jahr über auftreten und werden hauptsächlich durch Niederschlag minimiert. Dabei spielt weniger die Niederschlagsintensität als die Häufigkeit eine Rolle (Jacob und Winner 2009). Die Verweilzeit von PM reicht, wie die von Ozon, ebenfalls von wenigen Tagen in der planetaren Grenzschicht bis zu mehreren Wochen in der freien Troposphäre. Die Korrelation von Feinstaub mit meteorologischen Variablen ist schwächer als für Ozon aufgrund der unterschiedlichen Feinstaub-Komponenten, der komplexen Kopplung mit dem Wasserkreislauf und verschiedenen sich gegenseitig beeinflussenden und kompensierenden Effekten (Jacob und Winner 2009). Beispielsweise ist der Zusammenhang zwischen der Temperatur und hohen Feinstaubbelastungen nicht eindeutig sowie von der chemischen Zusammensetzung abhängig. Während die Konzentration von Sulfat-PM mit der Temperatur steigt, nimmt im Gegensatz dazu die Nitrat-PM-Konzentration mit der Temperatur ab, aufgrund des unter Temperatureinfluss stattfindenden Übergangs der Partikel in die Gasphase. Verschiedene Modellstudien haben weiterhin Zusammenhänge mit der Luftfeuchte und der Bewölkung aufgezeigt, wobei diese jedoch oft nur regional begrenzt galten (Jacob und Winner 2009). Ein deutlicher Zusammenhang zwischen hohen Feinstaubbelastungen und dem Auftreten austauscharmer Wetterlagen konnte jedoch in verschiedenen Studien aufgezeigt werden (Cheng et al. 2007; Singh und Palazoglu 2011).

Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts werden nachhaltige Änderungen des Klimas erwartet (Frei et al. 2003, 2006; Räisänen et al. 2004; Christensen und Christensen 2007; Christensen et al. 2007; Kjellström et al. 2007). Ändern sich die Wertebereiche und Ausprägungen der mit Luftbelastungen verknüpften meteorologischen Variablen, so ist auch eine Änderung der Häufigkeit von Luftschadstoffepisoden und somit der Konzentrationen von Ozon und Feinstaub zu erwarten (Dawson et al. 2009). Für Mitteleuropa wird ein deutlicher Anstieg der Jahresmitteltemperaturen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts erwartet, der in Abhängigkeit vom gewählten Emissionsszenario und der Region zwischen 1K und 5K liegt (Giorgi et al. 2004; Räisänen et al. 2004; Rowell 2005; Christensen et al. 2007; Déqué et al. 2007; Kjellström et al. 2007). Verschiedene Studien mit gekoppelten GCM-CTM Modellen zeigen aufgrund des Temperaturanstiegs einen Anstieg der Ozonkonzentration in den mittleren Breiten in der Zukunft. Während das Änderungssignal der Temperatur sehr robust in den verschiedenen Klimaprojektionen ist, zeigen die projizierten Niederschlagsänderungen für Mitteleuropa, aufgrund der hohen zeitlichen und räumlichen Variabilität des Niederschlages und der damit verbundenen Unsicherheit in der Modellierung durch Klimamodelle, größere räumliche und saisonale Unterschiede als die Temperaturänderungen. Dies hat einen wesentlichen Einfluss auf die Abbildung der zu erwartenden Feinstaubkonzentrationen und – ereignisse in der Zukunft, da Niederschlag die wichtigste Feinstaubsenke darstellt.

Änderungen des Klimas können aufgrund der Komplexität des Klimasystems nur mit Modellen abgebildet werden. Für die globale Skala erfolgt dies mit Globalen Zirkulationsmodellen (GCMs), die auf einem erdumspannenden Gitter, den Gesetzen der Atmosphärenphysik folgend, das Klima für lange Zeiträume berechnen können. Für Anwendungen auf der regionalen Skala haben die GCMs jedoch eine zu grobe räumliche Auflösung. Hier werden die Ergebnisse von GCMs mittels Downscaling-Methoden auf die regionale Skala projiziert. Prinzipiell kommen dynamisch numerische oder empirisch statistische Downscaling-Verfahren zur Anwendung (Christensen et al. 2007). Beim dynamisch numerischen Downscaling wird in das grobmaschige Gitter des Globalmodells ein wesentlich höher aufgelöstes Gitter des regionalen Ausschnitts des Zielgebietes eingebettet und die Atmosphärenphysik unter Einbeziehung räumlich höher aufgelöster Eingangsvariablen wie Orographie, Boden und Vegetation und unter Einbeziehung des GCM-Outputs als Randantrieb neu berechnet (z. B. Pavlik et al. 2012). Beim empirisch-statistischen Downscaling werden Beziehungen zwischen großräumigen Mustern der globalen Zirkulation und meteorologischen Eigenschaften von Stationsdaten abgeleitet und auf die Ergebnisse der Zukunftsszenarien des verwendeten GCMs angewendet (vgl. Benestad et al. 2007).

Szenarien der Luftschadstoffentwicklung können einerseits über den Zusammenhang von Konzentrationen bestimmter Luftschadstoffe mit typischen Zirkulationsmustern oder Wetterlagen für eine Region (Cheng et al. 2007a; b; Singh und Palazoglu 2011) oder über die Kopplung eines Regionalen Klimamodells (RCM) mit einem Chemie-Transportmodell (CTM) modelliert werden (Wolke et al. 2003; Racherla und Adams 2008; Vogel et al. 2009).

Der Einfluss des Klimawandels auf die Luftqualität sollte unbedingt im Zusammenhang mit Szenarien zukünftiger anthropogener Emissionen untersucht werden, da in den nächsten Dekaden deutliche ökonomische und vor allem energiepolitische Änderungen erwartet werden. Verschiedene Studien haben gezeigt, dass der Klimawandel in einigen Regionen die Auswirkungen emissionsmindernder Maßnahmen nivellieren kann (Jacob und Winner 2009), somit ist es erforderlich schon heute abzuschätzen, bis zu welchem Ausmaß emissionsmindernde Maßnahmen erfolgen müssen, um in der Zukunft unter dem Einfluss des Klimawandels eine nachhaltige Verbesserung der Luftqualität zu erreichen.

2 Forschungsansatz

Zur Lösung der Forschungsaufgaben im Projekt KLENOS wurde ein Forschungsansatz entwickelt, der auf zwei Modulen mit jeweils drei Teilaufgaben basiert:

Aufgabenstellung Modul 1

A1.1) Analyse und Identifikation von Ereignistagen mit Überschreitung der zulässigen Grenzwerte für Ozon und PM10.

A1.2) Analyse signifikanter synoptischer Muster (Wetterlagen) für die unter Aufgabe A1.1 identifizierten Überschreitungstage und somit Herstellung eines statistischen Zusammenhangs zwischen typischen Wetterlagen und hohen Luftschadstoffkonzentrationen.

A1.3) Analyse der in Aufgabe A1.2 identifizierten Wetterlagenklassen in langjährigen Zeitreihen von Klimaszenarien und Bewertung der Trends hinsichtlich des Auftretens und der Häufigkeit von Überschreitungstagen anhand des statistischen Zusammenhangs zwischen Wetterlagen und Luftschadstoffkonzentrationen.

Aufgabenstellung Modul 2

A2.1) Erstellung eines regionalen Klimaszenarios für die Modellregion (Bundesrepublik Deutschland) mittels dynamischen Downscalings eines globalen Klimaszenarios.

A2.2) Kopplung eines Chemie-Transport-Modells (CTM) mit dem Regionalen Klimamodell zur Simulation der Luftschadstoffentwicklung unter dem Einfluss des Klimawandels und energiepolitischer Änderungen (Emissionsszenarien) für eine relevante 30-jährige Zukunftsperiode.

A2.3) Überprüfung und Bewertung der Ergebnisse aus Aufgabe A2.2 durch den Vergleich mit hochauflösten Simulationen eines gekoppelten Chemie-Transport-Modells für relevante Episoden.

2.1 Modul 1

Anhand eines vom Umweltbundesamt (UBA) bereit gestellten Datensatzes von Messdaten verschiedener Luftgütemessstationen werden diejenigen Tage ermittelt an denen der Ozon-Zielwert zum Schutz der menschlichen Gesundheit von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als höchster Achtstundenwert (laut § 9 der 39. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes) und der PM10-Grenzwert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Tagesmittelwert überschritten wurden (laut § 4 der 39. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes). Für die Identifizierung synoptischer Muster kann die objektive Wetterlagenklassifikation des Deutschen Wetterdienstes (Bissolli und Dittmann, 2001) verwendet werden. Im Ergebnis wird jedem Überschreitungstag die entsprechende Wetterlagenklasse zugeordnet. Der Zusammenhang zwischen hohen Luftschadstoffkonzentrationen und Wetterlage kann mit Hilfe von Klimaszenarien in die Zukunft übertragen werden. Hierzu werden Modellergebnisse verschiedener globaler Zirkulationsmodelle verwendet unter den Emissionsszenarien A1B, B1 und A2. Somit wird es möglich die Luftschadstoffentwicklung unter dem Einfluss des Klimawandels für die Zukunft abzuschätzen unter der Annahme, dass die für die Vergangenheit gefundenen statistischen Beziehungen zwischen Wetterlagen und Schadstoffkonzentrationen in der Zukunft Bestand haben.

2.2 Modul 2

2.2.1 Aufgabe 2.1

Der Forschungsansatz für Modul 2 beinhaltet die regionale Projektion eines globalen Klimaszenarios für Deutschland mittels dynamischen Downscalings. Diese Projektion bildet neben einem notwendigen Evaluationslauf und einem Kontrolllauf für einen definierten Referenzzeitraum einerseits die

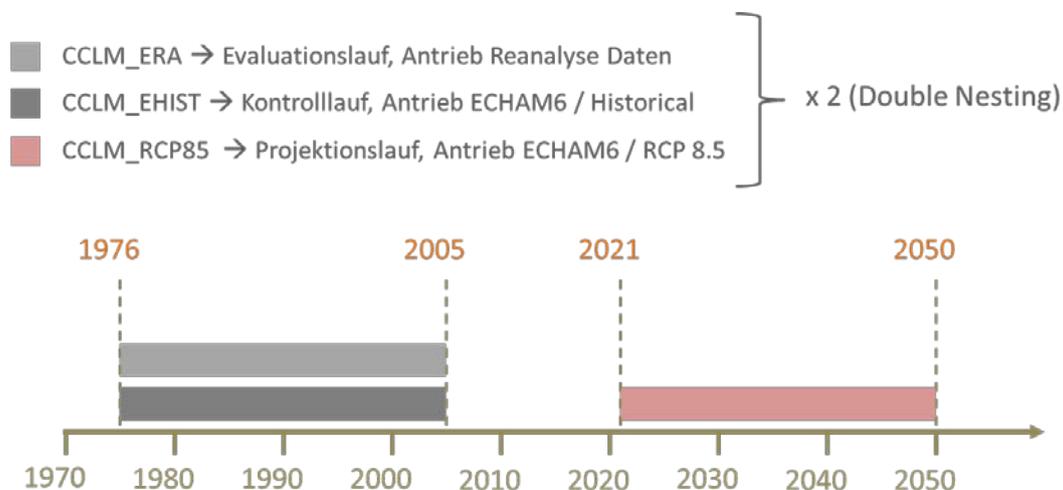
Grundlage für die Bewertung der zu erwartenden klimatischen Änderungen für das Bundesgebiet unter den ausgewählten Annahmen der Entwicklung der globalen CO₂-Emissionen, und andererseits dienen die Ergebnisse der regionalen Klimamodellierung als meteorologischer Antrieb für die Chemie-Transport-Modellierungen.

Klimaänderungen eines Szenarios lassen sich nur in Bezug zu einer Referenz bewerten. Die WMO (World Meteorological Organization) empfiehlt als klimatische Referenzperiode den Zeitraum von 1961 bis 1990 (WMO 2015). In der Klimaforschung werden jedoch auch andere Vergleichsperioden gewählt. Aus statistischen Gründen bzw. bei besserer Datenlage wird beispielsweise oftmals der Zeitraum 1971 bis 2000 verwendet (vgl. Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, Land Brandenburg (LUGV 2010) bzw. SCHUCHARDT et al. (2010)). Im Projekt KLENOS wurde als 30-jährige Referenzperiode der Zeitraum von 1976 bis 2005 festgelegt. Grund dafür ist der Datenbedarf an Emissionsdaten für die Chemie-Transport-Modellierungen. Diese Daten sind erst ab dem Jahr 2005 in ausreichender Qualität verfügbar. Durch die Festlegung der Referenzperiode bis zum Jahr 2005 stand, als Minimumanforderung, ein Jahr zur Evaluierung der verwendeten CTMs REM-CALGRID (RCG) und COSMO-MUSCAT zur Verfügung.

Als Szenarioperiode (oder auch Projektionsperiode) wurde der Zeitraum 2021 bis 2050 gewählt. Auch diese Auswahl war an die Verfügbarkeit von Emissionsdaten gebunden, welche vom UBA als Prognosedaten bis zum Jahr 2030 zur Verfügung gestellt werden konnten (Jörß et al. 2014). Für die Szenarioperiode wurde eine globale Klimaprojektion des Modells ECHAM6 basierend auf dem IPCC Klimaszenario RCP 8.5 (Moss et al. 2010) verwendet. Die RCP-Szenarien legen bestimmte Entwicklungen von Treibhausgaskonzentrationen fest. Daraus wird mit globalen Klimamodellen die Klimaänderung berechnet, die erforderlich ist, um diese Konzentrationen hervorzurufen. RCP8.5 steht für einen Strahlungsantrieb von 8.5 W/m² im Jahre 2100 gegenüber 1850 und beruht auf einer angenommenen CO₂-Treibhausgaskonzentration von 1370 ppm CO₂-Äquivalenten im Jahre 2100. Nach den Klimamodellrechnungen beträgt der Anstieg der globalen Mitteltemperatur unter den Voraussetzungen des Szenarios RCP8.5 bis zum Jahr 2100 etwa 4,8 °C im Vergleich mit dem vorindustriellen Zustand bzw. 4 °C gegenüber 1986-2005 (IPPC, 5. Sachstandsbericht).

Abbildung 1 gibt einen Überblick über die durchgeführten Klimamodellläufe und die zugehörigen Zeiträume. Das verwendete Regionale Klimamodell, seine Konfiguration und der notwendige Modellansatz sind in Abschnitt 3 beschrieben.

Abbildung 1: Benennung der Modellläufe und simulierte Zeiträume der Regionalen Klimamodellierung



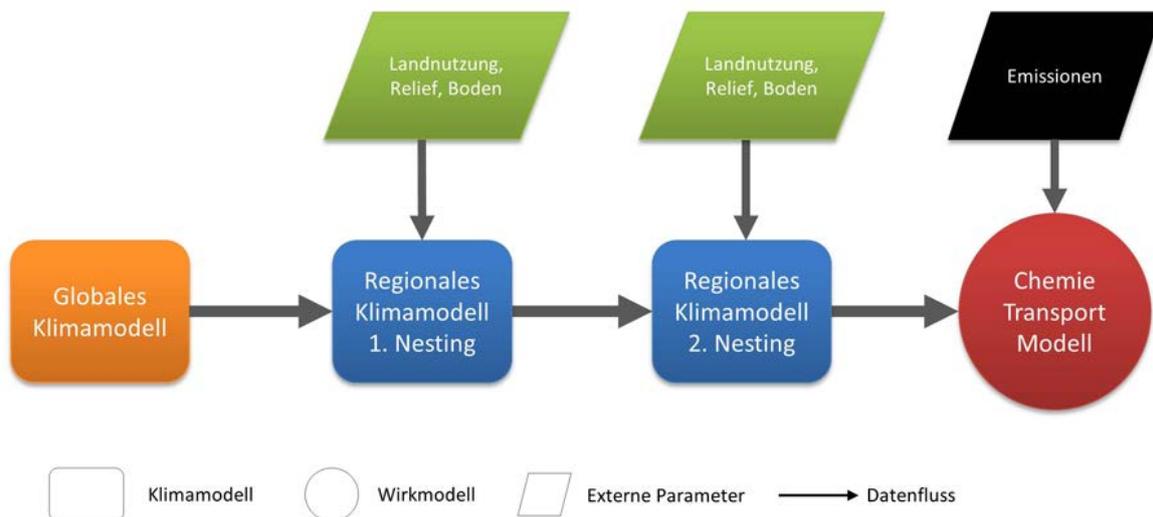
2.2.2 Aufgabe 2.2

Ziel von Aufgabe 2.2 war die chemische Modellierung und Bewertung des Einflusses von klimatischen sowie energiepolitischen Änderungen auf die PM10- und O₃-Luftqualität. Dazu wurde das Chemie-Transport-Modell REM-CALGRID (Stern 2010a) mit an der TU Dresden erstellten Datensätzen eines Regionalen Klimamodells (COSMO-CLM, CCLM) offline gekoppelt und zur Simulation der Luftschadstoffentwicklung unter dem Einfluss des Klimawandels und energiepolitischer Änderungen (Emissionsszenarien) für eine 30-jährige Vergangenheit sowie eine 30-jährige Zukunftsperiode angewendet. Offline bedeutet hierbei, dass die Ergebnisdaten des Regionalen Klimamodells als meteorologischer Antrieb für das RCG verwendet wurden (Abbildung 2). Zusätzlich benötigt RCG Emissionsdaten, die einerseits für das Jahr 2005 und andererseits als Szenario für das Jahr 2030 zur Verfügung standen. Die Emissionsdaten von 2005 wurden für die Berechnungen der gesamten Referenzperiode von 1976 bis 2005 als zeitlich fixes Datenfeld verwendet (Tabelle 1). Ebenso wurde mit den Emissionsdaten von 2030 für die Projektionsperiode von 2021 bis 2050 verfahren. Detaillierte Ausführungen dazu finden sich in Kapitel 4.2.2.

Tabelle 1: Erforderliche Modellläufe für die Chemie-Transport-Modellierung mit RCG

Modelllauf	Zeitraum	Meteorologischer Antrieb	Emissionen
CCLM_ERA_E2005	1976–2005	CCLM_ERA	E2005
CCLM_EHIST_E2005	1976–2005	CCLM_EHIST	E2005
CCLM_RCP85_E2005	2021–2050	CCLM_RCP85	E2005
CCLM_RCP85_E2030	2021–2050	CCLM_RCP85	E2030

Abbildung 2: Schematische Darstellung der Modellkette



2.2.3 Aufgabe 2.3

Die Überprüfung und Bewertung ausgewählter Episoden der Luftschadstoffentwicklung stand im Fokus von Aufgabe 2.3 innerhalb von Modul 2. Dazu wurde das Chemie-Transport-Modell COSMO-MUSCAT (Wolke et al. 2003) vom Institut für Troposphärenforschung in Leipzig verwendet. Die Simulationen mit dem Modellsystem COSMO-MUSCAT verfolgten im Wesentlichen die zwei folgenden

Ziele: (i) die Absicherung der RCG-Ergebnisse und (ii) die Untersuchung des Einflusses der meteorologischen Bedingungen auf hohe Schadstoffkonzentrationen. Eine Beschreibung des Modells, der Modellkonfiguration sowie des verfolgten Forschungsansatzes findet sich in Kapitel 3.

3 Regionale Klimamodellierung

3.1 Modellkonfiguration

Für die Regionale Klimamodellierung (Modul 2) wurde im Projekt KLENOS das Regionale Klimamodell CCLM (COSMO-Climate Local Model; Rockel et al. 2008) verwendet. Das CCLM ist ein numerisch, dynamisches Downscaling-Modell, welches für Anwendungen auf der meso- β (20-200 km) und meso- γ Skala (2-20 km) entwickelt wurde. Es berechnet atmosphärische Variablen basierend auf primitiven¹ thermo-hydrodynamischen Gleichungen, welche in der Lage sind kompressible Flüsse auf einem regulären Gitter (Lon/Lat-Grid = Gitter mit Längen- und Breitengraden), mit einem rotierten Pol und einer der Topographie folgenden Höhenkoordinate mathematisch zu beschreiben (Steppeler et al. 2003, Rockel et al. 2008).

Dynamisches Downscaling globaler Klimasimulationen basiert auf der numerischen Modellierung atmosphärischer Prozesse auf der regionalen Skala. Dabei dient der Output eines Globalmodells (GCM – Global Circulation Model, Globales Zirkulationsmodell) als Antrieb an den Rändern des Gitters des Regionalmodells (RCM – Regional Climate Model, Regionales Klimamodell). Man spricht dabei vom sogenannten Nesting, da im Prinzip das räumlich wesentlich höher aufgelöste Gitter des RCM in das gröbere Gitter des jeweiligen GCM genested (eingebettet) wird.

Das Verhältnis der räumlichen Gittergrößen zwischen dem groben globalen Gitter und dem feineren regionalen Gitter wird als Downscaling-Faktor bezeichnet. Nach Empfehlungen der CLM-Community² werden aus Gründen der numerischen Stabilität Downscaling-Faktoren < 17 bei regionalen Klimamodellierungen empfohlen. Im KLENOS-Projekt liegt die angestrebte höchste räumliche Auflösung bei ca. 7 km ($0,0625^\circ$). Die räumliche Auflösung der Antriebsdaten der verwendeten globalen Modelle liegt bei ca. 125 km (Reanalysedaten) und ca. 200 km (Globalmodell), was zu Downscaling-Faktoren von rund 18 und 29 bei einem einfachen Downscaling-Schritt führt. Daher wurde ein sogenanntes Doppelnesting mit einem Downscaling-Zwischenschritt von ca. 55 km ($0,5^\circ$) Gittergröße angewandt. Hierbei dient das globale Modell als Antrieb für das sog. 1. Nesting mit 55 km räumlicher Auflösung und das 1. Nesting wiederum als Antrieb für das 2. Nesting mit 7 km räumlicher Auflösung (siehe auch Abbildung 2).

Das Modellgebiet des 1. Nestings umfasst ganz Europa mit einer Ausdehnung von 71×85 Gitterpunkten. Das Modellgebiet des 2. Nesting umfasst ganz Deutschland mit 235×233 Gitterpunkten. Die Modellgitter wurden zur Verringerung der Meridiankonvergenz rotiert, wobei der Kreuzungspunkt von Nullmeridian und Äquator auf die ungefähre Mitte Deutschlands ($50,0^\circ$ nB, $10,0^\circ$ öL) verschoben wurde (Abbildung 3). Abbildung 4 zeigt die Lage der Modellgitter des CCLM in rotierten Koordinaten (weiße Rechtecke) sowie die Ausdehnung der jeweils dazugehörigen sogenannten „sponge zone“ (graue Rechtecke). Die „sponge zone“ ist ein die äußeren Grenzen des Modellgitters umgebender Randbereich mit einer Ausdehnung von 8 Gitterpunkten, welcher nicht in die Datenauswertung mit einbezogen wird, da dieser übermäßig stark von den äußeren Antriebsdaten beeinflusst wird.

¹ Primitiv im Sinne von *mathematisch primitiv*, was als *ursprünglich* oder *grundlegend* verstanden wird. Primitive Gleichungen sind nichtlineare Differentialgleichungen für die Berechnung atmosphärischer Flüsse in feuchter Atmosphäre.

² CLM-Community – Verbund von Wissenschaftlern, die sich der Weiterentwicklung und Anwendung des Regionalen Klimamodells CCLM (ehemals CLM) verschrieben haben (www.clm-community.eu).

Abbildung 3: a) Erdkugel mit unrotiertem Längen-Breiten-Gradnetz, b) Erdkugel mit rotiertem Längen-Breiten-Gradnetz; der schwarze Punkt markiert die Kreuzung von Äquator und Nullmeridian.

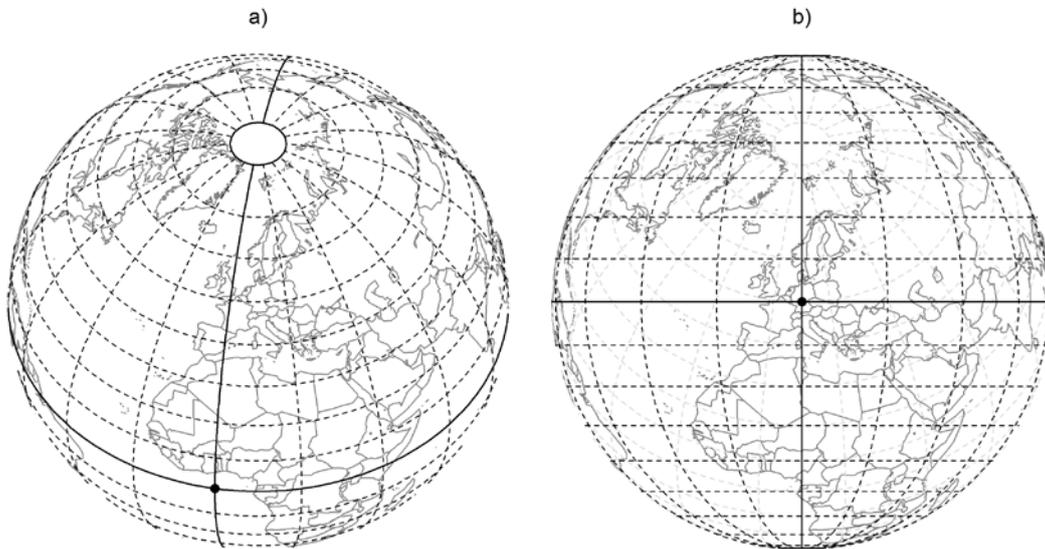
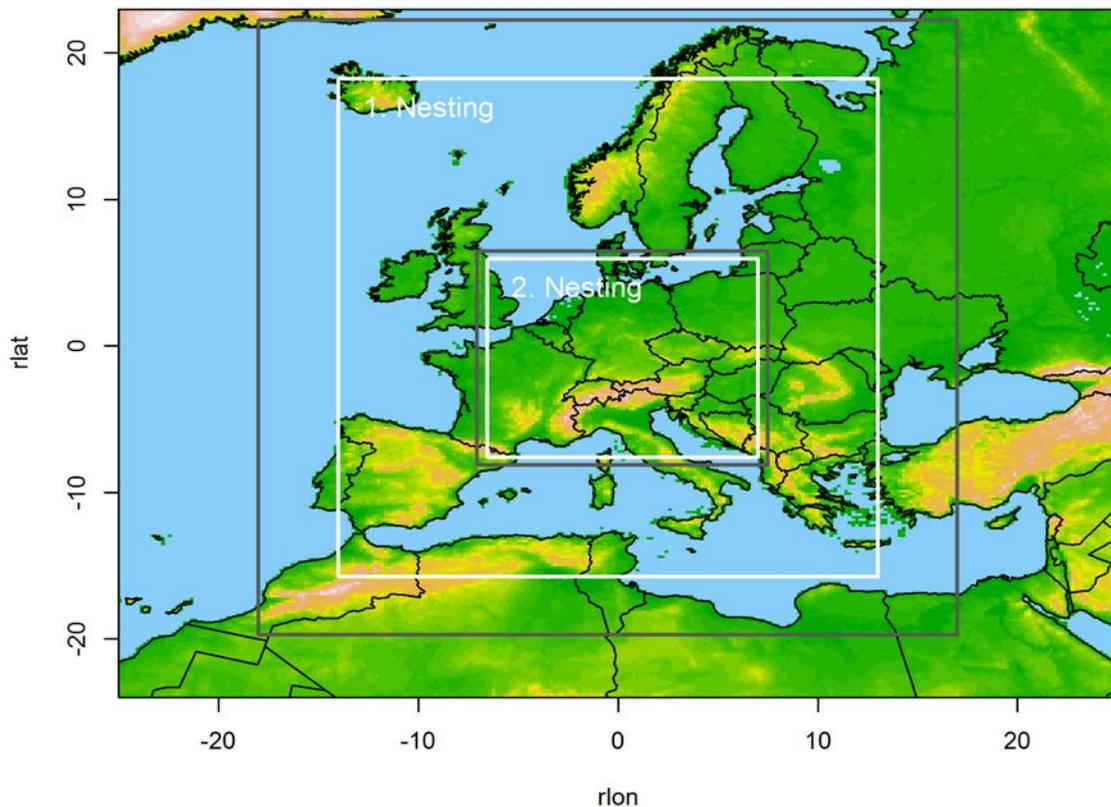


Abbildung 4: Lage und Ausdehnung der Modellgitter für die Simulationen des Regionalen Klimamodells in rotierten Koordinaten. Die grauen Linien markieren die sogenannte „sponge zone“ und die weißen Linien die jeweils verbleibende Gitterausdehnung.



Nach den Erfahrungen aus anderen Projekten (vgl. Pavlik et al. 2012, Pavlik et al. 2014) wurden für die Klimamodellierung die in Tabelle 2 aufgeführten Parametereinstellungen verwendet.

Tabelle 2: Grundlegende Modellkonfiguration des CCLM

Modellparameter	1. Nesting	2. Nesting
räumliche Auflösung	0.50°	0.0625°
Anzahl der Gitterpunkte	71 × 85	235 × 233
rotierter Nordpol	lon -170.0°, lat 40.0°	lon -170.0°, lat 40.0°
interner Modellzeitschritt	240 sec.	40 sec.
Ausgabezeitschritt	1 hr	1 hr
Integrationsschema	Runge Kutta	Runge Kutta
Konvektionsschema	Tiedtke	Tiedtke

3.2 Modellansatz

Nach dem in Kapitel 2 beschriebenen Forschungsansatz und den Anforderungen an das regionale Klimamodell wurden insgesamt 3 Simulationen durchgeführt, wobei durch den Doppelnesting-Ansatz insgesamt 6 Simulationsläufe mit einem Umfang von jeweils 30 Jahren erforderlich waren. In Tabelle 3 sind die Bezeichnungen der jeweiligen Modellläufe aufgeführt, welche im gesamten Bericht in dieser Form verwendet werden. Um die beiden Nestings zu unterscheiden wird vor die Bezeichnung des entsprechenden Modelllaufs entweder das Kürzel EU für Europa oder DE für Deutschland gesetzt.

Tabelle 3: Bezeichnung und Zeitraum der CCLM Modellläufe

Modelllauf	Antrieb	Zeitraum	1. Nesting	2. Nesting
CCLM_ERA (Evaluationslauf)	ERAinterim	1976–2005	EU_CCLM_ERA	DE_CCLM_ERA
CCLM_EHIST (Kontrolllauf)	ECHAM6 (historisch)	1976–2005	EU_CCLM_EHIST	DE_CCLM_EHIST
CCLM_RCP85 (Szenariolauf)	ECHAM6 (Szenario RCP 8.5)	2021–2050	EU_CCLM_RCP85	DE_CCLM_RCP85

Für die einzelnen Modellläufe wurden jeweils unterschiedliche Antriebsdaten verwendet. Der Evaluationslauf CCLM_ERA wurde für den Referenzzeitraum von 1976 bis 2005 mit ERAinterim Reanalyse-daten (Dee et al. 2011) des ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) angetrieben. Da die ERAinterim Daten jedoch erst ab 1979 zur Verfügung stehen wurden für den Zeitraum von 1976–1978 Daten der Vorgängerversion ERA40 (Uppala et al. 2005) verwendet. Für den Kontrolllauf CCLM_EHIST und den Szenariolauf CCLM_RCP85 kamen als Antrieb Daten des GCMS ECHAM6 (Stevens et al. 2013) zur Anwendung. ECHAM6 ist ein vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg entwickeltes globales Zirkulationsmodell, welches die atmosphärische Komponente des Erdsystemmodells des MPI (MPI-ESM - Max-Planck-Institute – Earth System Model) repräsentiert. Der Unterschied zwischen dem mit Reanalysedaten angetriebenen Evaluationslauf und dem mit ECHAM6 angetriebenen Kontrolllauf besteht darin, dass die Reanalysedaten regelmäßig durch die Assimilation von Messdaten angepasst werden, während das Modell ECHAM6 für den Kontrolllauf einmal initialisiert wird und sich das Klima quasi „frei“ entwickelt. Das bedeutet, dass die Reanalysedaten das Klima des repräsentierten Zeitraumes nicht nur im langjährigen Mittel, sondern

auch in seiner zeitlichen Abfolge abbilden. Somit können die Ergebnisse eines mit Reanalysedaten angetriebenen Regionalmodells auch mit zeitlich verknüpften Referenzdaten verglichen und evaluiert werden, da der zeitliche Bezug zwischen bspw. Beobachtungsdaten und Modelldaten gegeben ist. Im Falle des Kontrolllaufs (Antrieb mit „freiem“ Klimamodelllauf) ist nur der Vergleich mit klimatologischen Mittelwerten eines hinreichend langen Zeitraumes zulässig, da der zeitliche Zusammenhang zwischen Modell- und Referenzdaten nicht gegeben ist.

3.3 Evaluierung der Klimamodellergebnisse

Für vertrauenswürdige Zukunftsprojektionen sollte das Regionale Klimamodell in der Lage sein das Klima der Vergangenheit hinreichend gut abzubilden. Dafür wurden die Modellergebnisse des 1. und 2. Nestings mit interpolierten Beobachtungsdaten meteorologischer Messstationen verglichen. Der Vergleich zwischen Modell- und Beobachtungsdaten erfolgte einerseits anhand der Auswertung von Differenzfeldern, wobei zwischen Modelldaten und Referenzdaten eine einfache Differenz gebildet wird ($x_{modell} - x_{observation}$), und andererseits anhand von statistischen Gütemaßen. Folgende statistische Gütemaße wurden verwendet (vgl. Pavlik et al. 2012): (i) bias (BIAS), (ii) Wurzel des räumlichen quadratischen Fehlers (SRMSE), (iii) Musterkorrelation (PCOR) und (iv) das Verhältnis der räumlichen Varianzen (RSV) (Gleichungen 1 bis 4). Der BIAS beschreibt den mittleren Fehler zwischen Modell- und Referenzdaten und erlaubt einen einfachen Überblick über mittlere Über- oder Unterschätzungen (Gl. 1). Der SRMSE ist ebenfalls ein Fehlermaß, aber verhält sich sensitiver gegenüber Ausreißern und Extremwerten aufgrund seiner quadratischen Funktion (Gl. 2). Räumliche Strukturen von Langzeit-Mittelwerten können über die Musterkorrelation PCOR aufgezeigt werden. PCOR ist der Korrelationskoeffizient zwischen den Wertepaaren korrespondierender Gitterpunkte von zweidimensionalen Feldern (GL. 3). Die Wiedergabe der räumlichen Varianz kann mit dem RSV bewertet werden (Gl. 4).

$$BIAS = \bar{m} - \bar{r} \quad (1)$$

$$SRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i - r_i)^2} \quad (2)$$

$$PCOR = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n \frac{(m_i - \bar{m})(r_i - \bar{r})}{\delta_m \delta_r} \quad (3)$$

$$RSV = \frac{\delta_m^2}{\delta_r^2} \quad (4)$$

- m = Modellwert an einem bestimmten Punkt in einem zweidimensionalen Feld
- r = Referenzwert an einem bestimmten Punkt in einem zweidimensionalen Feld
- \bar{m} = Mittelwert Modellwerte
- \bar{r} = Mittelwert Referenzwerte
- δ_r = Standardabweichung Referenzwerte
- δ_m = Standardabweichung Modellwerte
- n = Anzahl der Werte

Zur grafischen Darstellung von langjährigen mittleren monatlichen Abweichungen und von Klimaänderungen werden in Kapitel 3 Box-Whisker-Plots verwendet, die den in Abbildung 173 (Anhang) aufgeführten Konventionen unterliegen. Alle Auswertungen in Kapitel 3 wurden mit der freien Statistiksoftware R durchgeführt (R Core Team 2015).

3.3.1 Vergleich des 1. Nestings (Europa) mit Beobachtungsdaten

Für die Bewertung der Modellergebnisse des 1. Nestings wurden Temperatur- und Niederschlagsdaten des ECA&D Projekts (The European Climate Assessment & Dataset ECA&D, www.ecad.eu) verwendet, die als sogenannter E-OBS Datensatz mit einer räumlichen Auflösung von $0,25^\circ$ flächendeckend für Europa zur Verfügung stehen. Diese Daten beinhalten räumlich interpolierte und gerasterte meteorologische Beobachtungsdaten von Wetterstationen, die sich ausschließlich auf dem Festland oder auf Inseln befinden. Die E-OBS Referenzdaten wurden zur Vergleichbarkeit auf das Gitter des 1. Nestings rotiert und interpoliert.

3.3.1.1 Temperatur

Verglichen wurden die 2m Temperaturen für langjährige jährliche und monatliche Mittelwerte der Referenzperiode von 1976 bis 2005. Die langjährigen Mitteltemperaturen werden für ganz Europa im Modellauf EU_CCLM_ERA mit einer mittleren Abweichung von $-0,94$ K leicht unterschätzt (Abbildung 5a). Die höchsten negativen Abweichungen finden sich in den Hochgebirgsregionen Europas wie den Alpen, den Dinariden oder in Skandinavien. Geringe Überschätzungen zeigen sich in Nordafrika. EU_CCLM_EHIST zeigt ein ähnliches Abweichungsmuster wie EU_CCLM_ERA und unterschätzt die langjährigen Mitteltemperaturen ebenfalls geringfügig (Abbildung 5b). Dabei ist die langjährige mittlere Abweichung der Modellwerte von den Referenzwerten mit $-0,84$ K ein wenig geringer als beim mit Reanalysedaten angetriebenen Lauf EU_CCLM_ERA. Beide Modellläufe geben die räumlichen Temperaturmuster der Beobachtungsdaten sehr gut wieder ($PCOR = 0,99$) und weisen eine etwas höhere räumliche Variabilität als die Observations auf (siehe RSV-Werte in Tabelle 5). Der RMSE liegt mit Werten von $1,23$ für EU_CCLM_ERA und $1,15$ für EU_CCLM_EHIST in einem akzeptablen Bereich.

Der Vergleich der langjährigen monatlichen Mittelwerte zwischen Modelldaten und Beobachtungen zeigt, dass die Mitteltemperaturen von EU_CCLM_ERA vor allem in den Wintermonaten unterschätzt werden (Abbildung 6a). Im Gegensatz zum Sommer tritt auch eine größere Variabilität der Abweichungen in den Wintermonaten auf. In den Sommermonaten werden die monatlichen Mitteltemperaturen für Europa relativ gut wiedergegeben. Der Unterschied zwischen geringen Abweichungen im Sommer und größeren Abweichungen Winter zeigt sich auch in den Gütemaßen in Tabelle 4. Das Verhältnis der räumlichen Variabilität der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen ist in den Sommermonaten größer 1 und zeigt eine höhere Schwankungsbreite der Temperaturen von EU_CCLM_ERA gegenüber E-OBS. Im Gegenteil dazu haben die E-OBS-Werte im Winter eine höhere Variabilität. Die räumlichen Muster der monatlichen Temperaturmittel werden vom Modell für alle Monate durchweg sehr gut wiedergegeben.

Beim mit ECHAM6 angetriebenen Kontrolllauf EU_CCLM_EHIST zeigt sich in der Wiedergabe der monatlichen Temperaturmittel ein gegensätzliches Muster (Abbildung 6b). Die Sommertemperaturen werden stärker unterschätzt als die Wintertemperaturen. Der Wertebereich des BIAS ($0,26$ K bis $-1,62$ K) ist in etwa mit dem BIAS von EU_CCLM_ERA vergleichbar ($0,01$ K bis $-1,66$ K) und zeigt damit eine gute Wiedergabe der monatlichen Mitteltemperaturen für das 1. Nesting. Das Verhältnis der räumlichen Varianz (RSV) ist von April bis September für EU_CCLM_EHIST größer als bei den E-OBS-Daten und in den anderen Monaten geringer ($RSV < 1$). Die Korrelation der räumlichen Temperaturmuster ist für alle Monate sehr gut, wobei die Sommermonate Juni und Juli mit $0,96$ die niedrigsten Korrelationskoeffizienten aufzeigen. Somit gehen die größten Abweichungen von

EU_CCLM_EHIST im Vergleich zu den Referenzwerten, ausgewiesen durch den BIAS, mit einer höheren räumlichen Variabilität und geringfügig niedrigeren räumlichen Korrelationen einher.

Es ist erkennbar, dass beide Modellläufe im Zeitraum von 1976 bis 2005 die langjährigen Mitteltemperaturen für Europa gut wiedergeben, wobei die größten Abweichungen in den Hochgebirgsregionen auftreten. Dies muss jedoch nicht unbedingt an einer unzureichenden Modellperformance liegen. So ist die Stationsdichte meteorologischer Stationen im Allgemeinen in Hochgebirgen geringer als in orographisch weniger gegliederten Regionen, was zu Unsicherheiten bei der Erstellung des Referenzdatensatzes E-OBS führen kann.

Tabelle 4: Gütemaße für EU_CCLM_ERA und EU_CCLM_EHIST vs. E-OBS, langjährige Monatliche Mittelwerte der Temperatur [K]

Monat	EU_CCLM_ERA				EU_CCLM_EHIST			
	BIAS	SRMSE	RSV	PCOR	BIAS	SRMSE	RSV	PCOR
JAN	-1,66	2,08	0,81	0,98	-0,17	1,33	0,86	0,98
FEB	-1,47	1,9	0,85	0,98	-0,67	1,34	0,92	0,98
MAR	-1,23	1,58	1,02	0,98	-0,50	1,29	0,87	0,98
APR	-0,84	1,23	1,28	0,99	-0,54	1,02	1,12	0,98
MAY	-0,48	1,18	1,41	0,98	-1,36	1,64	1,09	0,98
JUN	-0,31	1,39	1,60	0,98	-1,40	1,92	1,39	0,96
JUL	-0,21	1,58	1,74	0,98	-1,63	2,31	1,63	0,96
AUG	0,01	1,41	1,6	0,99	-1,62	2,12	1,35	0,97
SEP	-0,29	1,01	1,31	0,99	-0,79	1,24	1,04	0,98
OCT	-0,96	1,22	1,11	0,99	-0,76	1,30	0,88	0,98
NOV	-1,51	1,74	0,95	0,99	-0,32	1,13	0,89	0,98
DEC	-1,75	2,07	0,84	0,98	0,26	1,44	0,81	0,97

Abbildung 5: Differenz der langjährigen Mitteltemperatur 1976–2005, a) E-OBS - EU_CCLM_ERA, b) E-OBS – EU_CCLM_EHIST

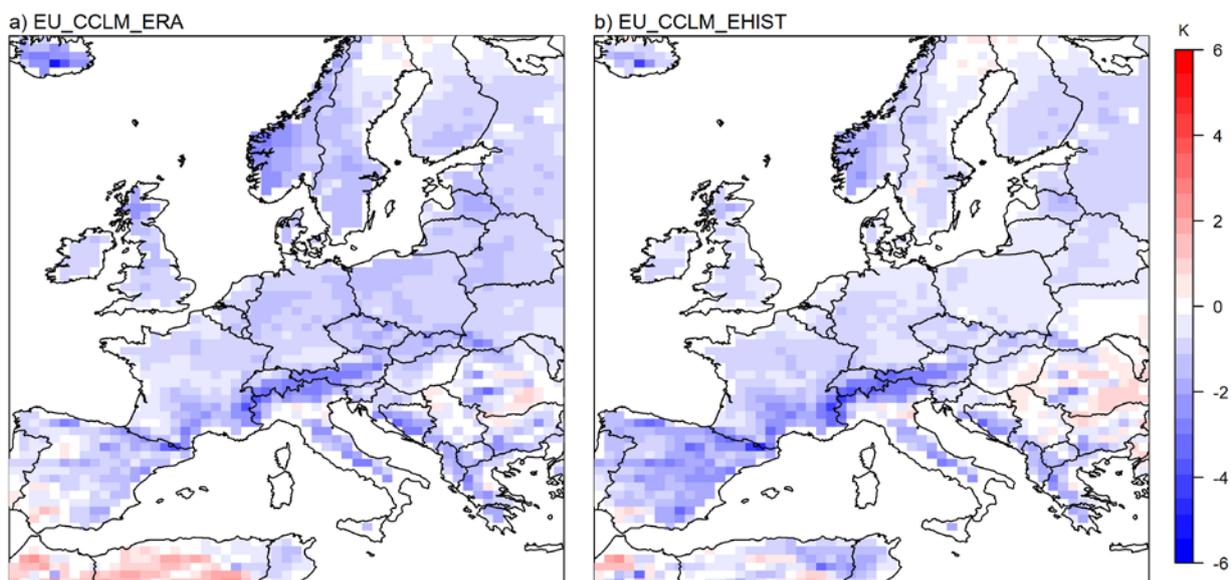
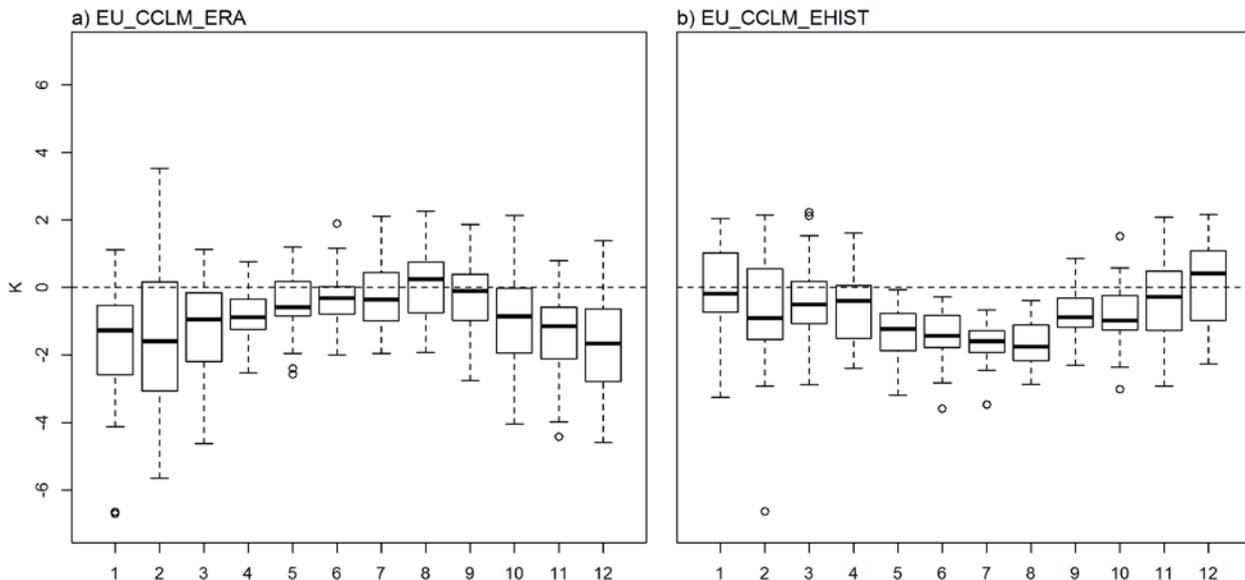


Abbildung 6: Differenz der langjährigen monatlichen Mitteltemperatur 1976–2005, a) E-OBS - EU_CCLM_ERA, b) E-OBS - EU_CCLM_EHIST



3.3.1.2 Niederschlag

Die Variable Niederschlag ist gekennzeichnet durch eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität. Prozesse, welche die Entstehung des Niederschlags wesentlich beeinflussen finden teilweise auf der sogenannten Sub-Grid-Skala statt und werden in regionalen Klimamodellen (in Abhängigkeit von der räumlichen Auflösung) nicht explizit modelliert, sondern parametrisiert. Dies, sowie das diskontinuierliche Auftreten trägt zu einer oftmals geringeren Abbildungsgüte des Niederschlages durch Klimamodelle im Vergleich zur Temperatur beispielsweise bei. Wie in vielen Studien aufgezeigt neigen die Modellergebnisse des CCLM vor allem in Mittel- und Osteuropa zu einer Überschätzung des Niederschlages (Jaeger et al. 2008, Roesch et al. 2008, Pavlik et al. 2014).

Die Ergebnisse des Modelllaufs EU_CCLM_ERA überschätzen im dreißigjährigen Flächenmittel die langjährige Niederschlagssumme Europas mit 90 mm (Tabelle 5), was einer positiven Abweichung von 13 % entspricht. Während vor allem in Mittel-, Nord- und Osteuropa zu hohe Niederschlagssummen auftreten zeigen sich in West- und Südeuropa negative Abweichungen (Abbildung 7a). Im Jahresgang haben die Sommermonate die geringsten Abweichungen, wobei in den Monaten Juli, August und September im Mittel die monatlichen Niederschlagssummen unterschätzt werden (Abbildung 8a). In den verbleibenden Monaten sind die mittleren Abweichungen vom Niederschlag durchweg positiv. Die räumliche Variabilität ist ausschließlich in den Wintermonaten geringer als die der Referenzdaten. Zwischen 0,58 und 0,88 liegt die räumliche Korrelation PCOR der langjährigen mittleren monatlichen Niederschlagssummen und zeigt somit geringere Übereinstimmungen als die oben beschriebenen Temperaturfelder. In den Sommermonaten treten dabei die höchsten räumlichen Korrelationen auf.

Der Kontrolllauf EU_CCLM_EHIST zeigt im langjährigen Mittel ebenfalls zu hohe Niederschlagssummen im Vergleich zu den Referenzdaten. Mit einem BIAS von 386 mm pro Jahr werden die langjährigen mittleren Niederschläge um 54 % überschätzt (Tabelle 5). Hier zeigt sich deutlich der Einfluss des Globalmodells ECHAM6, welches im Gegensatz zu den Reanalysedaten wesentlich mehr Feuchte ins Modellgebiet einträgt. Räumlich betrachtet werden europaweit die langjährigen mittleren Nieder-

schläge fast flächendeckend überschätzt. Einzig in Norditalien und Slowenien treten zu geringe Niederschlagssummen auf (Abbildung 7b). Die extremsten Überschätzungen finden sich am Westrand der Alpen.

Im mittleren monatlichen Jahresgang zeigt sich ein ähnliches Muster wie bei EU_CCLM_ERA mit geringeren Abweichungen im Sommer als im Winter (Abbildung 8b). Jedoch werden die Niederschläge in allen Monaten im Mittel durchweg überschätzt. Der BIAS liegt zwischen 19 mm im Juni und 39 mm im Januar (Tabelle 6). Somit ist der niedrigste BIAS von EU_CCLM_EHIST höher als der größte BIAS von EU_CCLM_ERA (18 mm). Das Verhältnis der Varianzen bewegt sich in einem Bereich von 1,27 im Oktober bis 2,55 im August. Auch hier zeigen die Modellwerte eine höhere räumliche Variabilität als die Observationen in den Sommermonaten. Die räumlichen Niederschlagsfelder von EU_CCLM_EHIST korrelieren jedoch ein wenig besser als die von EU_CCLM_ERA.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass EU_CCLM_ERA und EU_CCLM_EHIST die beobachteten Niederschläge für weite Gebiete Europas überschätzen. EU_CCLM_EHIST weist dabei wesentlich höhere positive Abweichungen auf als EU_CCLM_ERA. In den Sommermonaten werden bei beiden Modellläufen die Niederschläge mit geringeren Abweichungen wiedergegeben als in den Wintermonaten. EU_CCLM_EHIST weist eine bessere räumliche Musterübereinstimmung auf als EU_CCLM_ERA.

Tabelle 5: Gütemaße für EU_CCLM_ERA und EU_CCLM_EHIST vs. E-OBS

Modelllauf	Variable	BIAS	SRMSE	RSV	PCOR
EU_CCLM_ERA	Temperatur [°C]	-0,94	1,23	1,16	0,99
	Niederschlag [mm]	90	234	1,41	0,76
EU_CCLM_EHIST	Temperatur [°C]	-0,84	1,15	1,04	0,99
	Niederschlag [mm]	368	438	1,94	0,79

Abbildung 7: Differenz der langjährigen mittleren Niederschlagssummen 1976–2005, a) E-OBS - EU_CCLM_ERA, b) E-OBS - EU_CCLM_EHIST

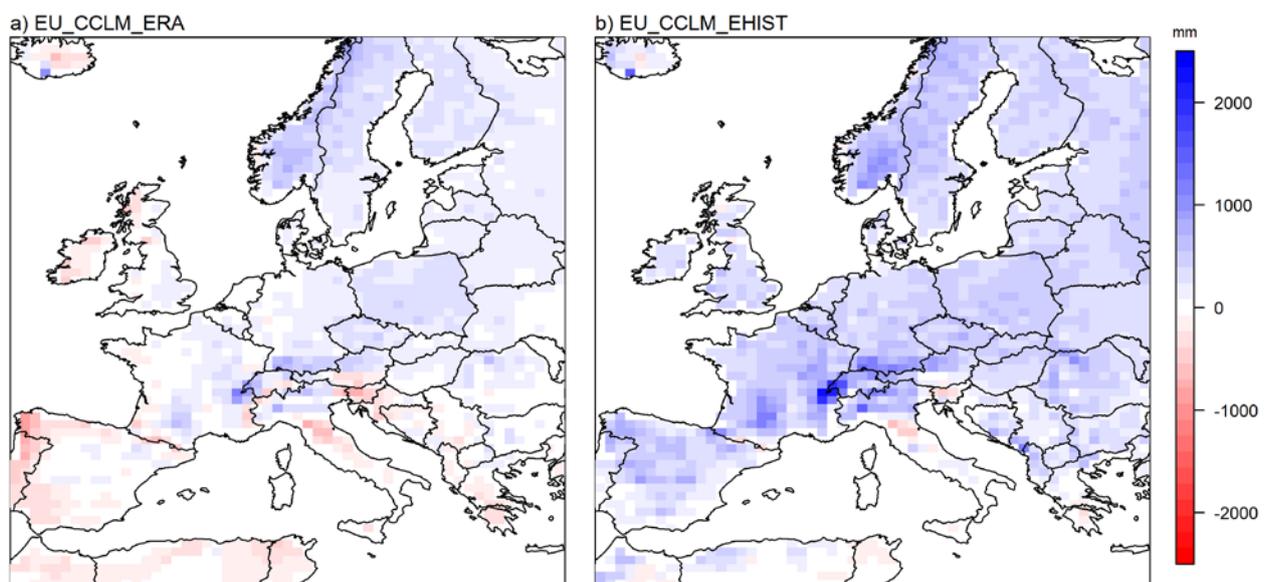


Abbildung 8: Differenz der langjährigen mittleren monatlichen Niederschlagssummen 1976–2005, a) E-OBS - EU_CCLM_ERA, b) E-OBS – EU_CCLM_EHIST

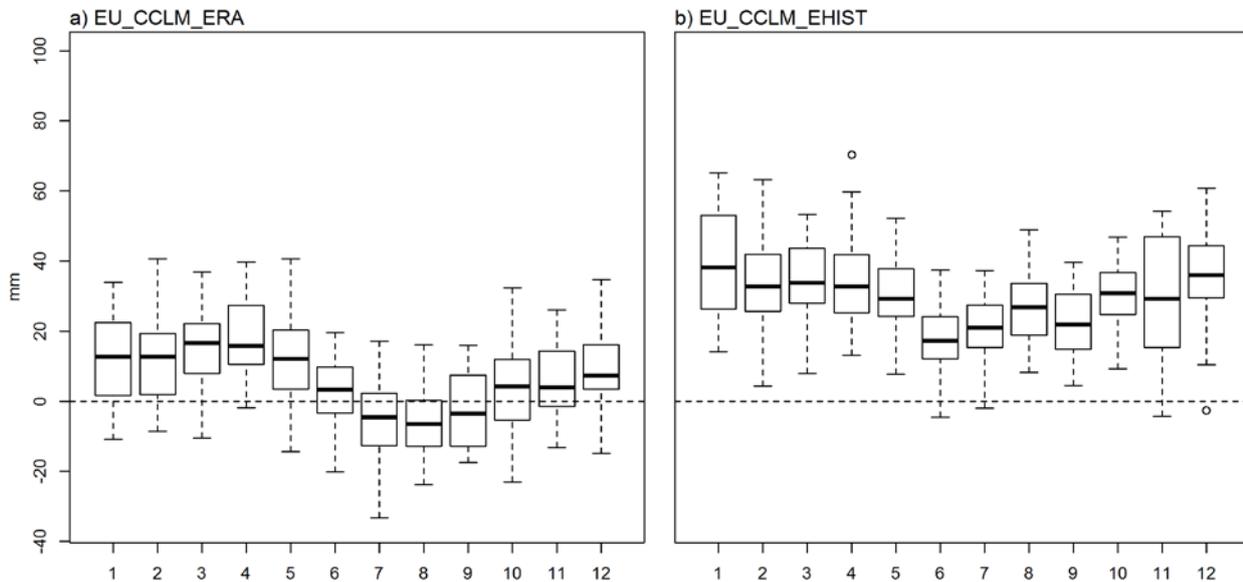


Tabelle 6: Gütemaße für EU_CCLM_ERA und EU_CCLM_EHIST vs. E-OBS, langjährige mittlere monatliche Niederschlagssummen [mm]

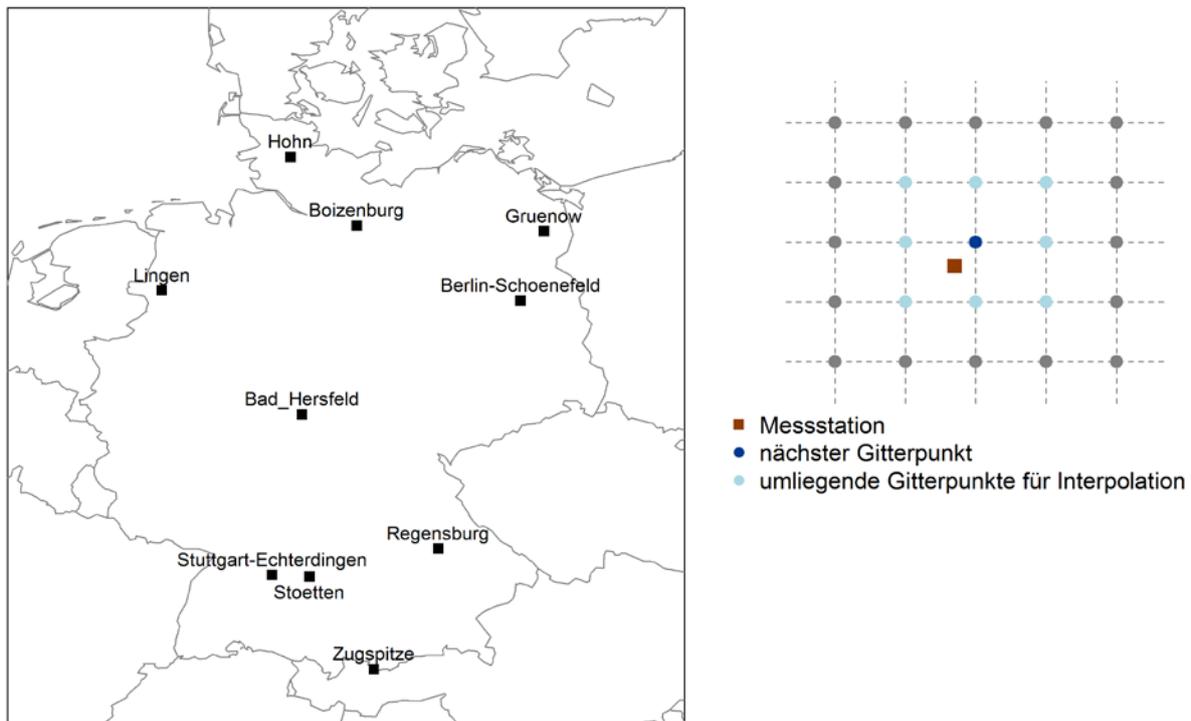
Monat	EU_CCLM_ERA				EU_CCLM_EHIST			
	BIAS	SRMSE	RSV	PCOR	BIAS	SRMSE	RSV	PCOR
JAN	13	26	0,97	0,74	39	53	2,05	0,62
FEB	12	24	1,06	0,71	34	43	1,95	0,70
MAR	17	27	1,25	0,69	35	42	1,77	0,74
APR	18	29	1,69	0,58	36	43	2,12	0,67
MAY	14	26	2,03	0,68	31	38	2,51	0,74
JUN	5	19	1,59	0,82	19	29	1,96	0,83
JUL	-4	17	1,32	0,88	22	33	2,36	0,89
AUG	-5	17	1,35	0,88	28	38	2,55	0,89
SEP	-2	19	1,29	0,81	24	32	1,75	0,82
OCT	4	24	1,02	0,76	32	40	1,27	0,78
NOV	7	26	0,88	0,66	30	41	1,49	0,70
DEC	10	28	0,87	0,67	36	47	1,71	0,73

3.3.2 Vergleich des 2. Nestings (Deutschland) mit Beobachtungsdaten

Aufgrund der höheren räumlichen Auflösung des 2. Nestings im Verhältnis zum 1. Nesting waren auch Referenzdaten mit einer entsprechend hohen räumlichen Auflösung erforderlich. Für den Vergleich der langjährigen Mitteltemperaturen wurde der sogenannte HYRAS-Datensatz (Frick et al. 2014) verwendet und für die Niederschläge der vom DWD bereitgestellte REGNIE-Datensatz (REGNIE 2013). Beide Datensätze liegen für Deutschland flächendeckend als Rasterdaten mit einer räumlichen Auflösung von 1 km vor und wurden, wie bereits die E-OBS-Daten, auf das Modellgitter interpoliert und rotiert. Zusätzlich zu den meteorologischen Variablen Niederschlag und Temperatur wurde,

aufgrund der Bedeutung für die Chemie-Transport-Modellierung, die mittlere Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe evaluiert. Für die Windgeschwindigkeit sind keine flächendeckenden Beobachtungsdaten (interpolierte Felder) verfügbar. Somit wurden 10 weiträumig über Deutschland verteilte Klimastationen ausgewählt (Abbildung 9, links) und deren Windgeschwindigkeiten mit den gemittelten Werten des räumlich nächsten und der umliegenden acht Gitterpunkte des Modellgitters verglichen (Abbildung 9, rechts).

Abbildung 9: Lage der verwendeten Klimastationen für die Bewertung der mittleren Windgeschwindigkeit (links), schematische Darstellung der verwendeten Gitterpunkte zur Interpolation der Modellwerte (rechts).



3.3.2.1 Temperatur

Die Temperaturfelder des zweiten Nestings wurden, wie in Kapitel 3.3.2 bereits erwähnt, mit den HY-RAS-Daten verglichen. Für den Referenzzeitraum von 1976 bis 2005 ergibt sich ein langjähriger Flächenmittelwert für Deutschland von 8,6 °C, was fast exakt dem aus Stationsdaten berechneten Flächenmittelwert des DWD von 8,7 °C entspricht. Betrachtet man den langjährigen Flächenmittelwert der Temperatur aus der Klimanormalperiode von 1961 bis 1990 mit einem Wert von 8,2 °C so wird deutlich, dass die gewählte Referenzperiode von 1976 bis 2005 bereits vom Klimawandel beeinflusst ist. Dies zeigt sich auch in der Tatsache, dass innerhalb dieses Zeitraumes vier der zehn wärmsten Jahre seit 1881 aufgetreten sind (1994, 1999, 2000, 2002) (DWD 2016).

Der Evaluationslauf DE_CCLM_ERA zeigt im langjährigen räumlichen Flächenmittel eine Unterschätzung der Temperaturen von -1,11 K (Tabelle 7). Dabei sind die mittleren negativen Abweichungen in Norddeutschland größer als in Süddeutschland (Abbildung 10a). Die größten Abweichungen finden sich in den Ballungsräumen, Berlins, Hamburgs und in der Metropolregion Rhein-Ruhr in Baden-Württemberg. Dies ist auf den Wärmeinseleffekt von städtischen Gebieten zurückzuführen, welcher durch die Messdaten repräsentiert, aber vom Modell explizit nicht wiedergegeben wird. Die räumliche Variabilität von DE_CCLM_ERA ist geringer, als die der Referenzdaten (RSV=0,87) und die räumliche Korrelation PCOR liegt bei 0,90.

DE_CCLM_EHIST hat mit einem BIAS von -0,77 K eine geringere mittlere Temperaturabweichung als DE_CCLM_ERA. Beide Modellläufe zeigen flächendeckend eine Unterschätzung der langjährigen mittleren Temperatur (Abbildung 10a, b), wobei der Nord-Süd Unterschied bei DE_CCLM_EHIST unschärfer ist als bei DE_CCLM_ERA. Die großstädtischen Gebiete werden auch bei DE_CCLM_EHIST stärker unterschätzt als die umliegenden Areale. Mit einem RSV von 0,95 ist die modellierte räumliche Variabilität der Temperaturen der Variabilität der Beobachtungsdaten sehr ähnlich. Bei einem räumlichen Korrelationskoeffizienten von 0,95 werden die räumlichen Temperaturmuster durch DE_CCLM_EHIST besser wiedergegeben als bei DE_CCLM_ERA.

Abbildung 10: Differenz der langjährigen Mitteltemperatur 1976–2005, a) HYRAS - DE_CCLM_ERA, b) HYRAS - DE_CCLM_EHIST

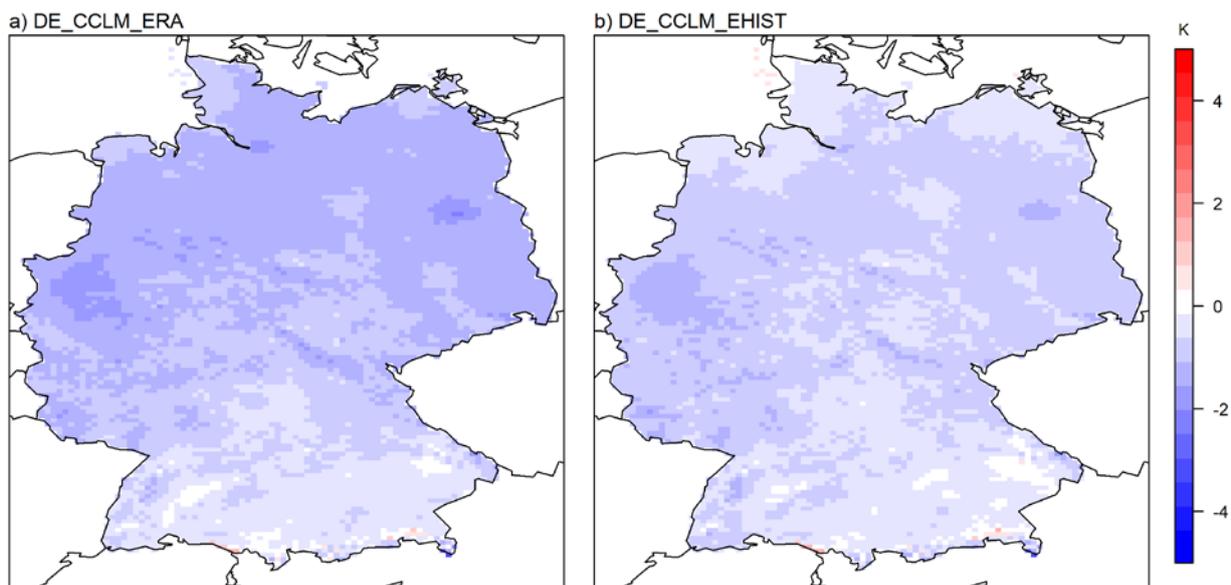


Tabelle 7: Gütemaße für DE_CCLM_ERA und DE_CCLM_EHIST vs. HYRAS und REGNIE

Modelllauf	Variable	BIAS	SRMSE	RSV	PCOR
DE_CCLM_ERA	Temperatur [°C]	-1,11	1,18	0,87	0,90
	Niederschlag [mm]	163	185	1,10	0,94
DE_CCLM_EHIST	Temperatur [°C]	-0,77	0,82	0,95	0,95
	Niederschlag [mm]	427	455	2,07	0,91

Der BIAS der langjährigen monatlichen Temperaturmittelwerte liegt bei DE_CCLM_ERA in einem Bereich von -0,38 K im September und -1,95 K im Dezember. Die Temperaturen werden im Mittel in allen Monaten unterschätzt, wobei die negativen Abweichungen in den Wintermonaten größer sind als in den Sommermonaten. Die RSV-Werte liegen zwischen 0,64 im Januar und November sowie 1,15 im September. Nur die Monate August und September zeigen RSV-Werte größer 1. Die höchsten räumlichen Korrelationen treten in den Sommermonaten auf, während der Oktober mit 0,80 die niedrigste räumliche Korrelation aufweist.

DE_CCLM_EHIST weist mit einem langjährigen mittleren BIAS von 0,77 K (Tabelle 7) eine geringere Temperaturabweichung als DE_CCLM_ERA auf. Im Jahresgang werden die Mitteltemperaturen der Wintermonate sehr gut wiedergegeben, während in den Sommermonaten auffallend hohe negative

Abweichungen auftreten. November und Dezember werden von DE_CCLM_EHIST mit positiven Abweichungen sogar etwas zu warm simuliert (Tabelle 8). Die geringen BIAS-Werte im Winter gehen einher mit RSV-Werten kleiner 1 und räumlichen Korrelationen zwischen 0,86 und 0,94. Die Sommermonate zeigen RSV-Werte nahe 1 und etwas höhere räumliche Korrelationen als die Wintermonate mit PCOR-Werten von 0,93.

Wie bereits bei den Europasimulationen des ersten Nestings festgestellt, unterschätzt der mit Reanalysedaten angetriebene Modelllauf die Wintermonate mehr als die Sommermonate und der mit ECHAM6 angetriebene Modelllauf zeigt im Gegensatz dazu geringere Abweichungen im Winter und die größeren Abweichungen im Sommer. Die räumlichen Muster werden relativ gut wiedergegeben und das Verhältnis der räumlichen Varianzen ist ebenfalls akzeptabel. Die SRMSE-Werte deuten bei beiden Modellläufen auf moderate Abweichungen ohne nennenswerte Ausreißer hin. Die großen negativen Abweichungen der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen bei DE_CCLM_EHIST von über 2 K im Juli und August sind jedoch als zu hoch einzustufen.

Abbildung 11: Differenz der langjährigen monatlichen Mitteltemperatur 1976–2005, a) HYRAS - DE_CCLM_ERA, b) HYRAS - DE_CCLM_EHIST

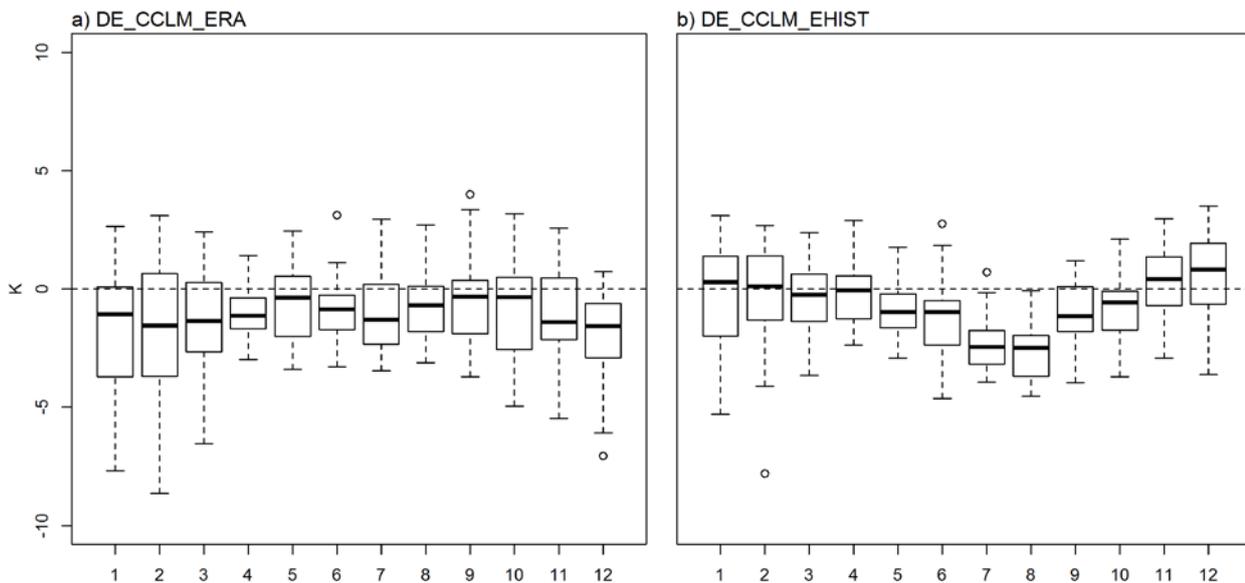


Tabelle 8: Gütemaße für DE_CCLM_ERA und DE_CCLM_EHIST vs. HYRAS, langjährige monatliche Mitteltemperaturen [K]

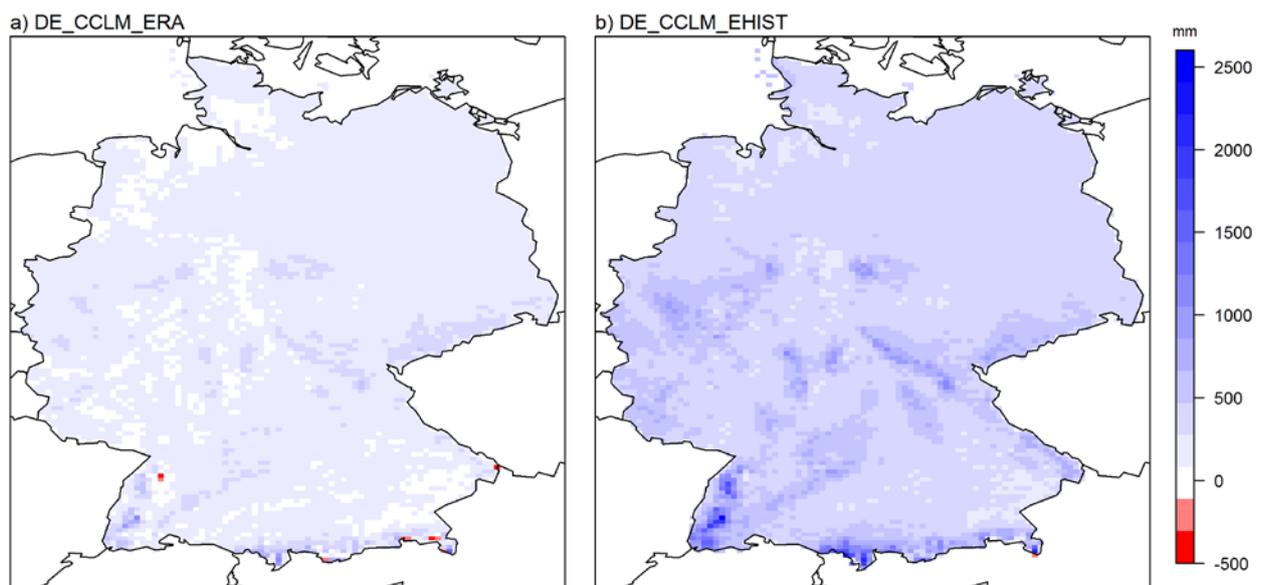
Monat	DE_CCLM_ERA				DE_CCLM_EHIST			
	BIAS	SRMSE	RSV	PCOR	BIAS	SRMSE	RSV	PCOR
JAN	-1,86	1,97	0,64	0,85	-0,36	0,67	0,67	0,88
FEB	-1,74	1,83	0,82	0,85	-0,37	0,61	0,92	0,89
MAR	-1,25	1,29	0,95	0,95	-0,35	0,49	0,88	0,94
APR	-0,98	1,02	0,86	0,95	-0,11	0,30	0,88	0,96
MAY	-0,61	0,69	0,92	0,95	-0,91	0,96	1,00	0,95
JUN	-0,83	0,88	0,96	0,96	-1,22	1,27	0,96	0,93
JUL	-0,95	1,02	0,98	0,93	-2,26	2,29	0,98	0,93
AUG	-0,73	0,86	1,13	0,88	-2,59	2,62	1,01	0,93
SEP	-0,38	0,59	1,15	0,87	-0,94	0,98	1,03	0,95

OCT	-0,79	0,94	0,95	0,80	-0,86	0,92	1,05	0,93
NOV	-1,26	1,36	0,64	0,89	0,19	0,61	0,58	0,86
DEC	-1,95	2,03	0,65	0,86	0,55	0,67	0,79	0,94

3.3.2.2 Niederschlag

Im zweiten Nesting werden die Niederschläge, wie bereits bei den Europaläufen des ersten Nestings festgestellt wurde, stark überschätzt. DE_CCLM_ERA hat eine Abweichung der langjährigen mittleren Niederschlagssumme von +163 mm (22 %) im Vergleich zu den Referenzwerten des REGNIE-Datensatzes (Tabelle 7). Dabei treten die größten Abweichungen in den Mittelgebirgen und den Alpen auf (Abbildung 12a). DE_CCLM_EHIST zeigt sehr ähnliche räumliche Muster mit einem jedoch wesentlich höheren BIAS von +427 mm, was einer Überschätzung der langjährigen mittleren Niederschlagssumme von 56 % entspricht. Dies bedeutet, dass das Klimamodell mit ECHAM6-Daten als Antrieb für Deutschland eineinhalbmal so viel Niederschlag simuliert wie gemessen wurde. Zurückzuführen ist dies wiederum auf den zu hohen Feuchteintrag durch das Globale Modell ECHAM6, welcher bereits im 1. Nesting zu einer starken Überschätzung des Niederschlages führte.

Abbildung 12: Differenz der langjährigen mittleren Niederschlagssummen 1976–2005, a) REGNIE - DE_CCLM_ERA, b) REGNIE - DE_CCLM_EHIST



Im Jahresgang von DE_CCLM_ERA haben die Sommermonate geringere Abweichungen der langjährigen mittleren monatlichen Niederschlagssummen als die Wintermonate, wobei im August mit -1 mm der niedrigste BIAS auftritt. Die größeren Abweichungen in den Wintermonaten gehen einher mit hohen Variabilitäten (vor allem im Januar, Abbildung 13a) und minimal besseren räumlichen Korrelationen als in den Sommermonaten. Die RSV-Werte liegen von Juli bis August unter 1 und haben ihr Maximum im April mit 1,77.

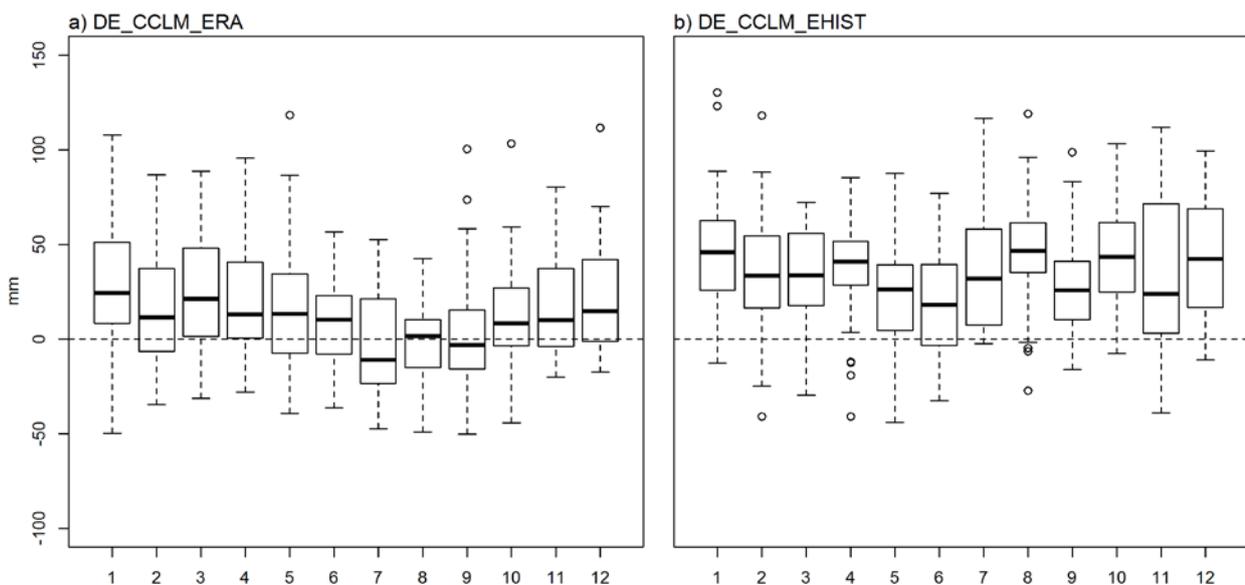
Beim Modelllauf DE_CCLM_EHIST ist der BIAS in allen Monaten durchweg positiv, wobei kein deutliches zeitliches Muster der Abweichungen erkennbar ist (Tabelle 9). Die geringste mittlere Abweichung mit +18 mm tritt im Juni auf und die höchste mit +48 mm im August. Die im Vergleich mit DE_CCLM_ERA hohen BIAS-Werte korrespondieren mit ebenfalls höheren SRMSE-Werten, sowie Verhältnissen der räumlichen Varianz (RSV) von über 1 und bis zu 2,64 im April. Die räumlichen Korrelationskoeffizienten unterstreichen die geringere Performance von DE_CCLM_EHIST im Vergleich mit DE_CCLM_ERA durch etwas niedrigere Werte.

In der Zusammenschau ist erkennbar, dass das regionale Klimamodell CCLM, in der eingangs beschriebenen Konfiguration, bereits beim Antrieb mit Reanalysedaten den langjährigen mittleren Niederschlag überschätzt. Dabei werden die Sommermonate besser abgebildet als die Wintermonate. Beim mit ECHAM6-Daten angetriebenen Modelllauf des zweiten Nestings für Deutschland wird dieser Effekt noch verstärkt, was sich in weitaus höheren positiven mittleren Abweichungen zeigt.

Tabelle 9: Gütemaße für DE_CCLM_ERA und DE_CCLM_EHIST vs. REGNIE, langjährige monatliche Niederschlagssummen [mm]

Monat	DE_CCLM_ERA				DE_CCLM_EHIST			
	BIAS	SRMSE	RSV	PCOR	BIAS	SRMSE	RSV	PCOR
JAN	27	29	1,37	0,90	46	51	2,45	0,84
FEB	15	17	1,27	0,91	34	36	2,12	0,92
MAR	24	26	1,40	0,92	34	36	1,98	0,89
APR	18	20	1,77	0,94	35	38	2,64	0,93
MAY	19	22	1,56	0,90	24	28	2,08	0,88
JUN	8	15	1,22	0,89	18	26	1,27	0,78
JUL	-4	16	0,71	0,84	40	46	1,96	0,79
AUG	-1	10	0,85	0,90	48	53	2,17	0,74
SEP	5	11	0,78	0,88	28	31	1,81	0,85
OCT	13	16	0,91	0,91	43	46	2,27	0,87
NOV	16	18	1,13	0,91	33	35	1,51	0,90
DEC	23	25	1,11	0,91	44	47	2,04	0,90

Abbildung 13: Differenz der langjährigen mittleren monatlichen Niederschlagssummen 1976–2005, a) REGNIE - DE_CCLM_ERA, b) REGNIE - DE_CCLM_EHIST



3.3.2.3 Wind

Für die Modellläufe des zweiten Nestings wurde zusätzlich die Windgeschwindigkeit an Daten ausgewählter Wetterstationen des DWD überprüft (vgl. die Ausführungen am Beginn des Kapitels). Kriterien für die Auswahl der Stationen waren einerseits die Lage, wobei Stationen aus dem Tiefland, dem Mittelgebirge, den Alpen und in städtischer Umgebung enthalten sein sollten, sowie eine möglichst hohe Datendichte mit nur wenigen Lücken in den Zeitreihen, um robuste Mittelwerte berechnen zu können.

Tabelle 10: Langjähriger mittlerer BIAS der Windgeschwindigkeit [m/s] 1976–2005 zwischen Modelldaten und Stationsdaten

	DE_CCLM_ERA	DE_CCLM_EHIST
Berlin-Schönefeld	0,0	0,1
Boizenburg	0,7	0,9
Grünow	-0,2	0,0
Bad Hersfeld	1,7	2,0
Hohn	1,0	1,1
Lingen	1,4	1,7
Regensburg	1,2	1,6
Stoetten	-0,8	-0,4
Stuttgart-Echterdingen	0,7	1,0
Zugspitze	-4,3	-4,0

Die Abweichungen der langjährigen jährlichen Mittelwerte der Windgeschwindigkeit liegen für DE_CCLM_ERA im Wertebereich von -4,3 m/s bis 1,7 m/s (Tabelle 10). Dabei stellt die Abweichung der Modellwerte von den Messwerten an der Station Zugspitze, aufgrund ihrer extremen Lage, einen starken Ausreißer dar. Bezieht man die Werte der Station Zugspitze nicht in die Betrachtungen mit ein, liegen die Abweichung zwischen -0,8 m/s und 1,7 m/s. Für DE_CCLM_EHIST ergibt sich ein Wertebereich der Abweichungen (ebenfalls ohne die Station Zugspitze) von -0,4 m/s bis 2,0 m/s. Die Windgeschwindigkeiten beider Modellläufe werden im langjährigen Mittel an 6 von 10 Stationen von DE_CCLM_ERA und an 7 von 10 Stationen von DE_CCLM_EHIST überschätzt. Auffällig ist ein Zusammenhang zwischen der orographischen Höhenlage der Stationen und der Größe des BIAS. Je höher eine Messstation liegt umso geringer die Übereinstimmung zwischen Mess- und Modellwerten.

Die Differenzen der langjährigen monatlichen Mittelwerte der Windgeschwindigkeit von DE_CCLM_ERA und den Stationsdaten zeigen keine einheitlichen zeitlichen Muster (Tabelle 11). So werden an den Stationen Berlin-Schönefeld und Grünow die Wintermonate geringfügig unterschätzt und die Sommermonate geringfügig überschätzt, während die Modellwerte im Vergleich mit den Daten der Stationen Hohn, Lingen und Regensburg im Jahresverlauf keine nennenswerten Variabilitäten aufweisen. An den Stationen Bad Hersfeld und Stuttgart-Echterdingen sind hingegen die Abweichungen in den Wintermonaten höher als in den Sommermonaten. Wie bereits bei den langjährigen Jahresmittelwerten erkennbar stellt die Station Zugspitze mit ihrer exponierten Lage eine Ausnahme dar. Vom Modelllauf DE_CCLM_ERA werden die mittleren Windgeschwindigkeiten an dieser Station in allen Monaten stark unterschätzt.

Beim Modelllauf DE_CCLM_EHIST werden die Winddaten der Stationen Berlin-Schönefeld und Grünow ebenfalls mit den geringsten Abweichungen wiedergegeben, wobei auch hier die Sommermonate leicht überschätzt und die Wintermonate leicht unterschätzt werden (Tabelle 12). Die bereits

für DE_CCLM_ERA festgestellten Ausprägungen der Differenzen zwischen Stationsdaten und Modell-
 ergebnissen treffen auch hier zu, wobei jedoch die positiven Abweichungen bei DE_CCLM_EHIST
 größtenteils nicht so hoch ausfallen wie bei DE_CCLM_ERA.

Tabelle 11: BIAS der langjährigen monatlichen Mittelwerte der Windgeschwindigkeit, 1976 -
 2005, DE_CCLM_ERA -Stationen

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Berlin-Schönefeld	-0,2	-0,2	-0,3	0,0	0,2	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	-0,1	-0,2
Boizenburg	0,5	0,4	0,5	0,7	0,9	1,0	0,9	0,8	0,8	0,8	0,6	0,4
Grünow	-0,5	-0,5	-0,5	-0,3	0,1	0,3	0,0	0,0	-0,1	-0,2	-0,4	-0,4
Bad Hersfeld	2,0	1,7	1,8	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,6	1,9	1,8	2,0
Hohn	0,9	0,7	0,7	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,1	1,0
Lingen	1,4	1,4	1,4	1,3	1,4	1,3	1,3	1,3	1,5	1,6	1,4	1,5
Regensburg	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,2	1,2	1,3	1,4	1,1	1,2
Stoetten	-1,0	-0,9	-1,0	-0,8	-0,6	-0,5	-0,5	-0,5	-0,8	-0,8	-0,8	-1,0
Stuttgart-Echterdingen	1,0	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,9	0,9	0,9
Zugspitze	-5,6	-4,5	-4,7	-3,6	-3,3	-3,4	-3,4	-3,3	-4,0	-5,1	-5,3	-5,7

Tabelle 12: BIAS der langjährigen monatlichen Mittelwerte der Windgeschwindigkeit, 1976 -
 2005, DE_CCLM_EHIST -Stationen

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Berlin-Schönefeld	-0,4	0,0	-0,4	0,2	0,2	0,3	0,3	0,5	0,3	0,3	0,0	0,1
Boizenburg	0,3	0,6	0,4	0,9	0,9	1,2	1,2	1,3	1,1	1,1	0,6	0,7
Grünow	-0,7	-0,4	-0,6	0,0	0,2	0,4	0,4	0,5	0,2	0,1	-0,5	-0,1
Bad Hersfeld	2,0	2,1	1,9	1,9	1,6	1,7	2,0	2,2	2,1	2,3	2,1	2,4
Hohn	0,6	0,8	0,5	1,0	0,9	1,2	1,3	1,5	1,5	1,5	1,2	1,3
Lingen	1,3	1,6	1,4	1,5	1,3	1,5	1,7	1,9	2,0	2,1	1,7	1,9
Regensburg	1,4	1,6	1,4	1,5	1,5	1,5	1,7	1,7	1,6	1,8	1,4	1,6
Stoetten	-0,8	-0,5	-0,9	-0,4	-0,4	-0,2	-0,1	0,1	-0,4	-0,4	-0,5	-0,6
Stuttgart-Echterdingen	1,2	1,1	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1,1	1,0	1,3	1,1	1,3
Zugspitze	-5,3	-4,2	-4,5	-3,4	-3,1	-3,1	-3,0	-2,7	-3,7	-4,6	-5,1	-5,3

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Güte der Modelldaten in Bezug auf die ausgewerteten Windgeschwindigkeiten ortsabhängig ist. Die Windgeschwindigkeiten der im ostdeutschen Tiefland gelegenen Stationen werden von beiden Modellläufen des Referenzzeitraumes 1976 bis 2005 am besten wiedergegeben. DE_CCLM_EHIST tendiert im Vergleich mit DE_CCLM_ERA allgemein zu höheren positiven Abweichungen. Generelle zeitliche Muster der Abweichungen sind nicht erkennbar, wobei jedoch häufig Unterschiede zwischen Winter und Sommer festgestellt werden konnten.

3.4 Klimatische Änderungen bis 2050

3.4.1 Erfassung klimatischer Änderungen

Klimatische Änderungen werden durch den Vergleich der Ausprägung meteorologischer Variablen unterschiedlicher Zeiträume erfasst. Dabei werden vor allem statistische Parameter zueinander in Beziehung gesetzt, um die Änderung der mittleren klimatischen Eigenschaften der betreffenden Zeiträume zu beurteilen. Die Änderung der Ausprägung einer meteorologischen Variablen von einem Zeitraum zu einem anderen Zeitraum wird auch als Klimaänderungssignal bezeichnet. Wird bspw. für einen 30-jährigen Referenzzeitraum eines Gebietes ein langjähriger Mittelwert der Temperatur von 7,5°C ermittelt und für einen anderen, ebenfalls 30-jährigen Zeitraum ein langjähriger Mittelwert von 8,2°C, so ergibt sich aus der Differenz beider Werte ein positives Klimaänderungssignal von 0,7 K.

Dabei wird die Annahme getroffen, dass die für vergangene Zeiträume festgestellten Abweichungen und Modellfehler für zukünftige Perioden konstant sind oder zumindest denselben Wertebereich aufweisen. Diese (sehr pragmatische) Herangehensweise beruht auf der Tatsache, dass sich Zukunftsmodellläufe natürlicherweise nicht an Messdaten validieren lassen. Maraun (2012) zeigt hingegen auf, dass die angenommene Stationarität des Bias von Niederschlag und Temperatur für vergangene Zeiträume in der Zukunft nicht gegeben sein muss.

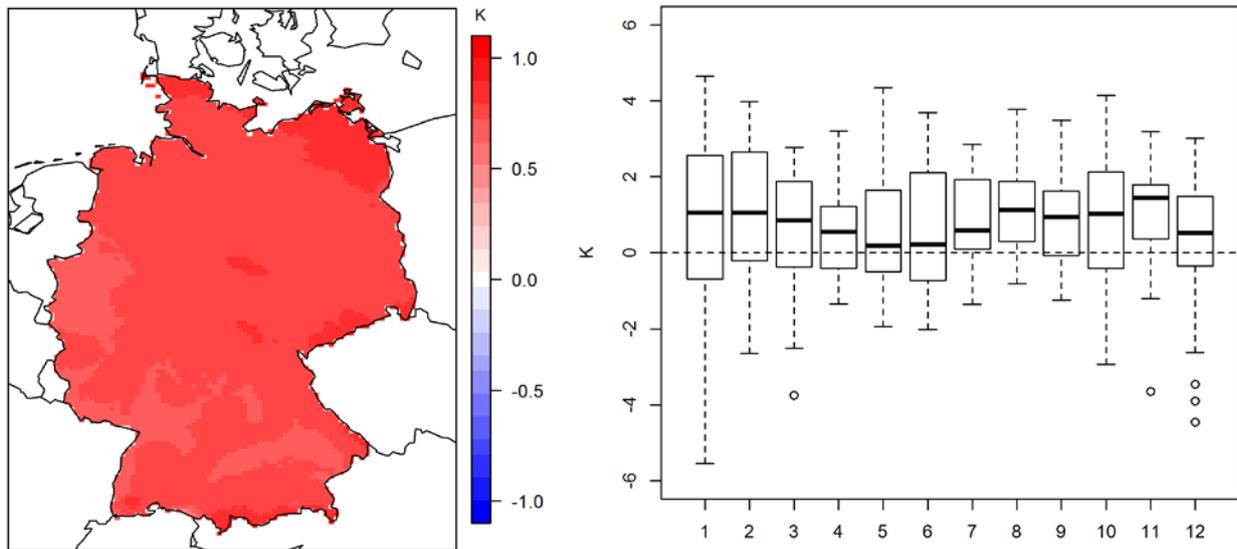
Im Projekt KLENOS wurden die modellierten Klimaänderungen durch den Vergleich der Modellläufe DE_CCLM_RCP85 (2021-2050) und DE_CCLM_EHIST (1976–2005) ermittelt. Die Beschreibung der Klimaänderungen des ersten Nestings (Modellläufe EU_CCLM_RCP85 und EU_CCLM_EHIST) wird in diesem Bericht nicht vorgenommen. Somit bleiben die erzielten Ergebnisse auf das Modellgebiet Deutschland fokussiert. Weiterhin wurden genau jene Datensätze hinsichtlich klimatischer Änderungen ausgewertet, die als meteorologischer Antrieb an das Chemie-Transport-Modell REM-CALGRID (RCG) übergeben wurden.

3.4.2 Temperatur

3.4.2.1 Mittlere langjährige jährliche und monatliche Klimaänderungen

Der Vergleich des Kontrolllaufs DE_CCLM_EHIST mit der Klimaprojektion des IPCC Klimaszenarios RCP 8.5 (DE_CCLM_RCP85) zeigt für das langjährige jährliche Mittel der Temperatur für Deutschland eine Zunahme um 0,8 K (Flächenmittelwert). Dies gilt für das Gesamtgebiet Deutschlands, wobei im Nordosten, den östlichen Mittelgebirgen und in den Alpen die größten Temperaturanstiege verzeichnet werden (Abbildung 14, links). Im langjährigen mittleren Jahressgang sind in allen Monaten Temperaturanstiege erkennbar, wobei die stärksten Temperaturzunahmen in den Wintermonaten zu verzeichnen sind (Abbildung 14, rechts). Positive Änderungen von bis zu 1,1 Kelvin (Median) treten im Februar und November auf. Dezember und Januar zeigen zusätzlich eine hohe Schwankungsbreite der monatlichen Abweichungen für die 30-jährige Zukunftsperiode

Abbildung 14: Änderung der langjährigen mittleren Temperatur, 2021-2050; links jährliche Änderung, rechts monatliche Änderung

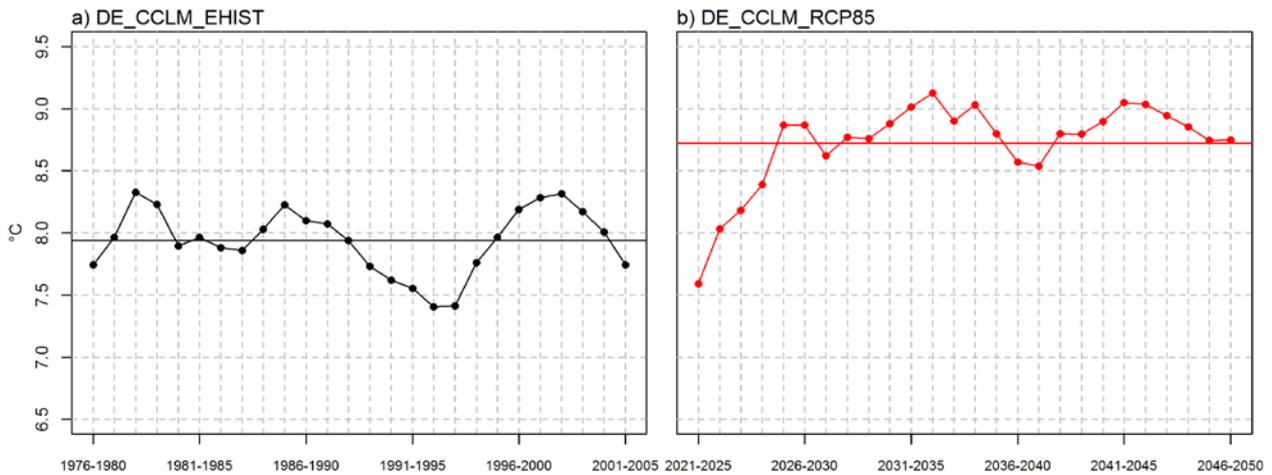


3.4.2.2 Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte

Zur Betrachtung der zeitlichen Abfolge der Temperaturentwicklung wurden in Abbildung 15 die gleitenden 5-jährigen Mittelwerte des Kontrolllaufes DE_CCLM_EHIST (a) und des regionalen Klimaszenarios DE_CCLM_RCP85 (b) gegenübergestellt. Der Temperaturverlauf der gleitenden Mittelwerte in DE_CCLM_EHIST zeigt von 1976 bis 1986 Schwankungen um den 30-jährigen Mittelwert von 7,9 °C und dann bis 1993 einen Temperaturrückgang auf 7,4 °C gefolgt von einem Anstieg der Werte bis Anfang 2000 auf 8,3 °C. Danach sinken die Werte bis zum Ende der Periode knapp unter den langjährigen Mittelwert auf 7,7 °C.

Der Temperaturverlauf der gleitenden 5-jährigen Mittelwerte des Szenariolaufes DE_CCLM_RCP85 zeigt einen raschen Anstieg von 7,6 °C auf bis zu 8,9 °C in den ersten fünf Jahren der Zukunftsperiode von 2021 bis 2050. Danach verbleiben die gleitenden 5-jährigen Mittelwerte auf hohem Niveau und schwanken im zeitlichen Verlauf bis zum Ende der Periode um den 30-jährigen Mittelwert von 8,7 °C. Die Abweichungen vom langjährigen Mittelwert betragen dabei bis zu $\pm 0,3$ K. Deutlich erkennbar in der Gegenüberstellung der gleitenden 5-jährigen Mittelwerte ist das höhere Temperaturniveau des Klimaszenarios DE_CCLM_RCP85 im Vergleich zum Kontrolllauf DE_CCLM_EHIST.

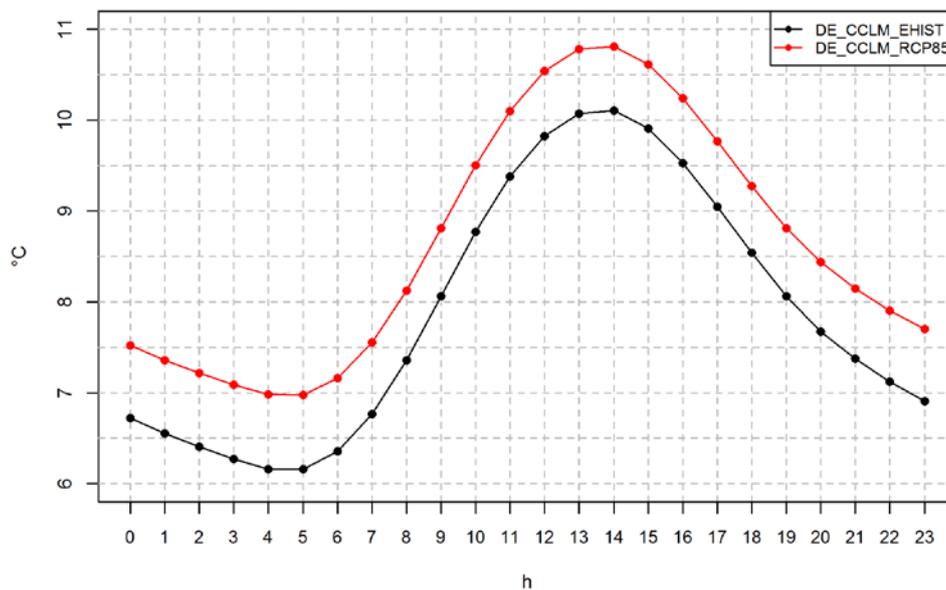
Abbildung 15: Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte der Temperatur, a) DE_CCLM_EHIST 1976–2005, b) DE_CCLM_RCP85 2021–2050. Die durchgezogenen Linien zeigen den jeweiligen 30-jährigen Mittelwert.



3.4.2.3 Langjährige mittlere Tagesgänge

In Abbildung 16 sind die 30-jährigen mittleren Tagesgänge der Modellläufe DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85 eingezeichnet. Hier zeigt sich, dass der bereits in den vorangegangenen Auswertungen aufgezeigte mittlere Temperaturanstieg auch im Tagesgang deutlich erkennbar ist. So sind die langjährigen Mitteltemperaturen des Szenariolaufes DE_CCLM_RCP85 zu jedem Zeitpunkt höher als im Kontrolllauf DE_CCLM_EHIST. Die Nachttemperaturen, die gleichzeitig die Minimumtemperaturen repräsentieren, haben im Mittel etwas größere Temperaturzunahmen als die Tagestemperaturen. Das mittlere Tagesmaximum von DE_CCLM_EHIST, welches gegen 14:00 Uhr auftritt, wird von DE_CCLM_RCP85 bereits 3 Stunden früher gegen 11:00 Uhr erreicht und um 14:00 Uhr um 0,7 K überschritten. Die höheren Nachttemperaturen führen zu einer verringerten Abkühlung und zu einer geringfügig niedrigeren Amplitude im Tagesgang von DE_CCLM_RCP85 gegenüber DE_CCLM_EHIST.

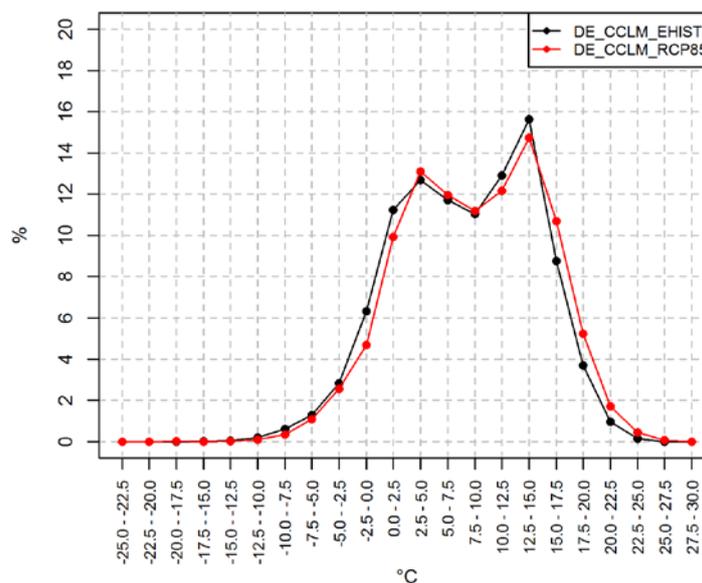
Abbildung 16: 30-jähriger mittlerer Tagesgang der Temperatur von DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85



3.4.2.4 Häufigkeitsverteilungen

Die Häufigkeitsverteilung der täglichen Mittelwerte der Temperatur basiert auf den Flächenmittelwerten aller modellierten Tage der jeweiligen 30-jährigen Periode. Abbildung 17 zeigt, dass die Häufigkeitsverteilung der täglichen Mitteltemperaturen eine zweigipflige Form aufweist. Dies liegt an dem in Deutschland vorherrschenden Jahreszeitenklima. Somit basiert die ganzjährige Temperaturverteilung auf einer Winter- und einer Sommerverteilung der vorliegenden Daten. Es ist erkennbar, dass in der Zukunftsperiode Tagesmitteltemperaturen unter 0 °C weniger häufig auftreten als in der Referenzperiode, zugunsten höherer Temperaturen. Weiterhin zeigt sich, dass im Modelllauf DE_CCLM_RCP85 Temperaturen ab 15 °C und wärmer häufiger ermittelt wurden als für DE_CCLM_EHIST. Es tritt in der Zukunftsperiode somit eine Verschiebung der Häufigkeiten von niedrigeren Temperaturen hin zu höheren täglichen Mitteltemperaturen auf. Dies stützt noch einmal die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen mittleren langjährigen Temperaturanstiege im Vergleich zwischen DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85.

Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung der mittleren täglichen Temperaturen (Flächenmittelwerte), DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85



3.4.3 Niederschlag

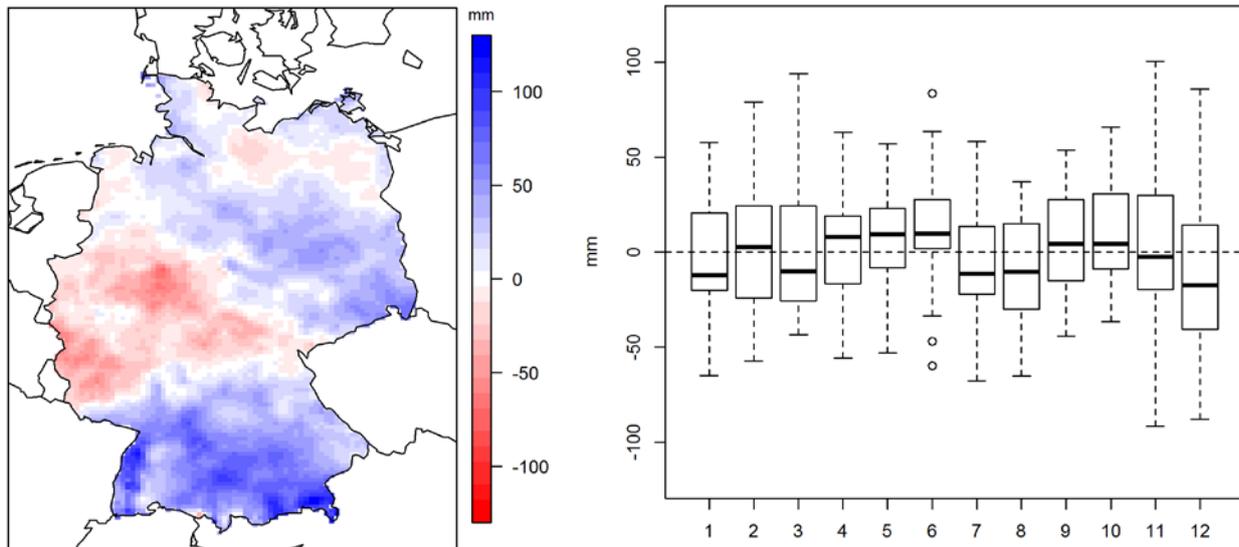
3.4.3.1 Mittlere langjährige jährliche und monatliche Klimaänderungen

Die Änderung des langjährigen Flächenmittelwertes des Niederschlages für Gesamtdeutschland ist mit 15 mm (1,3 %) als sehr gering einzuschätzen, auch im Hinblick auf die starken Unsicherheiten, ausgedrückt durch die ermittelten Abweichungen (siehe Kapitel 3.3.2.2). Betrachtet man hingegen die räumliche Verteilung der langjährigen mittleren Änderung (Abbildung 18, links) so zeigen sich im Nordosten und im Westen bis hinein nach Thüringen in den mitteldeutschen Raum negative Änderungen der langjährigen, jährlichen Niederschlagssumme von bis zu -70 mm/Jahr. Im verbleibenden Teil Deutschlands nehmen die Niederschläge zu, wobei die größten positiven Änderungen mit bis zu 130 mm/Jahr im Alpenvorland, den Alpen und im Schwarzwald auftreten.

Im Jahresgang liegen die Mediane der langjährigen monatlichen Niederschlagsänderungen in einem Bereich von -17 mm bis +10 mm. Dabei können Zunahmen von bis zu +100 mm/Monat und Abnahmen von bis zu -92 mm/Monat auftreten. Aus dem Boxplot der langjährigen monatlichen Niederschlagsänderungen (Abbildung 18, rechts) ist kein eindeutiges zeitliches Muster erkennbar. Im Dezember tritt die höchste Niederschlagsabnahme mit einem Median von -17 mm/Monat, gefolgt vom

Januar mit -12 mm/Monat auf. Von April bis Juni nimmt der Niederschlag mit Werten von +8 mm bis +10 mm zu, wobei Juli und August nachfolgend einen Rückgang der monatlichen Niederschläge mit -11 mm und -10 mm anzeigen (Mediane). Insgesamt zeigen die Unterschiede des Niederschlages zwischen Projektion (DE_CCLM_RCP85, 2021–2050) und Referenz (DE_CCLM_EHIST, 1976–2005) eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität mit nur geringen mittleren Änderungen.

Abbildung 18: Änderung der langjährigen mittleren Niederschlagssumme, 2021–2050; links jährliche Änderung, rechts monatliche Änderung

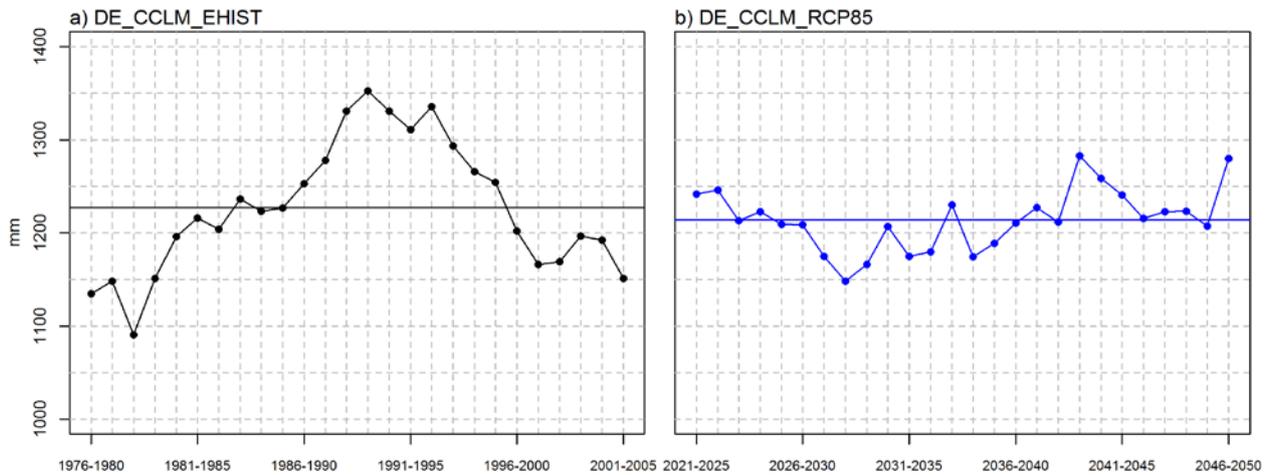


3.4.3.2 Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte

In der Gegenüberstellung der gleitenden 5-jährigen Mittelwerte der jährlichen Niederschlagssummen für die Modellläufe DE_CCLM_EHIST (Abbildung 19a) und DE_CCLM_RCP85 (Abbildung 19b) ist erkennbar, dass beide Modellläufe bei einem fast gleichen 30-jährigen Mittelwert der jährlichen Niederschlagssummen mit 1227 mm für DE_CCLM_EHIST und 1214 mm für DE_CCLM_RCP85 sehr unterschiedliche Zeitreihen aufweisen. In (Abbildung 19a) ist erkennbar, dass ab Mitte der 70er bis Anfang der 90er Jahre die gleitenden Mittelwerte der jährlichen Niederschlagssummen bis auf 1353 mm steigen und dann bis zum Jahr 2005 kontinuierlich zurückgehen.

In der Zukunftsperiode des Modellaufes DE_CCLM_RCP85 sinken die Niederschläge von 2021 bis ca. 2028 und steigen dann bis Mitte der 2040er Jahre an, um danach wieder einen Rückgang zu verzeichnen. Die Schwankungen um die mittlere Niederschlagssumme sind dabei wesentlich geringer als bei DE_CCLM_EHIST.

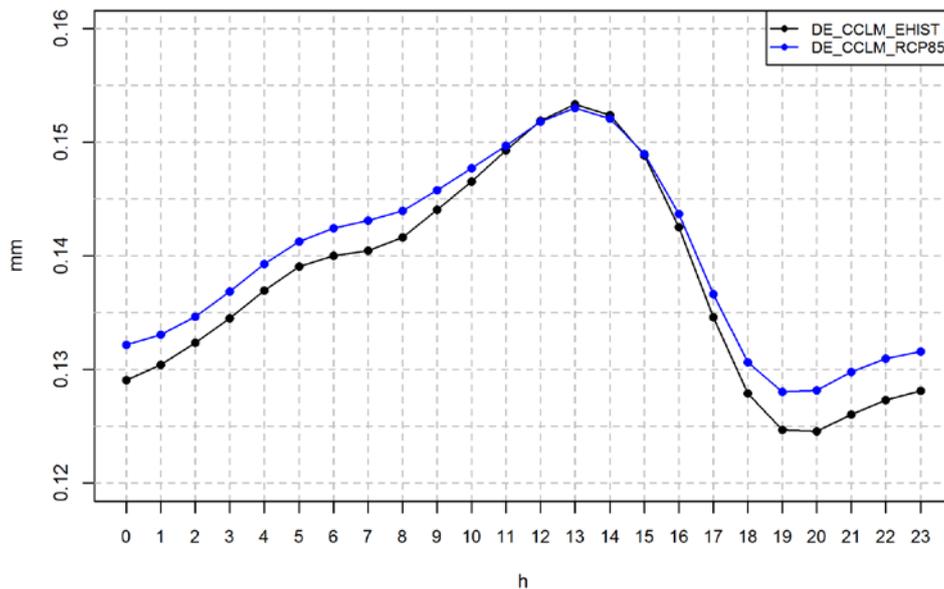
Abbildung 19: Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte der jährlichen Niederschlagssummen, a) DE_CCLM_EHIST 1976–2005, b) DE_CCLM_RCP85 2021–2050. Die durchgezogenen Linien zeigen den jeweiligen 30-jährigen Mittelwert.



3.4.3.3 Langjährige mittlere Tagesgänge

Die Veränderungen im mittleren langjährigen Tagesgang des Niederschlages von DE_CCLM_RCP85 im Vergleich zu DE_CCLM_EHIST zeigen sich vor allem in den Abend-, Nacht- und Vormittagsstunden mit höheren Niederschlagssummen (Abbildung 20). Das Tagesmaximum bleibt dabei annähernd gleich in der Niederschlagshöhe und im zeitlichen Auftreten.

Abbildung 20: 30-jähriger mittlerer Tagesgang des Niederschlages von DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85

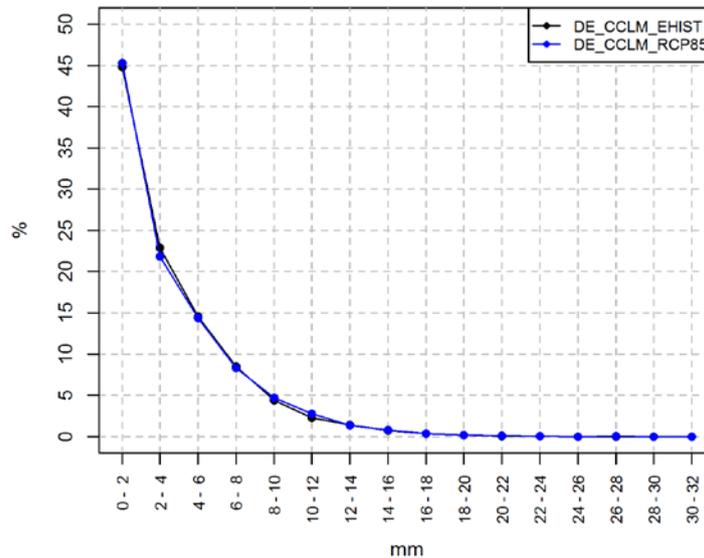


3.4.3.4 Häufigkeitsverteilungen

Die Häufigkeitsverteilungen für die täglichen Niederschlagssummen weisen kaum Unterschiede im Vergleich zwischen DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85 auf (Abbildung 21). Beide Verteilungen

haben die größten Häufigkeiten in der Klasse 0-2 mm und nachfolgend mit zunehmender Niederschlagshöhe abnehmende Häufigkeiten. Extremwerte treten bei beiden Verteilungen nur mit äußerst geringen Häufigkeiten auf. Anhand der Häufigkeitsverteilungen der täglichen Flächenmittelwerte des Niederschlages sind zwischen beiden Modellläufen kaum relevante Unterschiede sichtbar.

Abbildung 21: Häufigkeitsverteilung der mittleren täglichen Niederschlagssumme (Flächenmittelwerte), DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85



3.4.4 Wind

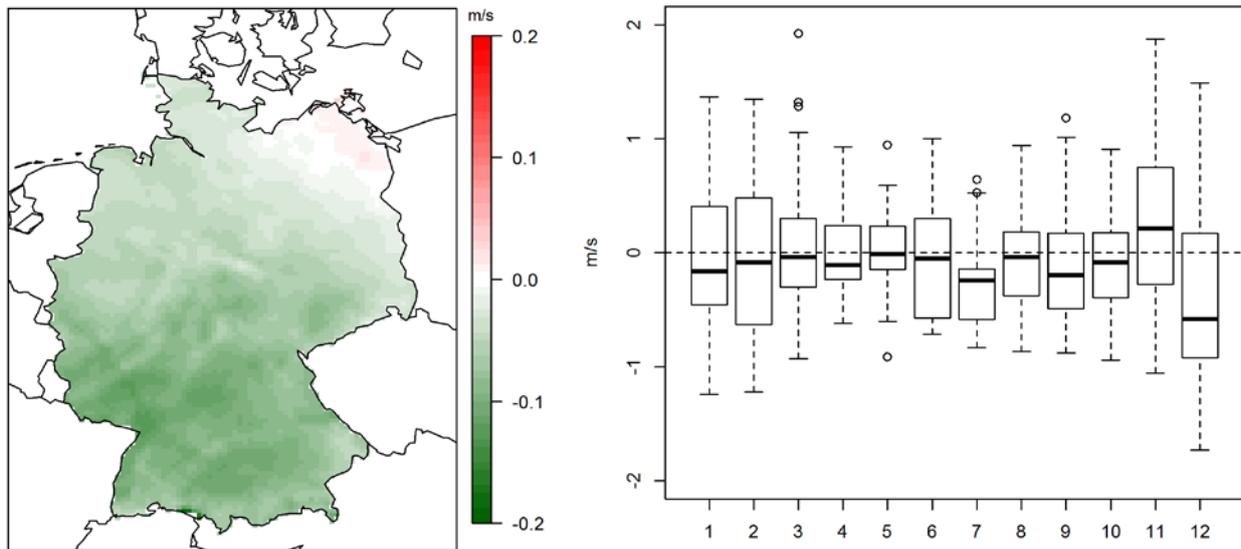
3.4.4.1 Mittlere langjährige jährliche und monatliche Klimaänderungen

Eine wichtige meteorologische Variable bei der Abbildung von Stofftransporten in der Atmosphäre ist die Windgeschwindigkeit. Sie bedingt im starken Maße den Transfer und die Verteilung emittierter Luftschadstoffe. Die erfasste Windgeschwindigkeit an einem beliebigen Punkt ist ein Ergebnis großräumiger Druckunterschiede in Verbindung mit einer regionalen bis lokalen Überprägung durch kleinräumige Druckanomalien, lokale Windsysteme und die jeweilige Orographie. Somit ist die Windgeschwindigkeit durch eine hohe räumliche und auch zeitliche Variabilität gekennzeichnet, deren Ausprägung sich in klimatologischen Mittelwerten nur bedingt wiedergeben lässt.

Aufgrund der starken zeitlichen und räumlichen Aggregation lässt sich aus den langjährigen Flächenmitteln für Deutschland keine relevante Änderung der Windgeschwindigkeit erkennen. Die langjährige mittlere Änderung zwischen Referenzperiode und Projektionsperiode lag bei einem Wert von -0,06 m/s. Abbildung 22 links zeigt, dass sich die Änderung der langjährigen mittleren Windgeschwindigkeit in einem Wertebereich von -0,27 m/s bis +0,04 m/s bewegt. Dabei gibt es einzig im äußersten Nordosten Deutschlands leichte Zunahmen der Windgeschwindigkeit und im verbleibenden Gebiet durchweg Abnahmen, wobei in Süddeutschland die größten Abnahmen erkennbar sind. Auch wenn die langjährigen mittleren Änderungen gering ausfallen ist eine Tendenz zu einem Rückgang der Windgeschwindigkeiten erkennbar mit einem auffälligen Nord-Süd-Gradienten.

Im mittleren Jahresgang bewegen sich die Mediane der Änderungen der Windgeschwindigkeit zwischen -0,58 m/s und +0,21 m/s. Dabei tritt nur im November eine Zunahme auf, während alle weiteren Monate sehr geringe negative Änderungen aufzeigen (Abbildung 22, rechts).

Abbildung 22: Änderung der langjährigen mittleren Windgeschwindigkeit, 2021-2050; links jährliche Änderung, rechts monatliche Änderung.

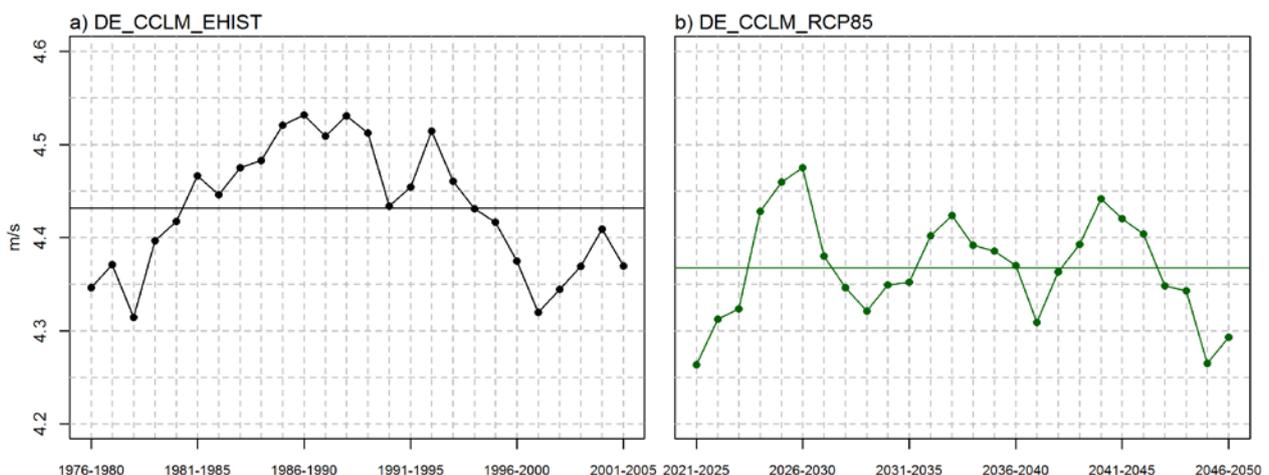


3.4.4.2 Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte

Die gleitenden 5-jährigen Mittelwerte der Windgeschwindigkeit, dargestellt in Abbildung 23, zeigen für den Modelllauf DE_CCLM_EHIST und den Zeitraum 1976 bis 2005 (Abbildung 23a) einen Anstieg der mittleren Windgeschwindigkeiten ab 1976 bis 1988 bis auf 4,5 m/s. Danach sinken die Werte, unterbrochen von einem Peak für das gleitende Mittel von 1992 bis 1996, bis zum Jahr 1997, um dann erneut knapp bis zum 30-jährigen Mittelwert (4,43 m/s) anzusteigen. Die Abweichungen vom langjährigen Mittelwert sind jedoch im gesamten Zeitraum sehr gering und zeigen auch hier die bereits erwähnte beschränkte Aussagekraft von mehrjährigen Mittelwerten der Windgeschwindigkeit.

Der 30-jährige Mittelwert des Modelllaufs DE_CCLM_RCP85 ist mit 4,37 m/s nur unwesentlich geringer als der langjährige Mittelwert des Kontrolllaufs (Abbildung 23b). Auffällig ist im Vergleich jedoch, dass in der modellierten Zukunftsperiode von 2021 bis 2050 die gleitenden 5-jährigen Mittelwerte der Windgeschwindigkeit einen unregelmäßigen periodischen Verlauf zeigen und ebenfalls nur jeweils geringfügig vom langjährigen Mittelwert abweichen.

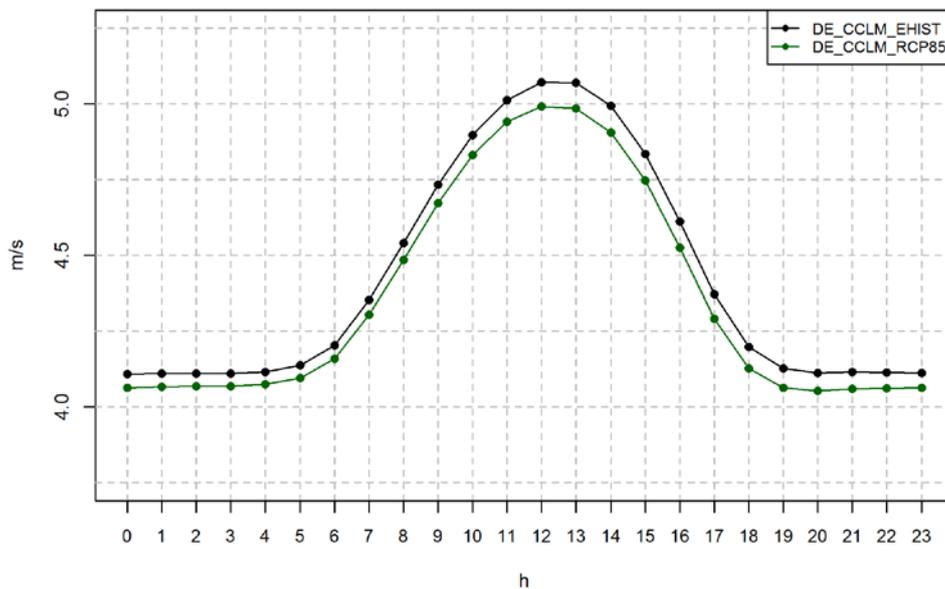
Abbildung 23: Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte der Windgeschwindigkeit, a) DE_CCLM_EHIST 1976–2005, b) DE_CCLM_RCP85 2021–2050. Die durchgezogenen Linien zeigen den jeweiligen 30-jährigen Mittelwert.



3.4.4.3 Langjährige mittlere Tagesgänge

Der langjährige mittlere Tagesgang der Windgeschwindigkeit ist für beide verglichenen Modellläufe im zeitlichen Ablauf identisch, wobei tagsüber höhere Windgeschwindigkeiten auftreten als in den Abend- und Nachtstunden (Abbildung 24). In der Zukunftsperiode (DE_CCLM_RCP85) treten im gesamten mittleren Tagesverlauf niedrigere Windgeschwindigkeiten als bei DE_CCLM_EHIST auf. Hierbei sind die negativen Abweichungen in den Tagesstunden größer als in den Nachtstunden, was darauf hinweist, dass in der Zukunftsperiode die Windspitzen niedriger sind als in der Referenzperiode des Modelllaufs DE_CCLM_EHIST.

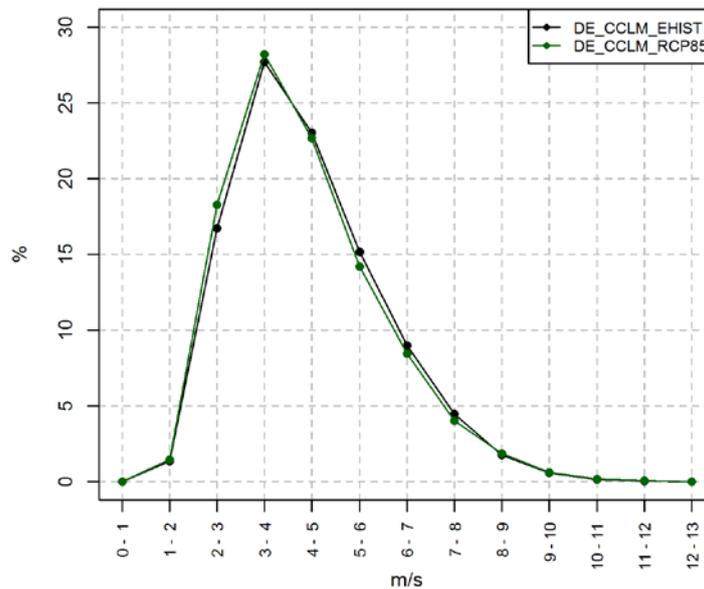
Abbildung 24: 30-jähriger mittlerer Tagesgang der Windgeschwindigkeit von DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85



3.4.4.4 Häufigkeitsverteilungen

Abbildung 25 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der täglichen Flächenmittelwerte der Windgeschwindigkeit für DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85. Beide Häufigkeitsverteilungen haben auch hier einen ähnlichen Verlauf mit der größten Häufigkeit in der Klasse 3 – 4 m/s. Für die Zukunftsperiode des Modelllaufs DE_CCLM_RCP85 weisen die täglichen Flächenmittelwerte der Windgeschwindigkeit in den Klassen 2 – 3 m/s und 3 – 4 m/s geringfügig größere Häufigkeiten auf als im Modelllauf der Referenzperiode DE_CCLM_EHIST. Dafür sind in den Klassen der höheren Windgeschwindigkeiten 4 – 5 m/s bis 7 – 8 m/s geringere Häufigkeiten erkennbar. Dies unterstützt noch einmal die Aussage, dass DE_CCLM_RCP85 einerseits geringere Windgeschwindigkeiten und andererseits weniger Tage mit hohen Windspitzen aufweist.

Abbildung 25: Häufigkeitsverteilung der mittleren täglichen Windgeschwindigkeiten (Flächenmittelwerte), DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85.



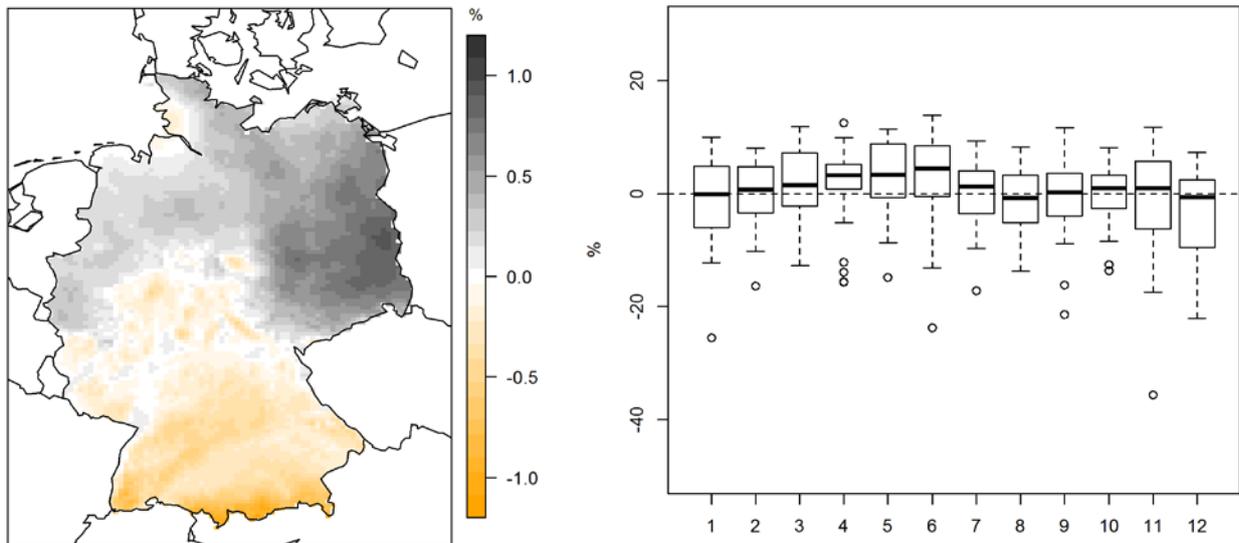
3.4.5 Bewölkung

3.4.5.1 Mittlere langjährige jährliche und monatliche Klimaänderungen

Der Bedeckungsgrad als Maß der auftretenden Bewölkung wird ebenfalls innerhalb der in KLENOS verwendeten Modellkette vom CCLM an das RCG übergeben. Hier wird der Bedeckungsgrad zur Berechnung des sensiblen und latenten Wärmestroms benötigt, um nachfolgend die Turbulenzparameter Monin-Obukhov-Länge und Schubspannungsgeschwindigkeit errechnen zu können. Der Bedeckungsgrad wird vom Modell CCLM als Anteil von 1 ausgegeben und wurde zur Auswertung aufgrund der besseren Anschaulichkeit mit 100 multipliziert und als Prozentwert ausgewiesen.

Das Flächenmittel der Änderung des langjährigen mittleren Bedeckungsgrades liegt bei 0 % und kann somit als bedeutungslos angegeben werden. Die räumliche Abbildung der langjährigen Änderungen zeigt zwar ein deutliches Nord-Süd-Muster mit positiven Änderungen im Norden und negativen Änderungen im Süden Deutschlands (Abbildung 26 links), der Wertebereich liegt jedoch zwischen +1,2 % und -1,2 % und weist somit auf keine relevante klimatische Änderung hin. Dies zeigt sich auch im langjährigen mittleren Jahresgang (Abbildung 26 rechts), wo die Mediane der monatlichen Änderungen in einem Wertebereich zwischen nur -1 % und +4 % liegen.

Abbildung 26: Änderung des langjährigen mittleren Bedeckungsgrades der Bewölkung, 2021-2050; links jährliche Änderung, rechts monatliche Änderung.

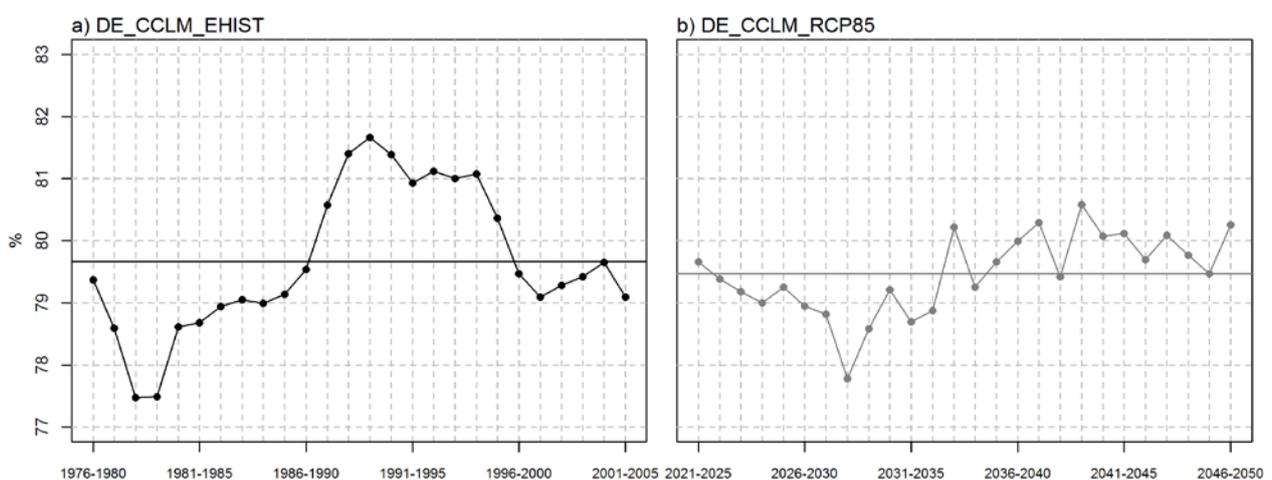


3.4.5.2 Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte

Der 30-jährige Mittelwert des Wolkenbedeckungsgrades liegt für den Modelllauf DE_CCLM_EHIST bei knapp 80 % (Abbildung 27a). Von Mitte der 70er Jahre bis Mitte-Ende der 80er Jahre liegen die gleitenden 5-jährigen Mittelwerte geringfügig unter dem 30-jährigen Mittelwert, gefolgt von einem Anstieg auf bis zu knapp 82 %. Ab Anfang der 90er Jahre sinken die Werte, mit einer kurzen Stagnationsphase Ende der 90er Jahre, wieder knapp unter den Mittelwert. Die Schwankungsbreite der gleitenden Mittelwerte ist mit -2 % bis +2 % äußerst gering und zeigt auch hier die schwache Aussagekraft von Mittelwerten bei einer zeitlich so variablen Größe wie dem Wolkenbedeckungsgrad.

Beim Modelllauf DE_CCLM_RCP85 im Zeitraum von 2021 bis 2050 zeigt der 30-jährige Mittelwert von ca. 79 % keine nennenswerte Veränderung gegenüber dem Zeitraum 1976 bis 2005 (Abbildung 27b). Die gleitenden Mittelwerte des Wolkenbedeckungsgrades liegen von 2021 bis 2032 geringfügig unter dem 30-jährigen Mittelwert, um danach geringfügig um diesen zu schwanken.

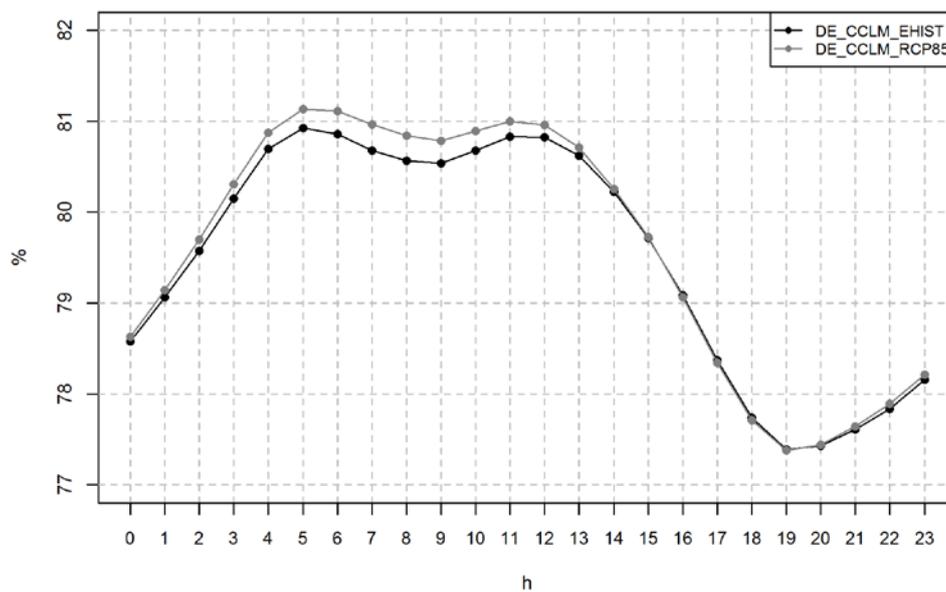
Abbildung 27: Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte des Wolkenbedeckungsgrades, a) DE_CCLM_EHIST 1976–2005, b) DE_CCLM_RCP85 2021–2050. Die durchgezogenen Linien zeigen den jeweiligen 30-jährigen Mittelwert.



3.4.5.3 Langjährige mittlere Tagesgänge

Die Tagesgänge des Wolkenbedeckungsgrades weisen im Modelllauf der Vergangenheit DE_CCLM_EHIST und in der Zukunft, DE_CCLM_RCP85, jeweils eine zweigipflige Verteilung auf, wobei die Maxima einmal gegen 05:00 Uhr und einmal gegen 11:00 Uhr auftreten (Abbildung 28). Die im langjährigen Mittel geringsten Bedeckungsgrade der Bewölkung finden sich in den Abend- und Nachtstunden. DE_CCLM_RCP85 weist besonders im Zeitraum zwischen 04:00 Uhr und 12:00 höhere Bedeckungsgrade auf als DE_CCLM_EHIST. Die Unterschiede sind jedoch äußerst gering. Im verbleibenden Tagesverlauf sind die langjährigen Mittelwerte nahezu identisch.

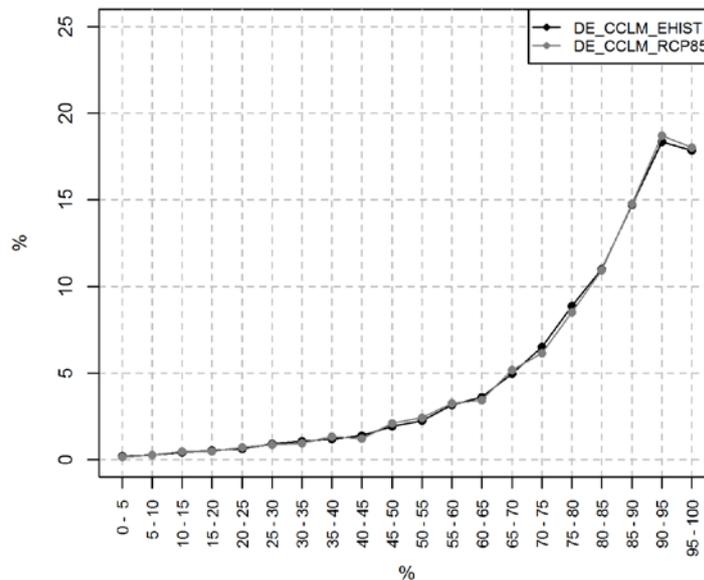
Abbildung 28: 30-jähriger mittlerer Tagesgang des Wolkenbedeckungsgrades von DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85.



3.4.5.4 Häufigkeitsverteilungen

Die Häufigkeitsverteilungen der täglichen Flächenmittelwerte der Wolkenbedeckung zeigen für beide Modellläufe eine monoton steigende Zunahme der Häufigkeiten von geringen Bedeckungsgraden bis hin zu den Klassen mit hohen Bedeckungsgraden (Abbildung 29). Eine Ausnahme bildet hierbei die Klasse mit Werten von >95 % – 100 % mit geringeren Häufigkeiten als die vorhergehende Klasse von >90 % – 95 %. Die Unterschiede in den Häufigkeitsverteilungen beider Modellläufe sind äußerst gering und liegen unter 1 %. DE_CCLM_RCP85 zeigt eine Tendenz zu höheren Bedeckungsgraden (Klasse >90 – 95 %) „auf Kosten“ geringerer Bedeckungsgrade (Klassen >70 – 75 % und >75 – 80 %). Die Unterschiede sind jedoch, wie bereits erwähnt, marginal und zeigen keine belastbare Veränderung zwischen Kontrolllauf und Zukunftslauf.

Abbildung 29: Häufigkeitsverteilung des mittleren täglichen Bedeckungsgrades (Flächenmittelwerte), DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85.



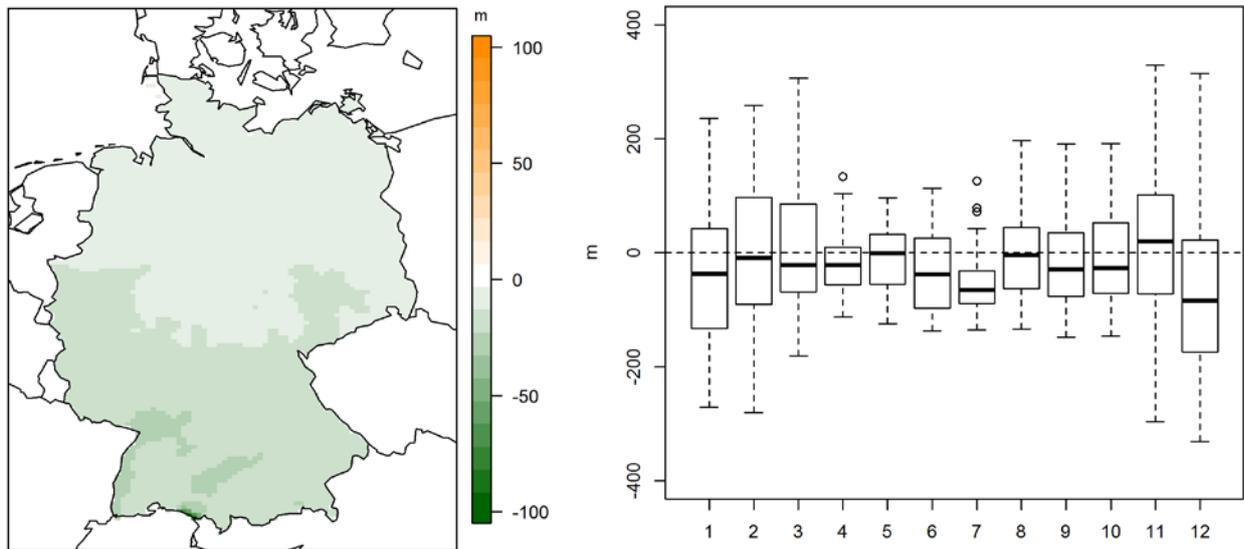
3.4.6 Höhe der atmosphärischen Grenzschicht

3.4.6.1 Mittlere langjährige jährliche und monatliche Klimaänderungen

Mit dem Begriff atmosphärische Grenzschicht wird der untere, von den Reibungseigenschaften der Erdoberfläche beeinflusste Bereich der Atmosphäre bezeichnet. In Abhängigkeit von der Einstrahlung und der Orographie kann die Höhe der Grenzschicht variieren. Ein wesentliches Merkmal der Grenzschicht ist die Dominanz von turbulenter Strömung und Durchmischung, wobei ein ausgeprägter Tagesgang auftritt. „Nach Sonnenaufgang erwärmt sich die Atmosphäre durch turbulente Wärmetransporte von der Unterlage und löst die nächtliche Inversion auf. Es entsteht eine Schicht mit guter Durchmischung (Mischungsschicht), die durch die Entrainmentschicht begrenzt wird. Bereits kurz vor Sonnenuntergang bildet sich am Boden die so genannte stabile (nächtliche) Grenzschicht (Bodeninversion) aus, die meist nur eine geringe Mächtigkeit hat. Die darüber verbleibenden Reste der Mischungsschicht des Vortages werden als Restschicht (Residual-Layer) bezeichnet, die durch eine freie Inversion nach oben begrenzt wird. Nach Sonnenaufgang lösen sich die stabile Grenzschicht und auch die Restschicht relativ schnell auf“ (Foken 2006). Der Wechsel von turbulenter Durchmischung und stabiler Schichtung, sowie allgemein die in der atmosphärischen Grenzschicht stattfindenden Prozesse haben einen entscheidenden Einfluss auf den Transport und die Verteilung von in der Atmosphäre befindlichen Stoffen.

Die Änderung der langjährigen mittleren Höhe der Grenzschicht im Vergleich zwischen Kontrolllauf und Projektion ist mit einem Wert von -16 m zu gering um relevant zu sein. Der Flächenplot der mittleren langjährigen Änderungen (Abbildung 30 links) zeigt räumlich ebenfalls nur sehr geringe Änderungen, wobei ausschließlich negative Werte auftreten. Auch die langjährigen Monatswerte mit einem Wertebereich von -84 m bis -1 m (Mediane, Abbildung 30 rechts) lassen keine Rückschlüsse auf langjährige Änderungen zu.

Abbildung 30: Änderung der langjährigen mittleren Höhe der atmosphärischen Grenzschicht, 2021-2050; links jährliche Änderung, rechts monatliche Änderung.



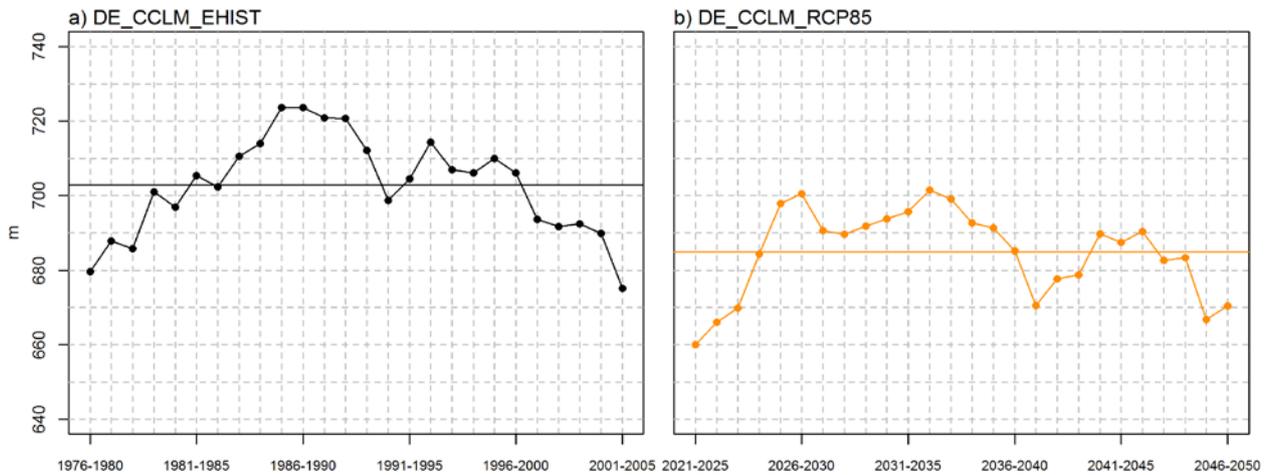
3.4.6.2 Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte

Der Modelllauf DE_CCLM_EHIST, mit einem 30-jährigen Mittelwert von 703 m, zeigt ab Mitte der 70er bis Ende der 80er Jahre einen Anstieg der gleitenden 5-jährigen Mittelwerte der Höhe der Atmosphärischen Grenzschicht bis auf 724 m und dann bis Anfang der 90er Jahre einen Rückgang bis knapp unter den langjährigen Mittelwert (Abbildung 31a). Nach einem kurzzeitigen Wiederanstieg sind die gleitenden 5-jährigen Mittelwerte rückgängig bis 2005.

Der 30-jährigen Mittelwert des Modelllaufs DE_CCLM_RCP85 liegt bei nur 685 m und weist auf eine Abnahme in der Zukunft hin (Abbildung 31b). Die gleitenden Mittelwerte der Atmosphärischen Grenzschicht steigen ab 2021 bis Mitte der 2020er Jahre an und verbleiben dann bis Mitte der 2030er Jahre über dem 30-jährigen Mittelwert. Danach schwanken sie geringfügig um diesen.

Wie beim Wolkenbedeckungsgrad schon erwähnt, ist auch hier die Aussagekraft von langjährigen Mittelwerten gering, da die Höhe der Atmosphärischen Grenzschicht in Abhängigkeit von der Sonneneinstrahlung und der Orographie einen ausgeprägten Tagesgang aufweist und wesentliche Veränderungen im langjährigen Mittel nicht zum Tragen kommen.

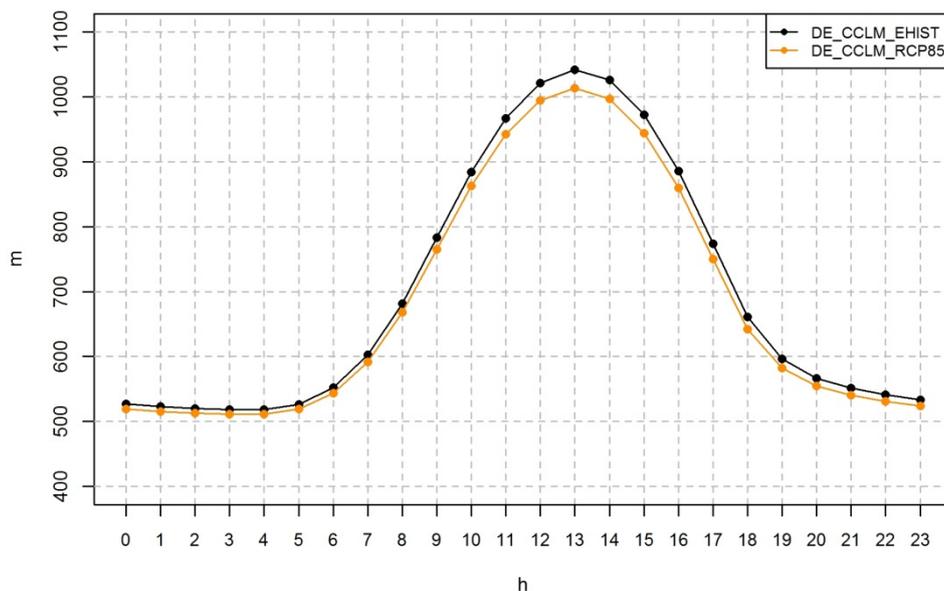
Abbildung 31: Gleitende 5-jährige Flächenmittelwerte der Höhe der Atmosphärischen Grenzschicht, a) DE_CCLM_EHIST 1976–2005, b) DE_CCLM_RCP85 2021–2050. Die durchgezogenen Linien zeigen den jeweiligen 30-jährigen Mittelwert.



3.4.6.3 Langjährige mittlere Tagesgänge

Abbildung 32 zeigt die langjährigen mittleren Tagesgänge der Höhe der Atmosphärischen Grenzschicht für DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85. Beide Tagesgänge in Abbildung 32 zeichnen die typische mittlere Entwicklung der atmosphärischen Grenzschicht im Verlauf eines Tages nach, mit niedrigen Werten in den Nacht- und Abendstunden und hohen Werten nach Sonnenaufgang. Die Unterschiede zwischen beiden Modellläufen sind minimal und zeigen, dass DE_CCLM_RCP85 nur geringfügig niedrigere Höhen der Atmosphärischen Grenzschicht aufzeigt als DE_CCLM_EHIST, mit den größten Unterschieden bei den Maximalwerten in der Tagesmitte.

Abbildung 32: 30-jähriger mittlerer Tagesgang der Höhe der Atmosphärischen Grenzschicht von DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85

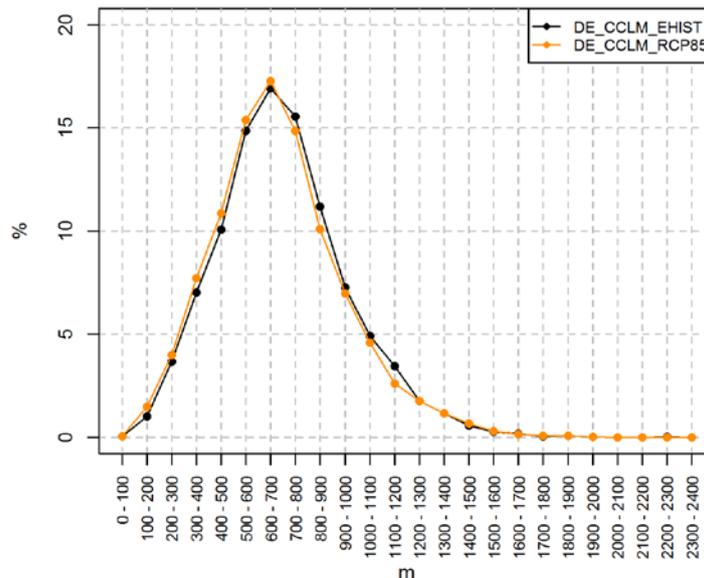


3.4.6.4 Häufigkeitsverteilungen

Die in Abbildung 33 aufgezeigten Häufigkeitsverteilungen der täglichen Flächenmittelwerte der Höhe der Atmosphärischen Grenzschicht zeigt zwei eingipflige Verteilungen mit dem jeweiligen Maximum

in der Klasse >600 m – 700 m. Auch hier sind die Unterschiede zwischen beiden Verteilungen der betrachteten Modellläufe DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85 nur gering. DE_CCLM_RCP85 zeigt in den unteren Klassen (>0 m – 100 m bis >600 m – 700 m) größere Häufigkeiten als DE_CCLM_EHIST. Dies kehrt sich in den oberen Klassen um, hier hat DE_CCLM_EHIST die größeren Häufigkeiten. Die Gegenüberstellung der Häufigkeitsverteilungen der Höhe der Atmosphärischen Grenzschicht bestätigt die Tendenz des Modelllaufs DE_CCLM_RCP85 zu im Mittel geringeren Höhen. Doch auch hier sei betont, dass die aufgezeigten Unterschiede zwischen beiden Modellläufen sehr gering sind.

Abbildung 33: Häufigkeitsverteilung der mittleren täglichen Höhe der Atmosphärischen Grenzschicht (Flächenmittelwerte), DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85



3.5 Diskussion der Ergebnisse der regionalen Klimamodellierung

3.5.1 Modellevaluierung

Im Projekt KLENOS ist das Regionale Klimamodell CCLM erfolgreich konfiguriert und angewendet worden. Die Evaluierung der Modellergebnisse durch den Vergleich mit interpolierten Beobachtungsdaten hat gezeigt, dass die langjährigen Mitteltemperaturen für ganz Deutschland unterschätzt werden. Die ermittelten Abweichungen bewegen sich jedoch noch in einem vertretbaren Rahmen und sind im Vergleich mit anderen Studien und dynamischen Regionalmodellen ähnlich (vgl. Jacob et al. 2007, Dequè et al. 2007, Jaeger et al. 2008, Kotlarski et al. 2014), wobei ein direkter Vergleich aufgrund unterschiedlicher Modellversionen und Modellkonfigurationen sowie unterschiedlicher Antriebsdaten und Zeiträume nur bedingt möglich ist. Für die West-Ukraine sind mit derselben Modellkonfiguration, jedoch mit anderen Antriebsdaten (ERA40, ECHAM5), etwas bessere Modellgüten erzielt worden (Pavlik et al. 2014). Im Vergleich mit den Evaluationsergebnissen der EURO-CORDEX-Initiative (Giorgi et al. 2009) liegen die Klimamodellergebnisse von KLENOS im gleichen Wertebereich der dort ermittelten Abweichungen des verwendeten Modell-Ensembles (Kotlarski et al. 2014). So bewegt sich der Temperatur-Bias des CORDEX-Ensembles für die Domain „Mitteleuropa“, die im Wesentlichen Deutschland umfasst, zwischen -1 K und -2 K. Auch die innerjährliche Variabilität der Abweichungen ist ähnlich (vgl. Kotlarski et al. 2014). Fast alle in EURO-CORDEX verwendeten Regionalmodelle erzeugten für Mitteleuropa einen cold-bias.

Die Evaluierung der Modellergebnisse von KLENOS hat weiterhin gezeigt, dass der mit Reanalysedaten angetriebene Modellauf (DE_CCLM_ERA) einen deutlichen positiven Niederschlags-Bias aufweist. Dieser ist mit 22 % etwas höher, im Vergleich zu den CORDEX Simulationen (dort ca. 10 %). Die

Spanne der Abweichungen des gesamten CORDEX-Ensembles liegt beim Niederschlag jedoch zwischen -30 % und +60 %. Kotlarski et al. (2014) bezeichnen Abweichungen des Niederschlages als akzeptabel, wenn diese in einem Bereich zwischen 0 % und 25 % liegen. Die Autoren begründen dies mit den Unsicherheiten der Referenzdaten (E-OBS), die nicht hinsichtlich des Windfehlers (ca. 20 %) beim Messen des Niederschlages korrigiert wurden. Der in KLENOS verwendete Referenzdatensatz REGNIE (REGNIE 2013) ist ebenfalls nicht windfehlerkorrigiert (Rauthe et al. 2013). Somit sind die ermittelten Niederschlagsabweichungen vermutlich sogar noch geringer als 22 % und liegen damit im akzeptablen Bereich.

Die Abweichungen der modellierten Niederschläge von den Referenzdaten des mit ECHAM6 angetriebenen Modelllaufs CCLM_EHIST sind mit einem mittleren langjährigen Bias von 56 % mehr als doppelt so hoch wie die Abweichungen von CCLM_ERA. Eine Ursache dafür ist ein zu hoher Eintrag von Feuchte in das Modellgebiet durch die Antriebsdaten. Dies führt zu einer starken Überschätzung des Bedeckungsgrades und folglich auch der Niederschläge (Jaeger et al. 2008). Schoetter et al. (2012) stellten für eine ältere Version des CCLM angetrieben mit Reanalysedaten (ERA40) ebenfalls zu hohe Bedeckungsgrade in Verbindung mit einer zu hohen Relativen Feuchte fest, was darauf hinweist, dass das CCLM an sich Unsicherheiten in der Modellierung von Feuchte und Wolkenbedeckung aufzeigt, die jedoch durch den Antrieb mit dem Globalmodell ECHAM6 noch verstärkt werden.

Ein zu hoher Bedeckungsgrad hat eine verminderte Nettostrahlung zur Folge, was zu einer zu geringeren Erwärmung führt. Zu hohe Niederschläge bedingen weiterhin eine hohe Bodenfeuchte. Aufgrund des Feuchteüberschusses wird mehr Energie zur Verdunstung benötigt und demzufolge steht weniger Energie zur Erwärmung der Oberfläche und der unteren Luftschichten zur Verfügung. Dies bewirkt eine weitere Abkühlung und kann somit auch ein Grund für die Unterschätzung der Temperaturen sein.

Die Modellierung des Niederschlages ist aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität allgemein mit einer Reihe von Problemen verknüpft. Die Prozesse der Niederschlagsbildung sind komplex und finden teilweise auf räumlichen Skalen statt, die vom Modell explizit nicht aufgelöst werden können. Dazu gehören beispielsweise die Einstrahlung, die Konvektion, die Wolken-Mikrophysik und Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Landoberfläche. Diese Prozesse müssen in Klimamodellen parametrisiert werden. Parametrisierungen sind jedoch immer nur Näherungen der eigentlichen Lösung und somit mit Unsicherheiten verbunden (vgl. Maraun et al. 2010). So führen Suklitsch et al. (2010) die Abweichungen von Sommerniederschlägen in den Alpen auf Unsicherheiten in der Parametrisierung der Konvektion zurück. Feldmann et al. (2008) beschreiben Defizite in der Parametrisierung des orographischen Niederschlagseffekts im Rheintal, was zu einer Überschätzung des Niederschlages an der Luvseite von Gebirgen führt.

Im Gegensatz zum Niederschlag und der Temperatur wurde die Windgeschwindigkeit anhand ausgewählter Stationsdaten evaluiert. Verwendet wurden die langjährigen Zeitreihen von 10 über Deutschland verteilten Stationen (siehe Kapitel 3.3.2.3). DE_CCLM_ERA überschätzt im langjährigen Mittel die Windgeschwindigkeiten an 6 der 10 Stationen und DE_CCLM_EHIST an 7 von 10 Stationen. Die innerjährliche Verteilung der Abweichungen zeigt dabei keine einheitlichen Muster. Schoetter et al. (2012) stellten im Gegensatz dazu in den Sommermonaten eine Überschätzung und in den Wintermonaten eine Unterschätzung der Windgeschwindigkeiten mit geringeren Abweichungen fest. Es besteht ein Zusammenhang zwischen Modellgüte und orographischer Lage der Stationen. So werden die Windgeschwindigkeiten besser an Stationen des Tieflands mit geringer orographischer Gliederung abgebildet, als an Stationen in Gebirgslagen.

3.5.2 Klimawandel

Die modellierten klimatischen Änderungen für Deutschland wurden durch den Vergleich der Modellläufe DE_CCLM_EHIST und DE_CCLM_RCP85 ermittelt. Das stärkste Änderungssignal zeigt die Temperatur mit einem langjährigen Flächenmittelwert für Deutschland von 0,8 K. Dabei zeigte sich in allen Monaten ein Anstieg der langjährigen Mitteltemperaturen, mit den höchsten Zunahmen in den Wintermonaten. Zu beachten ist hierbei, dass das Klimaänderungssignal von der Wahl der Referenzperiode abhängt. Die in KLENOS gewählte Referenzperiode umfasst den Zeitraum von 1976 bis 2005 (siehe Kap. 2.2.1), welcher bereits eine deutliche Erwärmung für Deutschland aufzeigt und somit zu einem geringeren Klimaänderungssignal führt als im Vergleich zur, von der WMO empfohlenen, Klimanormalperiode von 1961 bis 1990. Die CORDEX-Modellrechnungen zeigen für das RCP 8.5 Szenario bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (langjähriges Mittel von 2071 bis 2100) bereits eine Erwärmung um 2,5 K bis 4,0 K (Jacob et al. 2014). Somit können die Temperaturänderungen des Zeitraumes 2021 bis 2050 noch als relativ moderat angesehen werden.

Im Gegensatz zur Temperatur sind die langjährigen mittleren Änderungen des Niederschlages mit +1,3 % nur sehr gering und können in Anbetracht der hohen Unsicherheiten bei der Niederschlagsmodellierung nicht als signifikante Klimaänderung eingestuft werden. Die Schwankungsbreite der Niederschlagsänderungen (langjähriger Mittelwert) reicht von -6 % bis 8 %. Jacob et al. (2014) berechneten im Rahmen der CORDEX Initiative für Deutschland Niederschlagsänderungen in einem Bereich von ca. -2 % bis 29 % jedoch für den Zeitraum 2071 – 2100 verglichen mit der Referenzperiode 1971 – 2000. Der Median des langjährigen Flächenmittels der Änderungen lag für den atlantisch beeinflussten Bereich Deutschlands bei 4 % und für den kontinental beeinflussten Bereich bei 10 %. Die Ergebnisse von KLENOS liegen nicht exakt in dem von Jacob et al. (2014) angegebenen Wertebereich, da dieser aus einem Ensemble von 10 verschiedenen Modellläufen stammt und sich auf andere Zeiträume bezieht, kommt diesem jedoch relativ nahe.

Die Änderungen der langjährigen monatlichen Niederschlagssummen zeigen kein eindeutiges Muster und sind von einer hohen Variabilität gekennzeichnet. Räumlich zeigen sich im Nordosten und Westen bis hinein nach Thüringen Niederschlagsabnahmen und für das verbleibende Gebiet Deutschlands leichte Niederschlagszunahmen.

Weiterhin wurden die Änderungen der meteorologischen Variablen Windgeschwindigkeit, Wolkenbedeckungsgrad und Höhe der atmosphärischen Grenzschicht betrachtet, da diese direkt als Eingangsvariablen für das Chemie-Transport-Modell RCG verwendet wurden. Bei allen drei Variablen sind die erfassten klimatischen Änderungen äußerst gering und zeigen allenfalls Änderungstendenzen auf. In Abbildung 34 sind die Tendenzen der klimatischen Änderungen noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Abbildung 34: Tendenzen der klimatischen Änderungen im Vergleich 1976–2005 und 2021–2050

	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV
Temperatur	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Niederschlag	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↑
Bewölkung	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	→	↓	→	→	↓
Mischungsschichthöhe	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑
Windgeschwindigkeit	↓	↓	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↑

↑ Zunahme ↓ Abnahme → keine Änderung

4 Chemie-Transport-Modellierung mit RCG

4.1 Überblick

Wie schon in der Einleitung ausgeführt, hängt die zukünftige Luftqualität nicht nur ab von energiepolitischen Entscheidungen, die auf eine Reduzierung der Emission von Schadstoffen wie Stickoxiden, Schwefel, reaktiven Kohlenwasserstoffen oder Feinstaub abzielen. Bei der Betrachtung größerer Zeithorizonte ist es unabdingbar, neben den Auswirkungen von emissionsmindernden Maßnahmen auch die Einflüsse des Klimawandels auf die Luftqualität zu berücksichtigen.

Luftqualität und Klima stehen in einer wechselseitigen Beziehung. Der prognostizierte globale Klimawandel hat Auswirkungen auf die Luftqualität, da die Bildung von Luftbeimengungen wie Ozon oder Feinstaub stark von den meteorologischen Bedingungen beeinflusst wird. Maßnahmen primär entwickelt zur Verbesserung der Luftqualität haben umgekehrt auch einen Einfluss auf das Klima. Emissionsminderungsmaßnahmen, die eine Reduzierung der troposphärischen Ozonkonzentrationen im Fokus haben, helfen gleichzeitig, den Beitrag des Treibhausgases Ozon zur Klimaerwärmung abzuschwächen. Aerosole haben insgesamt eine eher abkühlende Wirkung, da sie solare Strahlung teilweise reflektieren und zu einer verstärkten Wolkenbildung und Verlängerung der Lebenszeit von Wolken beitragen. Die Reduzierung der Feinstaubkonzentrationen kann daher negative Auswirkungen auf das Klimasystem haben. Insgesamt sind die Zusammenhänge wegen der nicht-linearen Interaktionen der verschiedenen Einflussparameter aber sehr komplex und daher noch unsicher.

Es existieren in der Zwischenzeit schon zahlreiche Studien, die den Einfluss eines sich ändernden Klimas auf die Luftqualität in Europa zum Thema haben (Szopa et al. 2006; Andersson und Engardt, 2010; Hedegaard et al. 2008, 2013; Langner et al. 2012a, 2012b; Manders et al. 2012; Colette et al. 2013). Alle diese Studien benutzen die auf unterschiedlichen Energieszenarien beruhenden Projektionsergebnisse globaler Klimamodelle für die Gegenwart und die Zukunft, die dann mit unterschiedlichen Methoden regionalisiert werden ("down-scaling"). Die so erzeugten meteorologischen Daten werden als Antrieb für ein chemisches Transportmodell (CTM) benutzt. Der Einfluss der Luftbeimengungen auf die meteorologischen Parameter wird in den chemischen Transportrechnungen nicht berücksichtigt. Dies ist ein gängiger Ansatz, da die Berücksichtigung der nichtlinearen Rückkopplungseffekte zwischen meteorologischen Parametern und Luftbeimengungen einen erheblichen numerischen Aufwand erfordert, der für Langfristbetrachtungen gegenwärtig nur in der globalen Modellierung betrieben wird (Shindell et al. 2013, Lamarque et al. 2013).

Der Schwerpunkt der meisten regionalen Untersuchungen liegt auf dem Einfluss der Klimaänderung auf die Konzentrationen von Ozon, da die troposphärischen Hintergrundkonzentrationen von Ozon im letzten Jahrhundert unter dem Einfluss der stetig zunehmenden Vorläuferemissionen (Methan, Kohlenmonoxid, Stickoxide und reaktive Kohlenwasserstoffe) stark angestiegen sind (Anfossi et al. 1991, Pavelin et al. 1999). Neben der Menge der für die chemischen Reaktionen zur Verfügung stehenden anthropogenen (und biogenen) Vorläuferemissionen wird die Ozonbildung gesteuert durch meteorologische Größen wie Temperatur, Feuchte und Strahlungsbedingungen. Auch die für die Entfernung von Ozon aus der Atmosphäre verantwortlichen Prozesse der trockenen Deposition hängen ab von diesen meteorologischen Größen und zusätzlich noch vom Bodenwassergehalt. All diese Einflussfaktoren ändern sich in einem sich ändernden Klima, so dass Auswirkungen auf die zukünftigen Ozonkonzentrationen zu erwarten sind. Nicht zuletzt ist auch zu erwarten, dass in einem zukünftigen Klima die Auftrittshäufigkeit von Wetterlagen ansteigen wird, die eine verstärkte Ozonbildung begünstigen.

Der reine auf die Ozonbildung einwirkende Klimaeffekt wird ermittelt, in dem man die Emissionen im Untersuchungsgebiet auf einem gewissen Niveau einfriert und die langfristigen Mittelwerte der betrachteten Luftbeimengungen für einen langjährigen (10 bis 30 Jahre) Referenzzeitraum (Gegenwart) und einen ebenso langen Projektionszeitraum (Zukunft) ermittelt. Dieser reine Klimaeffekt wird durch geplante emissionsmindernde Maßnahmen beeinflusst. Zur Abschätzung dieses Effekts wird der Projektionszeitraum zusätzlich mit einem auf dem zukünftigen Emissionsniveau eingefrorenen Emissionsdatensatz gerechnet.

Langner et al. (2012) untersuchten mit einem regionalen CTM, das mit dem Output eines regionalen Klimamodells angetrieben wurde, den Einfluss des Klimawandels auf die sommerlichen Ozonkonzentrationen in Europa in dem Zeitraum 1990 bis 2100. Nach ihren Berechnungen führt der Klimawandel vor allem in Südeuropa und den südlichen Bereichen Zentraleuropas zu einer Erhöhung der sommerlichen Ozonkonzentrationen, im nördlichen Europa dagegen eher zu einer Abnahme. Emissionsminderungsmaßnahmen heben den Klimaeffekt aber zum großen Teil wieder auf, so dass insgesamt die Ozonkonzentrationen in großen Teilen Europas in der Zukunft eher sinken werden. Dies gilt nach den Berechnungen von Langner et al. (2012) außer in Großbritannien auch unter der Annahme eines Anstiegs des hemisphärischen Hintergrundozons, der in den Modellläufen über eine Erhöhung der Ozonrandbedingungen simuliert wurde. Ein ähnliches Bild zu den Auswirkungen des Klimaeffekts auf Ozon mit Zunahmen der Ozonkonzentrationen in Südeuropa, Abnahmen in Nordeuropa und einer Übergangszone in Zentraleuropa, die in einigen Berechnungen genau über Deutschland liegt, findet sich in den meisten Modellrechnungen. Die Größenordnung der Ozonänderungen kann sich aber um den Faktor 2 unterscheiden (Langner et al. 2012b). Generell wirkt sich eine Klimaänderung in den höheren Konzentrationsbereichen stärker aus als in den Mittelwerten. Bei den Sommermittelwerten von Ozon liegen die berechneten Änderungen in Zentraleuropa bis 2050 als Folge des reinen Klimaeffekts in der Größenordnung von 1 bis 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, bei Metriken, die auf die höheren Ozonbereiche abzielen (z.B. mittlere tägliche Maximalwerte im Sommer) in der Größenordnung von 1 bis 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Manders et al. (2012) berechnen für die mittleren maximalen Sommermittelwerte sogar Zunahmen in Europa bis zu 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

In einigen Studien (z. B. Hedegaard et al. 2013, Manders et al. 2012, Colette et al. 2013) wird auch die Feinstaubbildung im Zusammenhang mit Klimaänderungen betrachtet, da die Bildung der sekundären PM-Anteile eine Abhängigkeit von meteorologischen Parametern wie Temperatur oder Feuchte zeigt (Megaritis et al. 2012). Das sich aus den vorliegenden Studien ergebende Bild zum Klimasignal ist weit weniger robust als bei Ozon. Es kommt zu (geringen) Zu- und Abnahmen als Folge einer Klimaänderung mit großen Unterschieden in der geographischen Verteilung zwischen den Modellen. Eine der Hauptursachen für die Unterschiede dürfte die zwischen den verschiedenen Treibermodellen stark unterschiedliche Simulation des Niederschlags sein (Colette et al. 2013).

In der hier vorgestellten Studie werden die Auswirkungen des Klimawandels auf die regionale Luftqualität in Deutschland im Zeitraum 2021 bis 2050 behandelt. Betrachtet werden Ozon, NO₂ und PM₁₀ in einer horizontalen Auflösung von 0.125° Länge und 0.0625° Breite (circa 7 x 8 km²). Die dazu verwendeten meteorologischen Daten beruhen auf dem sogenannten RCP8.5-Szenario (IPCC, 5. Sachstandbericht), das von einer CO₂-Treibhausgaskonzentration von 1370 ppm CO₂-Äquivalenten im Jahre 2100 ausgeht. Nach den Klimamodellrechnungen beträgt der Anstieg der globalen Mitteltemperatur unter den Voraussetzungen des Szenarios RCP8.5 bis zum Jahr 2100 etwa 4,8 °C im Vergleich mit dem vorindustriellen Zustand bzw. 4 °C gegenüber 1986-2005 (IPCC, 5. Sachstandbericht). Zur Berechnung der Luftqualität wird das Chemie-Transport-Modell REM-CALGRID mit an der TU Dresden erstellten Re-Analysen (ERAinterim) und Datensätzen des Regionalen Klimamodells COSMO-CLM (CCLM) gekoppelt und zur Simulation der Luftschadstoffentwicklung unter dem Einfluss des Klimawandels und energiepolitischer Änderungen (Emissionsszenarien) für eine 30-jährige Vergangenheits- sowie eine 30-jährige Zukunftsperiode benutzt.

4.2 Modellbeschreibung und Setup

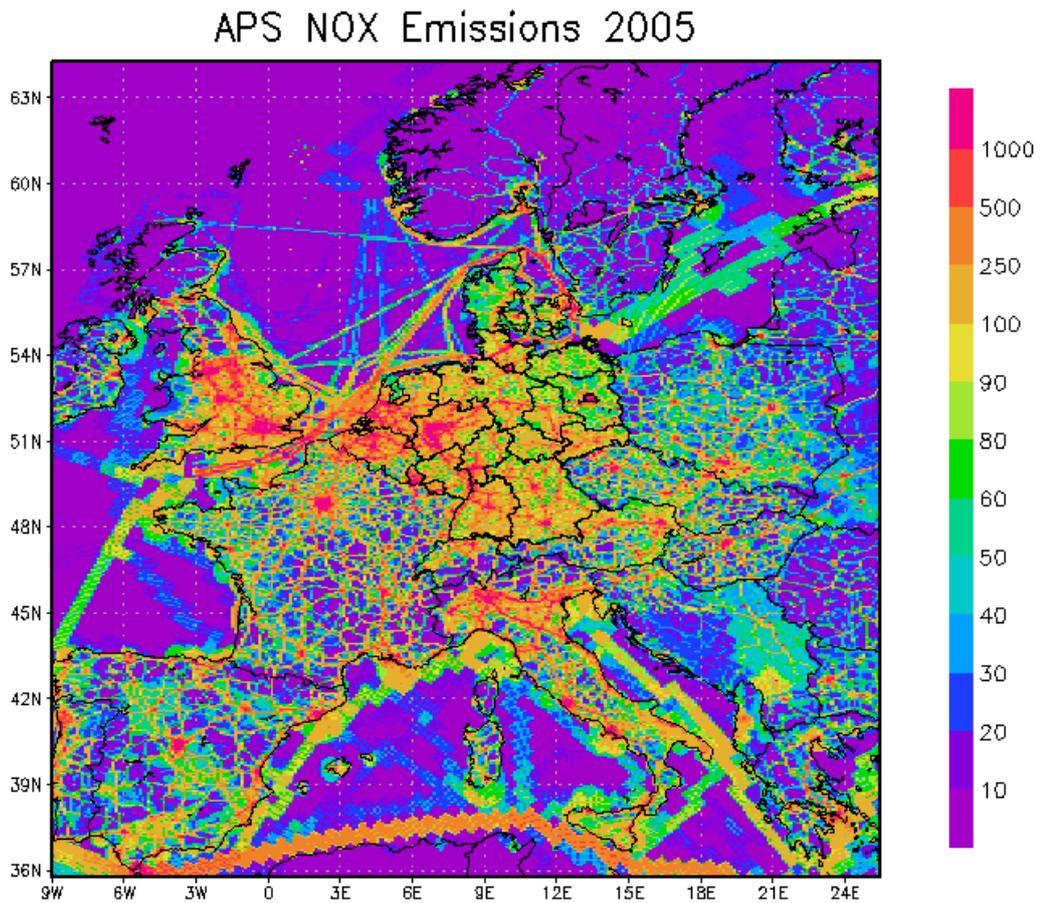
4.2.1 Modellgebiete

Das CTM REM-CALGRID (RCG) wurde in 2 Skalen angewendet:

- ▶ Europaskala
- ▶ Deutschlandskala

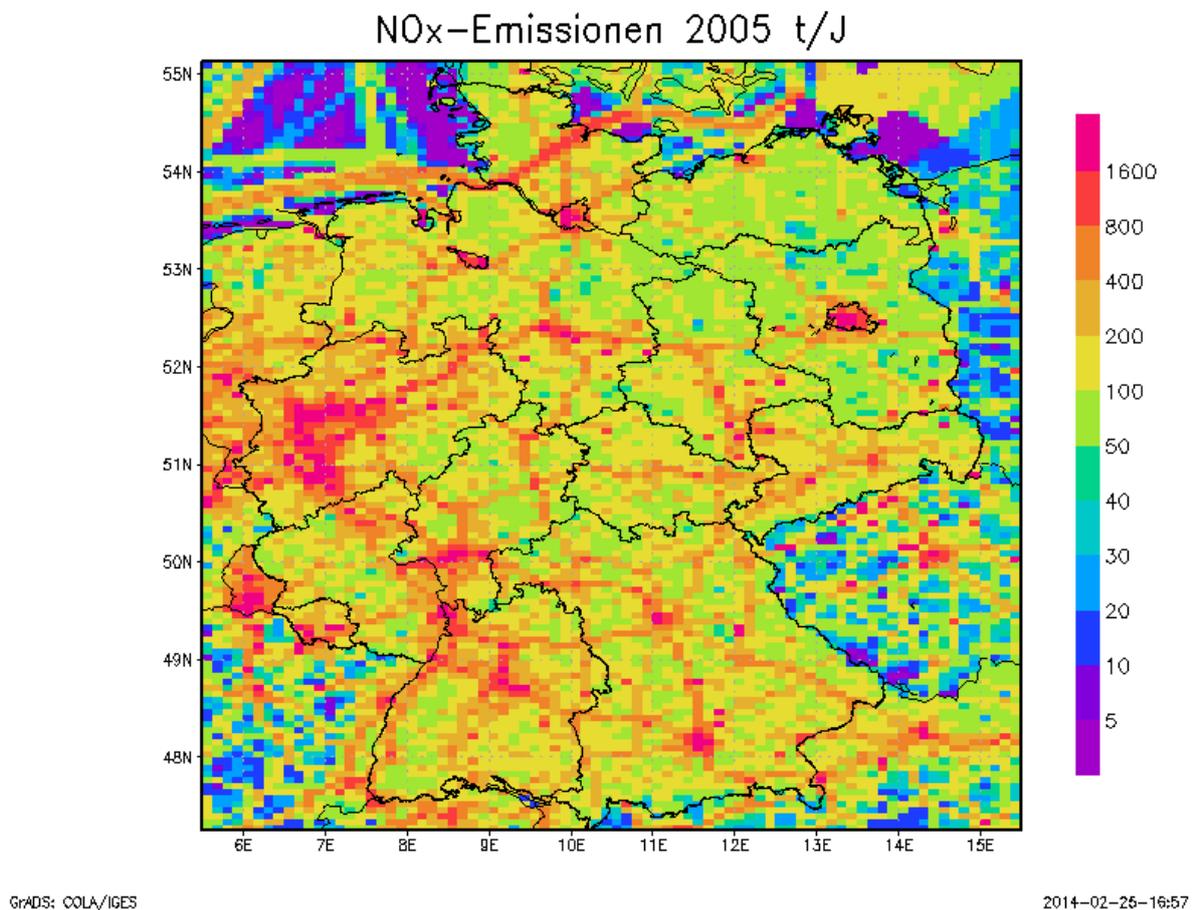
Die Europaskala beschreibt ein Modellgebiet, das ganz West- und Südeuropa sowie einen Großteil Nord- und Osteuropas umfasst. Die Berechnungen in dieser Skala liefern die Schadstoffflüsse über die seitlichen und oberen Ränder des eigentlichen Untersuchungsgebiets Deutschland. Die Randbedingungen für die europäische Skala werden aus klimatologischen Konzentrationsanalysen abgeleitet und für die Vergangenheits- und Zukunftsperioden konstant gehalten. Die beiden Modellgebiete zeigen die Abbildung 35 (Europa-Gebiet) und die Abbildung 36 (Deutschland-Gebiet). Die Größe des Europegebietes wurde so gewählt, dass das Gebiet vollständig mit COSMO-CCLM-Daten abgedeckt werden konnte. Die Auflösung der europäischen Skala beträgt 0.5° Länge und 0.25° Breite. Die Auflösung der Deutschlandskala beträgt 0.125° Länge und 0.0625° Breite.

Abbildung 35: Modellgebiet der Europaskala. Das Gebiet reicht von 9° West bis 25° Ost und von 35.75° N bis 64° Nord. Die Gitterauflösung beträgt 0.5° Länge und 0.25° Breite. Gezeigt sind die NO_x-Emissionen des Jahres 2005 in t/J, die für die Berechnung des 30-jährigen Vergangenheitslaufes verwendet wurden. Die Emissionen entsprechen denen des Aktuellen Politik Szenario (APS), siehe Kapitel 4.2.2.



GrADS: COLA/IGES

Abbildung 36: Modellgebiet der Deutschandskala. Das Gebiet reicht von 5.5° Ost bis 15.5° Ost und von 47.25° N bis 55° Nord. Die Gitterauflösung beträgt 0.125° Länge und 0.0625° Breite. Gezeigt sind die NO_x-Emissionen des Jahres 2005, die für die Berechnung des 30-jährigen Vergangenheitslaufes verwendet wurden. Die Emissionen entsprechen dem Aktuellen Politik Szenario (APS), siehe Kapitel 4.2.2.



4.2.2 Emissionen

Für die Ausbreitungsrechnungen in den Zeiträumen 1976–2005 wurden für alle Jahre die Emissionen des aktuellen Politik-Szenarios (APS) für das Jahr 2005 verwendet. In den Rechnungen für den Zeitraum 2021–2050 wurden einerseits auch die APS-Emissionen 2005 und andererseits die APS-Emissionen 2030 verwendet. Für Deutschland sind diese Emissionen in Anhang 9.4 zusammengestellt. Eine Dokumentation der Emissionen kann in Jörss et al. (2014) gefunden werden. Die hier verwendeten europäischen Emissionen für die Bezugsjahre 2005 und 2030 sind in Jozwicka et al. (2012) beschrieben.

4.3 Testen des Gesamtsystems am Jahre 2005 mit TRAMPER-Daten 2005, Re-Analyse-Daten, CCLM-Daten 2005, Vergleich mit Beobachtungen in Deutschland

4.3.1 Europa: NO₂ und PM

Die Simulation des Jahres 2005 wurde mit dem RCG-Modell auf Basis der TRAMPER-Meteorologiedaten³ (TRAMPER), der CCLM-Daten angetrieben mit Re-Analysedaten (CCLM_ERA) sowie des historischen CCLM-Kontrolllaufes (CCLM_EHIST) durchgeführt. Dieser Vergleich dient lediglich dazu, das Gesamtsystem zu testen und eine erste qualitative Einschätzung des Oxidantien- und PM-Bildungspotentials der verschiedenen meteorologischen Datensätze im Vergleich mit Messungen zu gewinnen. Eine vergleichende Diskussion des langjährigen mittlerer Oxidantien- und PM-Bildungspotentials des Evaluierungslaufs bzw. des Kontrolllaufes wird in Kapitel 4.4 geführt. Es wurde der Europa-Lauf und der Deutschlandlauf erstellt und ausgewertet. Abbildung 37 zeigt die mit dem RCG-Modell auf Basis der drei Meteorologien berechneten NO₂-Jahresmittelwerte 2005 im europäischen Modellgebiet. Die Verteilung der NO₂-Jahresmittelwerte in Europa ist für alle Meteorologien sehr ähnlich mit niedrigen Konzentrationen in den ländlichen Regionen und hohen Konzentrationen in den europäischen Ballungsgebieten. Auch die erhöhten Konzentrationen entlang der internationalen Schifffahrtslinien zeichnen sich in allen Berechnungen deutlich ab. Auf Basis der TRAMPER-Meteorologie ergeben sich in den Ballungsgebieten (London, Paris, Ruhrgebiet, Mailand, Madrid, Barcelona) aber leicht höhere Maximalwerte als mit den CCLM-Meteorologien.

Die mit den unterschiedlichen Meteorologien berechneten PM₁₀-Jahresmittelwerte zeigt die Abbildung 38. Bei den PM₁₀-Konzentrationsverteilungen sind die Unterschiede größer als beim NO₂. Vor allem außerhalb der Ballungsgebiete werden auf Basis der CCLM-Meteorologien flächendeckend etwas höhere PM₁₀-Jahresmittelwerte und auch höhere PM_{2.5}-Konzentrationen (Abbildung 39) berechnet als auf Basis der TRAMPER-Meteorologie. Ursache der höheren PM₁₀- und PM_{2.5}-Werte sind im Wesentlichen höhere Sulfat-Konzentrationen (Abbildung 40), die im RCG-Modell vollständig dem PM₁₀-Bereich <2.5 µm zugeordnet werden. Im RCG-Modell entsteht Sulfat hauptsächlich über die Nassphase. Die Nassphasen-Chemie der Sulfatbildung wird dabei nur stark parametrisiert als Funktion der Bedeckung und der Feuchte behandelt. Die höheren Sulfat-Konzentrationen auf Basis beider CCLM-Meteorologien sind daher ein Hinweis auf im Vergleich zu TRAMPER höhere Bedeckungsgrade und Feuchtwerte. Die Grobstaub-Konzentrationen (PM > 2.5 µm und PM < 10 µm) sind über Land relativ ähnlich mit etwas höheren Ballungsraumkonzentrationen für die TRAMPER-Meteorologie (Abbildung 41). Die höchsten Grobstaubkonzentrationen werden mit allen Meteorologien über der Nordsee berechnet, was auf die Seesalzemissionen aus dem Meereswasser zurückzuführen ist. Seesalz wird zum großen Teil der PM-Grobfraktion zugeordnet. Über der Nordsee erzeugt die TRAMPER-Meteorologie mehr Seesalzemissionen als die CCLM-Meteorologien. Im Mittelmeer ist es eher umgekehrt. Die Höhe der Seesalzemissionen ist direkt proportional zu den herrschenden Windgeschwindigkeiten. Daraus lässt sich ableiten, dass die TRAMPER-Meteorologie über der Nordsee eher durch höhere und über dem Mittelmeer eher durch niedrigere Windgeschwindigkeiten gekennzeichnet ist als die CCLM-Meteorologien.

³ Das TRAMPER-System (Troposphärische Analyse meteorologischer Parameter) wird zur standardmäßigen Ableitung der meteorologischen Eingabegrößen für das RCG-Modell benutzt. Das System wurde an der Freien Universität Berlin entwickelt und erstellt basierend auf routinemäßig erhobenen Beobachtungen am Boden und in der Höhe konsistente dreidimensionale meteorologische Felder, die als Eingabedaten für das RCG-Modell verwendet werden.

Abbildung 37: NO₂-Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Europa-Lauf.

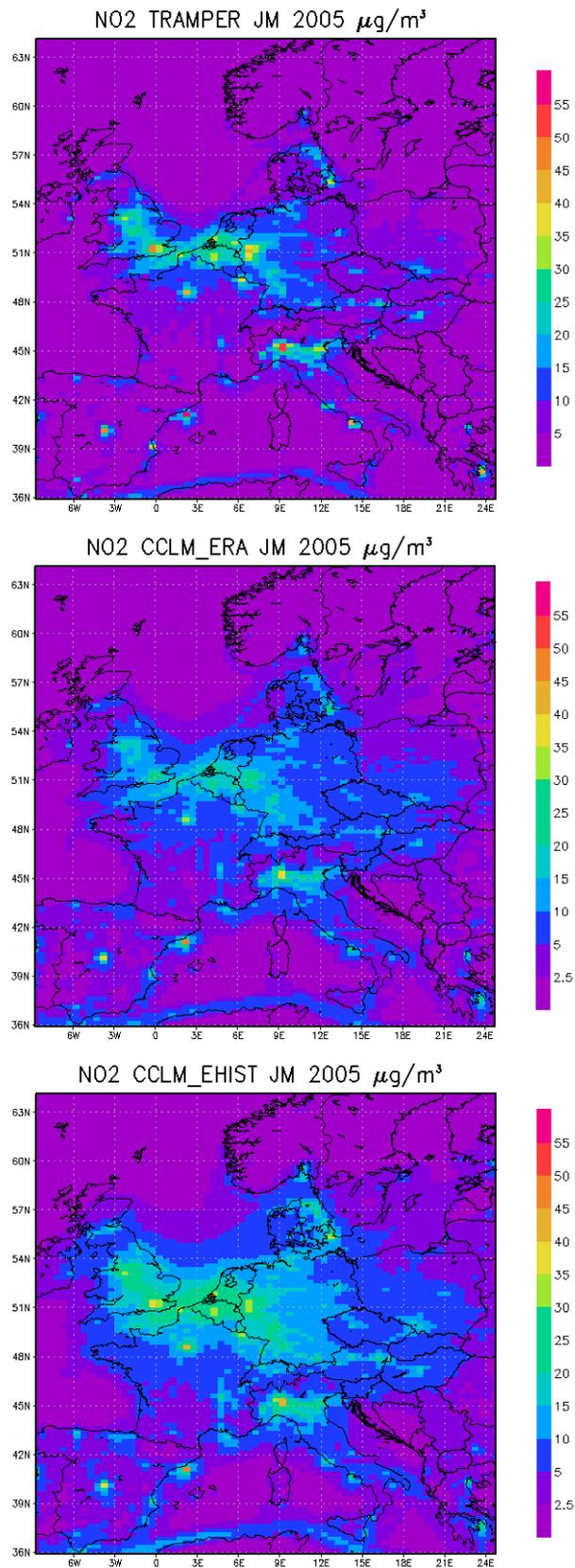


Abbildung 38: PM10-Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Europa-Lauf.

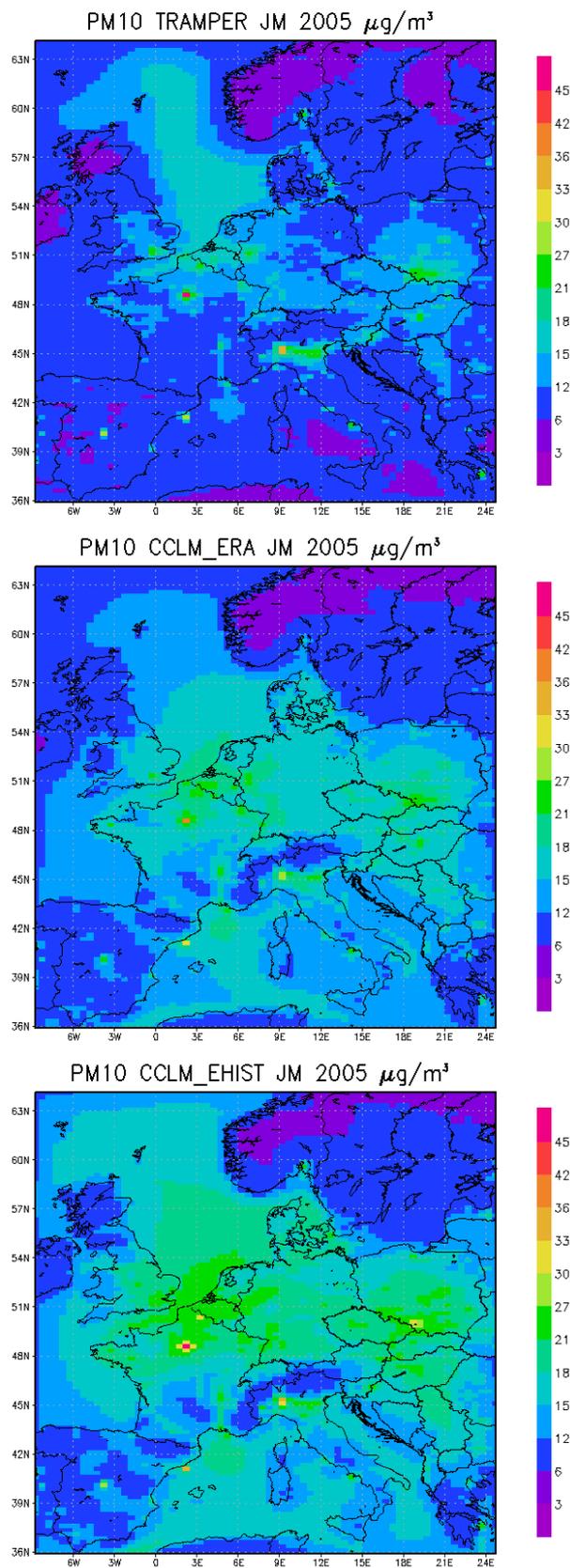


Abbildung 39: PM2.5-Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Europa-Lauf.

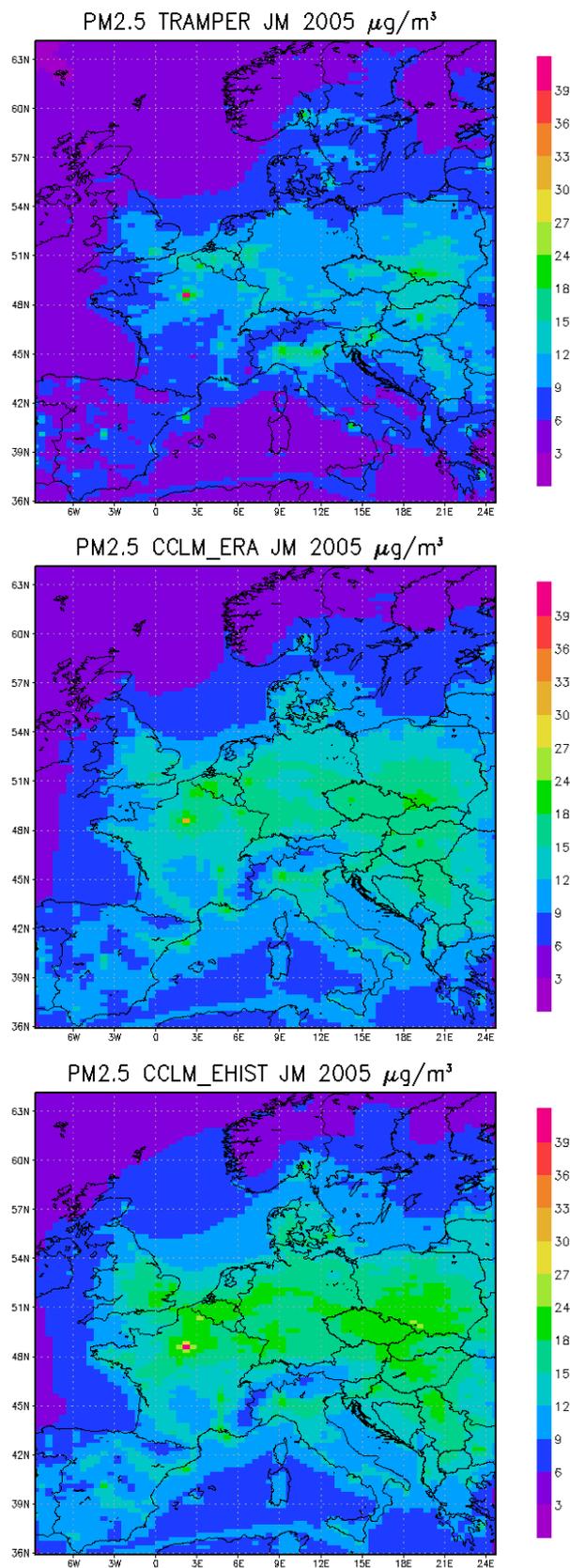


Abbildung 40: Sulfat-Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Europa-Lauf.

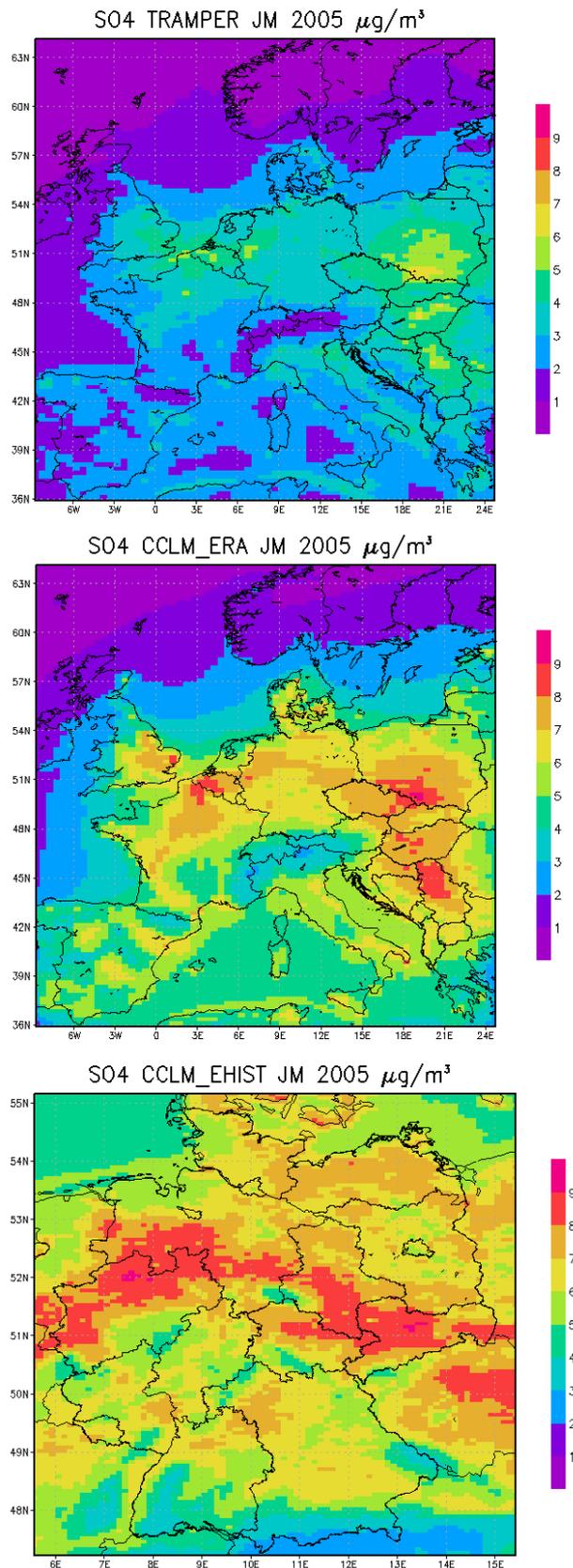
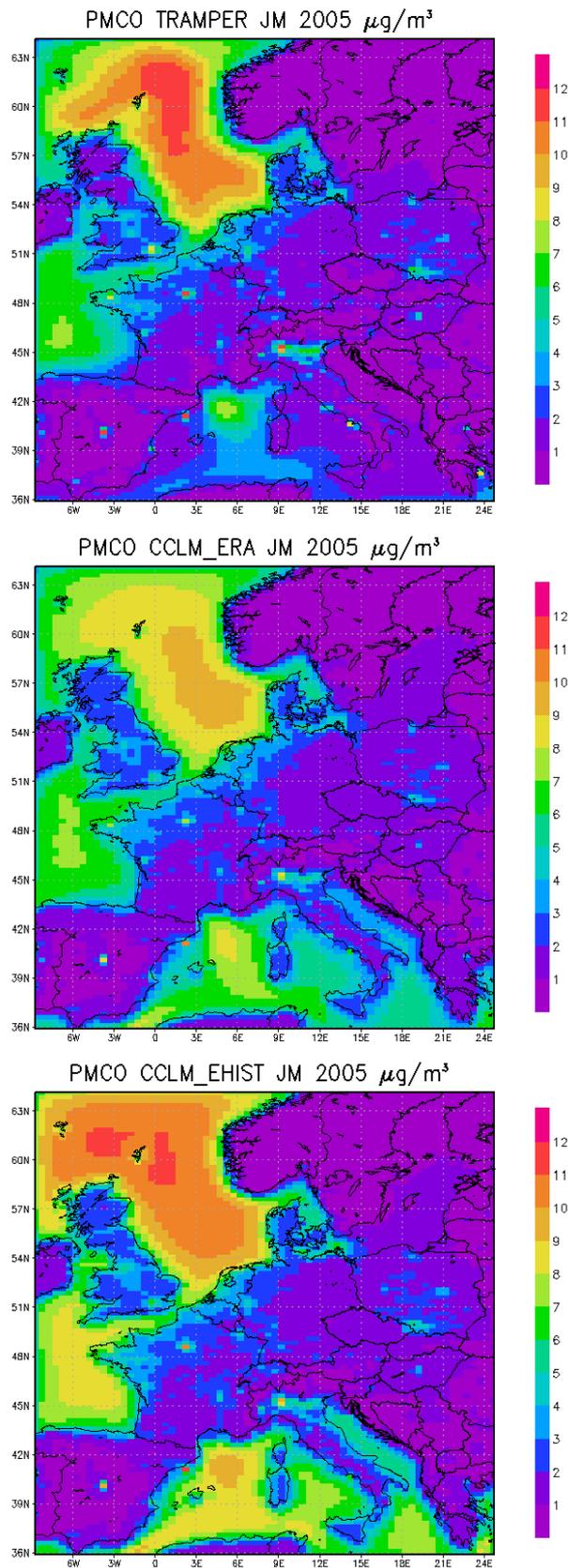


Abbildung 41: PMCO-Jahresmittelwerte (Grobstaub) 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Europa-Lauf.



4.3.2 Europa: Ozon

Abbildung 42 zeigt die mit den drei Meteorologien berechneten Ozon-Jahresmittelwerte 2005 in Europa. Die Verwendung der TRAMPER- und der CCLM_ERA-Meteorologie führt zu einer recht ähnlichen Verteilung der Ozonjahresmittelwerte, wobei mit TRAMPER in den Ballungsgebieten etwas niedrigere Werte berechnet werden als mit CCLM_ERA. Die CCLM_EHIST Meteorologie führt dagegen fast überall in Europa zu deutlich niedrigeren Ozon-Jahresmittelwerten als die beiden anderen Meteorologien. Ähnliches gilt für die AOT40-Werte (Abbildung 43) wobei bei dieser Größe die Unterschiede zwischen TRAMPER und CCLM_ERA größer sind als bei den Mittelwerten. Auch die Jahresmittelwerte der täglichen maximalen gleitenden 8-Stunden-Mittelwerte sind für CCLM_EHIST deutlich niedriger als für die beiden anderen Meteorologien (Abbildung 44). Eine meteorologische Erklärung für die unterschiedlichen Ozonniveaus der drei Meteorologien wird im Kapitel 4.4.3 geliefert.

Abbildung 42: Ozon-Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Europa-Lauf

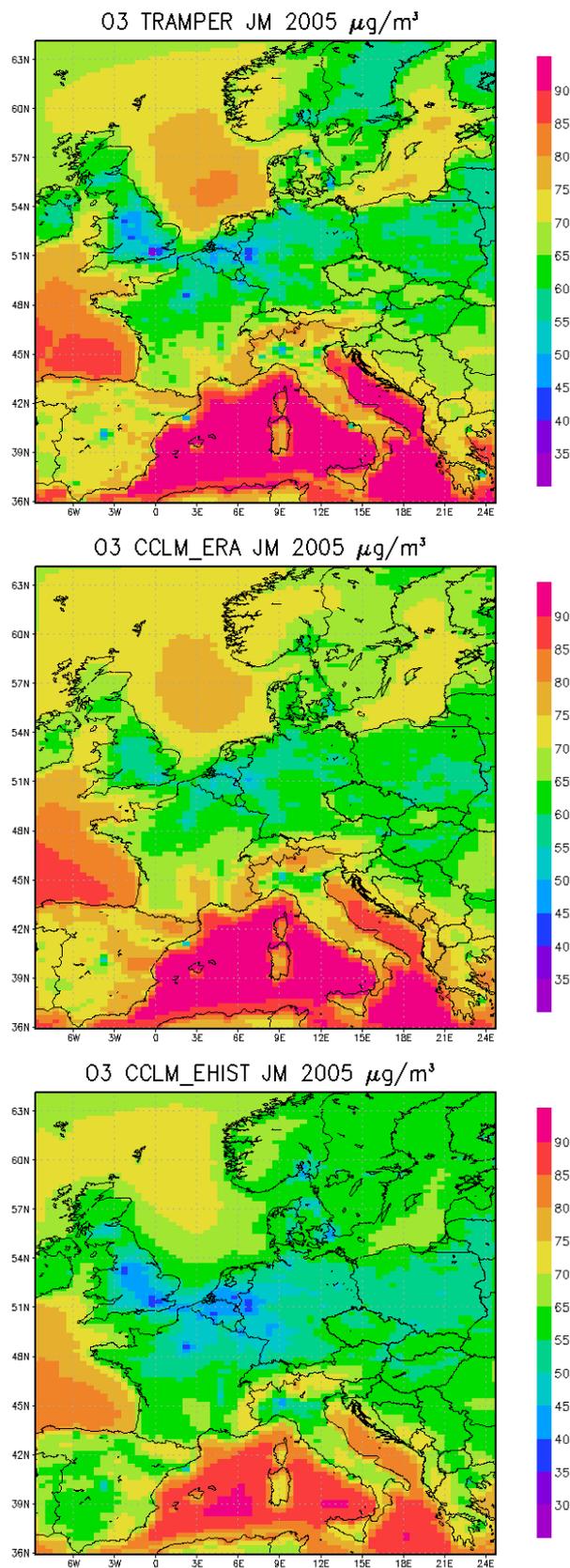


Abbildung 43: Ozon-AOT40 Vegetation 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Europa-Lauf.

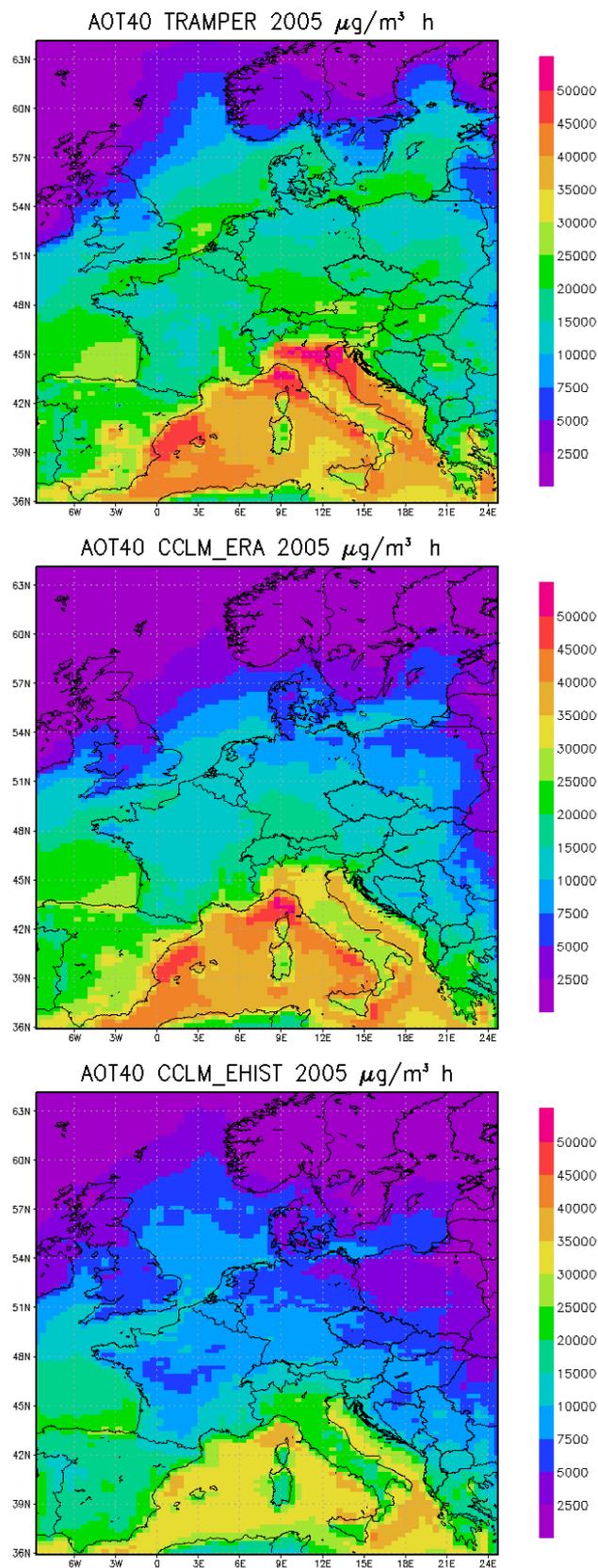
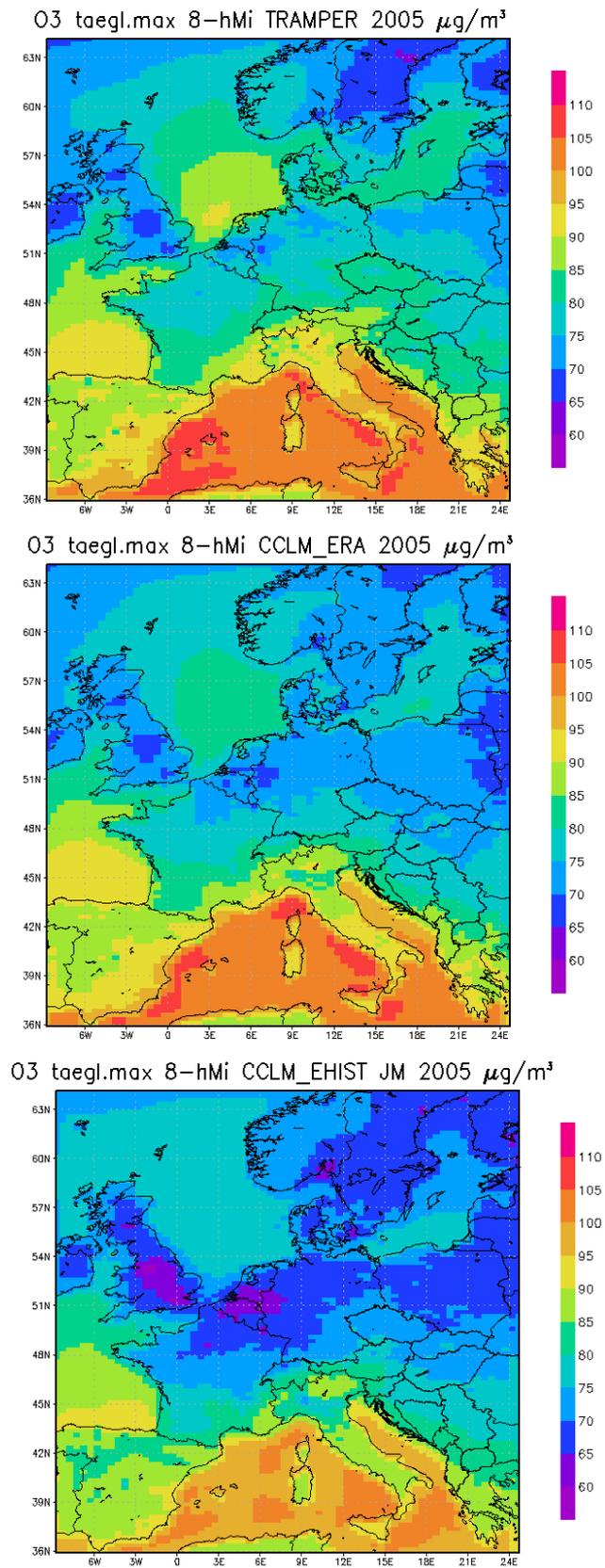


Abbildung 44: Mittelwert 2005 des Maximums der täglichen gleitenden 8-Stunden-Mittelwerte berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Europa-Lauf



4.3.3 Deutschland: NO₂ und PM10

Ergänzend zu den flächenhaften Vergleichen der Ergebnisse für die drei Meteorologien im höher auflösenden Deutschland-Raster (siehe Abbildung 36) erfolgt noch eine Auswertung in Form von sogenannten Box-Whisker-Plots, die die räumliche Verteilung der dargestellten Größen in Deutschland in einer Darstellung zusammenfassen. Abbildung 45 zeigt die NO₂-Jahresmittelwerte des Deutschlandlaufs in der hohen Auflösung von 0.125° Länge und 0.0625° Breite. Wie schon im Europalauf ist die NO₂-Konzentrationsverteilung in Deutschland bei allen Meteorologien ähnlich. In den Ballungsgebieten, vor allem dem Ruhrgebiet werden mit der TRAMPER-Meteorologie aber höhere Konzentrationen berechnet als mit den beiden anderen Meteorologien. Dies zeigt sich auch deutlich in dem Box-Whisker-Plot, der die in Deutschland berechnete Spannbreite der NO₂-Jahresmittelwerte (Minimaler, maximaler Jahresmittelwert, 1. Quartil, Median, 3. Quartil der Verteilung) aufzeigt (Abbildung 46).

Bei den PM10-Jahresmittelwerten (Abbildung 47) ergeben sich wie schon im Europalauf für die CCLM-Meteorologien höhere Jahresmittelwerte, was im Wesentlichen wieder auf die höheren Sulfatkonzentrationen zurückzuführen ist. Übereinstimmend bei allen Meteorologien werden die höchsten PM10-Jahresmittelwerte im Ruhrgebiet, entlang der Rheinschiene und im Großraum Stuttgart berechnet. Die höheren PM10-Konzentrationen der CCLM-Meteorologien zeigen sich auch in den Box-Whisker-Plots (Abbildung 48).

Die PM10-Jahresmittelwerte wurden zusätzlich nach 4 Bevölkerungsklassen (BVK) ausgewertet. Diese Bevölkerungsklassen fassen die Gitterzellen in Deutschland entsprechend den im Anhang 9.2.1 definierten Kriterien in Abhängigkeit von der Bevölkerungsdichte zusammen. Abbildung 49 zeigt dazu beispielhaft die mit der CCLM_ERA-Meteorologie berechnete Verteilung der PM10-Jahresmittelwerte getrennt für die ländlichen Gebiete (BVK1) bis zu den Ballungsgebieten (BVK4). Es ist deutlich zu erkennen, dass die berechneten PM10-Jahresmittelwerte in den ländlichen Regionen niedriger sind als in den Ballungsgebieten. Dieses Ansteigen der Konzentrationen vom Land in die städtischen Regionen zeigt sich auch bei den Berechnungen mit den anderen beiden Meteorologien (nicht abgebildet). In Abbildung 50 sind die mit allen Meteorologien berechneten PM10-Konzentrationen getrennt nach Bevölkerungsklasse 1 und Bevölkerungsklasse 4 zusammengestellt. Die in der deutschlandweiten Auswertung (Abbildung 48) festgestellte Rangfolge (TRAMPER die niedrigsten PM10-Jahresmittelwerte, CCLM_EHIST die höchsten PM10-Jahresmittelwerte) ergibt sich auch in der Unterteilung ländliche Gebiete und Ballungsräume. Die Verwendung der CCLM_ERA-Meteorologie führt in ländlichen Regionen im Vergleich mit der TRAMPER-Meteorologie im Mittel zu circa 23% höheren PM10-Jahresmittelwerten (Tabelle 13). In den Ballungsräumen beträgt der Unterschied nur circa 13 %. Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, dass vor allem die höheren Sulfatkonzentrationen der CCLM-Läufe (siehe Kapitel 4.3.1) für die Unterschiede verantwortlich sind. Sekundäraerosole wie Sulfat werden großflächig gebildet und transportiert, so dass sich für diese Komponenten des PM10 nur ein geringer Gradient zwischen Land und Stadt entwickelt. Die primären PM-Komponenten werden dagegen eher in dichter besiedelten Regionen emittiert.

Tabelle 13: PM10-Jahresmittelwerte 2005 gemittelt über Deutschland, alle Flächen der Bevölkerungsklasse 1 und alle Flächen der Bevölkerungsklasse 4.

µg/m ³	Deutschland	Ländliche Regionen (BVK1)	Ballungsgebiete (BVK4)
TRAMPER	13.3	12.4	17.2
CCLM_ERA	15.6	14.8	18.9
CCLM_EHIST	16.0	15.3	19.4

Abbildung 45: NO₂-Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Deutschland-Lauf.

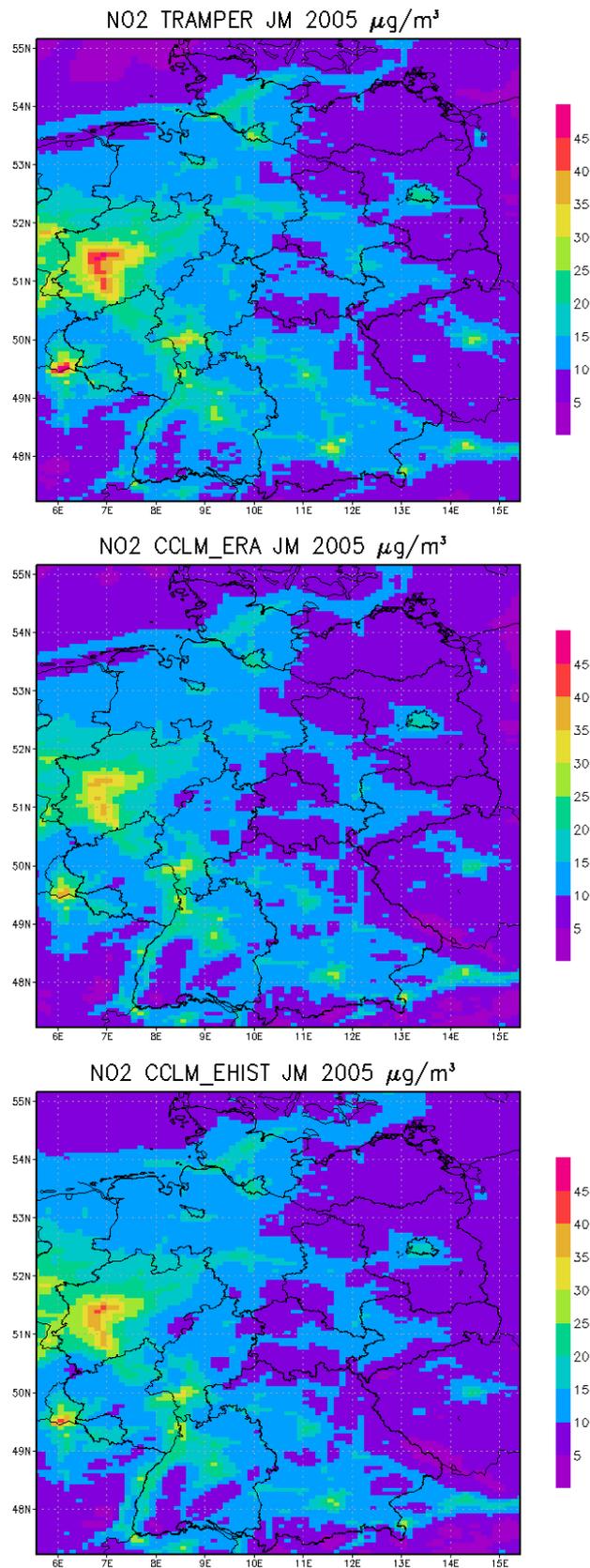


Abbildung 46: Spannbreite der NO₂-Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (links), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Jahresmittelwert in Deutschland, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf.

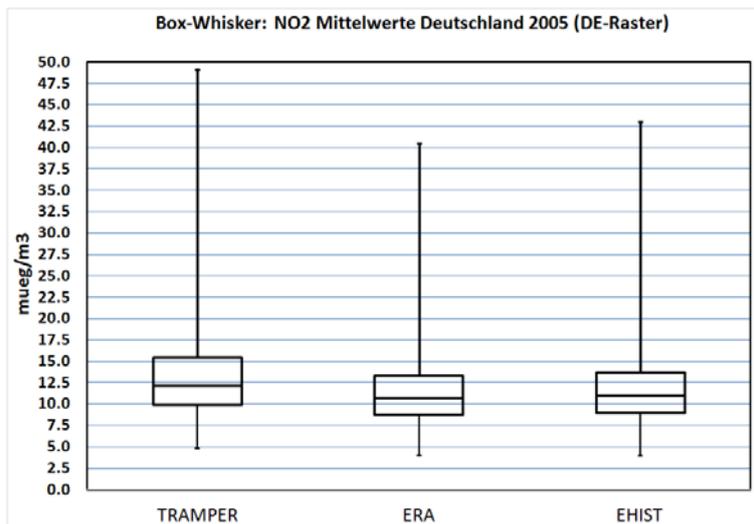


Abbildung 47: PM10-Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Deutschland-Lauf.

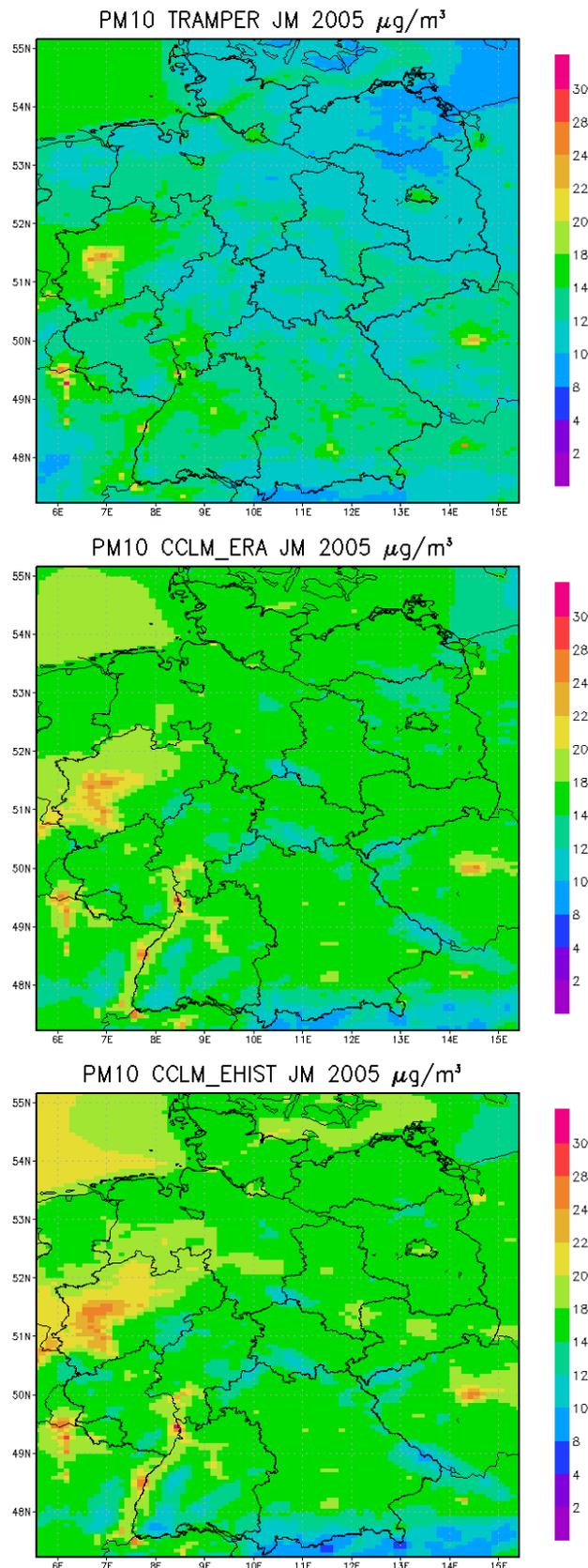


Abbildung 48: Spannweite der PM10-Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (links), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Jahresmittelwert in Deutschland, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf.

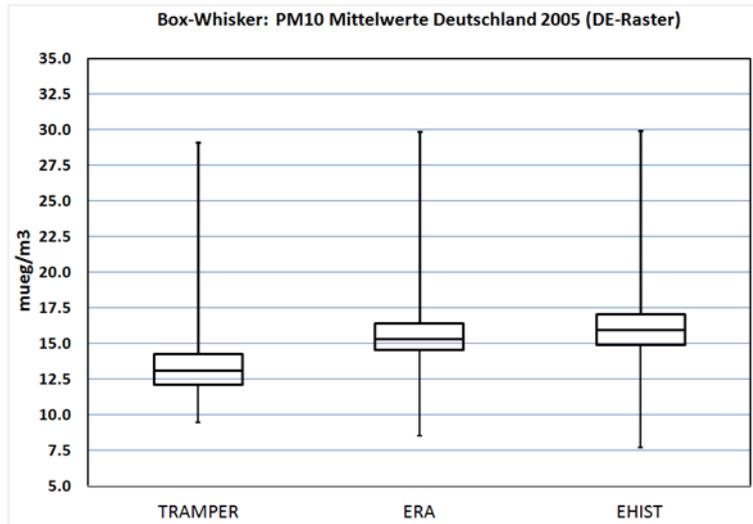


Abbildung 49: Spannweite der PM10-Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie unterteilt nach 4 Bevölkerungsklassen (BVK). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Jahresmittelwert in Deutschland, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf.

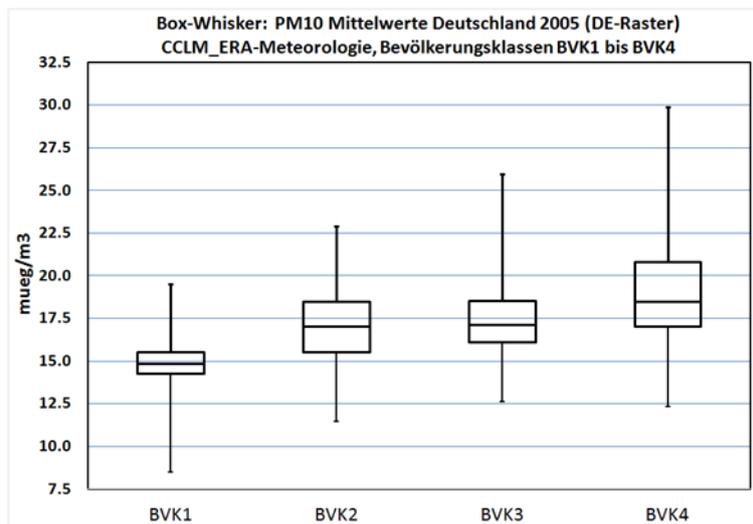
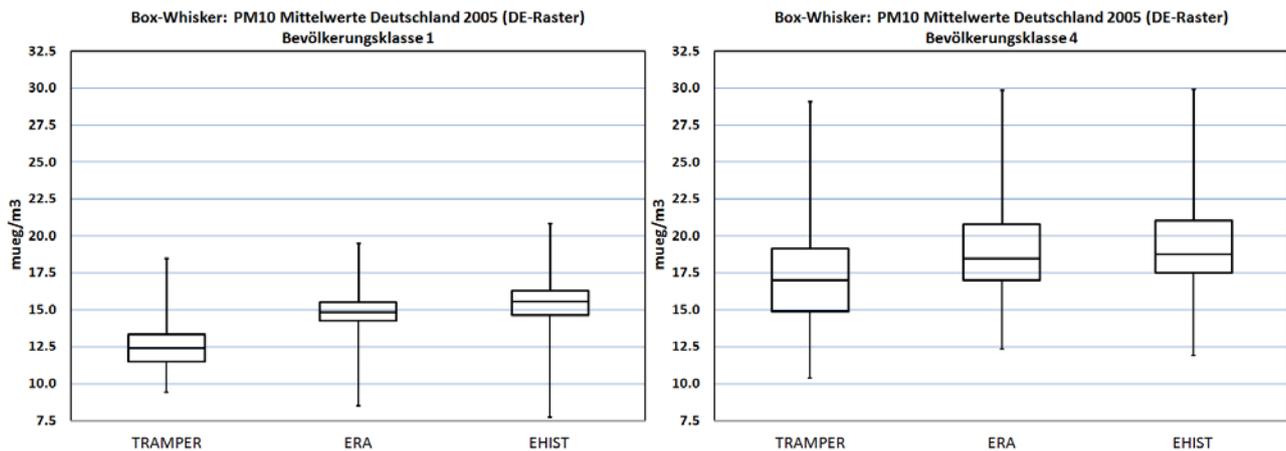


Abbildung 50: Spannweite der PM10-Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (links), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Jahresmittelwert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf, Bevölkerungsklasse 1 (ländliche Regionen, linke Grafik) und Bevölkerungsklasse 4 (Ballungsgebiete, rechte Grafik).



4.3.4 Deutschland: Ozon

Abbildung 51 zeigt die Verteilung der in Deutschland berechneten Ozon-Jahresmittelwerte. Das RCG-Modell berechnet mit allen Meteorologien die niedrigsten Ozon-Jahresmittelwerte im Ruhrgebiet, wo die hohen NO_x-Emissionen einen Ozonaufbau verhindern (Titrationseffekt). Auf Basis der CCLM-Meteorologien werden vor allem im Bereich der Mittelgebirge etwas höhere Ozon-Jahresmittel berechnet als mit der TRAMPER-Meteorologie. Diese höheren Jahresmittelwerte zeigen sich auch in den Box-Whisker-Plots der Jahresmittelwerte (Abbildung 52). Dies ist ein Hinweis, dass die dynamischen Effekte im Bereich von Gebirgen mit den auf Modellrechnungen basierenden CCLM-Meteorologien besser abgebildet werden als in der auf der Interpolation von Beobachtungen beruhenden TRAMPER-Meteorologie.

Die Bewertung von Ozon-Jahresmittelwerten alleine genügt nicht, um die grundlegenden Unterschiede in den Ozonergebnissen auf Basis verschiedener Meteorologien herauszuarbeiten, da Ozon-Jahresmittelwerte stark vom hauptsächlich im Winter und nachts auftretenden Titrationseffekt, d.h. dem Abbau von Ozon durch frisch emittierte NO_x-Emissionen geprägt werden. Betrachtet man die Mittelwerte der Maxima der täglichen gleitenden 8-Stundenmittelwerte im Zeitraum April bis September (Abbildung 53 und Abbildung 54), ergibt sich ein vollständig anderes Bild. Bei diesem Maß, das nur für die Ozonsaison (April bis September) gebildet wurde und die Nachtwerte weitgehend ausblendet (die Maxima der gleitenden 8-Stundenmittelwerte treten überwiegend am Tage auf), werden die höchsten Werte unter Verwendung der TRAMPER-Meteorologie und die niedrigsten Werte unter Verwendung der CCLM_EHIST-Meteorologie berechnet. Bei allen drei Abbildungen der räumlichen Konzentrationsverteilung in Deutschland ist zudem ein deutlicher Nord-Süd-Gradient zu erkennen. Die höheren Werte in den Berechnungen mit der TRAMPER-Meteorologie zeigen sich entsprechend auch in den Häufigkeitsverteilungen der Maxima der täglichen gleitenden 8-Stundenmittelwerte (Abbildung 55). In allen Konzentrationsbereichen > 100 µg/m³ liefert die TRAMPER-Meteorologie die höchsten, die CCLM_ERA-Meteorologie die niedrigsten Anteile. In Abbildung 56 sind die Auftrittshäufigkeiten der täglichen maximalen 8-Stundenmittelwerte für die Bereiche > 120 µg/m³ für 3 Zonen in Deutschland dargestellt: Norddeutschland (alle Zellen in Deutschland > 52.25° Breite), Mitteldeutschland (alle Zellen der Modellrechnung in Deutschland zwischen 50.25° Breite und

52.25° Breite), Süddeutschland (alle Zellen in Deutschland südlich von 50.25° Breite). Aus den Abbildungen wird zweierlei deutlich: die CCLM_EHIST-Meteorologie liefert in jeder der drei Regionen weniger Überschreitungstage (maximaler täglicher 8-Stundenmittelwert $> 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$) als die CCLM_ERA-Meteorologie und diese wiederum weniger Überschreitungstage als die TRAMPER-Meteorologie. Gleichzeitig zeigt die CCLM_EHIST-Meteorologie bei den hohen Ozonbereichen den geringsten Nord-Süd-Gradienten. So werden für diese Meteorologie in allen Regionen im Mittel lediglich an circa 1% der Tage des Zeitraumes April bis September ein maximaler gleitender 8-Stundenmittelwert $> 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berechnet. Unter Verwendung der CCLM_ERA-Meteorologie sind zwischen circa 2% (Norddeutschland) und 4% (Süddeutschland) der Tage im Jahr Überschreitungstage. Die entsprechenden Zahlen für die TRAMPER-Meteorologie sind circa 4% und 8%.

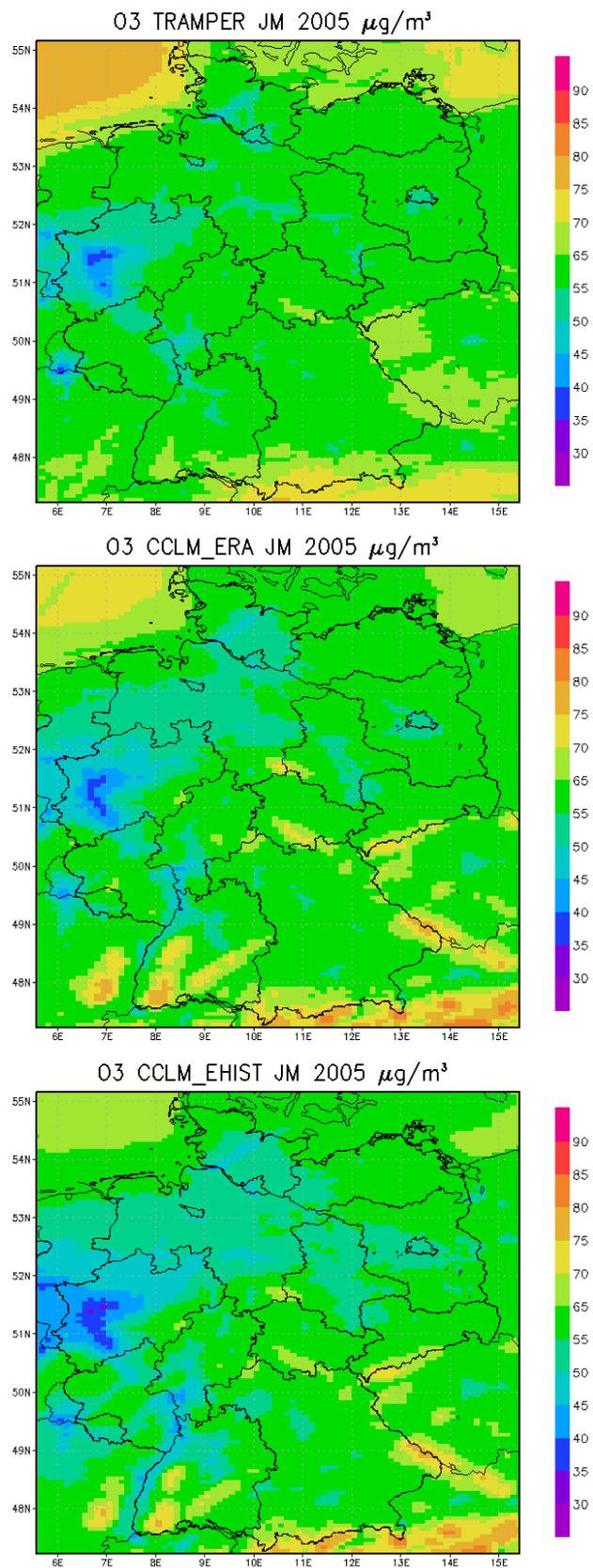
Diese Rangfolge zeigt sich auch bei zwei weiteren Größen, die eher auf die hohen Ozonkonzentrationen abzielen: dem AOT40-Wert für Vegetation (Abbildung 57 und Abbildung 58) und dem SOMO35-Wert (Abbildung 59 und Abbildung 60), der von der WHO zur Bewertung des Einflusses hoher Ozonkonzentration auf die menschliche Gesundheit vorgeschlagen wurde. Beide Größen sind Dosen, d. h. die Ozonkonzentrationen einer Wachstumsperiode (AOT40) bzw. eines Jahres (SOMO35) werden nach bestimmten Kriterien aufsummiert. Der AOT40 ist ein Maß zur Bewertung der ökotoxikologischen Wirkung von Ozon auf die Vegetation und wird gebildet aus der Summe der Differenzen der 1-Stunden-Mittelwerte $> 40 \text{ ppb}$ und des Schwellenwertes 40 ppb . Zur Summierung verwendet werden nur die 1-Stunden-Mittelwerte zwischen 8 Uhr morgens und 20 Uhr abends Mitteleuropäischer Zeit (MEZ) an jedem Tag der Wachstumsperiode April bis Juli (EU-Richtlinie 2008/50/EG). Der SOMO35 ist definiert als die Summe der Differenzen des täglichen Maximums der 8-stündigen gleitenden Mittelwerte $> 35 \text{ ppb}$ und des Schwellenwerts 35 ppb .

Die zwischen den drei Meteorologien unterschiedlich starke Ausbildung hoher Ozonwerte hat ihre Ursache in der unterschiedlichen meteorologischen Simulation der die Ozonbildung begünstigenden meteorologischen Parameter. Hohe Ozonwerte entstehen hauptsächlich bei hohen Temperaturen und geringer Bewölkung. Hohe Temperaturen beschleunigen viele der zur Ozonbildung führenden Reaktionsraten, geringe Bewölkung bedeutet vor allem im Sommer hohe Einstrahlung was die für die Ozonbildung notwendigen Photolyseprozesse verstärkt. Hohe Temperaturen und hohe Einstrahlung erhöhen zudem die Emission der biogenen Kohlenwasserstoffe, was wiederum die Ozonbildungsrate verstärkt. Die meteorologischen Daten 2005 wurden dazu im Modellgebiet Deutschland bezüglich der Bodentemperaturen und der Bewölkungsgrade ausgewertet. Abbildung 61 zeigt die Anteile der 3 Meteorologien an geringer, mittlerer und hoher Bewölkung. Es ist offensichtlich, dass die Meteorologie CCLM_EHIST den geringsten Anteil an geringen und mittleren Bewölkungsgraden und den höchsten Anteil an hohen Bewölkungsgraden aufweist. Bei den Bodentemperaturen am Tage im Sommer weist die Meteorologie CCLM_EHIST in Deutschland in allen Bereichen $> 20^\circ\text{C}$ die geringsten Anteile, die Meteorologie TRAMPER dagegen die höchsten Anteile auf (Abbildung 62). Entsprechend den geringeren Temperaturanteilen im höheren Temperaturbereich und den höheren Bewölkungsanteilen bei dichter Bewölkung sind die biogenen Isopren-Emissionen, die wesentlich zum biogenen Anteil der Ozonkonzentrationen beitragen, im Lauf mit der CCLM_EHIST Meteorologie auch niedriger als in den Läufen mit den beiden anderen Meteorologien: die Isopren-Emissionen des Laufes CCLM_EHIST betragen im Jahr 2005 nur 67% der Isopren-Emission des Laufes TRAMPER und 87% des Laufes CCLM_ERA.

Diese Aussagen gelten natürlich nur für das Jahr 2005. Bei den Auswertungen für die CCLM_EHIST-Meteorologie muss außerdem berücksichtigt werden, dass ein Vergleich mit Messungen eigentlich nur mit klimatologischen Immissionsmittelwerten durchgeführt werden sollte. Der hier beschriebene Vergleich auf Basis der Jahresdaten 2005 soll nur aufzeigen, ob die CCLM_EHIST-Meteorologie zu Immissionswerten in einer zu erwartenden Größenordnung führt. Die meteorologischen Auswertungen in Kapitel 3 zeigen, dass sowohl die Meteorologie CCLM_ERA als auch die Meteorologie CCLM_EHIST

die langjährigen mittleren Sommertemperaturen unterschätzen mit einer deutlich höheren Unterschätzung für CCLM_EHIST (siehe Tabelle 8 und Abbildung 11).

Abbildung 51: O₃-Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Deutschland-Lauf.



Dies deckt sich qualitativ mit der hier vorgestellten Auswertung für 2005. Spezielle Auswertungen zu den Bewölkungsanteilen wurden nicht vorgenommen. Die starke Überschätzung der Niederschlagsmengen bei beiden Meteorologien kann aber als Hinweis gewertet werden, dass auch die Bewölkungsanteile überschätzt werden. Die immissionsseitigen Auswertungen der 30-jährigen Mittelwerte (Kapitel 4.4) zeigen dementsprechend auch deutlich das geringere Oxidantien- und PM-Bildungspotential der CCLM_EHIST-Meteorologie im Vergleich zur CCLM_ERA-Meteorologie.

Abbildung 52: Spannweite der O₃-Jahresmittelwerte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (links), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Jahresmittelwert in Deutschland, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf.

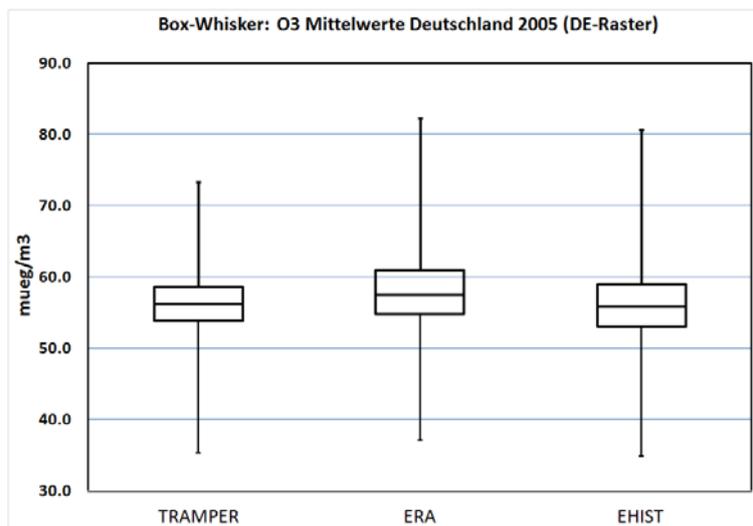
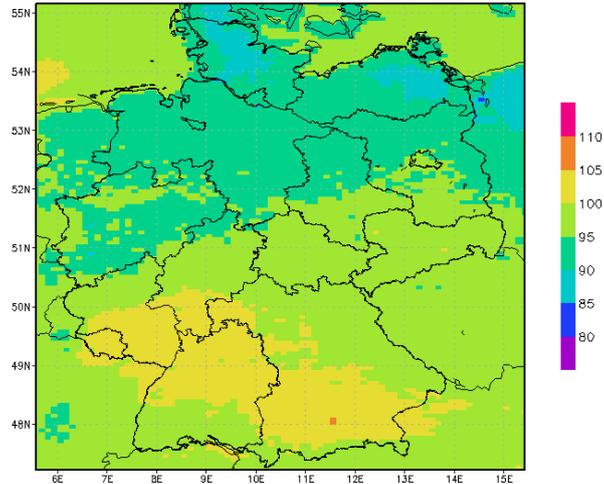
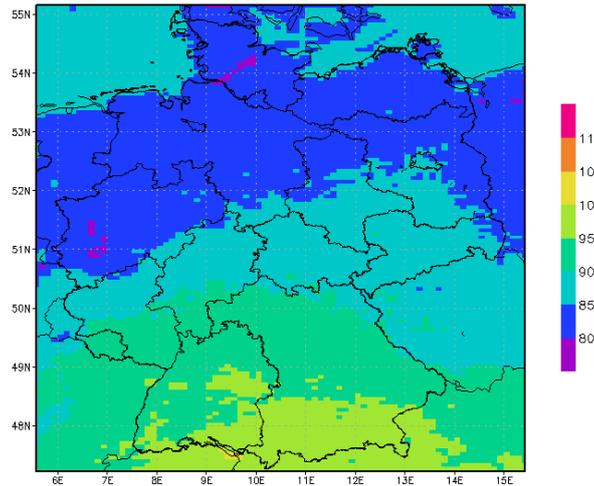


Abbildung 53: Mittelwerte der Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel im Zeitraum April bis September 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Deutschland-Lauf.

RCG-TRAMPER Max.8-h-Mittel Apr-Sept 2005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



RCG-CCLM_ERA Max.8-h-Mittel Apr-Sept 2005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



RCG-CCLM_EHIST Max.8-h-Mittel Apr-Sept 2005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

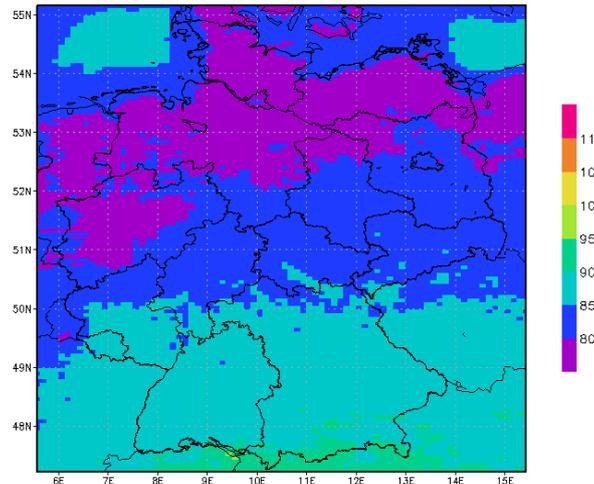


Abbildung 54: Spannweite der Mittel des Maximums der täglichen gleitenden Ozon 8-Std.-Mittel im Zeitraum April bis September 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (links), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Mittelwert in Deutschland, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf.

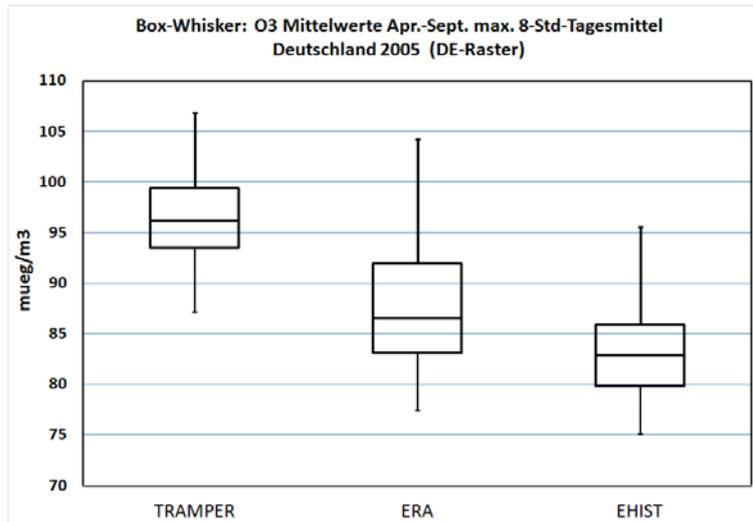


Abbildung 55: Auftretshäufigkeit der Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Stundenmittelwerte im Zeitraum April bis September 2005 in Deutschland.

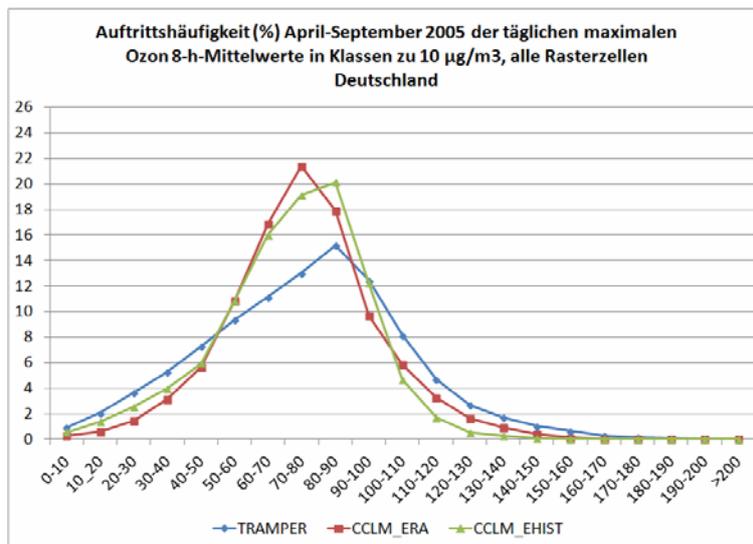


Abbildung 56: Häufigkeiten der Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Stundenmittelwerte im Zeitraum April bis September 2005 für die Bereiche > 120 µg/m³ unterteilt in Norddeutschland (oben), Mitteldeutschland (Mitte) und Süddeutschland (unten).

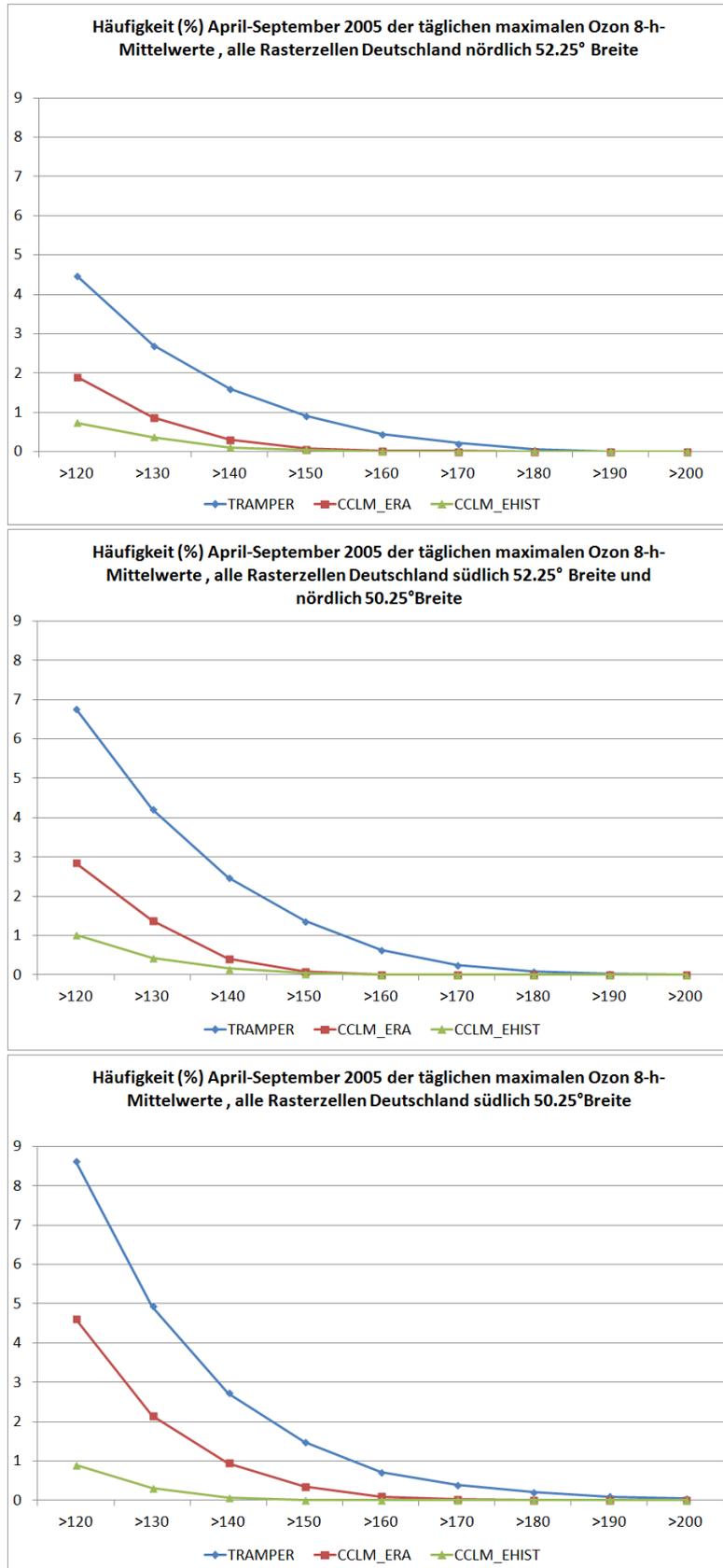


Abbildung 57: O₃-AOT40-Werte 2005 für Vegetation berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Deutschland-Lauf.

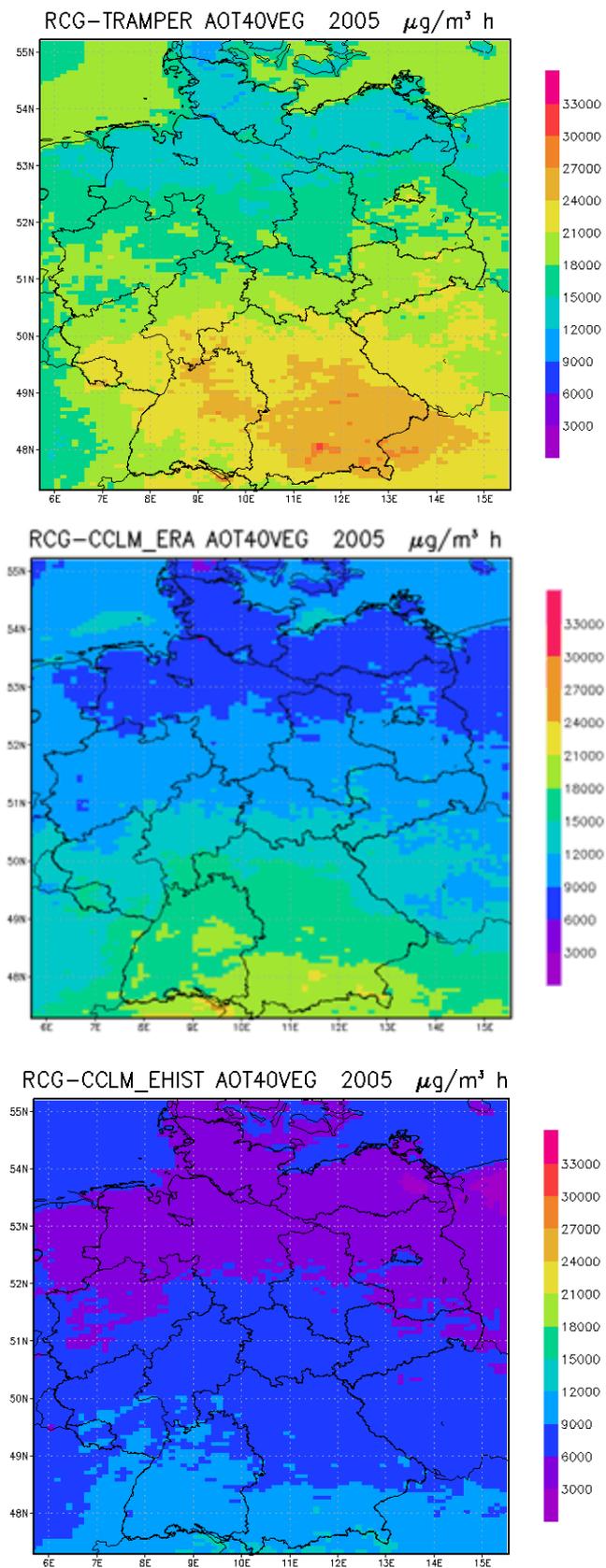


Abbildung 58: Spannweite der O₃-AOT40 Werte 2005 für Vegetation berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (links), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete AOT40-Wert in Deutschland, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf.

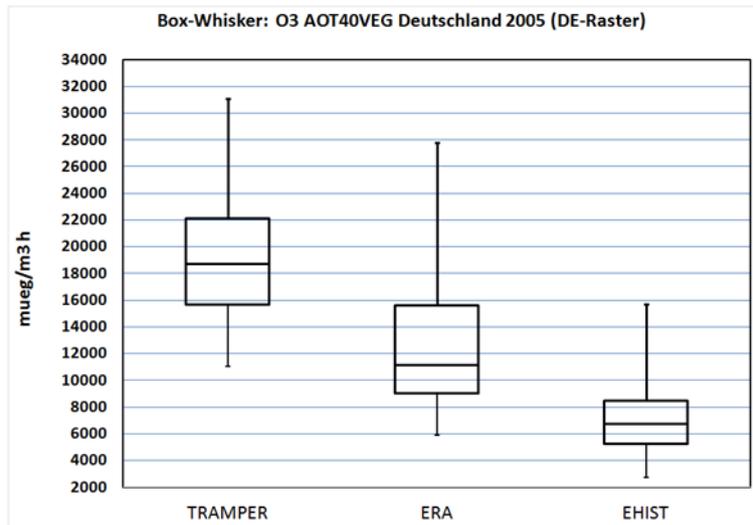


Abbildung 59: O₃-SOMO35-Werte 2005 berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (oben), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Deutschland-Lauf.

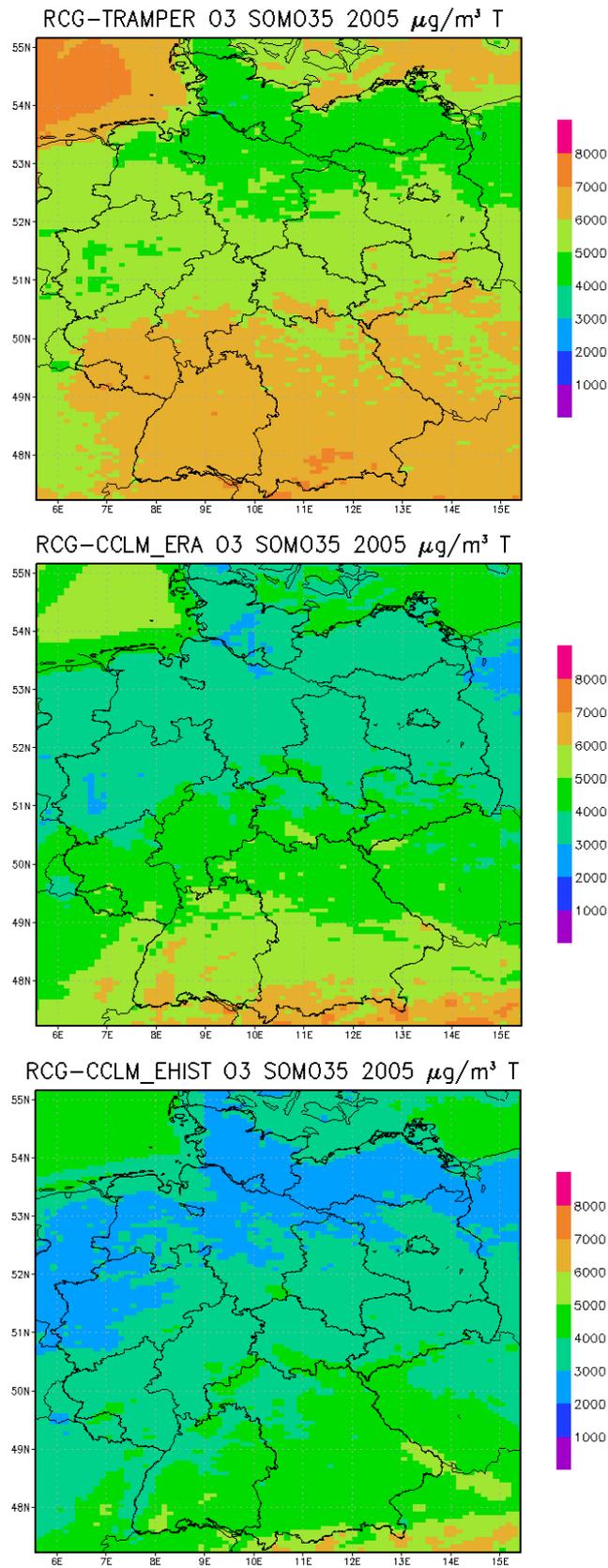


Abbildung 60: Spannweite der O₂-SOMO35 Werte 2005 für Vegetation berechnet mit der TRAMPER-Meteorologie (links), der CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete SOMO35 Wert in Deutschland, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf.

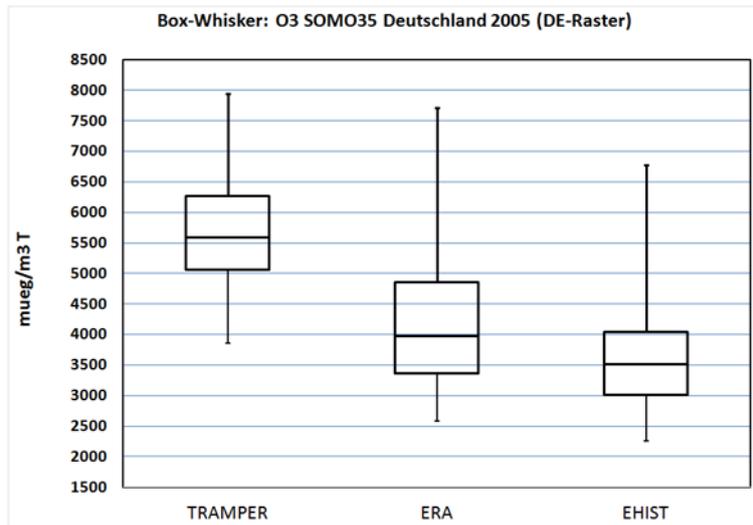


Abbildung 61: Anteile der Bewölkung (%) im Modellgebiet Deutschland unterteilt in 3 Klassen: geringe Bewölkung 0 bis 3/10, mittlere Bewölkung 4/10 bis 6/10, dichte Bewölkung: 7/10 bis 10/10. Auswertejahr: 2005.

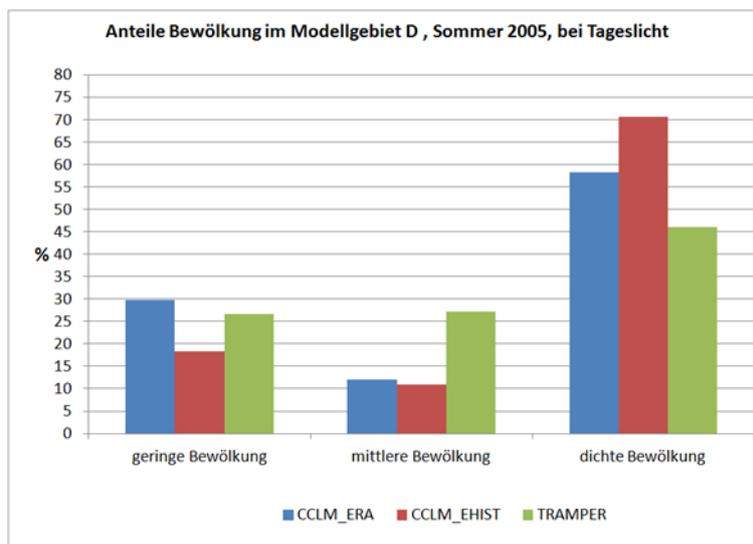
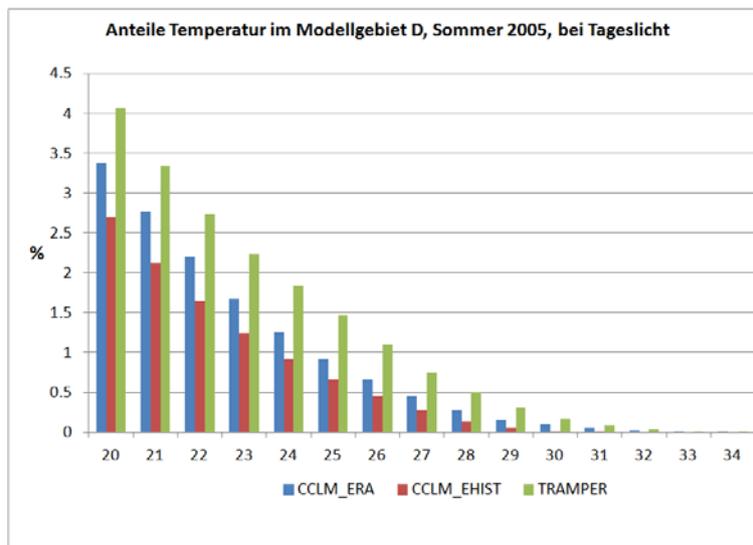


Abbildung 62: Anteile der Bodentemperaturen (%) über 20°C im Modellgebiet Deutschland in Klassen zu 1 °C. Tagesstunden im Sommer 2005.



4.3.5 Vergleich mit Beobachtungen

In den vorhergehenden Abbildungen wurden durchgehend die mit den verschiedenen Meteorologien berechneten Konzentrationen der ersten RCG-Modellschicht verwendet. Die erste Modellschicht beginnt am Boden und hat eine vertikale Ausdehnung von 25 m. Die berechneten Konzentrationen repräsentieren den Mittelwert über diese vertikale Ausdehnung. Messungen werden aber im Allgemeinen in einer deutlich niedrigeren Höhe, im Schnitt in 3 m Höhe, durchgeführt. Zum Vergleich mit Messungen werden daher im RCG-Modell die Schichtmittelwerte unter Verwendung der lokalen Depositionsgeschwindigkeit und des lokalen aerodynamischen Widerstands mit Hilfe der sogenannten "constant flux assumption" auf 3 m skaliert. Diese Skalierung erfolgt für die stündlich berechneten Konzentrationen. Auf die NO_x- und Ozonkonzentrationen werden anschließend die photostationären Gleichgewichtsbeziehungen angewandt, um diese Größen wieder in ein chemisches Gleichgewicht zu bringen.

Abbildung 63 zeigt die mit den drei unterschiedlichen Meteorologien an ländlichen und städtischen Hintergrundstationen berechneten NO₂-Jahresmittelwerte im Vergleich mit den Beobachtungen. Generell wird die beobachtete Spannweite von circa 5 µg/m³ NO₂ im ländlichen Hintergrund bis zu nahezu 40 µg/m³ im städtischen Hintergrund mit allen drei Meteorologien gut reproduziert. Mit der TRAMPER-Meteorologie werden die höchsten beobachteten NO₂-Konzentrationen überschätzt. Die Hauptursache der höheren NO₂-Konzentrationen liegt in dem in TRAMPER integrierten Grenzschichtmodell, das im Gegensatz zu dem prognostischen Treiber CCLM zu Werten einiger Grenzschichtvariablen führt, die hohe Konzentrationen begünstigen (Kerschbaumer, 2010a, 2010b, Stern, 2010b).

Die beobachteten PM₁₀-Konzentrationen werden vor allem in den höheren Bereichen mit allen Meteorologien an vielen Stationen unterschätzt (Abbildung 64). Dazu muss erwähnt werden, dass die Modellierung der PM₁₀-Immissionen auch heute noch mit beträchtlichen Schwierigkeiten verbunden ist. Generell werden die zeitweise beobachteten hohen PM₁₀-Konzentrationen von den Modellen in den meisten Fällen nicht reproduziert (Stern et al. 2008; Cuvelier et al. 2013). Dies betrifft sowohl lokal gemessene kurzzeitige Spitzenkonzentrationen als auch durch Ferntransport verursachte großflächigere Konzentrationsanstiege. Ein wesentlicher Grund liegt darin, dass nicht alle PM₁₀-Quellen mit ihren Emissionen bekannt sind, und auch die Qualität der verfügbaren anthropogenen Partikel-Emissionsdaten geringer ist als diejenige der klassischen Schadstoffe wie z. B. NO_x und SO₂.

Partikelemissionen aus landwirtschaftlichen Aktivitäten, windbedingte Staubaufwirbelung von naturbelassenen Böden oder in Stadtgebieten (z. B. aus Baustellentätigkeit oder Wiederaufwirbelung durch den Kfz-Verkehr) sowie biogene Aerosole sind unvollständig oder gar nicht erfasst, da diese Emissionen zum Teil stark von den meteorologischen Bedingungen und der Beschaffenheit des Untergrundes abhängen. Auch die gasförmigen Primäremissionen, die zu den organischen und anorganischen Sekundäraerosolen führen, stehen nur zum Teil zur Verfügung (z. B. biogen emittierte Isoprene und Terpene, aber auch anthropogen verursachte NH_3 -Emissionen). Generell werden mit den beiden COSMO-Meteorologien etwas höhere PM_{10} -Konzentrationen berechnet als mit der TRAMPER-Meteorologie. Wie bereits ausgeführt, ist dies eine Folge der höheren Sulfat-Konzentrationen (siehe Kapitel 4.3.1). Den Vergleich der Berechnungen mit den wenigen verfügbaren Sulfat-Konzentrationen zeigt die Abbildung 65. Die Sulfat-Messungen werden mit der TRAMPER-Meteorologie meistens etwas unterschätzt, mit den COSMO-Meteorologien dagegen leicht überschätzt. Die geringe Anzahl der Messungen erlaubt aber keine allgemeingültige Aussage zur Sulfat-Prognosequalität der verschiedenen Modellkonstellationen.

Abbildung 66 zeigt den Vergleich der berechneten und beobachteten Ozon-Jahresmittelwerte. Mit allen Meteorologien werden die niedrigeren (städtischen) Ozonkonzentrationen eher überschätzt und die hohen (ländlichen) Konzentrationen eher unterschätzt. Die Überschätzung vieler städtischer Hintergrundstationen ist eine Folge der Maschenweite von circa 7 km x 8 km, wodurch lokale Emissionsstrukturen nicht angemessen aufgelöst werden können. Dies führt zu einer Unterschätzung des einem Ozonaufbau entgegenwirkenden Titrationseffekts. Die Unterschätzung hoher Konzentrationen kann vielfältige Ursachen haben: Unterschätzung des realen chemischen Ozonbildungspotenzials und ungenügende Abbildung der vertikalen Austauschverhältnisse zählen dabei zu den Hauptursachen.

Die Unterschiede zwischen den Ozon-Prognosen werden sehr viel größer, wenn man Maße betrachtet, die eher auf die hohen Ozonkonzentrationen abheben. Dieser Umstand wurde bereits in Kapitel 4.3.4 diskutiert. Dazu zeigt die Abbildung 67 einen Vergleich berechneter und beobachteter AOT40-Werte an deutschen Hintergrundstationen. Auf Basis der TRAMPER-Meteorologie werden die niedrigen beobachteten AOT40-Werte überschätzt und die hohen beobachteten AOT40-Werte unterschätzt. Mit den beiden COSMO-Meteorologien kommt es zu einer Unterschätzung der AOT40-Werte in nahezu allen Bereichen.

Abbildung 68 zeigt eine Auswertung der Messungen und der Berechnungen getrennt für Winter und Sommer. Dargestellt ist der jeweils mittlere Ozontagesgang gebildet an den ländlichen Hintergrundstationen. Unter Verwendung der TRAMPER-Meteorologie wird der beobachtete sommerliche Ozonanstieg am Vormittag überschätzt, die mittleren Ozonspitzenkonzentrationen werden in der Höhe dagegen gut getroffen. Mit den beiden COSMO-Meteorologien ist es genau umgekehrt, der Ozonanstieg wird gut reproduziert, die Ozonspitzen am Nachmittag werden dagegen klar unterschätzt, mit der CCLM_EHIST-Meteorologie noch stärker als mit der CCLM_ERA-Meteorologie. Dies zeigt das höhere Ozonbildungspotenzial der TRAMPER-Meteorologie auf, was schon bei der Diskussion der Bewölkungsgrade und der Bodentemperaturen (siehe Kapitel 4.3.4) deutlich wurde. Im Winter werden mit den beiden COSMO-Meteorologien Ozonverläufe berechnet, die meistens über den gemessenen Verläufen liegen. Bei TRAMPER ist es dagegen umgekehrt. Im Winter spielt das chemische Ozonbildungspotenzial eine untergeordnete Rolle, die Ozonkonzentrationen werden im Wesentlichen durch das Zusammenspiel von Ablagerung am Boden, Ozonabbau durch frisch emittiertes NO_x und Ozontransport aus höheren Schichten zum Boden bestimmt. Die höheren Konzentrationen bei Verwendung der COSMO-Meteorologien sind möglicherweise ein Hinweis auf einen im Vergleich zur TRAMPER-Meteorologie verstärkten Vertikalaustausch.

Das gegenläufige Winter-Sommer-Verhalten führt dazu, dass die Ozonjahresmittelwerte mit allen Meteorologien in ähnlicher Güte abgebildet werden. Das höhere chemische Ozonbildungspotenzial der

TRAMPER-Meteorologie zeigt sich erst, wenn man Auswertegrößen betrachtet, die auf die höheren Ozonbereiche abheben, so wie AOT40, SOMO35 oder die Mittelwerte der Maxima der gleitenden täglichen 8-Stundenmittel. Bei diesen Größen wird auch deutlich, dass die CCLM_EHIST-Meteorologie das geringste chemische Ozonbildungspotenzial besitzt, was durch die im Vergleich zu den anderen beiden Meteorologien höheren Bedeckungsgrade und die geringe Häufigkeit von Temperaturen in den hohen Bereichen untermauert wird.

Der Vergleich zeigt, dass die Anbindung des RCG-Modells an die Meteorologien CCLM_ERA und CCLM_EHIST sowohl für Europa als auch für Deutschland erfolgreich durchgeführt wurde und die Systeme RCG-CCLM_ERA und RCG-CCLM_EHIST zu realistischen, d.h. erklärbaren Ergebnissen führen.

Abbildung 63: Berechnete und beobachtete NO₂-Jahresmittelwerte 2005. Tramper-Meteorologie (oben), CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) und CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Ländliche und städtische Hintergrundstationen in Deutschland. Keine Bergstationen.

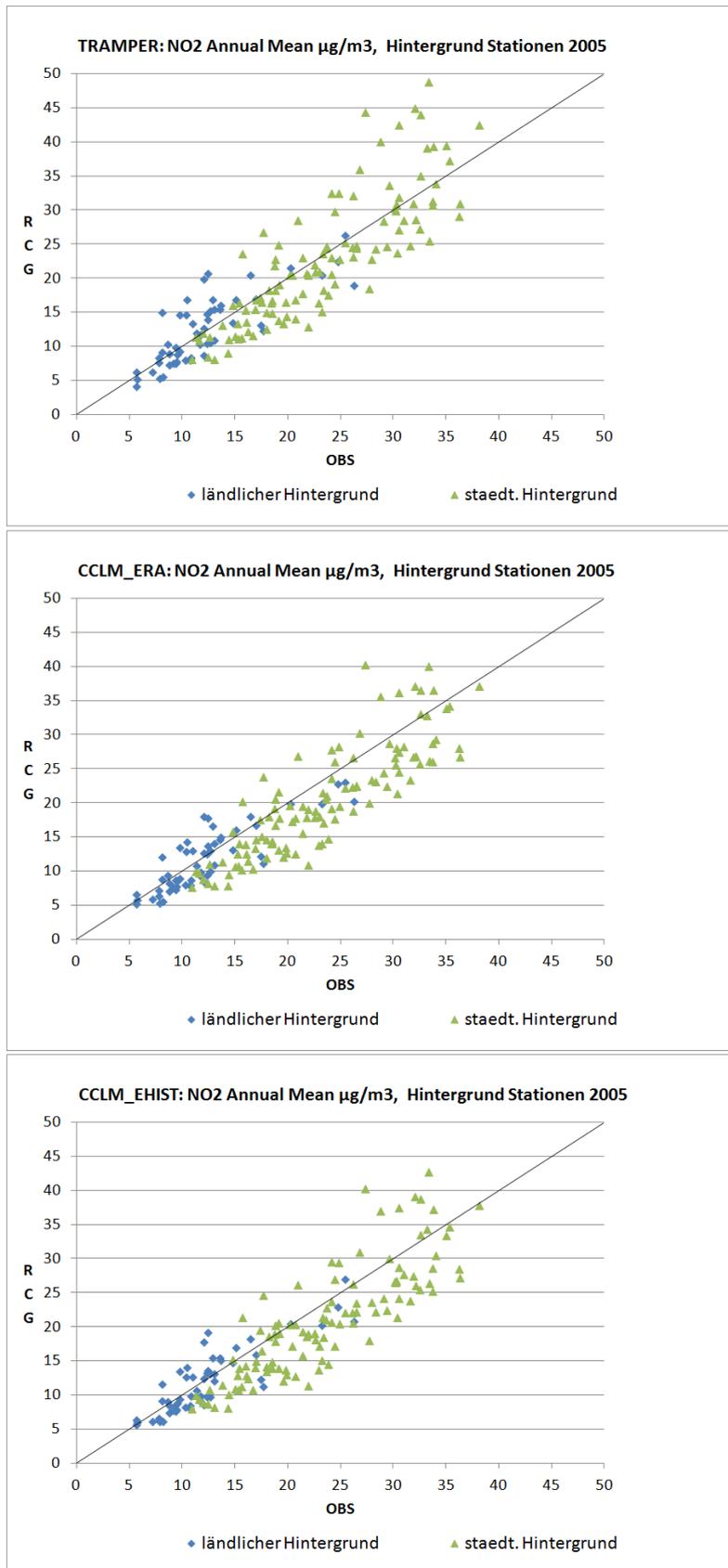


Abbildung 64: Berechnete und beobachtete PM10-Jahresmittelwerte 2005. Tramper-Meteorologie (oben), CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) und CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Ländliche und städtische Hintergrundstationen in Deutschland. Keine Bergstationen.

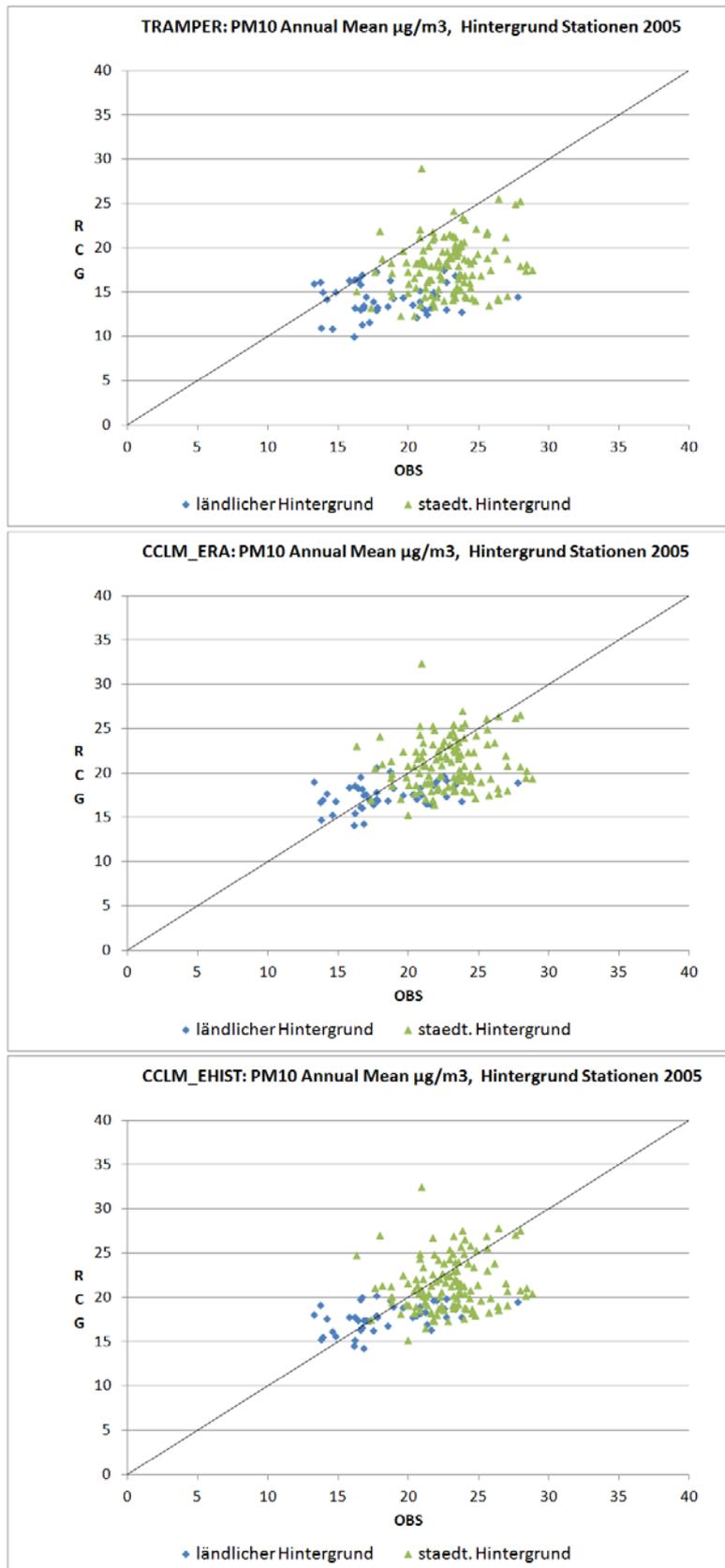


Abbildung 65: Berechnete und beobachtete Sulfat-Jahresmittelwerte 2005. Tramper-Meteorologie, CCLM_ERA-Meteorologie und CCLM_EHIST-Meteorologie. Hintergrundstationen in Deutschland.

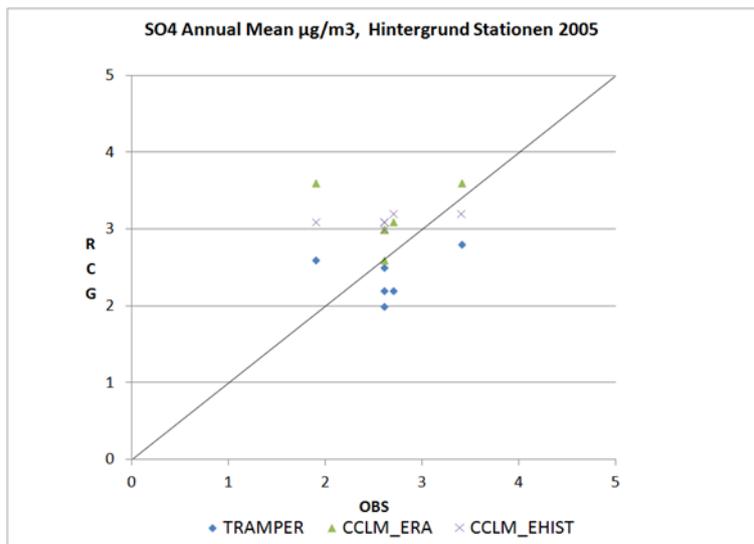


Abbildung 66: Berechnete und beobachtete Ozon-Jahresmittelwerte 2005. Tramper-Meteorologie (oben), CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) und CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Ländliche und städtische Hintergrundstationen in Deutschland. Keine Bergstationen.

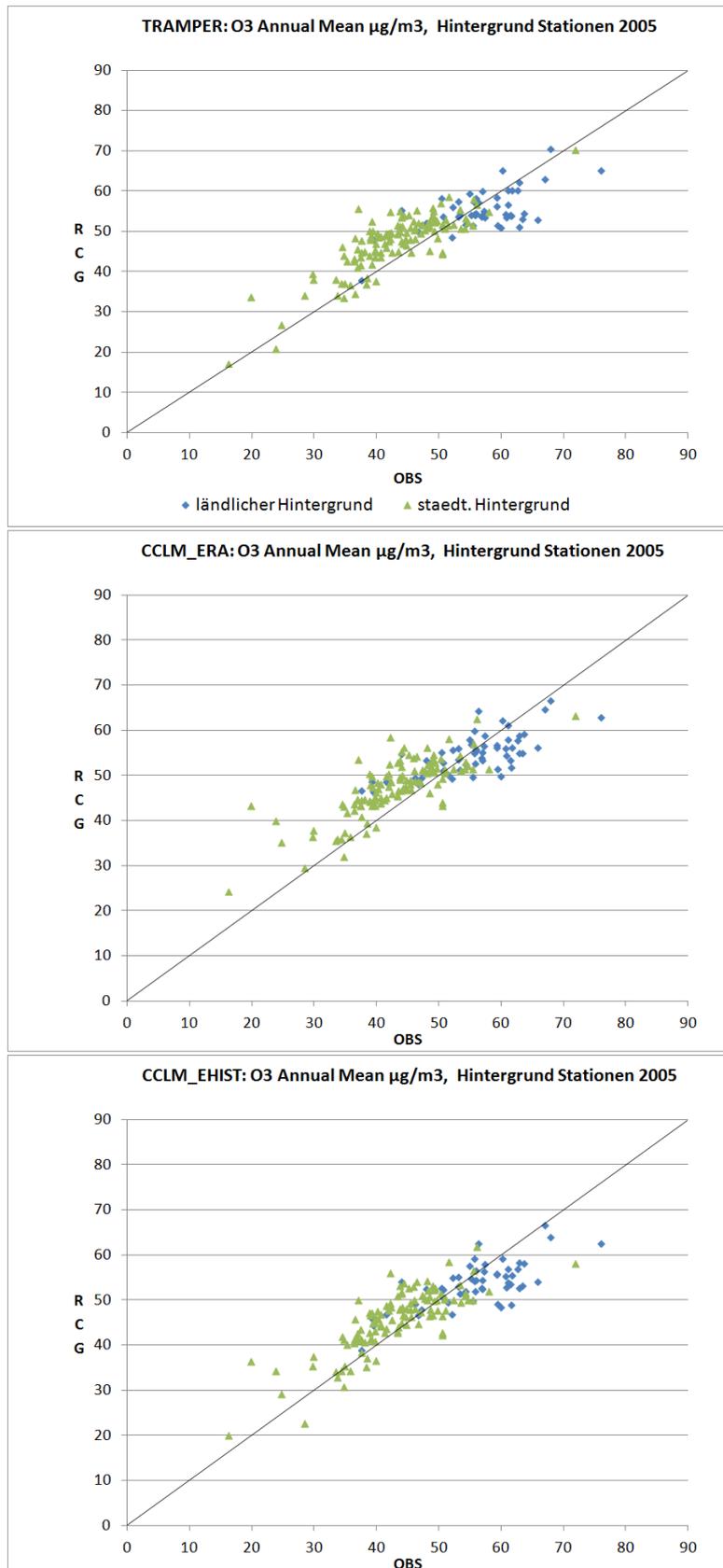


Abbildung 67: Berechnete und beobachtete Ozon-AOT40-Werte für Vegetation 2005. Tramper-Meteorologie (oben), CCLM_ERA-Meteorologie (Mitte) und CCLM_EHIST-Meteorologie (unten). Ländliche und städtische Hintergrundstationen in Deutschland. Keine Bergstationen.

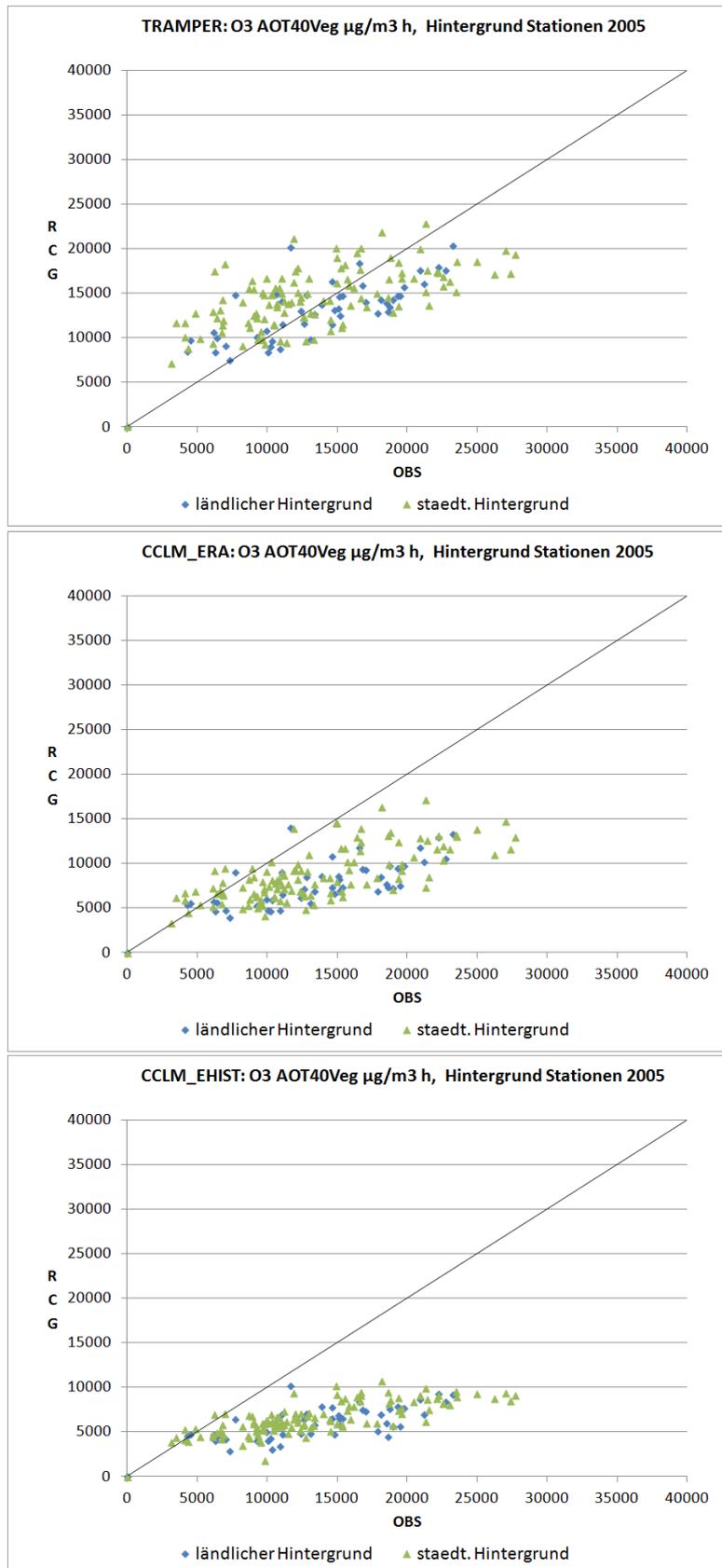
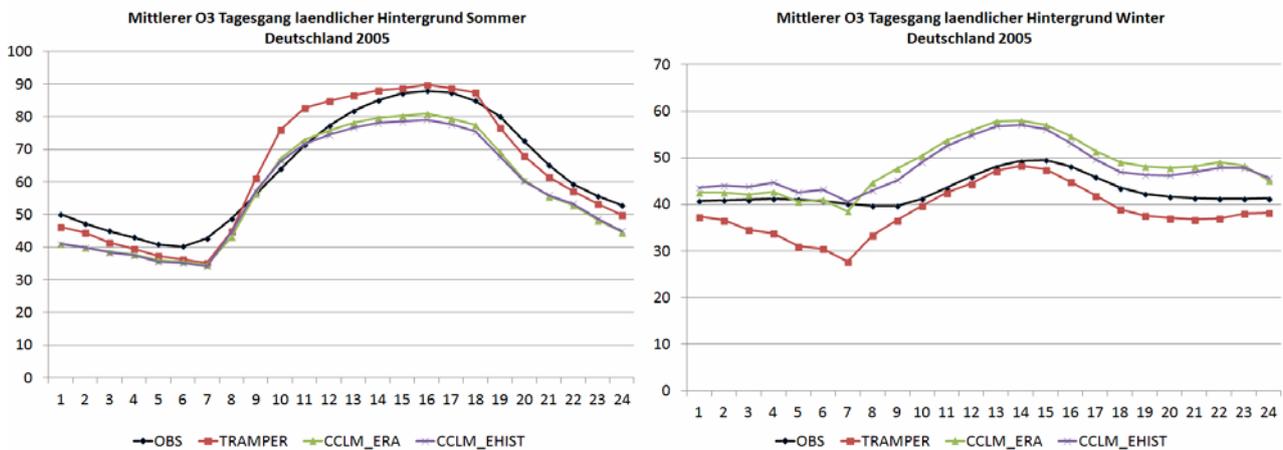


Abbildung 68: Berechnete und beobachtete mittlere Ozon-Tagesgänge 2005 für Sommer (links) und Winter (rechts). Tramper-Meteorologie, CCLM_ERA-Meteorologie und CCLM_EHIST-Meteorologie. Ländliche Hintergrundstationen in Deutschland. Keine Bergstationen.



4.4 Evaluierungs- und Kontrolllauf 30 Jahre: CCLM_ERA und CCLM_EHIST

4.4.1 Überblick

Im letzten Kapitel wurde gezeigt, dass die für die eigentliche Klimaprojektion verwendete rein prognostische Modellierung der meteorologischen Parameter (CCLM_EHIST) zumindest im Jahre 2005 das geringste chemische Ozonbildungspotenzial aller verwendeten Meteorologien aufweist. Beim PM10 und auch beim NO₂ sind die Unterschiede zwischen den Rechenläufen mit den verschiedenen meteorologischen Datensätzen dagegen sehr viel geringer. In diesem Kapitel wird durch die Simulation von jeweils 30 Jahren (1976–2005) mit der CCLM_EHIST und der CCLM_ERA-Meteorologie untersucht, ob sich die Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten zwischen den Ergebnissen für diese beiden Meteorologien auch im 30-jährigen Mittel abbilden. Alle Jahre wurden dabei mit den Emissionen 2005 gerechnet. Diese Auswertungen wurden nur für die Deutschland-Läufe durchgeführt.

4.4.2 Deutschland: NO₂ und PM10

Abbildung 69 zeigt die 30-jährigen Mittelwerte der NO₂-Konzentration auf Basis der CCLM_ERA und der CCLM_EHIST-Meteorologie. Die Unterschiede in der räumlichen Verteilung sind gering. Auch in der Zusammenfassung in Form der Box-Whisker-Plots (Abbildung 70) sind für ganz Deutschland sowie für die ländlichen Regionen nur geringe Unterschiede zu erkennen. Die mittleren Konzentrationen in den Ballungsgebieten sind dagegen auf Basis der CCLM_ERA-Meteorologie etwas höher als auf Basis der CCLM_EHIST-Meteorologie. Dies zeigt sich auch in den in Tabelle 14 dargestellten Mittelwerten.

Tabelle 14: 30-jährige (1976–2005) NO₂-Mittelwerte im Mittel über Deutschland, die ländlichen Gebiete (BVK1) sowie die Ballungsräume (BVK4).

µg/m ³	Deutschland	Bevölkerungsklasse 1	Bevölkerungsklasse 4
CCLM_ERA	11.9	9.6	23.2
CCLM_EHIST	11.5	9.4	22.2

Auch bei den 30-jährigen Mittelwerten der PM10-Konzentrationen sind die Unterschiede in der räumlichen Verteilung gering (Abbildung 71). Die räumlich und zeitlich gemittelten Konzentrationen

sind auf Basis der CCLM_ERA-Meteorologie wie beim NO₂ etwas höher als auf Basis der CCLM_EHIST-Meteorologie (Abbildung 72). Dies zeigt sich auch wieder in den in Tabelle 15 dargestellten Mittelwerten.

Tabelle 15: 30-jährige (1976–2005) PM10-Mittelwerte im Mittel über Deutschland, die ländlichen Gebiete (BVK1) sowie die Ballungsräume (BVK4).

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Deutschland	Bevölkerungsklasse 1	Bevölkerungsklasse 4
CCLM_ERA	15.7	15.0	19.0
CCLM_EHIST	15.4	14.8	18.5

Die 30-Jahresläufe wurden für den PM10- und den NO₂-Mittelwert über Deutschland zusätzlich mit gleitenden 5-Jahresmitteln ausgewertet. Diese Auswertung zeigt die Abbildung 73. Generell liegen die gleitenden 5-Jahresmittel auf Basis der CCLM_EHIST-Meteorologie für PM10 und NO₂ etwas unter denen auf Basis der CCLM_ERA-Meteorologie. Beim PM10 sind die Unterschiede im Zeitraum 1985 bis 2000 mit entgegengesetzten Trends etwas größer.

Abbildung 69: 30-jährige NO₂-Mittelwerte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie (links) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005.

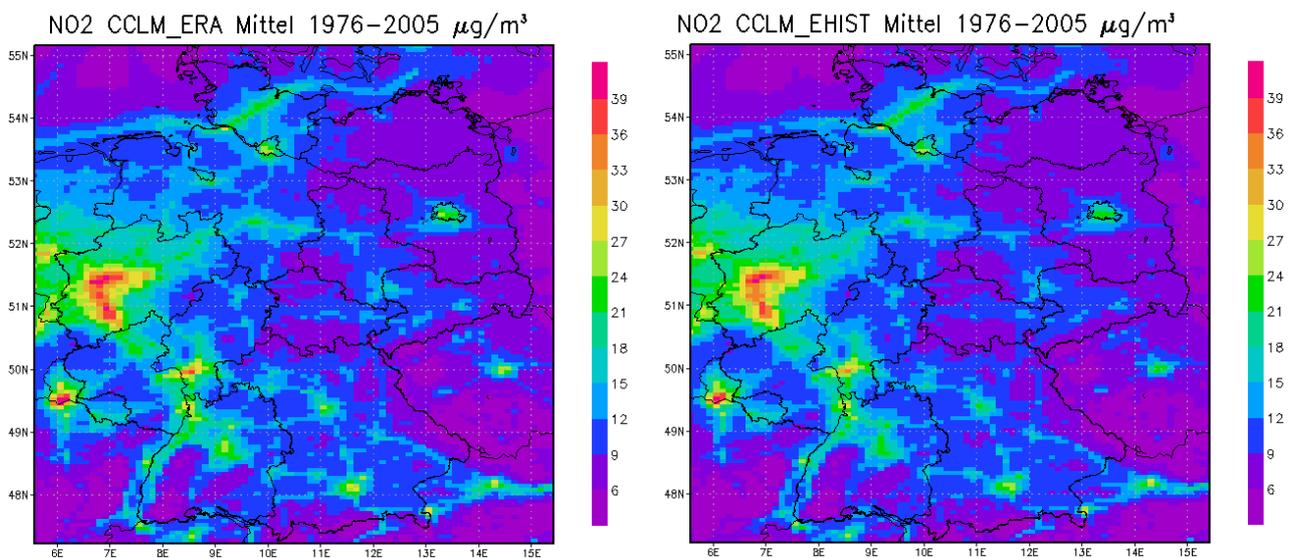


Abbildung 70: Spannweite der 30-jährigen NO₂-Mittelwerte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie (links) und der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert in Deutschland, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Oben: Alle Zellen Deutschland, Mitte: Zellen mit BVK1, unten: Zellen mit BVK4.

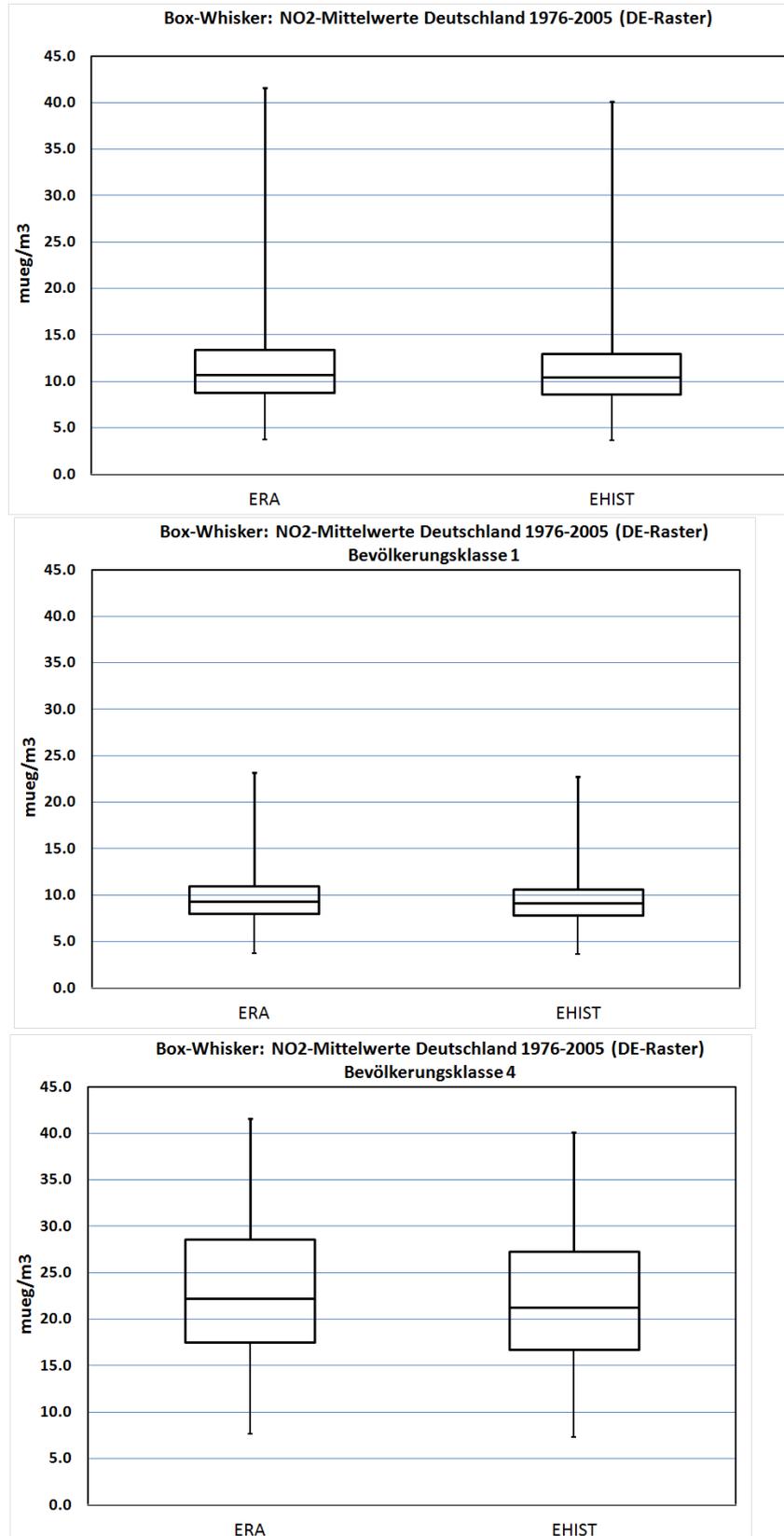


Abbildung 71: 30-jährige PM10-Mittelwerte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie (links) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005.

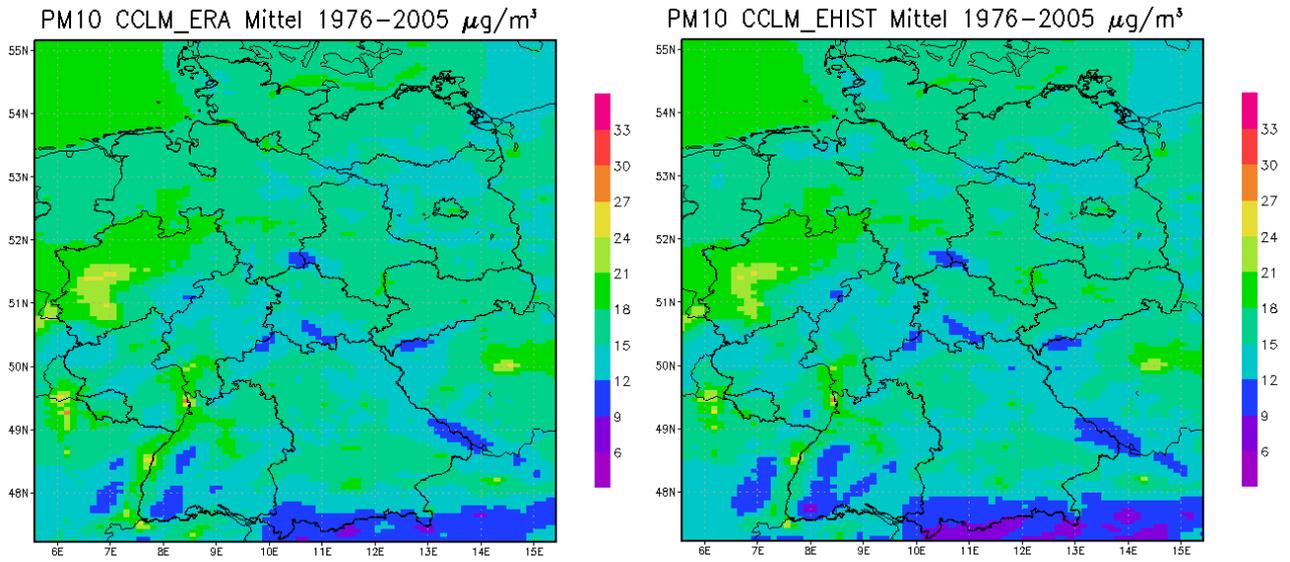


Abbildung 72: Spannweite der 30-jährigen PM10-Mittelwerte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie (links) und der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert in Deutschland (obere Abbildung), das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante). Mitte: Auswertung für Bevölkerungsklasse, unten: Auswertung für Bevölkerungsklasse 4.

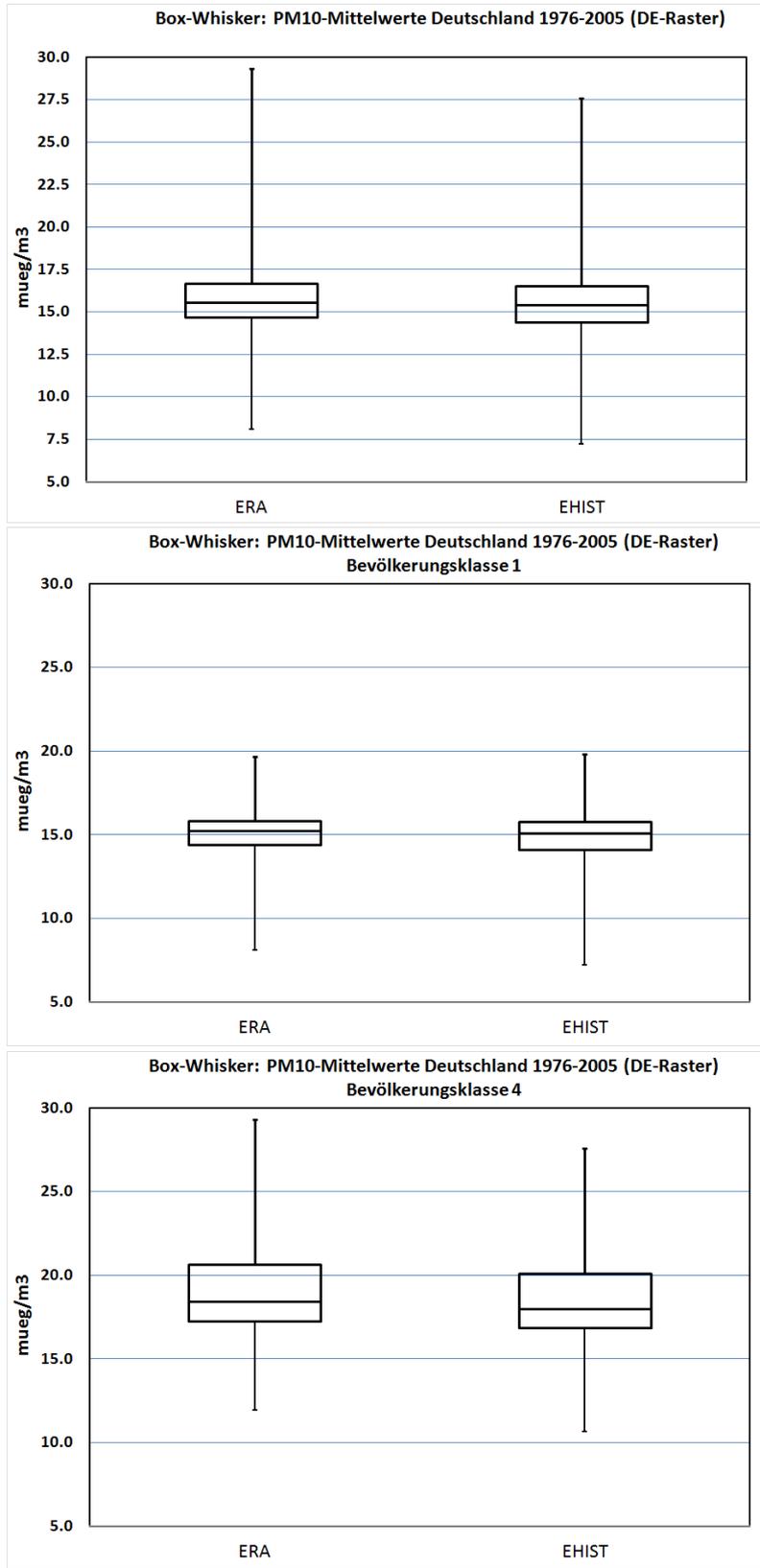
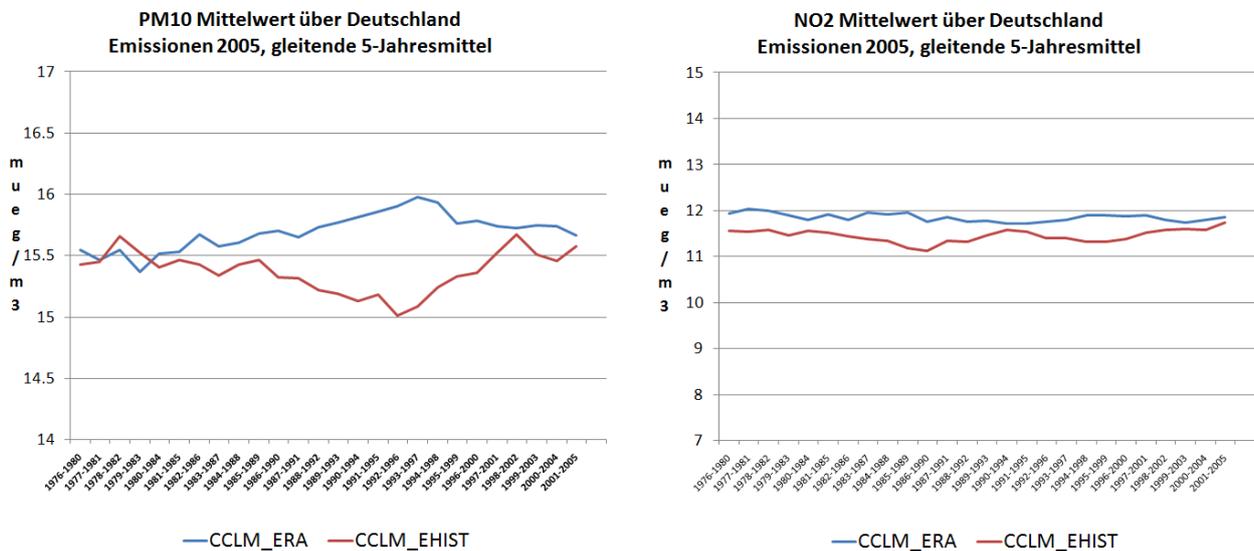


Abbildung 73: Gleitende 5-Jahresmittelwerte über Deutschland von 1976 bis 2005. Links: PM10, rechts NO₂.



4.4.3 Deutschland: Ozon

4.4.3.1 30-jährige Mittelwerte

Für Ozon wird als erste Auswertegröße der 30-jährige Mittelwert der Ozonsaison (April bis September) betrachtet. Abbildung 74 zeigt dazu die 30-jährigen Mittelwerte auf Basis der ERA-Meteorologie, der EHIST-Meteorologie und die relative Abweichung der Werte der EHIST-Meteorologie von denen der ERA-Meteorologie. Die auf Basis der EHIST-Meteorologie berechneten Mittelwerte sind überall in Deutschland niedriger als diejenigen berechnet mit der ERA-Meteorologie. Im Gegensatz zu den PM10- und den NO₂-Mittelwerten, die ihre Maxima immer in Regionen mit hohen Emissionsdichten haben, ergibt sich bei Ozon ein deutlicher Nord-Süd-Unterschied mit nach Süden ansteigenden Konzentrationen. Im Norden werden mit der EHIST-Meteorologie circa 1 bis 2%, im Süden 3 bis 5% niedrigere Ozonmittelwerte berechnet als mit der ERA-Meteorologie. Die Nord-Süd-Zunahme der Ozonkonzentrationen und auch der Unterschiede zwischen ERA und EHIST zeigen sich auch in der zusammenfassenden mittleren Box-Whisker-Darstellung der Abbildung 75 und in der tabellarischen Zusammenstellung der regional und in Abhängigkeit von der Bevölkerungsdichte aufgeschlüsselten Mittelwerte (Tabelle 16). Generell nehmen die Ozonsaison-Mittelwerte bei beiden Meteorologien mit zunehmender Bevölkerungsdichte ab. Die geringeren Ozonwerte in den Ballungsgebieten sind durch die einem Ozonaufbau entgegenwirkenden Auswirkungen des Ozonabbaus durch hohe NO_x-Emissionen zu erklären.

Abbildung 77 zeigt die 30-jährigen Mittelwerte April-September 1976–2005 der Maxima der tägl. gleitenden Ozon 8-Std-Mittel berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie und Abbildung 78 die absoluten und relativen Unterschiede zwischen den Ergebnissen. Wie schon bei den Saison-Mittelwerten werden mit der EHIST-Meteorologie auch bei den 8-Stunden-Mittelwerten generell niedrigere Konzentrationen berechnet als mit der ERA-Meteorologie. Die relativen Unterschiede sind dabei größer.

Tabelle 16: 30-jährige O₃-Mittelwerte April bis September jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen > 52.25° Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen < 52.25° und > 50.25° Breite), in Süddeutschland (alle Zellen < 50.25° Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf ERA und EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005.

O ₃ , µg/m ³	ERA, E2005	EHIST, E2005
Deutschland	64.7	62.2
Norddeutschland	61.5	60.2
Mitteldeutschland	63.3	61.4
Süddeutschland	70.0	66.3
BVK1	65.4	63.5
BVK2	64.6	62.5
BVK3	61.9	59.9
BVK4	58.9	57.1

Im Norden werden mit der EHIST-Meteorologie circa 2 bis 3%, im Süden 4 bis 7% niedrigere Ozonmittelwerte berechnet als mit der ERA-Meteorologie. Die größten Unterschiede treten im Südwesten entlang der Rheinschiene und im Großraum Stuttgart auf. Die Nord-Süd-Zunahme der Ozonkonzentrationen und die Unterschiede zwischen ERA und EHIST zeigen sich auch in der Box-Whisker-Darstellung der Abbildung 79 und in der tabellarischen Zusammenstellung der Tabelle 17. Bei den maximalen 8-Stunden-Mittelwerten ist der Zusammenhang zwischen Konzentration und Bevölkerungsklasse nicht so eindeutig wie bei den Ozonmittelwerten, da die 8-Stundenmittelwerte die Nachtstunden ausblenden und damit der Titrationseffekt eine geringere Rolle spielt als bei den 24-Mittelwerten. Außerdem trennt die Einteilung der Fläche Deutschlands in 4 Bevölkerungsklassen nicht mehr zwischen photochemisch aktiveren (Süddeutschland) und photochemisch weniger aktiven (Norddeutschland) Regionen, womit jeder Bevölkerungsklasse Flächen aus jeder Klimaregion zugeordnet sind.

Tabelle 17: 30-jährige O₃-Mittelwerte April bis September der Maxima der tägl. gleitenden Ozon 8-Std-Mittel jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen > 52.25° Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen < 52.25° und > 50.25° Breite), in Süddeutschland (alle Zellen < 50.25° Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf ERA und EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005.

O ₃ , µg/m ³	ERA, E2005	EHIST, E2005
Deutschland	86.2	82.8
Norddeutschland	81.9	79.6
Mitteldeutschland	84.9	81.5
Süddeutschland	91.5	86.9
BVK1	85.6	82.5
BVK2	86.9	83.2
BVK3	86.6	82.6
BVK4	85.2	81.6

Abbildung 80 zeigt die 30-jährigen Mittel der O₃-SOMO35-Werte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie und der CCLM_EHIST-Meteorologie und Abbildung 81 die absoluten und relativen Abweichungen zwischen ERA und EHIST. Die zusammenfassende Auswertung nach Klimazonen und Bevölkerungsklassen findet sich in Abbildung 82 und Tabelle 18. Wie schon bei den anderen beiden Auswertegrößen ist auch bei den SOMO35-Werten ein klarer Nord-Südgradient zu erkennen mit deutlich höheren Werten für die ERA-Meteorologie. Im Norden werden mit der EHIST-Meteorologie zwischen 7 und 15 % und im Süden zwischen 15 und 25% niedrigere SOMO35-Werte berechnet.

Tabelle 18: 30-jährige Mittelwerte der O₃-SOMO35-Werte jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen > 52.25° Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen < 52.25° und > 50.25° Breite), in Süddeutschland (alle Zellen < 50.25° Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf ERA und EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005.

O ₃ SOMO35, µg/m ³ T	ERA, E2005	EHIST, E2005
Deutschland	3953	3308
Norddeutschland	3123	2732
Mitteldeutschland	3704	3069
Süddeutschland	4954	4074
BVK1	3879	3290
BVK2	4060	3365
BVK3	3946	3229
BVK4	3749	3055

Abbildung 83 zeigt die 30-jährigen Mittel der O₃-AOT40-Werte für Vegetation 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie und der CCLM_EHIST-Meteorologie und Abbildung 84 die absoluten und relativen Abweichungen zwischen ERA und EHIST. Die zusammenfassende Auswertung nach Klimazonen und Bevölkerungsklassen findet sich in Abbildung 85 und Tabelle 19. Auch bei den AOT40-Werten ist wieder ein klarer Nord-Südgradient zu erkennen mit deutlich höheren Werten für die ERA-Meteorologie. Im Norden werden mit der EHIST-Meteorologie zwischen 10 und 20 % und im Süden zwischen 20 und 30% niedrigere AOT40-Werte berechnet.

Tabelle 19: 30-jährige Mittelwerte der O₃-AOT40-Werte für Vegetation jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen > 52.25° Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen < 52.25° und > 50.25° Breite), in Süddeutschland (alle Zellen < 50.25° Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf ERA und EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005.

O ₃ AOT40, µg/m ³ h	ERA, E2005	EHIST, E2005
Deutschland	10346	8197
Norddeutschland	7548	6285
Mitteldeutschland	9708	7642
Süddeutschland	13591	10497
BVK1	9768	7850
BVK2	10870	8527
BVK3	11126	8611
BVK4	11097	8568

Als letzte Größe werden die Anzahl der berechneten Ozon-Überschreitungstage (=maximaler gleitender 8-Stunden-Mittelwert eines Tages $> 120\mu\text{g}/\text{m}^3$) ausgewertet. Die Verteilungen der berechneten Überschreitungstage in Deutschland zeigen die Abbildung 86. Die absoluten und relativen Unterschiede zwischen der ERA- und der EHIST-Meteorologie können der Abbildung 87 entnommen werden. Es ist offensichtlich, dass zum einen im Norden Deutschlands sehr viel weniger Überschreitungstage berechnet werden als im Süden und zum anderen auf Basis der EHIST-Meteorologie in ganz Deutschland sehr viel weniger Überschreitungstage berechnet werden als auf Basis der ERA-Meteorologie. Die Unterschiede liegen zwischen circa 30 und 80% weniger Überschreitungstagen für die EHIST-Meteorologie. Die höchste Einzelanzahl von Überschreitungstagen wird in einer Zelle des Modells in ländlicher Region (Bevölkerungsklasse 1, Abbildung 88) berechnet. Der Median und die Quartile der Verteilung der Überschreitungstage liegen für beide Meteorologien in den dichter besiedelten Regionen aber höher als in den ländlichen Regionen. So werden für Bevölkerungsklasse 1 mit der ERA-Meteorologie in 50% der Fälle mehr als circa 4 bis 5 Überschreitungstage berechnet, in Bevölkerungsklasse 4 dagegen schon mehr als 9 bis 10 Überschreitungstage. Die Tabelle 20 zeigt dazu die mittlere Summe der positiven Konzentrationsdifferenzen zwischen dem maximalen gleitenden 8-Stundenmittelwert und dem Schwellenwert $120\mu\text{g}/\text{m}^3$. Diese Auswertung berücksichtigt nicht nur, ob es einen Überschreitungstag gibt sondern auch um wie viel der maximale 8-Stundenmittelwert eines Tages über dem Schwellenwert von $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ liegt. Auch bei dieser Auswertung zeigt sich der große Unterschied zwischen den photochemischen Bildungspotenzialen der ERA- und der EHIST-Meteorologie. Die auf Basis der ERA-Meteorologie berechneten Überschreitungssummen sind circa 3mal so hoch wie die auf Basis der EHIST-Meteorologie berechneten Summen. Es wird auch deutlich, dass die Summe der Überschreitungskonzentrationen bei einer deutschlandweiten Auswertung mit wachsender Bevölkerungsdichte zunimmt. Dies bedeutet, dass hohe Ozonkonzentrationen auch in oder in der Umgebung von Ballungsgebieten auftreten können, wo noch genügend Vorläuferstoffe, vor allem reaktive Kohlenwasserstoffe, für die Ozonbildung zur Verfügung stehen. Eine eindeutige Interpretation dieses Umstandes ist allerdings nicht möglich, da die Einteilung in Bevölkerungsklassen ausschließlich nach der Bevölkerungsdichte und unabhängig von den klimatischen Bedingungen erfolgt. Ballungsgebiete im Süden besitzen bei gleichen Emissionsbedingungen ein größeres Ozonbildungspotenzial als Ballungsgebiete im Norden. Die von Nord nach Süd ansteigende photochemische Aktivität verstärkt das chemische Ozonbildungspotential wegen der ungleichen Verteilung der Bevölkerungsdichte mit mehr gering besiedelten Regionen im Norden und in großen Teilen Mitteldeutschlands daher eher in den höheren Bevölkerungsklassen.

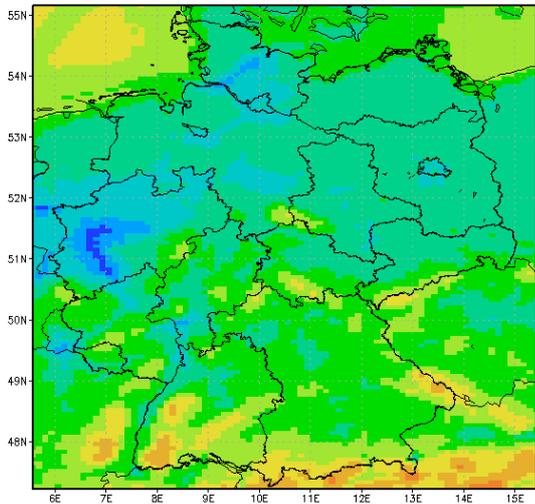
Die Häufigkeit der Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel $> 120\mu\text{g}/\text{m}^3$ gemittelt über den Zeitraum April-September 1976–2005 unterteilt in Nord-, Mittel und Süddeutschland zeigt die Abbildung 89. Diese Häufigkeit entspricht dem Jahresanteil der Überschreitungstage. Danach werden mit der ERA-Meteorologie im Mittel in Süddeutschland und im 30-jährigen Mittel an circa 2.6 % der Jahrestage maximale 8-Stundenmittelwerte $> 120\mu\text{g}/\text{m}^3$ berechnet. Auf Basis der EHIST-Meteorologie ergeben sich weniger als die Hälfte, nämlich knapp 1.1 %. Nach Norden hin nimmt die Anzahl der Überschreitungstage ab.

Tabelle 20: 30-jährige Mittelwerte der Summe der positiven Konzentrationsdifferenz zwischen dem maximalen gleitenden 8-Stundenmittelwert und dem Schwellenwert $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen $> 52.25^\circ$ Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen $< 52.25^\circ$ und $> 50.25^\circ$ Breite), in Süddeutschland (alle Zellen $< 50.25^\circ$ Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf ERA und EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005.

$\text{O}_3 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{T}$	ERA, E2005	EHIST, E2005
Deutschland	67.8	24.0
Norddeutschland	40.6	16.3
Mitteldeutschland	63.0	22.9
Süddeutschland	97.2	32.0
BVK1	52.2	18.0
BVK2	77.0	27.5
BVK3	102.9	36.9
BVK4	118.8	44.3

Abbildung 74: 30-jährige O_3 -Mittelwerte April-September 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie (links) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005.

O_3 CCLM_ERA Mittel Apr–Sept 1976–2005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



O_3 CCLM_EHIST Mittel Apr–Sept 1976–2005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

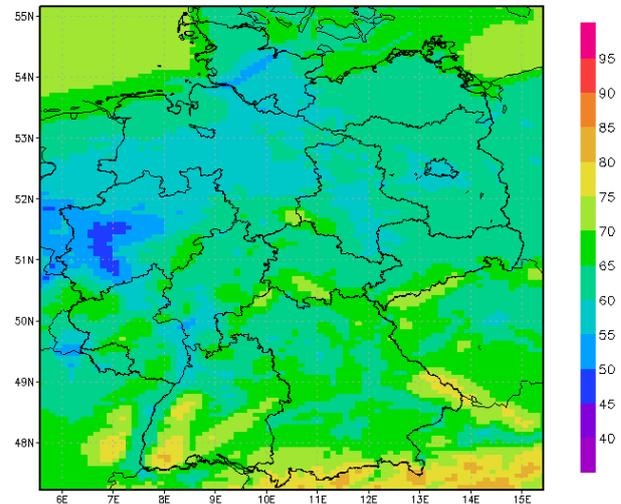


Abbildung 75: Absolute (links) und relative Abweichungen (rechts) der 30-jährigen O₃-Mittelwerte April-September 1976–2005 berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie von denjenigen berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie. Deutschland-Lauf. Emissionen 2005.

DELTA O3 CCLM_EHIST-ERA Mittel Apr-Sept 1976-2005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ DELTA O3 CCLM_EHIST-ERA Mittel Apr-Sept 1976-2005 %

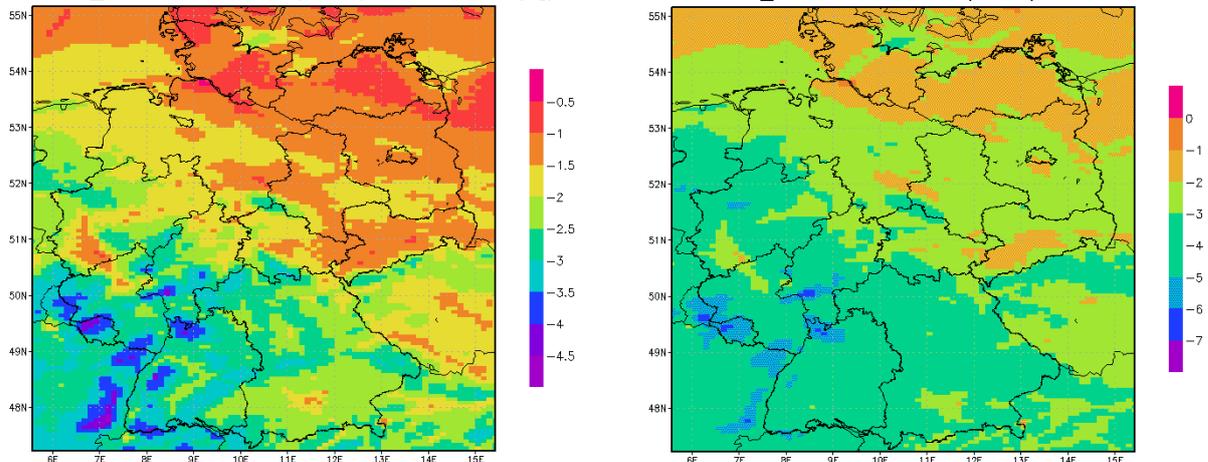


Abbildung 76: Spannweite der 30-jährigen O₃-Mittelwerte April bis September 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie und der CCLM_EHIST-Meteorologie. Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Oben: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume).

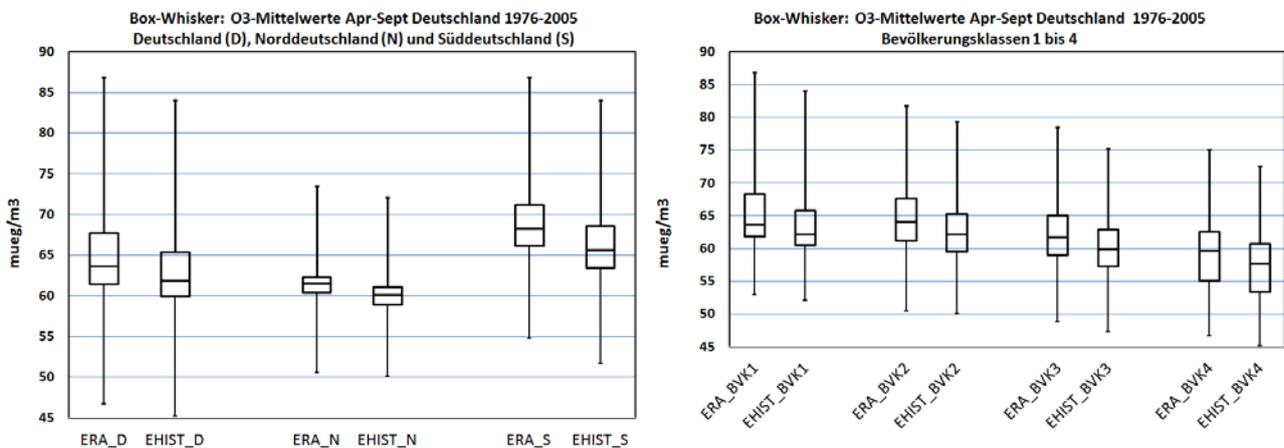


Abbildung 77: 30-jährige Mittelwerte April-September 1976–2005 der Maxima der tägl. gleitenden Ozon 8-Std-Mittel berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie (links) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005.

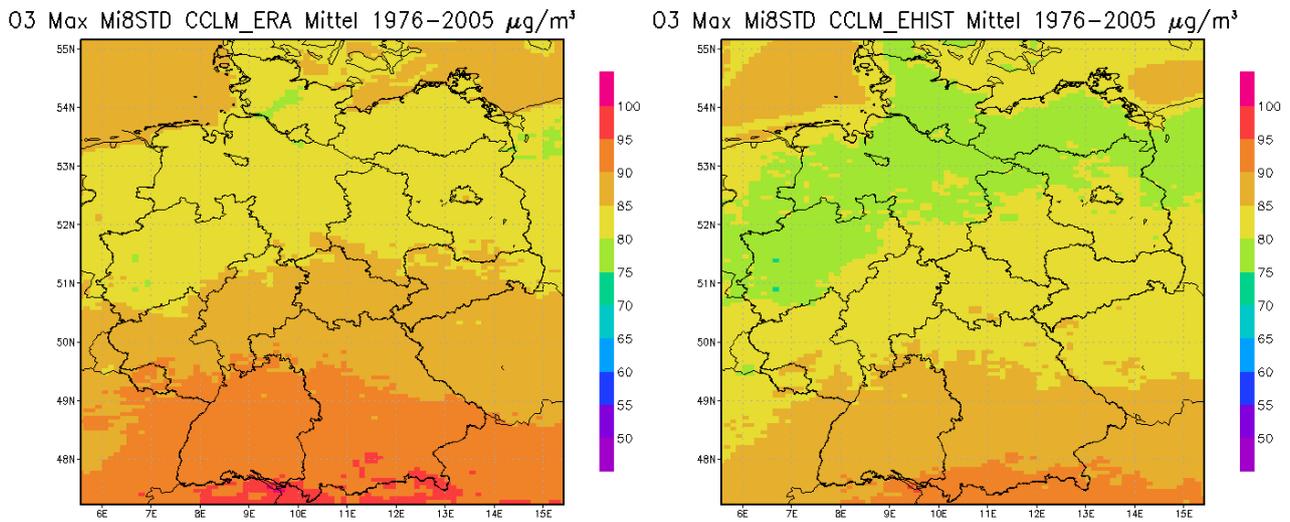


Abbildung 78: Absolute (links) und relative Abweichungen (rechts) der 30-jährigen Mittelwerte April-September 1976–2005 der max. tägl. Ozon 8-Std-Mittel berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie von denjenigen berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie. Deutschland-Lauf. Emissionen 2005.

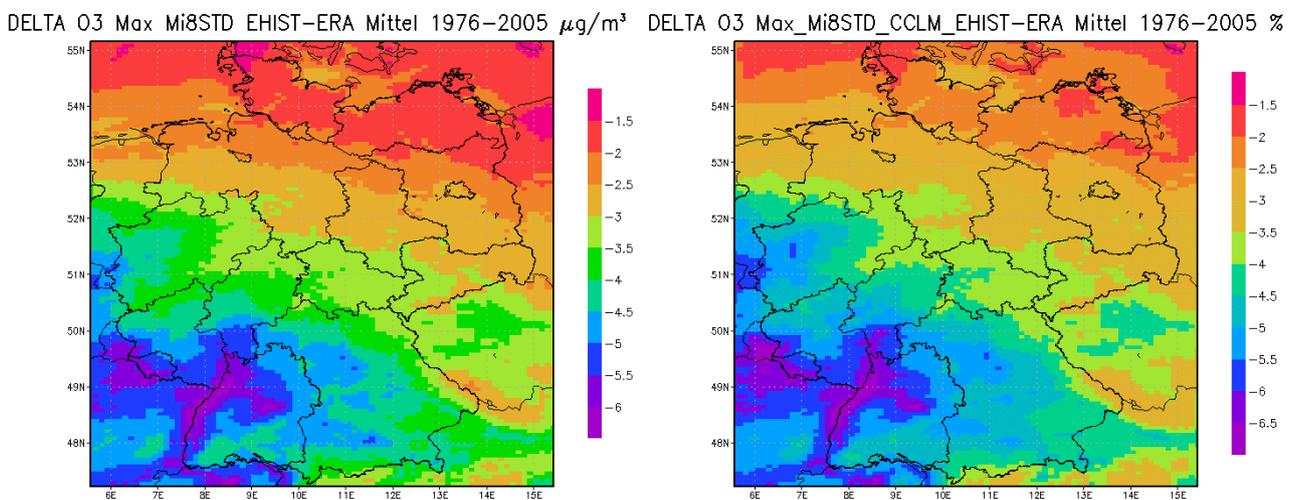


Abbildung 79: Spannweite der 30-jährigen Mittelwerte April bis September 1976–2005 der max. tägl. Ozon 8-Std-Mittel berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie und der CCLM_EHIST-Meteorologie. Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median (Boxmitte) und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume).

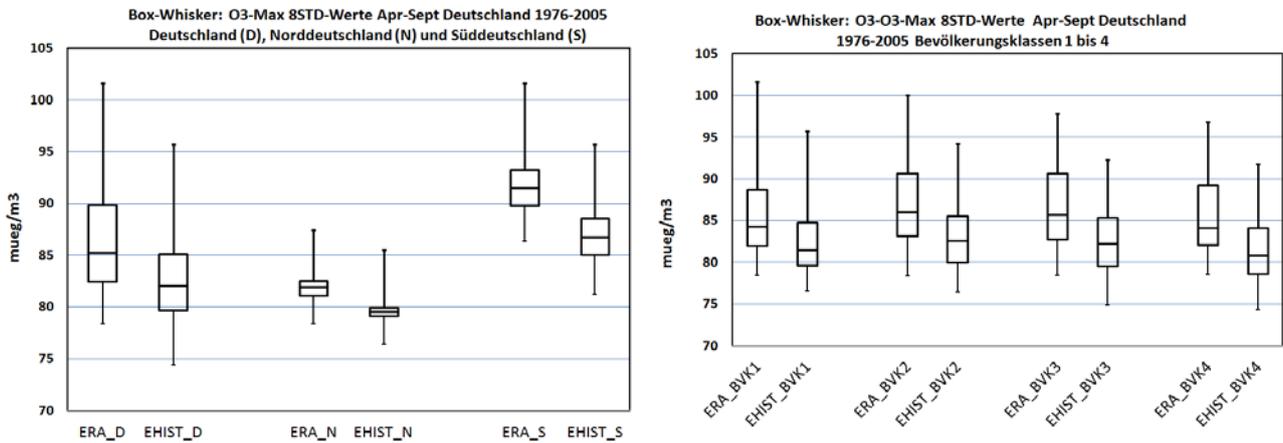


Abbildung 80: 30-jährige Mittel der O₃-SOMO35-Werte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie (links) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005.

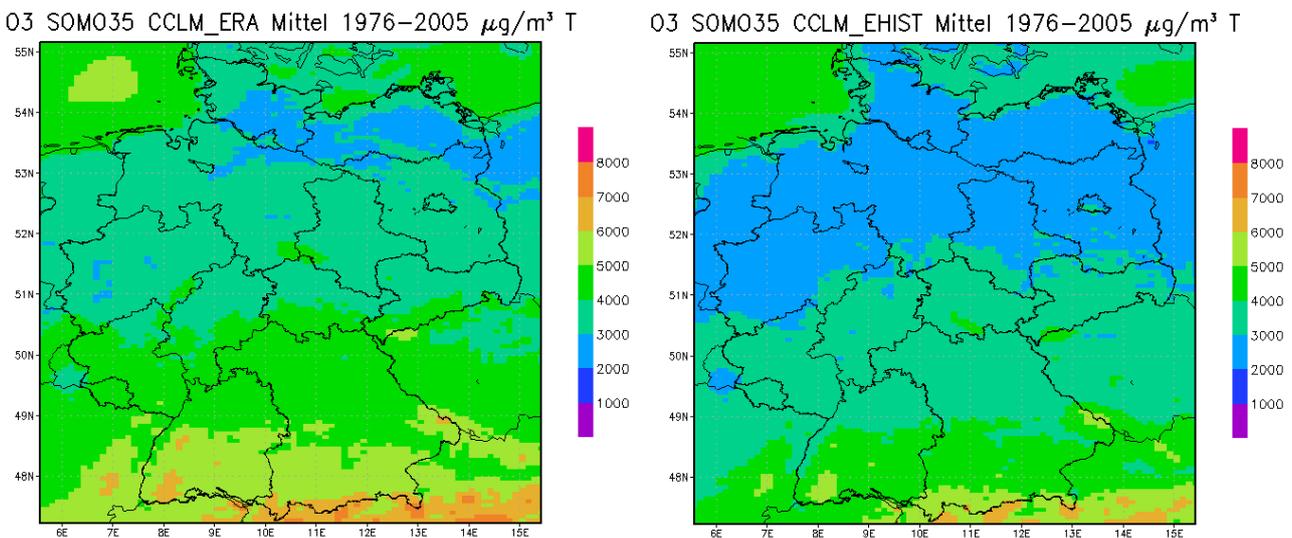


Abbildung 81: Absolute (links) und relative Abweichungen (rechts) der 30-jährigen O₃-SOMO35-Werte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie von denjenigen berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie. Deutschland-Lauf. Emissionen 2005.

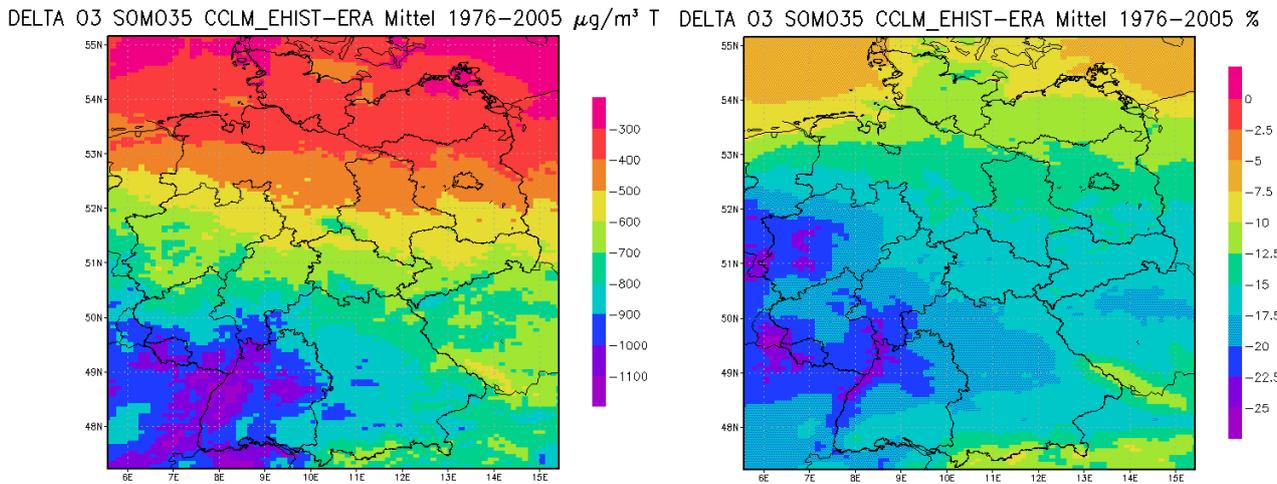


Abbildung 82: Spannweite der 30-jährigen O₃-SOMO35-Werte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie und der CCLM_EHIST-Meteorologie. Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume).

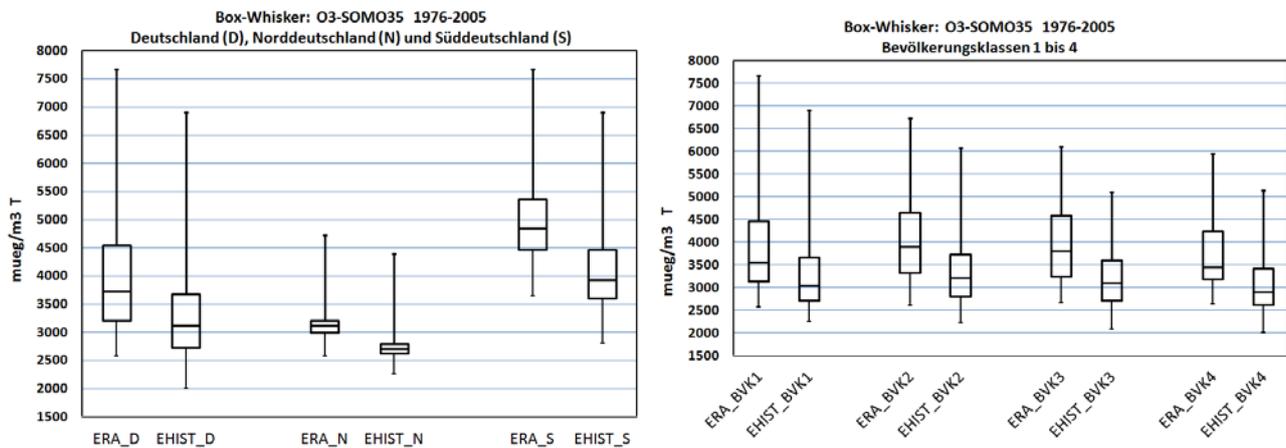


Abbildung 83: 30-jährige Mittel der O₃-AOT40-Werte für Vegetation 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie (links) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005.

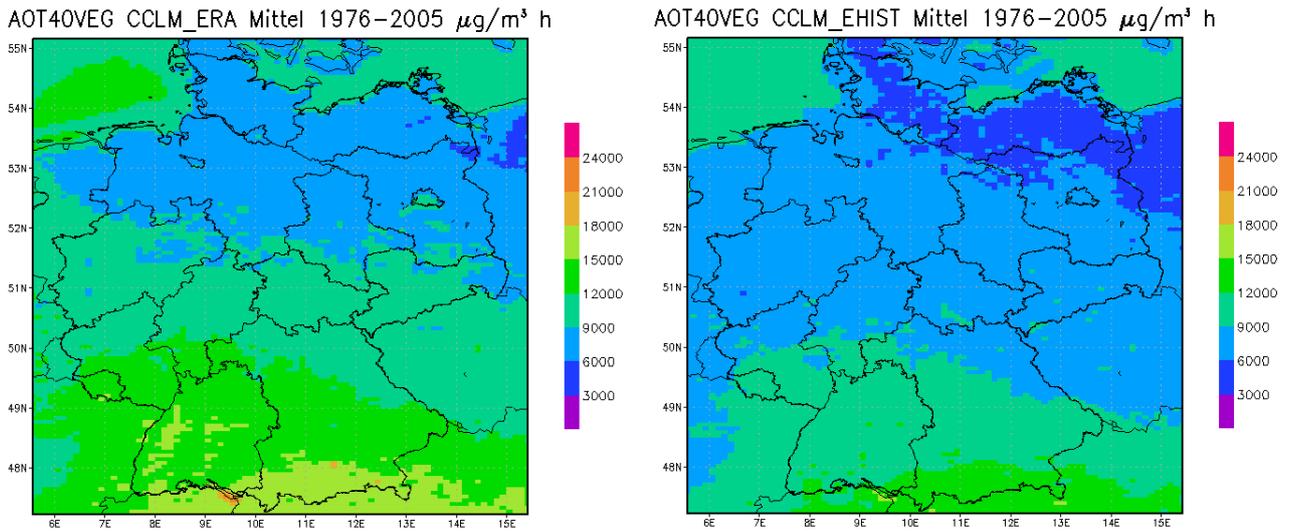


Abbildung 84: Absolute (links) und relative Abweichungen (rechts) der 30-jährigen O₃-AOT40-Werte für Vegetation 1976–2005 berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie von denjenigen berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie. Deutschland-Lauf. Emissionen 2005.

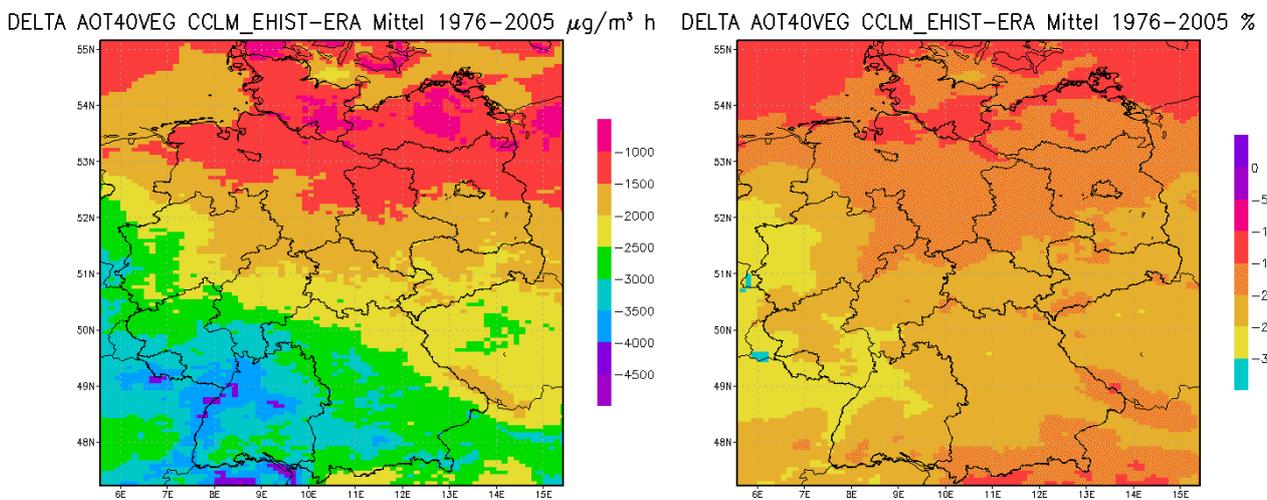


Abbildung 85: Spannweite der 30-jährigen O₃-AOT40-Werte für Vegetation 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie und der CCLM_EHIST-Meteorologie. Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume).

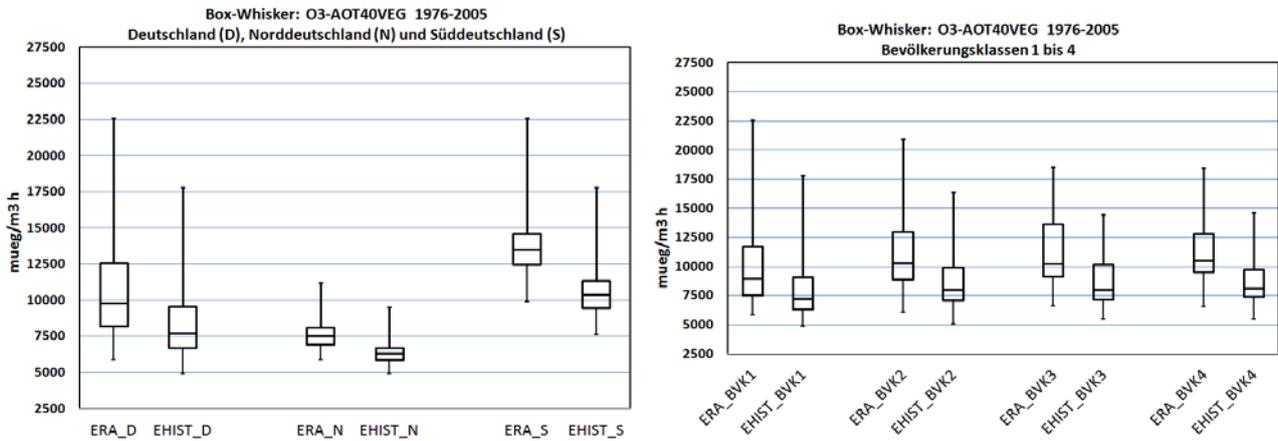


Abbildung 86: 30-jährige Mittel der Anzahl der Ozon Überschreitungstage (max. tägl. 8-std-Mittel > 120 µg/m³) 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie (links) sowie der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005.

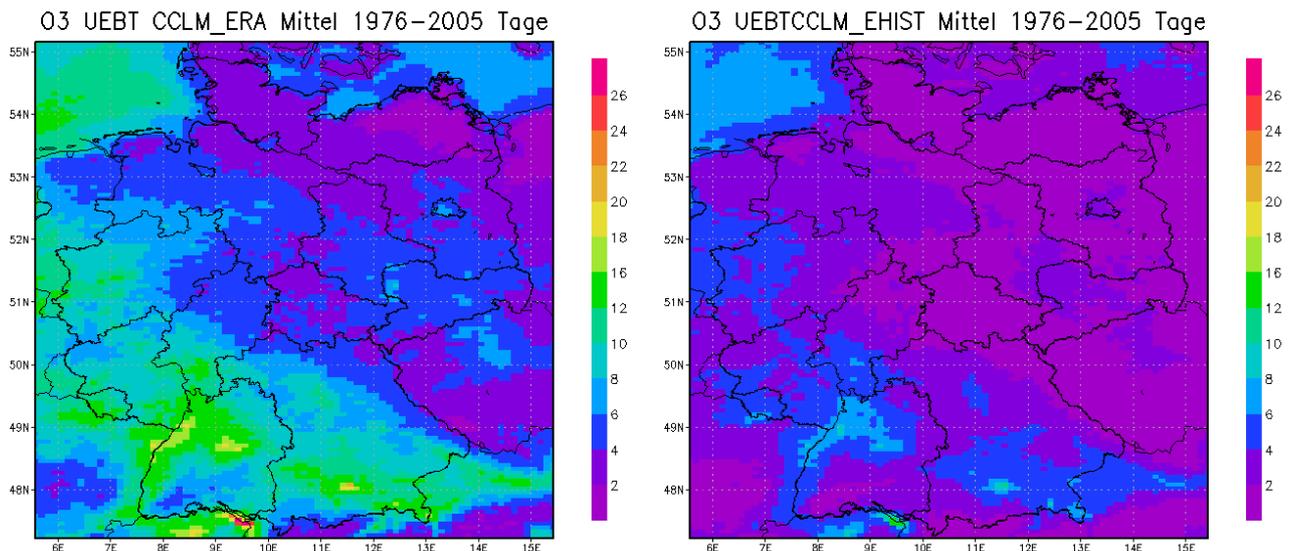


Abbildung 87: Absolute (links) und relative Abweichungen (rechts) der 30-jährigen Mittel der Anzahl der Ozon Überschreitungstage (max. tägl. 8-std-Mittel > 120 µg/m³) 1976–2005 berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie von denjenigen berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie. Deutschland-Lauf. Emissionen 2005.

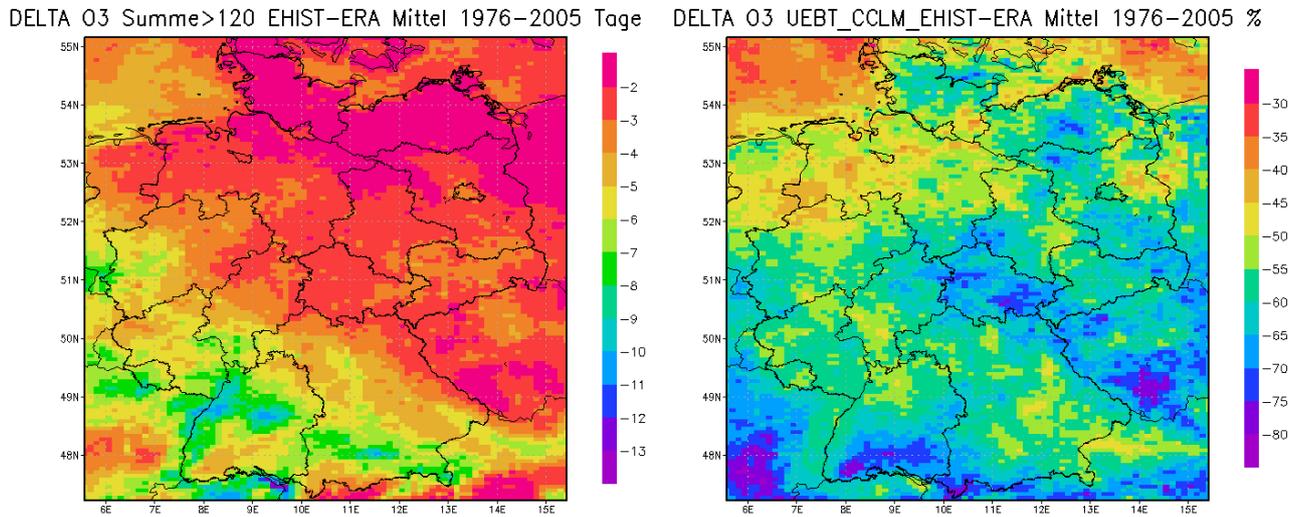


Abbildung 88: Spannweite der 30-jährigen der Anzahl der Ozon Überschreitungstage (max. tägl. 8-std-Mittel > 120 µg/m³) 1976–2005 berechnet mit der CCLM_ERA-Meteorologie und der CCLM_EHIST-Meteorologie. Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume).

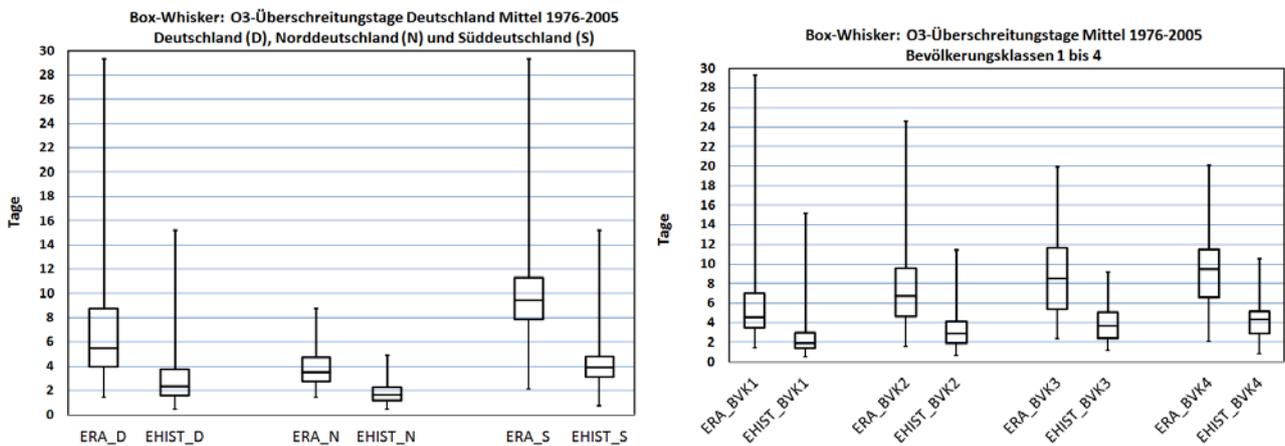
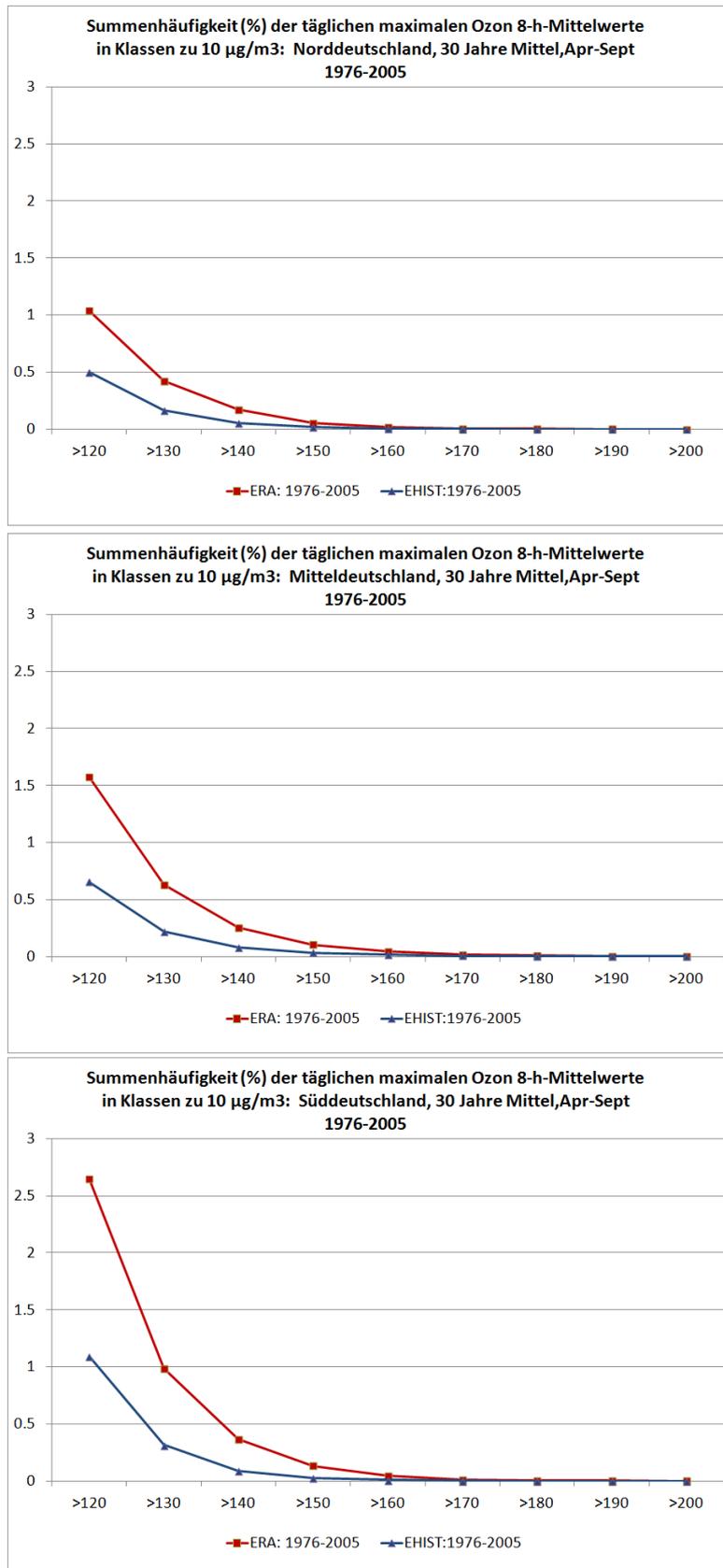


Abbildung 89: Häufigkeit der maximalen täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel > 120 µg/m³ gemittelt über den Zeitraum April-September, 1976–2005. Mittel über Norddeutschland (alle Zellen nördlich von 52.25° Breite), Mitteldeutschland (Alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite) und Süddeutschland (Alle Zellen südlich von 50.25° Breite).



4.4.3.2 Gleitende 5-jährige Mittelwerte

Die Abbildung 90 zeigt die Box-Whisker-Verteilung der Überschreitungstage als deutschlandweites Mittel in gleitenden 5-Jahresmittelwerten. Aus der Abbildung wird deutlich, dass die sehr geringere Anzahl von Überschreitungstagen auf Basis der EHIST-Meteorologie nicht etwa durch wenige Extremjahre verursacht wird, sondern in allen 5-Jahresmittelwerten des gesamten Zeitraums 1997-2005 auftritt. Dieser Umstand wird auch deutlich aus Abbildung 91 und Abbildung 92, die für alle Ozon-Auswertegrößen die gleitenden 5-Jahresmittelwerte zeigen. Die gleitenden 5-Jahresmittelwerte auf Basis der ERA-Meteorologie zeigen von 1976 nach 2005 einen ansteigenden Trend, der für die auf die hohen Ozonkonzentrationen abhebenden Auswertegrößen (SOMO35, AOT40, Überschreitungstage) deutlicher ist als für die eher auf mittlere Konzentrationen abhebenden Auswertegrößen (Saison-Mittelwerte). Dieser ansteigende Trend ist in den Berechnungen mit der EHIST-Meteorologie nicht sichtbar. Im Gegenteil, in den Achtziger-Jahren bis in den Anfang der Neunziger-Jahre wird aus den Ergebnissen mit der EHIST-Meteorologie ein eher abwärts gerichteter Trend sichtbar. Dieser negative Trend trägt wesentlich dazu bei, dass die 30-jährigen Mittel auf Basis der EHIST-Meteorologie niedriger sind als die entsprechenden Mittel auf Basis der ERA-Meteorologie. Es sei hier nochmals angemerkt, dass alle Jahre 1976 bis 2005 sowohl in Europa als auch in Deutschland mit den Emissionen für 2005 berechnet wurden und dass die außereuropäischen Randbedingungen ebenfalls konstant gehalten wurden. Die berechneten Trends haben damit rein meteorologische Ursachen. Die Auswertungen zeigen, dass die mit dem Globalmodell ECHAM6 angetriebene CCLM-Meteorologie CCLM_EHIST (freier Klimalauf) ein geringeres Oxidantienbildungspotential aufweist als die mit Reanalysen angetriebene Evaluierungsmeteorologie CCLM_ERA. Da die Modellkombination ECHAM6-CCLM auch für den Projektionszeitraum 2021–2050 verwendet wurde, ist davon auszugehen, dass das Oxidantienbildungspotential auch in dieser Zukunftsperiode unterschätzt wird.

Abbildung 90: Spannweite der Anzahl der Ozon Überschreitungstage (max. tägl. 8-std-Mittel > 120 µg/m³) 1976–2005 in Deutschland berechnet als gleitende 5-Jahresmittelwerte mit der CCLM_ERA-Meteorologie (links) und der CCLM_EHIST-Meteorologie (rechts). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf.

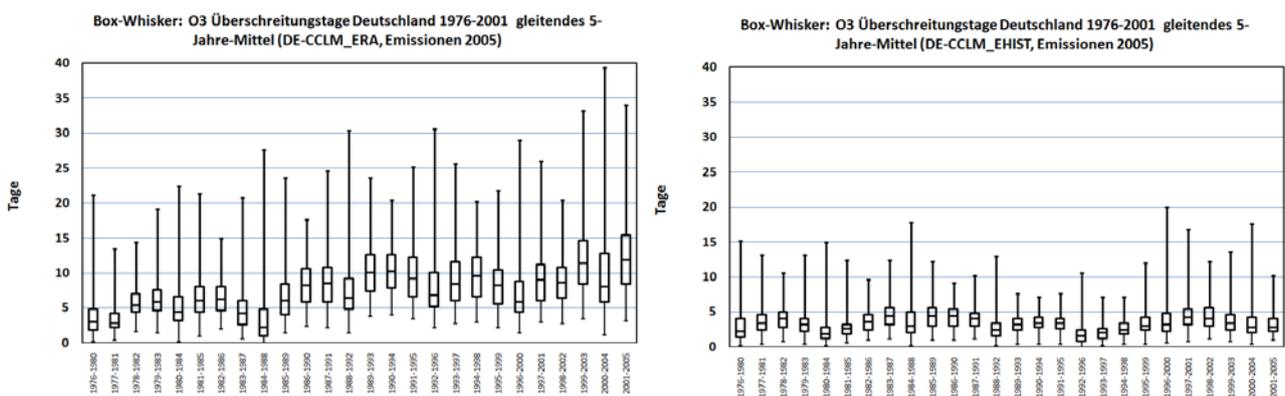


Abbildung 91: Gleitende 5 Jahresmittelwerte gemittelt über Deutschland. 1976–2005. Links: Ozonmittelwert April bis September, rechts maximales tägliches gleitendes 8-Std.-Mittel.

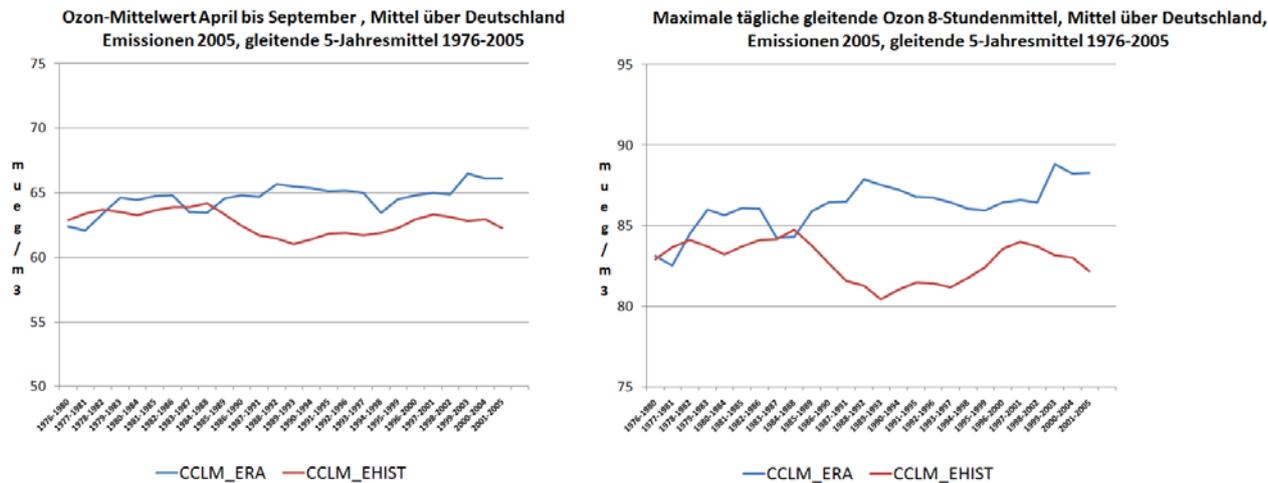
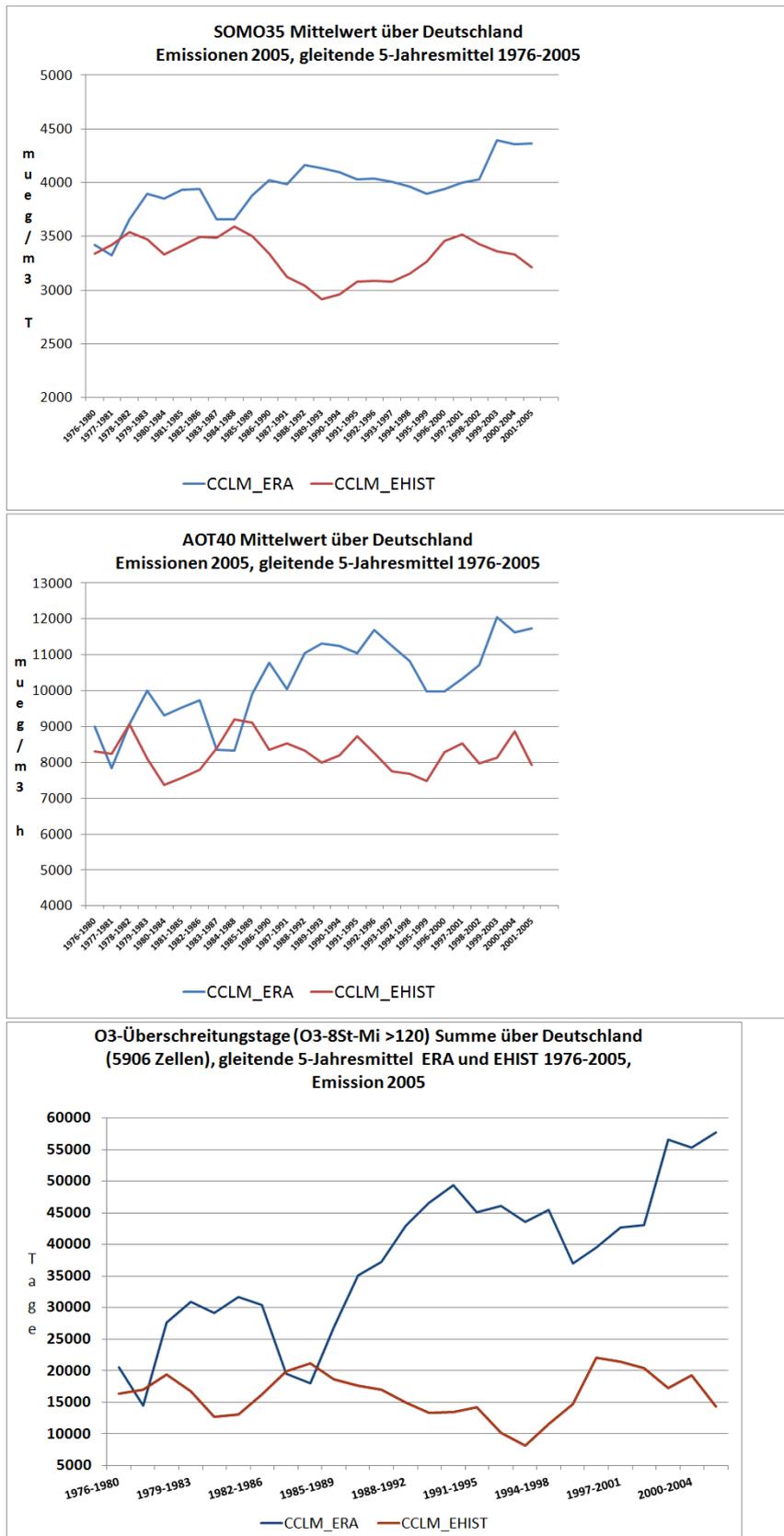


Abbildung 92: Gleitende 5 Jahresmittelwerte gemittelt über Deutschland. 1976–2005. Oben: SOMO35, Mitte: AOT40 für Vegetation, unten: Summe der Überschreitungstage (Max. tägl. gleitender 8-Std-Mittel > 120 µg/m3)



4.5 Die Luftqualität für den Zeitraum 2021 bis 2050

4.5.1 Klimasignal

4.5.1.1 Überblick

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse für den Zeitraum 1976–2005 berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie verglichen mit den Ergebnissen für den Zeitraum 2021–2050 berechnet mit der CCLM_RCP85-Meteorologie. Diese Meteorologie beruht auf dem so genannten RCP8.5-Szenario (IPCC, 5. Sachstandsbericht). Die RCP-Szenarien legen bestimmte Szenarien von Treibhausgaskonzentrationen fest. Daraus wird mit Klimamodellen die Klimaänderung berechnet, die erforderlich ist, um diese Konzentrationen hervorzurufen. RCP8.5 steht für einen Strahlungsantrieb von 8.5 W/m^2 im Jahre 2100 gegenüber 1850 und beruht auf einer angenommenen CO_2 -Treibhausgaskonzentration von 1370 ppm CO_2 -Äquivalenten im Jahre 2100. Nach den Klimamodellrechnungen beträgt der Anstieg der globalen Mitteltemperatur unter den Voraussetzungen des Szenarios RCP8.5 bis zum Jahr 2100 etwa $4,8 \text{ }^\circ\text{C}$ im Vergleich mit dem vorindustriellen Zustand bzw. $4 \text{ }^\circ\text{C}$ gegenüber 1986-2005 (IPCC, 5. Sachstandsbericht). Das meteorologische RCP8.5-Szenario wurden an der TU Dresden für die europäische und für die Deutschlandskala gerechnet und als Eingangsdaten für das RCG-Modell aufbereitet. Zur Abschätzung des Einflusses des rein meteorologischen Klimasignals auf die Konzentrationen der Luftbeimengungen wurden alle Jahre mit den Emissionen 2005 berechnet.

4.5.1.2 Deutschland: NO_2 und PM_{10}

Abbildung 93 zeigt die 30-jährigen Mittelwerte der NO_2 -Konzentration auf Basis der CCLM-EHIST (1976–2005) und der CCLM_RCP85-Meteorologie (2021–2050), Abbildung 94 die absoluten und relativen Unterschiede zwischen den beiden 30-jährigen Mittelwerten. Die Unterschiede in der räumlichen Verteilung der NO_2 -Mittelwerte sind gering und liegen im Bereich von flächen- und betragsmäßig geringfügigen Abnahmen im Projektionszeitraum bis zu Zunahmen in der Größenordnung von $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dies entspricht relativen Zunahmen von 1 bis zu circa 4%. Auch bei den 30-jährigen Mittelwerten der PM_{10} -Konzentrationen für den Zeitraum 2021–2050 sind die Auswirkungen der mit der RCP8.5-Meteorologie prognostizierten Klimaänderungen gegenüber dem Zeitraum 1976–2005 gering (Abbildung 95 und Abbildung 96). Für den Projektionszeitraum werden geringfügige Zunahmen der PM_{10} -Mittelwerte bis zu $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berechnet. Dies entspricht relativen Zunahmen in großen Teilen Deutschlands im Bereich von 1 bis 3% und maximalen Zunahmen bis zu 5%. Auf welche klimatischen Änderungen diese PM_{10} -Zunahmen zurückzuführen sind, kann nur durch eine detaillierte Analyse der meteorologischen Daten geklärt werden.

Die Abbildung 97 zeigt für NO_2 und PM_{10} die Auswertung in Form der Box-Whisker-Plots unterteilt in die Regionen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Der emissionsabhängige Anstieg der mittleren Konzentration von den ländlichen Regionen zu den Ballungsgebieten ist im Referenzzeitraum 1976–2005 und im Projektionszeitraum 2021–2050 klar zu erkennen. Die Spannbreite der berechneten Mittelwerte beider Zeiträume unterscheidet sich in allen Bevölkerungsklassen nur geringfügig. Eine tabellarische Auswertung der Mittelwerte erfolgt im nächsten Kapitel. Die geringen Unterschiede zwischen den Mittelwerten beider Zeiträume mit leicht höheren Werten im Projektionszeitraum zeigen sich auch in den deutschlandweit gemittelten gleitenden 5-Jahresmittelwerten (Abbildung 98).

Abbildung 93: 30-jährige NO₂-Mittelwerte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie (links) sowie 30-jährige NO₂-Mittelwerte 2021–2050 berechnet mit der CCLM_RCP85-Meteorologie (rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.

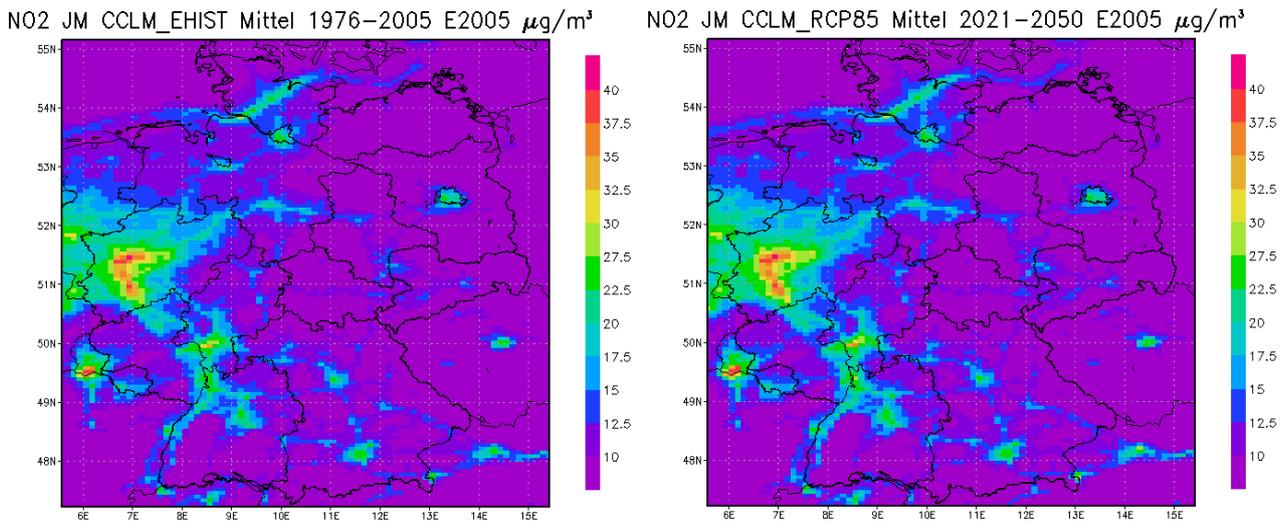


Abbildung 94: Absolute (links) und relative Abweichung (rechts) der 30-jährigen NO₂-Mittelwerte 2021–2050 berechnet mit der CCLM_RCP85-Meteorologie von den 30-jährigen NO₂-Mittelwerte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie. Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.

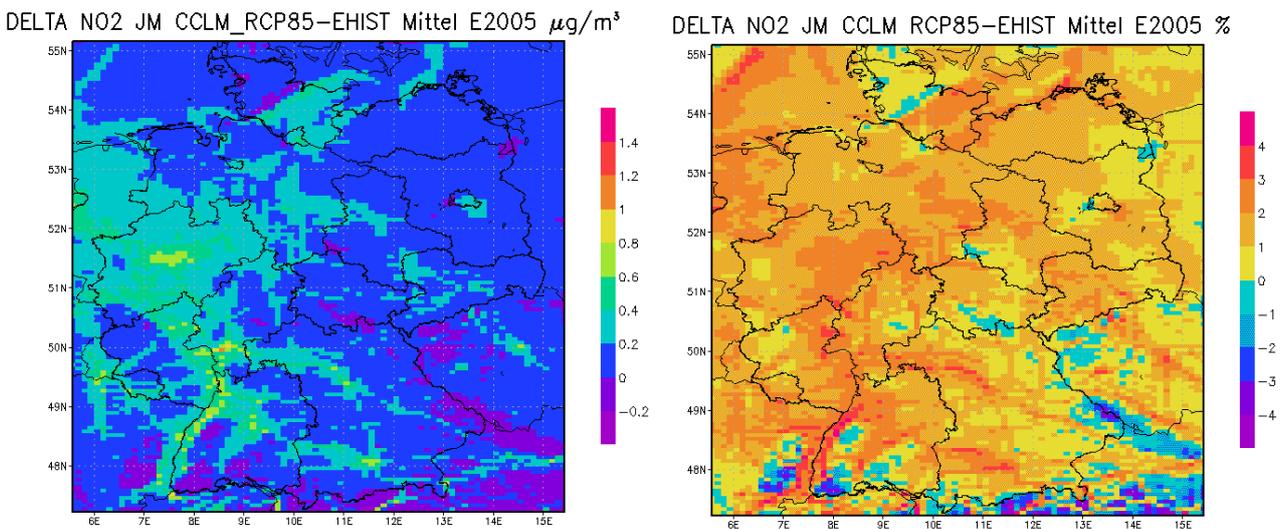


Abbildung 95: 30-jährige PM10-Mittelwerte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie (oben) sowie 30-jährige PM10-Mittelwerte 2021–2050 berechnet mit der CCLM_RCP85-Meteorologie (unten). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.

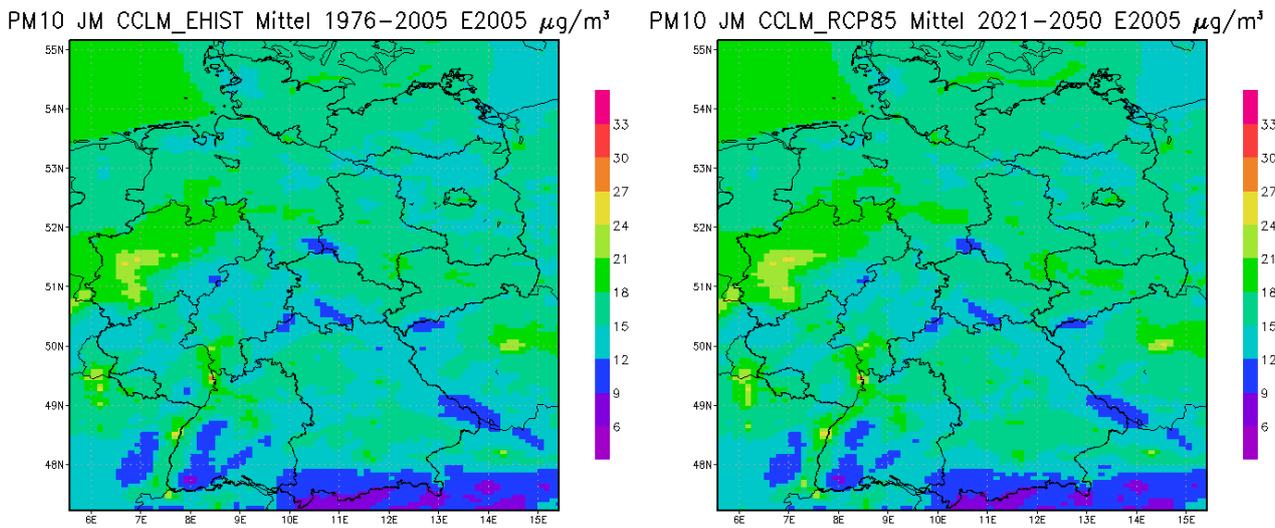


Abbildung 96: Absolute (links) und relative Abweichung (rechts) der 30-jährigen PM10-Mittelwerte 2021–2050 berechnet mit der CCLM_RCP85-Meteorologie von den 30-jährigen PM10-Mittelwerte 1976–2005 berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie. Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.

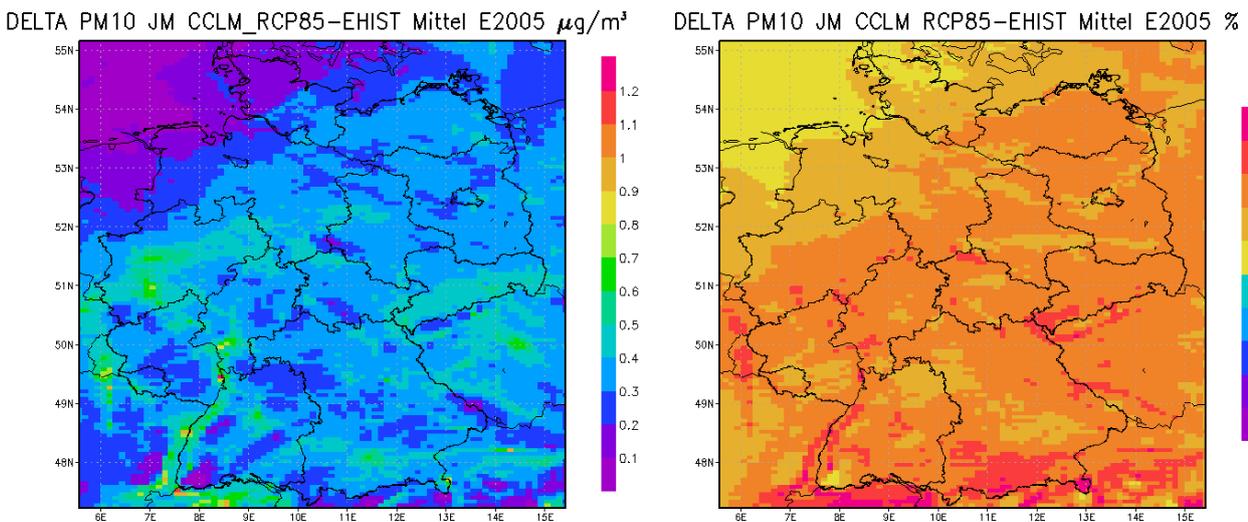


Abbildung 97: Spannweite der 30-jährigen NO₂- (links) und PM₁₀-Mittelwerte (rechts) berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie (1976–2005) und der CCLM_RCP85-Meteorologie (2021–2050). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). Alle Jahre mit Emissionen 2005.

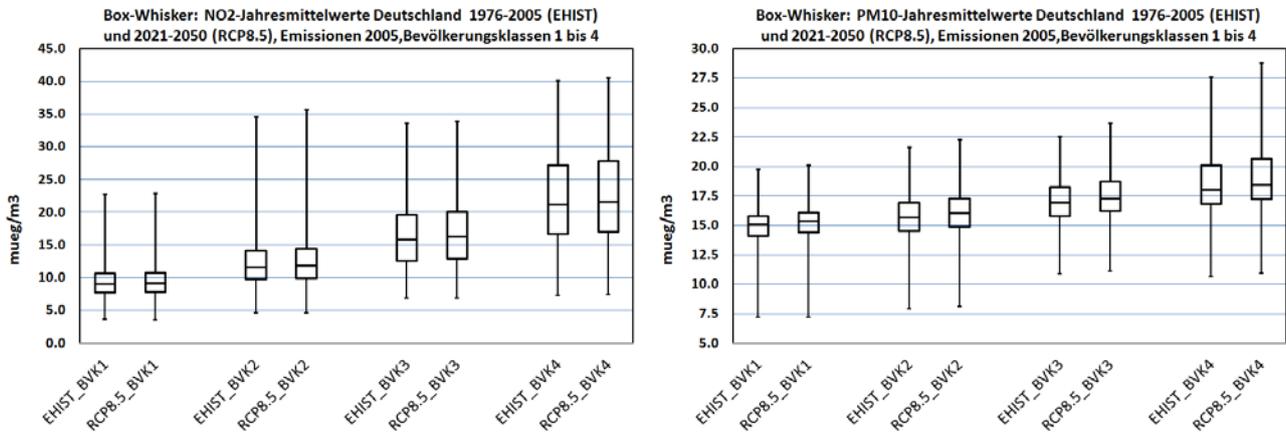
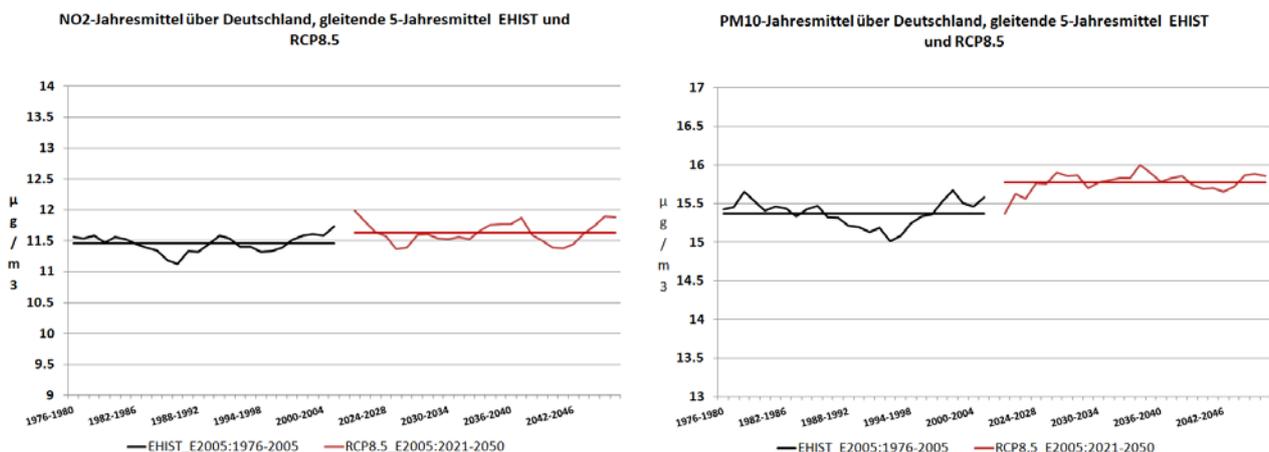


Abbildung 98: Gleitende 5-Jahresmittelwerte über Deutschland von 1976 bis 2005 (CCLM_EHIST) und von 2021 bis 2050 (CCLM_RCP85). Links: NO₂, rechts: PM₁₀. Emission 2005 für alle Jahre. Die durchgezogenen Linien kennzeichnen das jeweilige 30-jährige Mittel.



4.5.1.3 Deutschland: Ozon

Abbildung 99 zeigt die 30-jährigen Mittelwerte der Ozon-Mittelwerte April bis September auf Basis der CCLM-EHIST (1976–2005) und der CCLM_RCP85-Meteorologie (2021–2050), die Abbildung 100 die absoluten und relativen Unterschiede zwischen den beiden 30-jährigen Mittelwerten. Die Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Ozon-Mittelwerte sind gering mit Abnahmen der Ozonkonzentrationen für den Projektionszeitraum bis zu circa 1 μg/m³ oder 1 bis 2% im Norden und in der Mitte Deutschlands und Zunahmen in großen Teilen Süddeutschlands in der Größenordnung von 1%. Die geringen Auswirkungen der klimatischen Veränderungen auf die Ozonmittelwerte zeigt sich auch in den Box-Whisker-Plots zur Spannweite der berechneten Ozonmittelwerte in den drei Klimazonen Norddeutschland, Mitteldeutschland und Süddeutschland sowie in den 4 Bevölkerungsklassen (Abbildung 101). Der im Referenzzeitraum ermittelte Nord-Süd-Gradient in den Ozonverteilungen und der Konzentrationsabfall von den ländlichen Regionen in die Stadtgebiete bleiben auch im Projektionszeitraum erhalten.

Abbildung 102 zeigt die 30-jährigen Mittelwerte April-September der Maxima der tägl. gleitenden Ozon 8-Std-Mittel berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie (1976–2005) sowie der CCLM_RCP85-Meteorologie (2021–2050). Abbildung 103 zeigt die absoluten und relativen Unterschiede zwischen den Ergebnissen des Referenz- und des Projektionszeitraums. Wie schon bei den Saisonmittelwerten sind die Unterschiede gering, die Änderungen übersteigen kaum den 1%-Bereich. Im Norden werden wieder eher Abnahmen der maximalen 8-Stundenmittelwerte berechnet, im Süden ergeben sich jetzt überall leichte Zunahmen. Zunahmen werden auch für den Osten Sachsens und Brandenburgs berechnet. Die Spitzenwerte der maximalen 8-Stundenmittelwerte nehmen in Süddeutschland für den Projektionszeitraum leicht zu wie aus der Spannweite der räumlich gemittelten Konzentrationsverteilungen (Abbildung 104) ersichtlich wird. Geringe Zunahmen in den Spitzen ergeben sich auch in der Unterteilung der Konzentrationen nach den Bevölkerungsklassen.

Diese Aufteilung Deutschlands mit leichten Zunahmen der Ozonmittelwerte und der Maxima der 8-Stundenmittelwerte im Norden und in der Mitte Deutschlands und leichten Zunahmen im Süden Deutschlands zeigt sich auch bei der Auswertung für die SOMO35-Werte (Abbildung 105 und Abbildung 106). Zu- und Abnahmen reichen jetzt teilweise bis in den Bereich von 3-4%. Auch bei den prognostizierten SOMO35-Werten bleiben die für den Referenzzeitraum ermittelten Spannweiten der Konzentrationsverteilungen in den Klimazonen und den Bevölkerungsklassen erhalten (Abbildung 107).

Abbildung 108 zeigt die 30-jährigen Mittelwerte der Ozon-AOT40-Werte für Vegetation ermittelt für den Referenzzeitraum (CCLM-EHIST-Meteorologie, 1976–2005) und für den Projektionszeitraum (CCLM_RCP85-Meteorologie, 2021–2050), die Abbildung 109 die absoluten und relativen Unterschiede zwischen den beiden 30-jährigen Mittelwerten. Es werden wieder Bereiche mit Zunahmen (im Großteil Ostdeutschlands und Bayerns und in Teilen von Baden-Württemberg und Schleswig-Holstein) und Bereiche mit Abnahmen (im Westen und Südwesten) berechnet, die großteils im Bereich von -3% bis +3 % liegen. In Teilen von Brandenburg und Sachsen und in Südbayern kommt es zu Zunahmen der AOT-Werte bis zu 10%. Zu lokal höheren Spitzenwerten der AOT-40-Kenngröße kommt es dagegen nahezu überall in Deutschland und in allen Bevölkerungsklassen wie der Abbildung 110 entnommen werden kann.

Die 30-jährigen Mittelwerte der O₃-Überschreitungssumme (Summe der Differenzen der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel > 120 µg/m³ und dem Schwellenwert 120 µg/m³) zeigt die Abbildung 111 für die CCLM_EHIST-Meteorologie (1976–2005) und die CCLM_RCP85-Meteorologie (2021–2050). Die höchsten Überschreitungssummen werden mit beiden in den Ballungsräumen München, Stuttgart und Rhein-Main berechnet. Auch im Ruhrgebiet kommt es zu höheren Überschreitungssummen. Die absolute Höhe der Überschreitungssummen ist im Projektionszeitraum 2021–2050 bis auf wenige Ausnahmen in Regionen mit sehr niedrigen Überschreitungssummen deutlich höher als im Referenzzeitraum 1976–2005. Großflächig kommt es zu Verdoppelungen, lokal sogar zu Verdreifachungen der Überschreitungssummen des Laufes CCLM_EHIST im Referenzzeitraum (Abbildung 112). Die starke Zunahme der Überschreitungssummen im Projektionszeitraum zeigt sich dementsprechend auch in den mittleren Box-Whisker-Darstellungen (Abbildung 113).

Die Häufigkeit der Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel > 120 µg/m³ gemittelt über den Zeitraum April-September 1976–2005 und 2021–2050 unterteilt in Nord-, Mittel- und Süddeutschland zeigt die Abbildung 114. Die Häufigkeit der Überschreitungen des Schwellenwerts von 120 µg/m³ entspricht dem mittleren Jahresanteil der Überschreitungstage. Für beide Zeiträume wächst die Anzahl der Überschreitungstage von Nord nach Süd an. Im Referenzzeitraum 1976–2005 werden im Mittel in Süddeutschland und im 30-jährigen Mittel an circa 1.1 % der Jahrestage maximale 8-Stundenmittelwerte > 120 µg/m³ berechnet, in Norddeutschland dagegen nur an circa 0.5%. Die entsprechenden Zahlen für den Projektionszeitraum 2021–2050 sind circa 1.5% und 1.1%.

Abbildung 99: 30-jährige O₃-Mittelwerte April bis September 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie, links) sowie 30-jährige O₃-Mittelwerte April bis September 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie, rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.

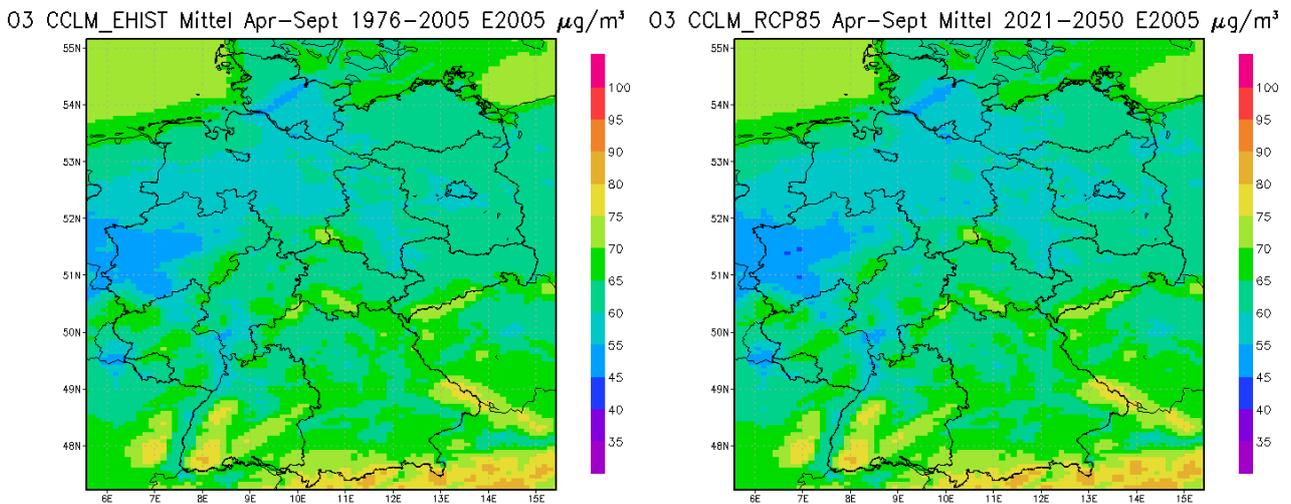


Abbildung 100: Absolute (links) und relative Abweichung (rechts) der 30-jährigen O₃-Mittelwerte April–September 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie) von den 30-jährigen O₃-Mittelwerten April bis September 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.

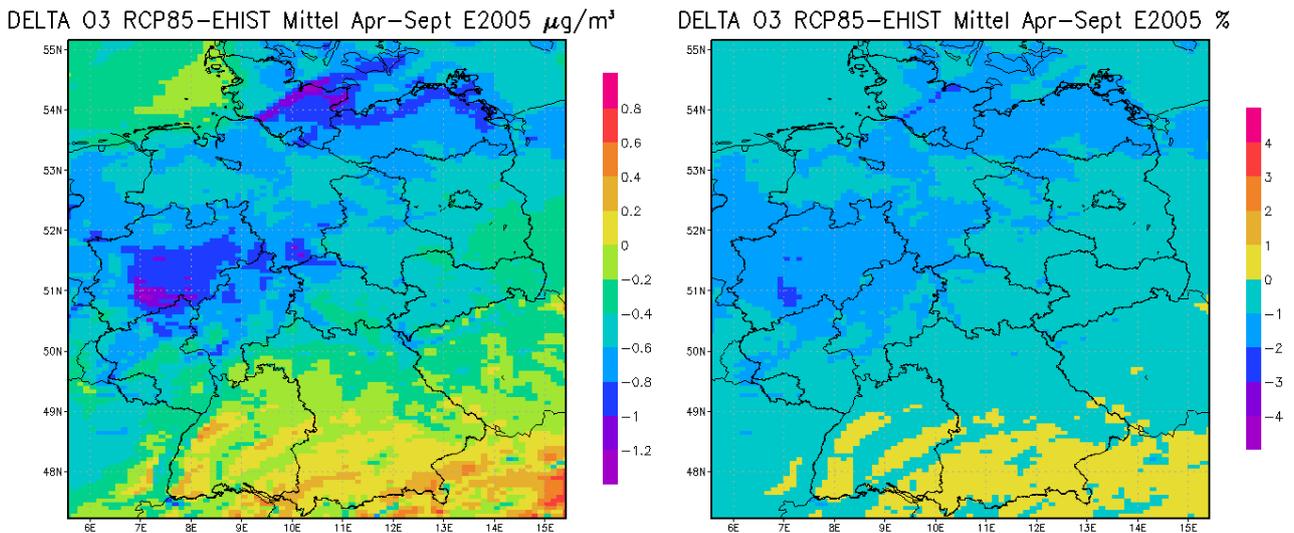


Abbildung 101: Spannweite der 30-jährigen Ozonmittel April bis September 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). Alle Jahre mit Emission 2005.

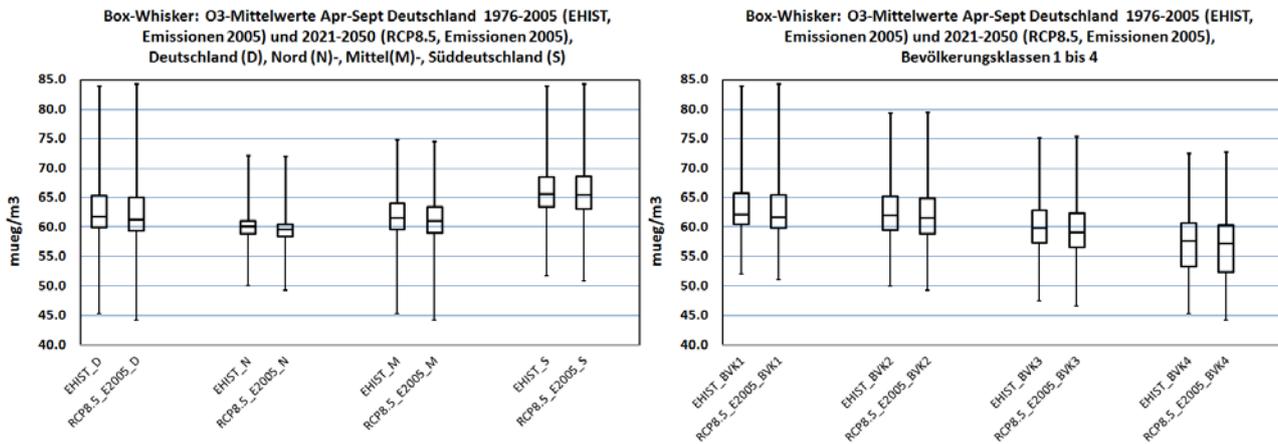


Abbildung 102: 30-jährige Mittelwerte der maximalen täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie, links), sowie die entsprechenden 30-jährigen-Mittelwerte 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie, rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.

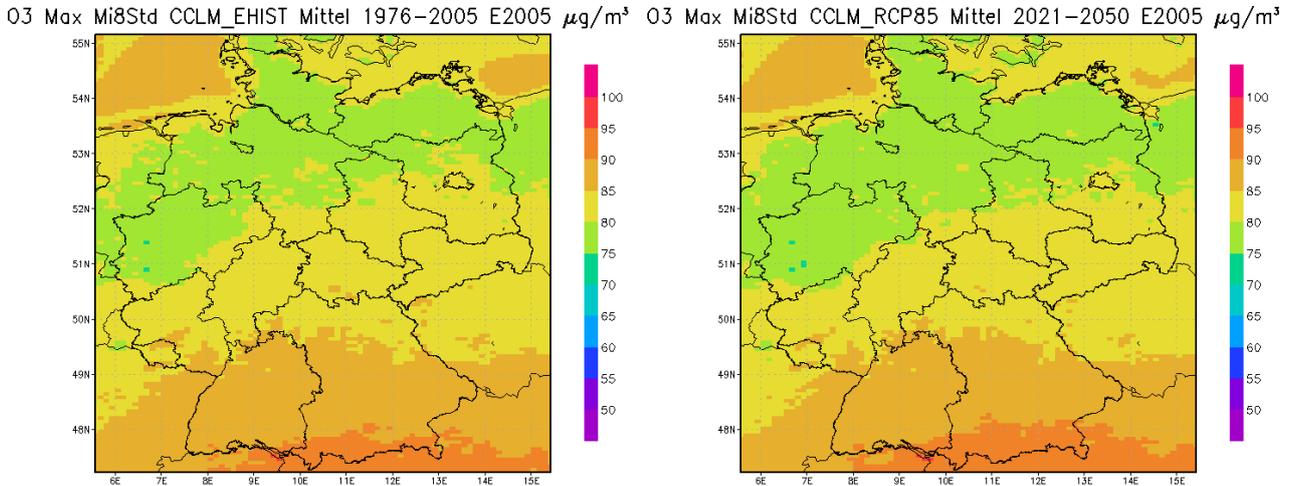


Abbildung 103: Absolute (links) und relative Abweichung (rechts) der 30-jährigen Mittelwerte der maximalen täglichen 8-Std-Mittel 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie) von den entsprechenden 30-jährigen O₃-Mittelwerten 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.

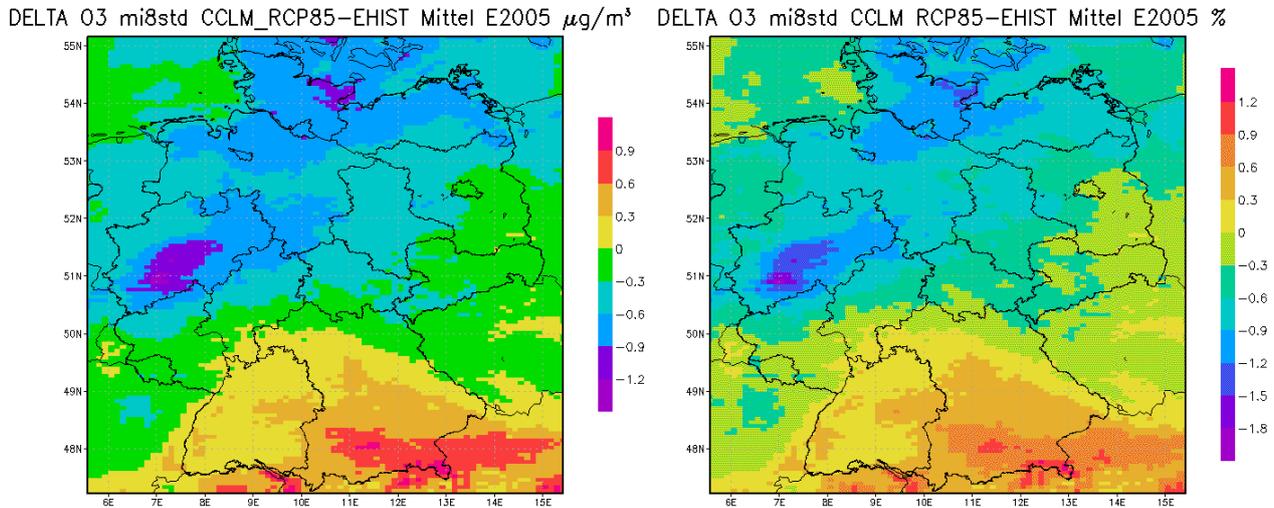


Abbildung 104: Spannweite der 30-jährigen Mittel der max. tägl. 8-Std-Mittel, April bis September 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). Alle Jahre mit Emission 2005.

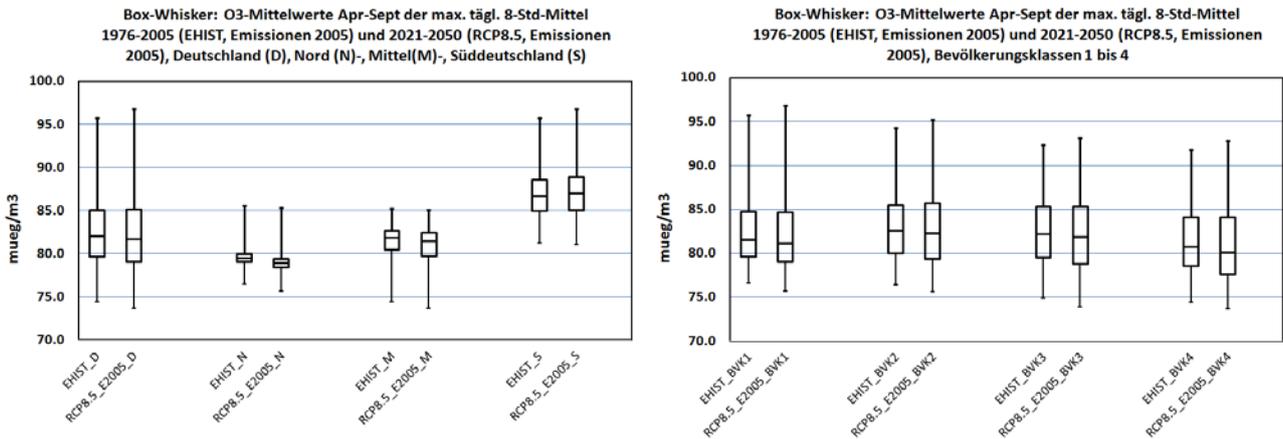


Abbildung 105: 30-jährige Mittelwerte der O₃ SOMO35-Werte 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie, links) sowie die entsprechenden 30-jährigen-Mittelwerte 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie, rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.

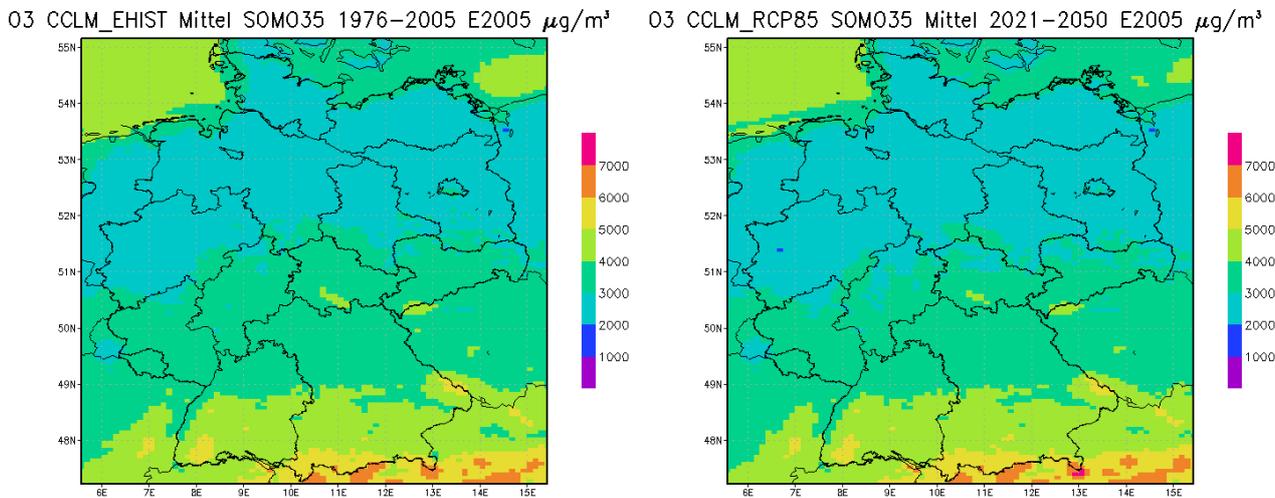


Abbildung 106: Absolute (links) und relative Abweichung (rechts) der 30-jährigen Mittelwerte der O₃ SOMO35 Werte 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie) von den entsprechenden 30-jährigen Mittelwerten 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.

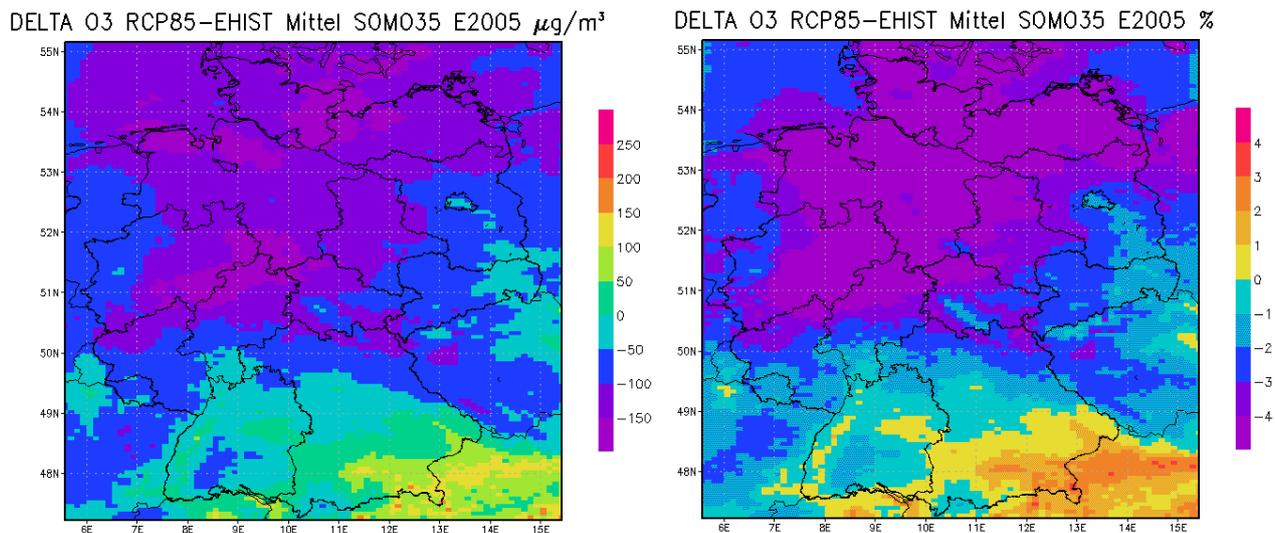


Abbildung 107: Spannweite der 30-jährigen Mittel der O₃ SOMO35-Werte 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). Alle Jahre mit Emission 2005.

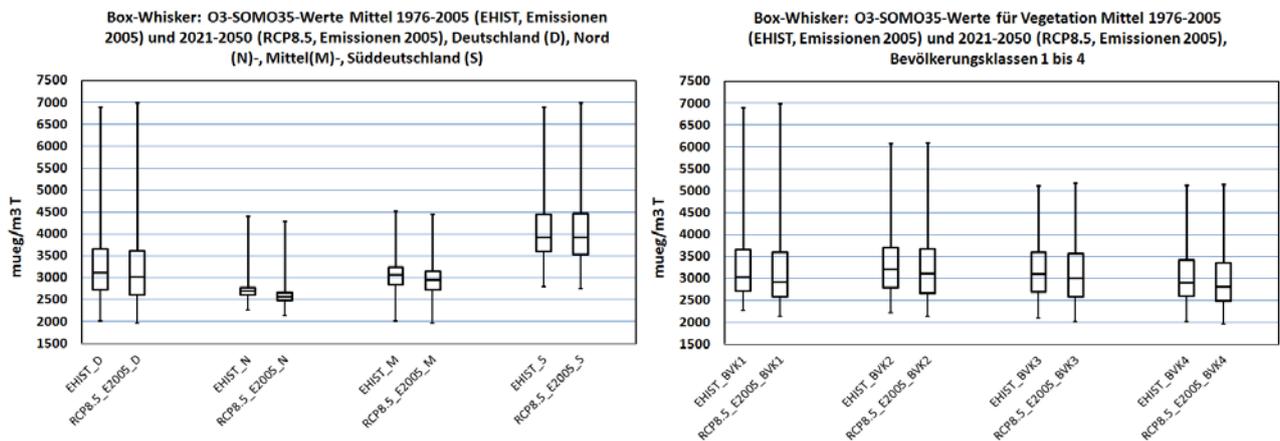


Abbildung 108: 30-jährige Mittelwerte der O₃ AOT40-Werte für Vegetation 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie, links) sowie die entsprechenden 30-jährigen-Mittelwerte 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie, rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.

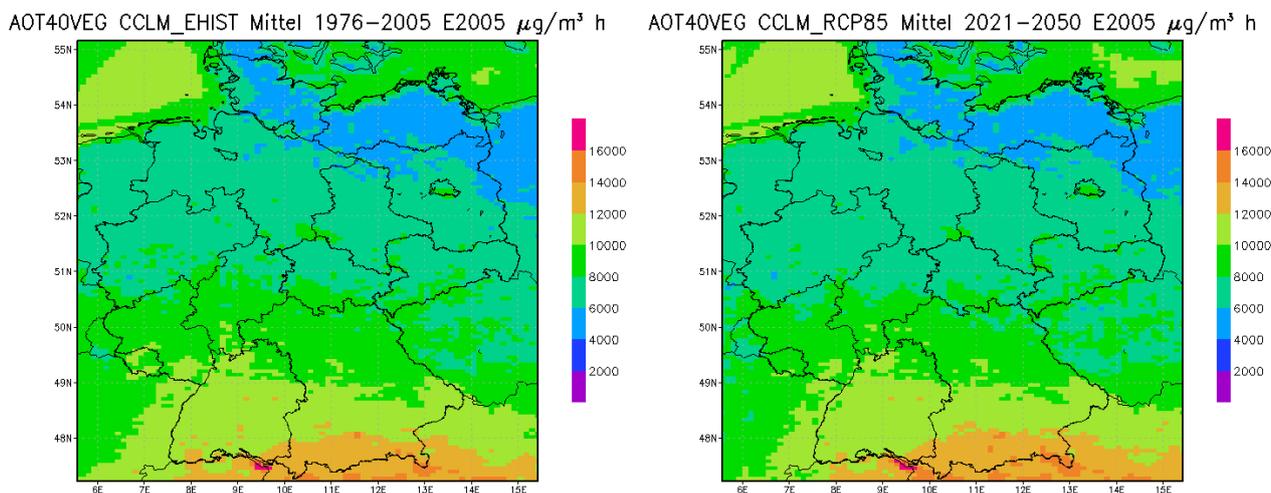


Abbildung 109: Absolute (rechts) und relative Abweichung (links) der 30-jährigen Mittelwerte der O₃ AOT40 Werte 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie) von den entsprechenden 30-jährigen Mittelwerten 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.

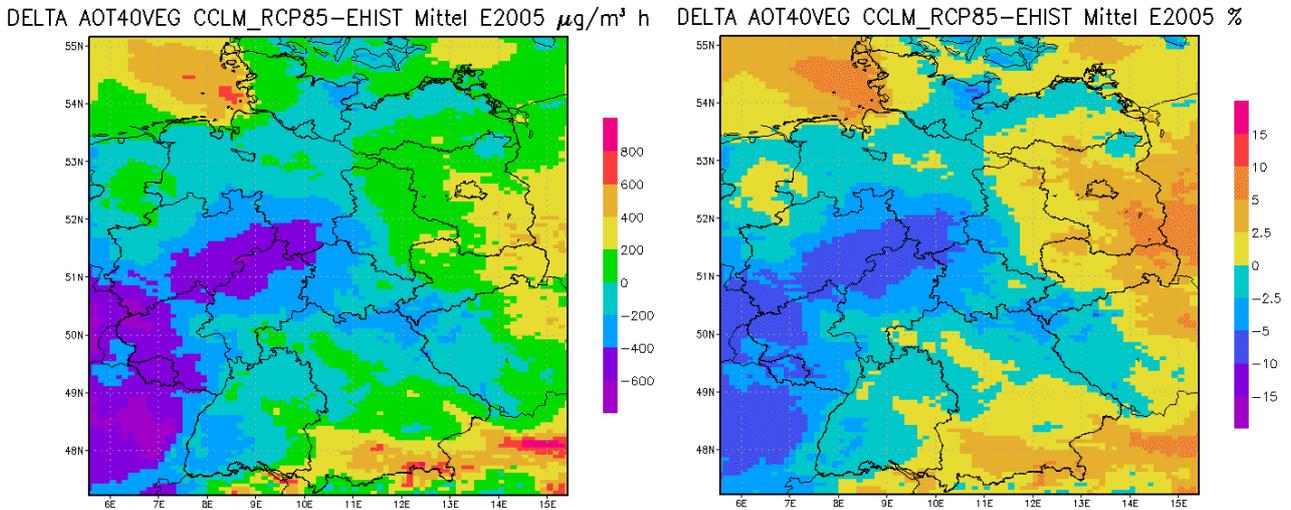


Abbildung 110: Spannweite der 30-jährigen Mittel der AOT40-Werte für Vegetation 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). Alle Jahre mit Emission 2005.

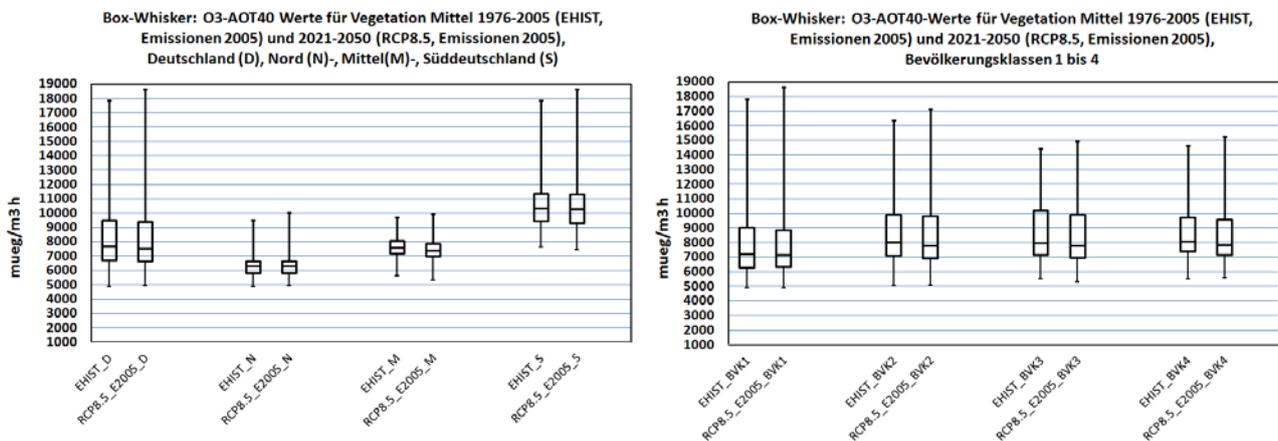


Abbildung 111: 30-jährige Mittelwerte der O₃ Überschreitungssumme (Differenzsumme der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel > 120 µg/m³ und dem Schwellenwert 120 µg/m³) 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie, links) sowie die entsprechenden 30-jährigen-Mittelwerte 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie, rechts). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.

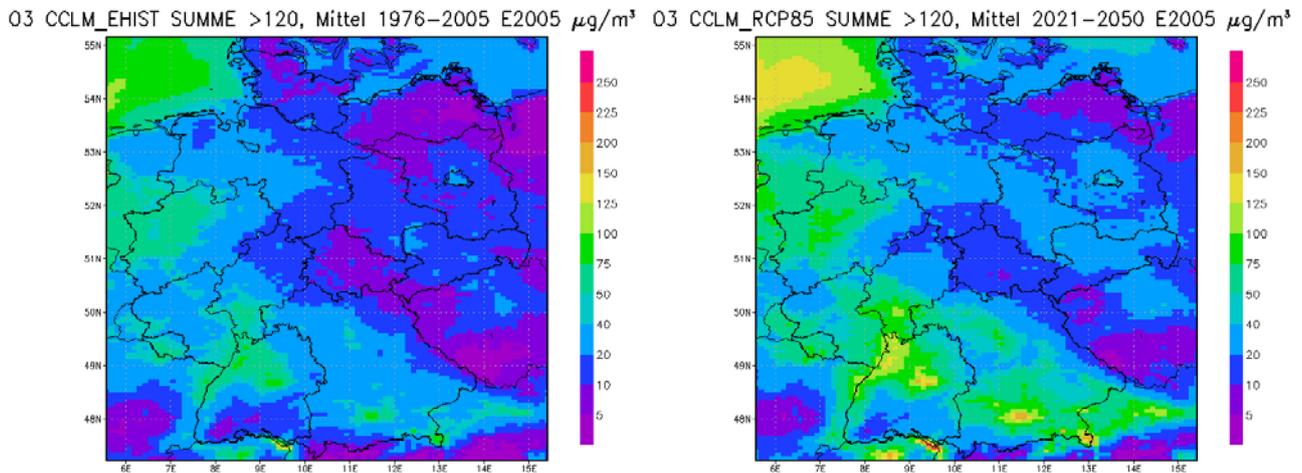


Abbildung 112: Absolute (links) und relative Abweichung (rechts) der 30-jährigen Mittelwerte der O₃ Überschreitungssumme (Differenzsumme der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel > 120 µg/m³ und dem Schwellenwert 120 µg/m³) 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie) von den entsprechenden 30-jährigen Mittelwerten 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie). Deutschland-Lauf. Emissionen 2005 für alle Jahre.

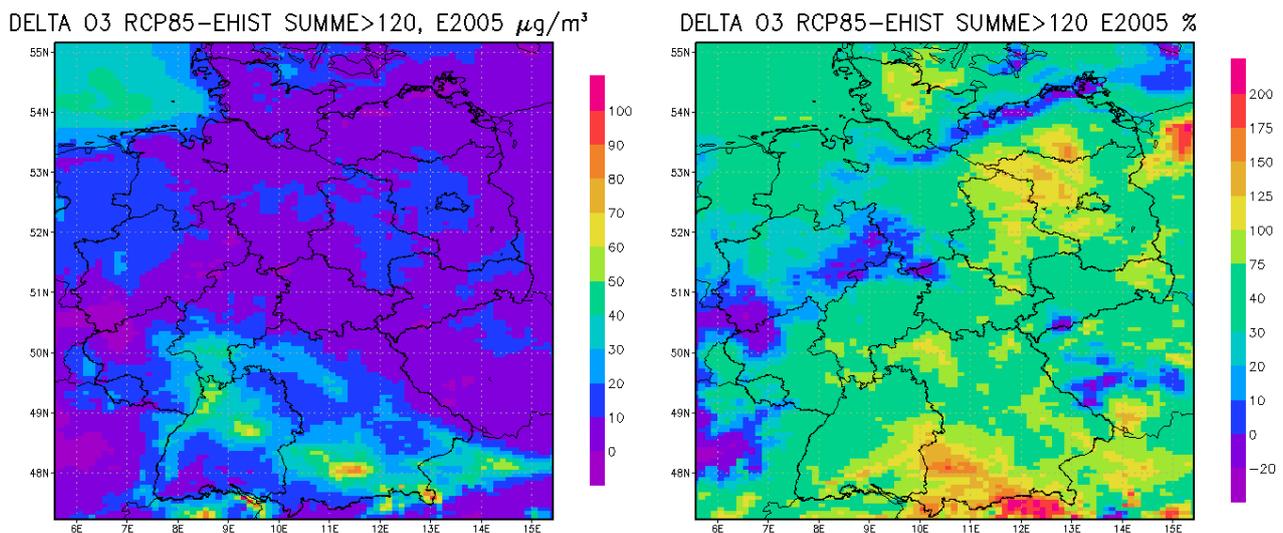


Abbildung 113: Spannweite der Ozon Überschreitungssumme (Differenzsumme der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel > 120 µg/m³ und dem Schwellenwert 120 µg/m³), Mittel 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume). Alle Jahre mit Emission 2005.

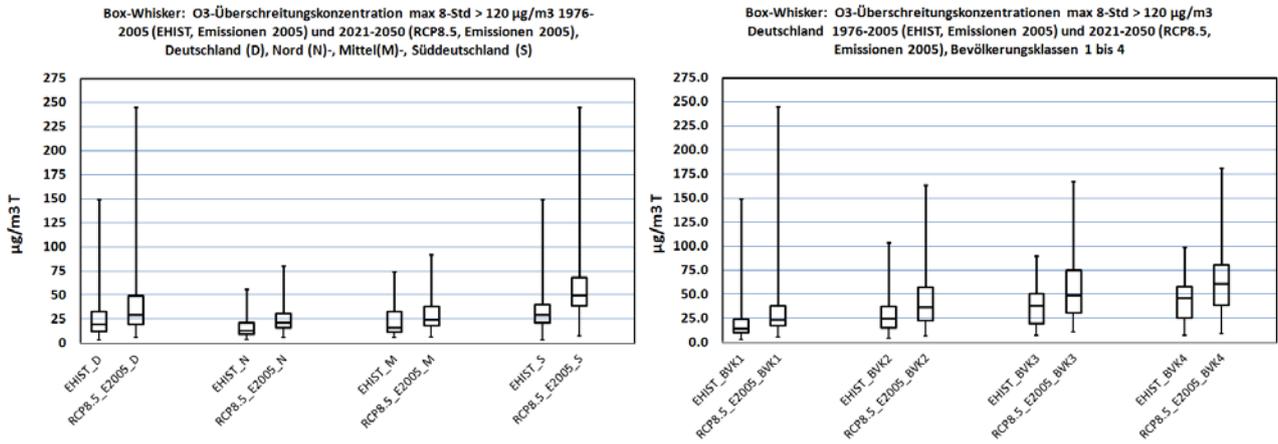
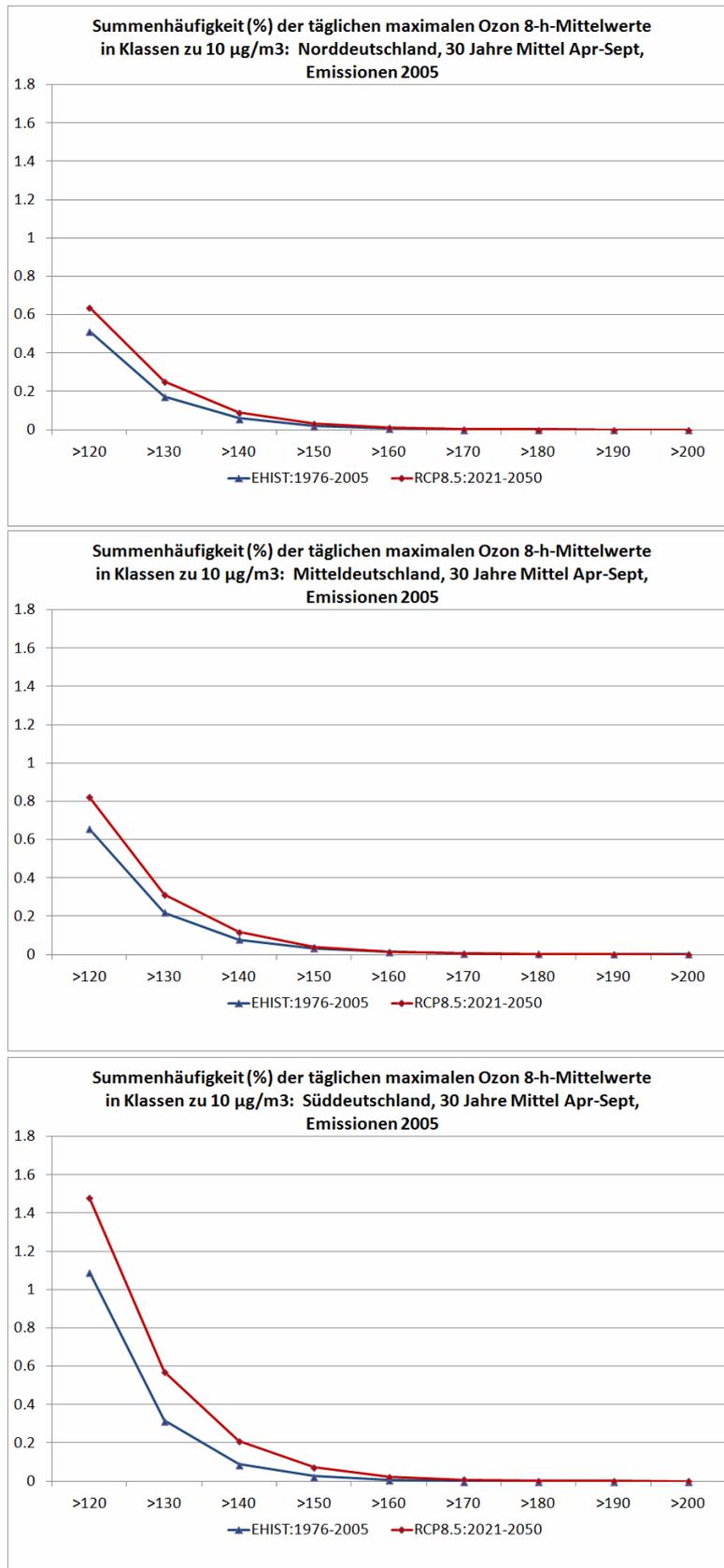


Abbildung 114: Häufigkeit der maximalen täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel > 120 µg/m³ gemittelt über den Zeitraum April-September, 1976–2005 (EHIST) und 2021–2050 (RCP8.5). Mittel über Norddeutschland (alle Zellen nördlich von 52.25° Breite), Mitteldeutschland (Alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite) und Süddeutschland (Alle Zellen südlich von 50.25° Breite). Alle Jahre Emissionen 2005.



Die Abbildung 115 zeigt für den Ozonmittelwert April-September die deutschlandweit gemittelten gleitenden 5-Jahresmittelwerte im Referenzzeitraum 1976–2005 und im Projektionszeitraum 2021–2050. Ebenfalls abgebildet sind Mittelwerte nur für Norddeutschland und nur für Süddeutschland. Auffällig bei allen Zeitverläufen sind die im Referenzzeitraum und Projektionszeitraum ähnlich langen Zeitperioden zwischen Aufstiegs- und Abfallphasen der gleitenden Mittelwerte. Dies gilt für die deutschlandweiten Mittel als auch für die regionalen Mittel (auch für Mitteldeutschland, nicht abgebildet). Ob dies zufällig ist oder mit den Antriebsdaten aus dem globalen Klimamodell zusammenhängt, kann im Rahmen dieser Untersuchung nicht geklärt werden. Insbesondere in Süddeutschland unterscheiden sich die Zeitverläufe des Referenzzeitraums und des Projektionszeitraums kaum. Nach Norden hin werden die Amplituden und dementsprechend auch die 30-jährigen Mittel im Projektionszeitraum etwas niedriger als im Referenzzeitraum. In allen Zeitverläufen zeigt sich das von Norden nach Süden ansteigende Ozonniveau.

Die gleitenden 5-Jahresmittelwerte der Maxima der 8-Stundenmittelwerte (Abbildung 116) zeigen ähnliche Amplituden und Perioden wie die Ozonmittelwerte. Bei dieser Auswertegröße, die im Gegensatz zu den Ozonmittelwerten die Nachtwerte nicht berücksichtigt, werden in Süddeutschland im Projektionszeitraum leicht höhere Werte berechnet als im Referenzzeitraum. Ähnliches gilt auch für die Zeitreihen der SOMO35-Werte (Abbildung 117).

Für die Auswertegrößen, die verstärkt auf die maximalen Ozonwerte abzielen, ist die Amplituden- und Phasenähnlichkeit zwischen Referenzzeitraum und Projektionszeitraum nicht mehr deutlich (Abbildung 118 und Abbildung 119). Die Schwingungsweite der 5-Jahresmittelwertkurven des AOT40-Wertes ist im Projektionszeitraum deutlich größer als im Referenzzeitraum. Die starken positiven und negativen Ausschläge führen dann aber dazu, dass die 30-jährigen Mittelwerte des Projektionszeitraums nahezu identisch mit denjenigen des Referenzzeitraums sind. Auch die 5-Jahresmittel der Summe der Differenzen der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel $> 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und dem Schwellenwert $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zeigen im Projektionszeitraum eine sehr viel größere Schwingungsweite als im Referenzzeitraum. Bei dieser Auswertegröße erhöhen sich im Projektionszeitraum auch die 30-jährigen Mittel, in verstärktem Maße in Süddeutschland.

Insgesamt ergeben sich in der Periodendauer der gleitenden 5-Jahresmittelwerte in den jeweiligen Beurteilungszeiträumen kaum regionale Unterschiede. Wenn es in einem oder mehreren Jahren zu erhöhter Ozonbildung kommt, dann geschieht das meistens in ganz Deutschland, allerdings auf unterschiedlichem Niveau mit sehr viel höheren Spitzenwerten in Süddeutschland.

Es lässt sich festhalten, dass das prognostizierte meteorologische Klimasignal bei Auswertegrößen, die eher auf die hohen Ozonkonzentrationen abzielen, zu einer Erhöhung der Belastung im Projektionszeitraum führt. Diese Erhöhung fällt im süddeutschen Raum absolut und relativ höher aus als in den weiter nördlichen Regionen Deutschlands.

Abbildung 115: Gleitende 5-Jahresmittelwerte 1976–2005 (EHIST) und 2021–2050 (RCP8.5). Ozonmittelwert April bis September. Auswertung für das Mittel über Deutschland, Norddeutschland (alle Zellen nördlich von 52.25° Breite) und Süddeutschland (Alle Zellen südlich von 50.25° Breite). Die durchgezogenen Linien kennzeichnen die 30-jährigen Mittelwerte. Alle Jahre mit Emissionen 2005.

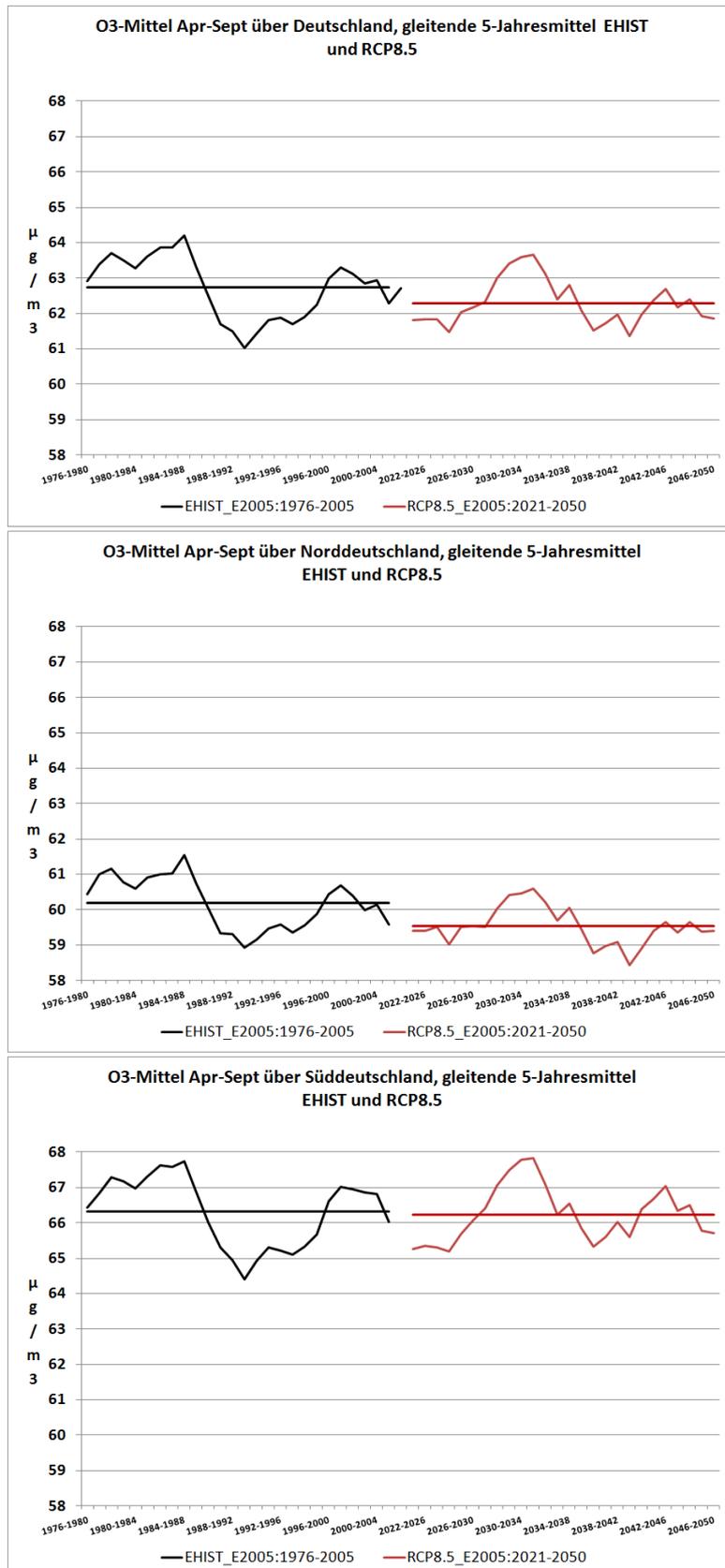


Abbildung 116: Gleitende 5-Jahresmittelwerte 1976–2005 (EHIST) und 2021–2050 (RCP8.5). Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel, April bis September. Auswertung für das Mittel über Deutschland, Norddeutschland (alle Zellen nördlich von 52.25° Breite) und Süddeutschland (Alle Zellen südlich von 50.25° Breite). Die durchgezogenen Linien kennzeichnen die 30-jährigen Mittelwerte. Alle Jahre mit Emissionen 2005.

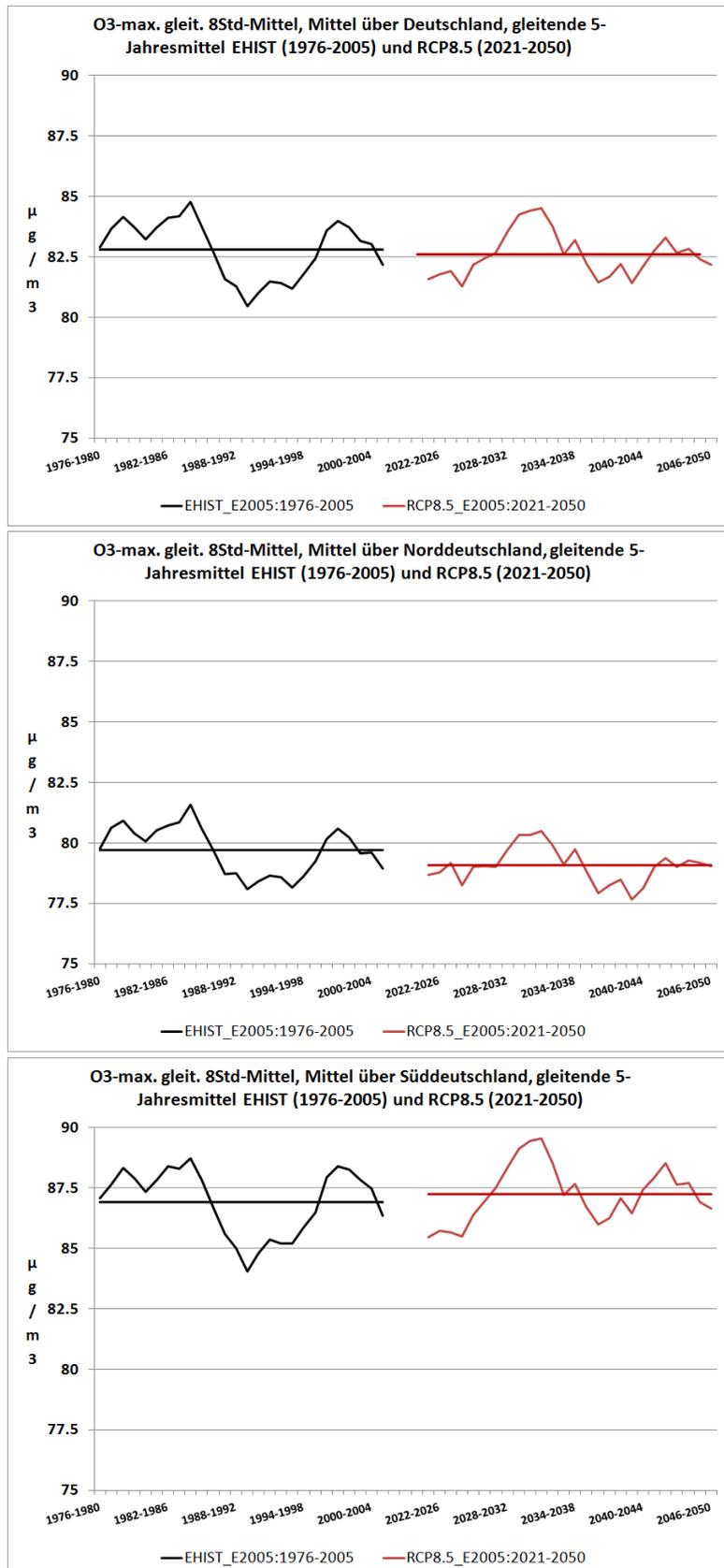


Abbildung 117: Gleitende 5-Jahresmittelwerte 1976–2005 (EHIST) und 2021–2050 (RCP8.5). SOMO35-Werte. Auswertung für das Mittel über Deutschland, Norddeutschland (alle Zellen nördlich von 52.25° Breite) und Süddeutschland (Alle Zellen südlich von 50.25° Breite). Die durchgezogenen Linien kennzeichnen die 30-jährigen Mittelwerte. Alle Jahre mit Emissionen 2005.

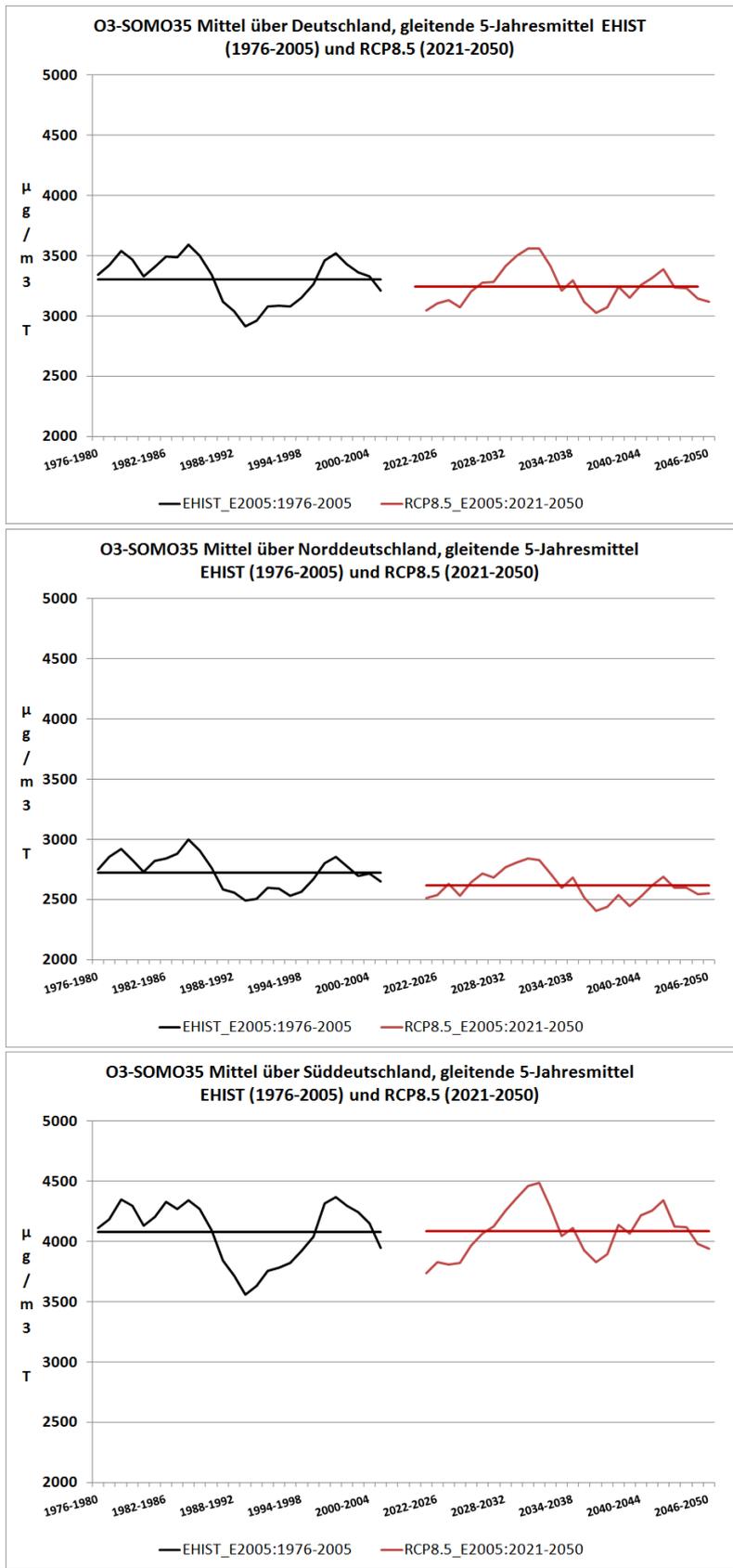


Abbildung 118: Gleitende 5-Jahresmittelwerte 1976–2005 (EHIST) und 2021–2050 (RCP8.5). AOT40-Werte für Vegetation. Auswertung für das Mittel über Deutschland, Norddeutschland (alle Zellen nördlich von 52.25° Breite) und Süddeutschland (Alle Zellen südlich von 50.25° Breite). Die durchgezogenen Linien kennzeichnen die 30-jährigen Mittelwerte. Alle Jahre mit Emissionen 2005.

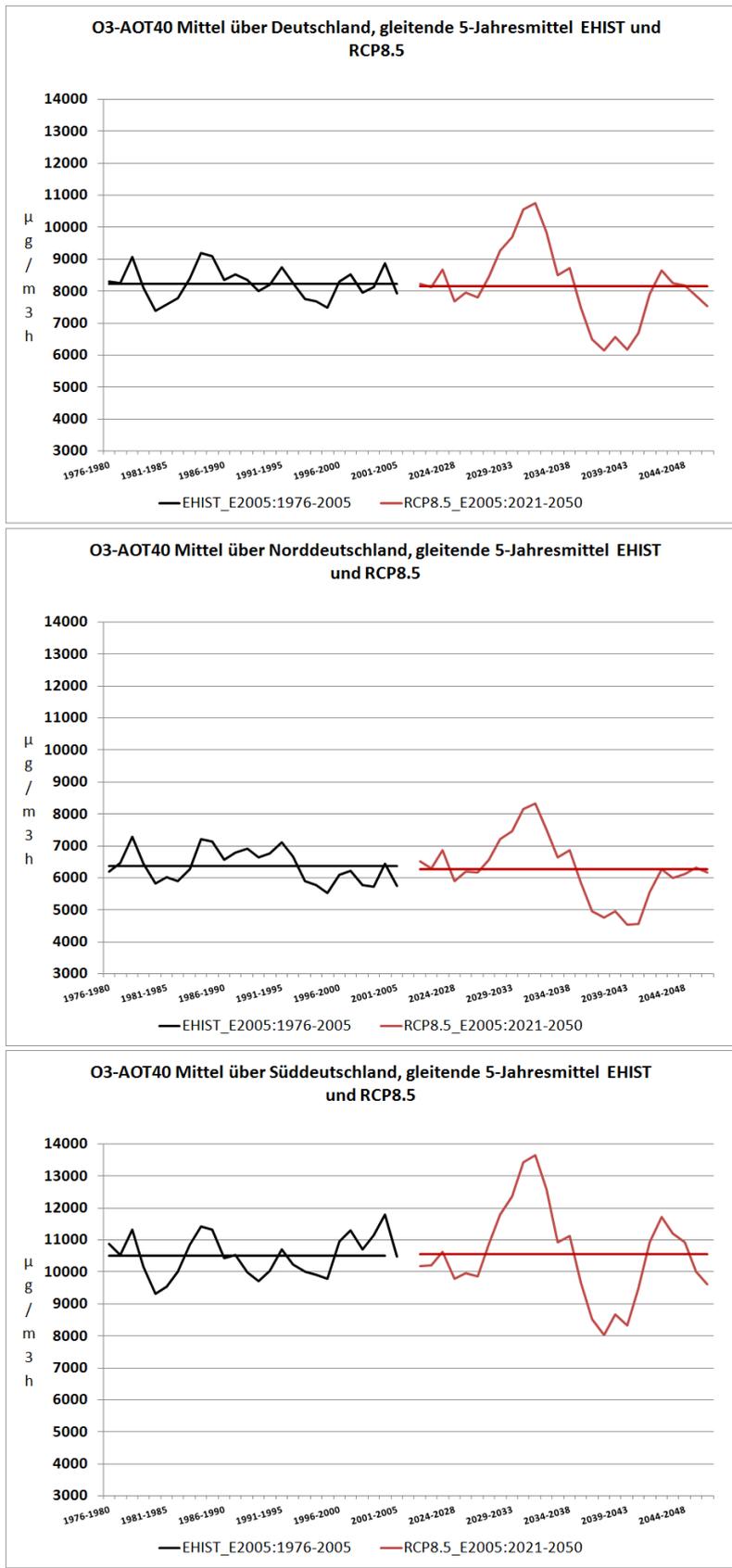
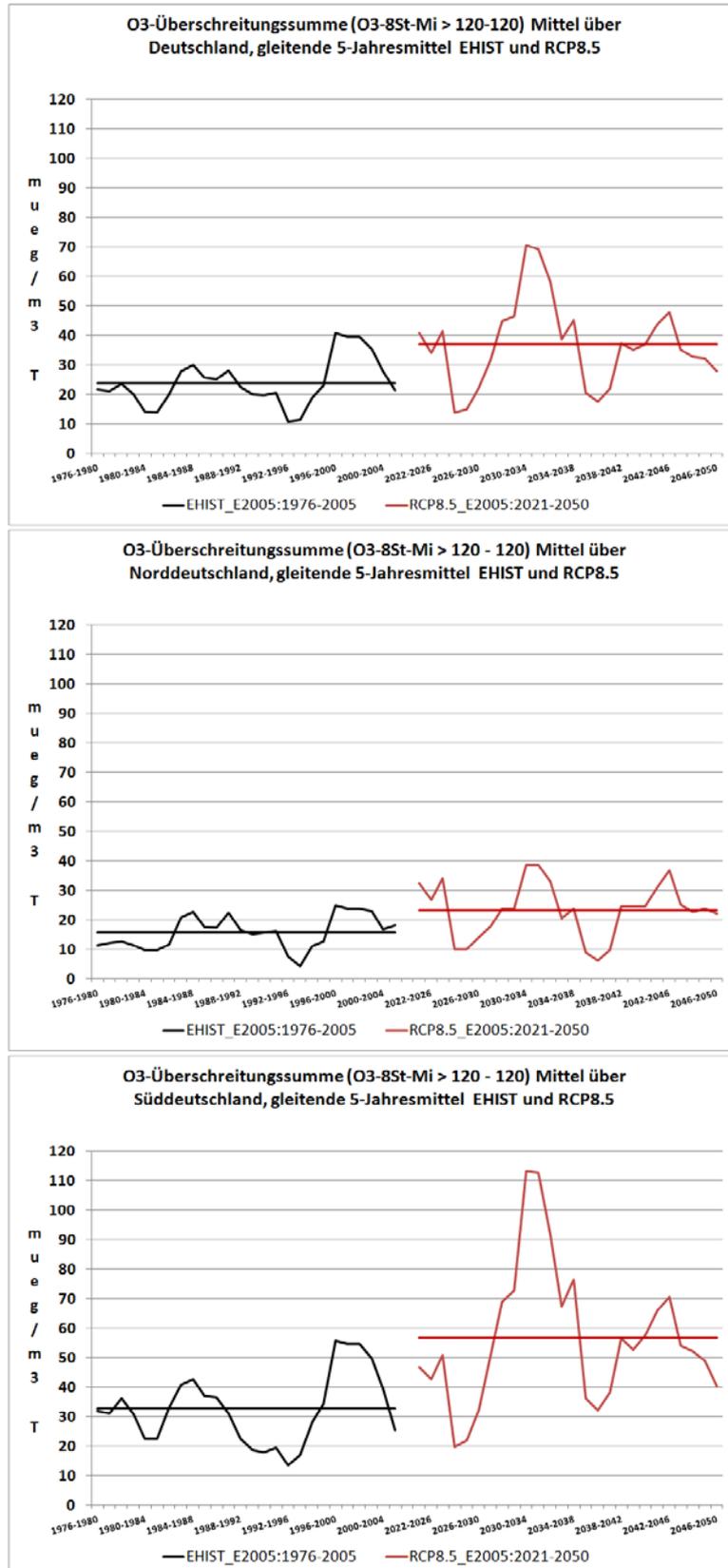


Abbildung 119: Gleitende 5-Jahresmittelwerte 1976–2005 (EHIST) und 2021–2050 (RCP8.5). O₃ Überschreitungssumme (Summe der Differenzen der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel > 120 µg/m³ und dem Schwellenwert 120 µg/m³). Auswertung für das Mittel über Deutschland, Norddeutschland (alle Zellen nördlich von 52.25° Breite) und Süddeutschland (Alle Zellen südlich von 50.25° Breite). Die durchgezogenen Linien kennzeichnen die 30-jährigen Mittelwerte. Alle Jahre mit Emissionen 2005.



4.5.2 Kombiniertes Klima- und Emissionssignal

4.5.2.1 Emissionsänderung 2005 bis 2030

Alle bisher diskutierten Berechnungen basierten auf den Emissionsdaten 2005. Zur Ermittlung des Emissionssignals wurde der Projektionszeitraum 2021–2050 auch mit den Emissionen 2030 berechnet. Die Tabelle 21 zeigt die relativen Änderungen der Emission 2030 bezogen auf die Emission 2005, getrennt für Deutschland und Europa. Es ist offensichtlich, dass für alle Emissionen außer NH₃ bis 2030 Abnahmen prognostiziert werden, die am stärksten für die Stickoxide und SO₂ ausfallen. Details zu den verwendeten Szenarien können in Jörss et al. (2014) gefunden werden.

Tabelle 21: Relative Änderungen der Emissionen 2030 bezogen auf die Emissionen 2005. Mittlere Änderungen in Deutschland und in Europa.

2030-2005 (%)	NO _x	NMVOC	SO ₂	NH ₃	PM _{2.5}	PM ₁₀
APS Deutschland	-48.2	-14.6	-39.7	+0.4	-28.9	-10.5
Europa	-33.5	-31.9	-32.5	+4.4	-10.8	-9.8

4.5.2.2 Deutschland: NO₂ und PM₁₀

Die Tabelle 22 zeigt die in den vier Bevölkerungsklassen berechneten NO₂-Mittelwerte des Referenzzeitraums 1976–2005, des Projektionszeitraums 2021–2050 mit den Emissionen 2005 und des Projektionszeitraums 2021–2050 mit den Emissionen 2030. Tabelle 23 zeigt dieselbe Auswertung für PM₁₀. Wie schon diskutiert wurde, hat der rein meteorologische Klimaeffekt nur geringe Auswirkungen auf die NO₂- und die PM₁₀-Konzentrationen. Die prognostizierte Emissionsänderung bis 2030 führt dagegen zu deutlichen Abnahmen der Mittelwerte, die für NO₂ im Bereich von circa 50%, für PM₁₀ im Bereich von 11 bis 13% liegen. Der Emissionseffekt ist damit weit stärker als der Klimaeffekt. Dies zeigen auch die mittleren Auswertungen in Form der Box-Whisker-Plots (Abbildung 120) und die gleitenden 5-Jahresmittelwerte (Abbildung 121).

Tabelle 22: 30-jährige NO₂-Mittelwerte in Deutschland jeweils im Mittel über Bevölkerungsklasse 1 bis 4. Lauf EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005, Lauf RCP8.5 2021–2050 mit Emissionen 2005 und Emissionen 2030.

NO ₂ , µg/m ³	EHIST, E2005	RCP8.5, E2005	RCP8.5, E2030
BVK1	9.3	9.5	4.6
BVK2	12.3	12.5	5.9
BVK3	16.6	16.9	8.2
BVK4	22.2	22.6	11.7

Tabelle 23: 30-jährige PM₁₀-Mittelwerte in Deutschland jeweils im Mittel über Bevölkerungsklasse 1 bis 4. Lauf EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005, Lauf RCP8.5 2021–2050 mit Emissionen 2005 und Emissionen 2030.

PM ₁₀ , µg/m ³	EHIST, E2005	RCP8.5, E2005	RCP8.5, E2030
BVK1	14.8	15.1	12.9
BVK2	15.6	16.0	13.8
BVK3	17.1	17.5	15.2
BVK4	18.5	19.0	16.5

Abbildung 120: Spannweite der 30-jährigen NO₂- (links) und PM₁₀-Mittelwerte (rechts) berechnet mit der CCLM_EHIST-Meteorologie (1976–2005, Emission 2005) und der CCLM_RCP85-Meteorologie (2021–2050, Emission 2005 und 2030). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume).

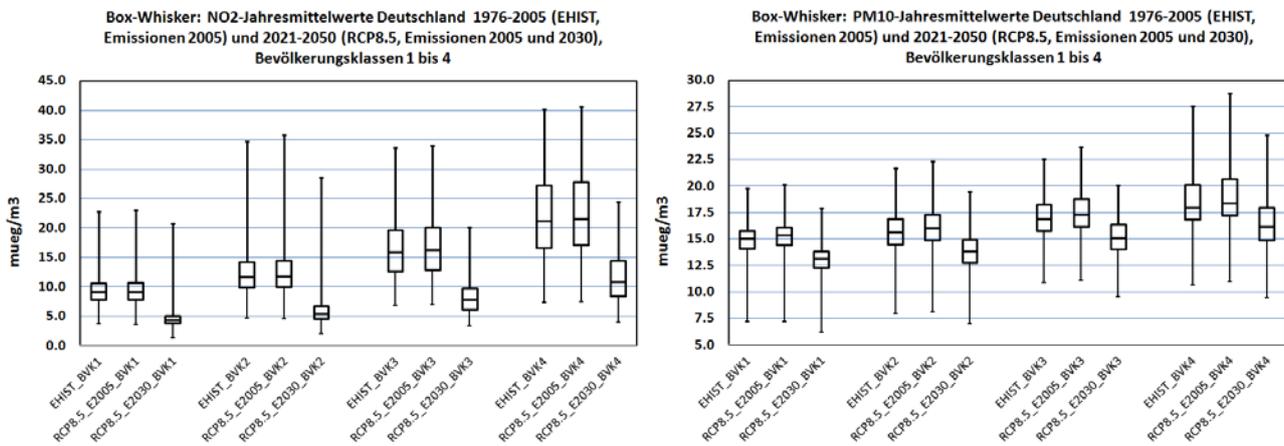
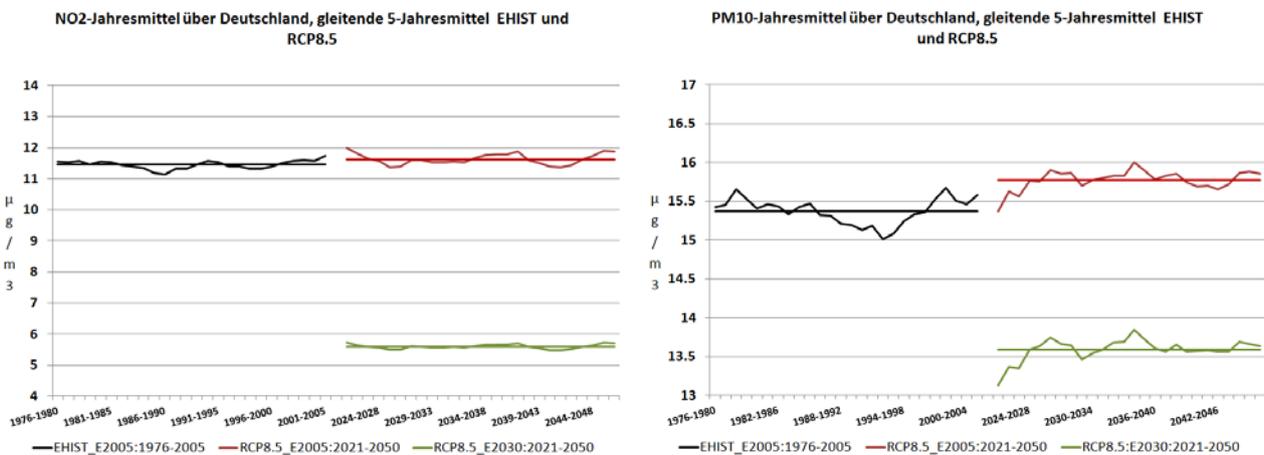


Abbildung 121: Gleitende 5-Jahresmittelwerte über Deutschland von 1976 bis 2005 (CCLM_EHIST, Emission 2005) und von 2021 bis 2050 (CCLM_RCP85, Emission 2005 und 2030). Links: NO₂, rechts: PM₁₀. Emission 2005 für alle Jahre



4.5.2.3 Deutschland: Ozon

In der Tabelle 24 sind die berechneten 30-jährigen Ozon-Mittelwerte April bis September für Deutschland gesamt, für die drei Klimazonen und für die vier Bevölkerungsklassen zusammengestellt. Für diese Auswertegröße hat der Klimaeffekt nur geringe Auswirkungen auf die mittleren Konzentrationen. Auch hier sind die Effekte der Emissionsminderung deutlicher. In der Einteilung nach Klimazonen kommt es unter dem Einfluss der Emissionsminderung zu Abnahmen der Ozon-Mittelwerte von 2 bis 5% mit dem größten Abnahmeeffekt in Süddeutschland. In der Einteilung nach der Bevölkerungsdichte kommt es für die eher ländlichen Klassen 1 und 2 ebenfalls zu Abnahmen in ähnlicher Größenordnung. In den dichter besiedelten Regionen werden die Abnahmeeffekte geringer und in Bevölkerungsklasse 4 (Ballungsgebiete) ergibt sich sogar eine leichte Zunahme der Konzentrationen. Diese Zunahme ist eine direkte Folge der Minderung der NO_x-Emissionen, die in Ballungsgebieten be-

sonders hoch ist. Durch das verminderte Angebot an frisch emittierten Stickoxiden wird lokal weniger Ozon durch NO abgebaut, d.h. die NO_x-Emissionsminderung führt zu einer Abschwächung des Titrationseffekts.

Tabelle 24: 30-jährige O₃-Mittelwerte April bis September jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen > 52.25° Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen < 52.25° und > 50.25° Breite), in Süddeutschland (alle Zellen < 50.25° Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005, Lauf RCP8.5 2021–2050 mit Emissionen 2005 und Emissionen 2030.

O ₃ , µg/m ³	EHIST, E2005	RCP8.5, E2005	RCP8.5, E2030
Deutschland	62.6	62.2	60.8
Norddeutschland	60.2	59.5	58.7
Mitteldeutschland	61.4	60.8	60.3
Süddeutschland	66.3	66.2	63.2
BVK1	63.6	63.1	61.1
BVK2	62.6	62.1	60.9
BVK3	59.9	59.4	59.5
BVK4	57.0	56.4	58.0

Die Tabelle 25 zeigt die identische Auswertung für die mittleren Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Stundenmittel. Auch bei dieser Größe ist das reine Klimasignal deutlich geringer als das kombinierte Klima- und Emissionssignal. Während sich die Mittelwerte des Projektionszeitraums durch den meteorologischen Klimaeffekt kaum verändern, führt die Hinzufügung der Emissionsminderung zu Abnahmen der Konzentrationen im Bereich von 4-8%. Auch in den Ballungsgebieten nehmen die Maxima der 8-Stundenmittel ab, da diese Maxima überwiegend aus den Tageswerten gebildet werden, die wegen der photochemischen Aktivität während der Einstrahlungsstunden weniger vom Titrationseffekt betroffen sind als die Nachtwerte.

Tabelle 25: 30-jährige O₃-Mittelwerte April bis September der max. tägl. 8-Std-Mittel jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen > 52.25° Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen < 52.25° und > 50.25° Breite), in Süddeutschland (alle Zellen < 50.25° Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005, Lauf RCP8.5 2021–2050 mit Emissionen 2005 und Emissionen 2030.

O ₃ , µg/m ³	EHIST, E2005	RCP8.5, E2005	RCP8.5, E2030
Deutschland	82.8	82.5	77.6
Norddeutschland	79.6	79.0	75.4
Mitteldeutschland	81.5	81.1	77.1
Süddeutschland	86.9	87.1	80.0
BVK1	82.5	82.3	77.2
BVK2	83.2	82.9	78.0
BVK3	82.6	82.3	78.2
BVK4	81.6	81.2	78.4

Die im Vergleich zum Klimaeffekt deutlich stärkeren Auswirkungen der Emissionsminderung auf die prognostizierten Konzentrationsverteilungen zeigen auch die mittleren Auswertungen in Form der Box-Whisker-Plots (Abbildung 122 und Abbildung 123) und die gleitenden 5-Jahresmittelwerte (Abbildung 124).

Abbildung 122: Spannweite der 30-jährigen Ozonmittel April bis September 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie mit Emission 2005) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie mit Emission 2005 und Emission 2030). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume).

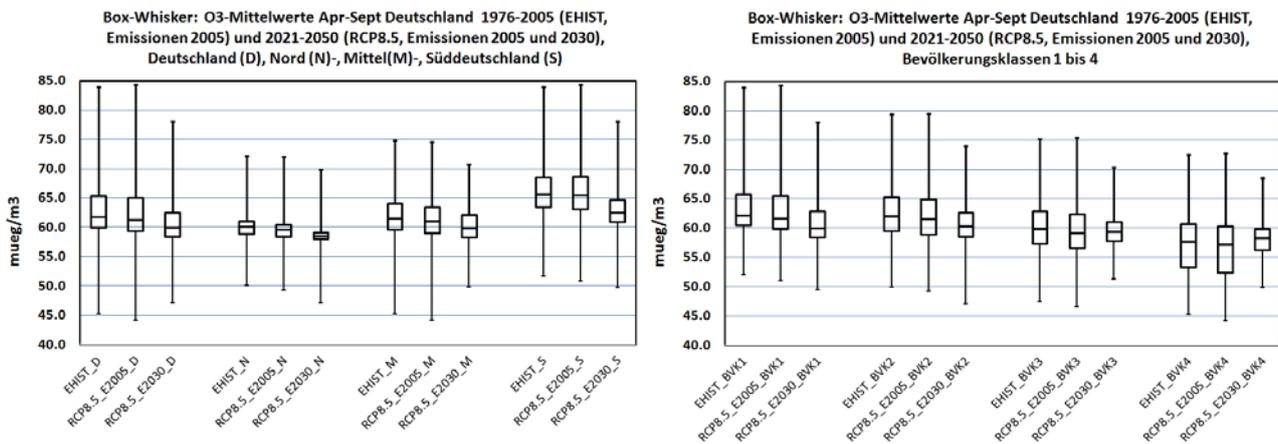


Abbildung 123: Spannweite der 30-jährigen Mittel der max. tägl. 8-Std-Mittel, April bis September 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie mit Emission 2005) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie mit Emission 2005 und Emission 2030). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume).

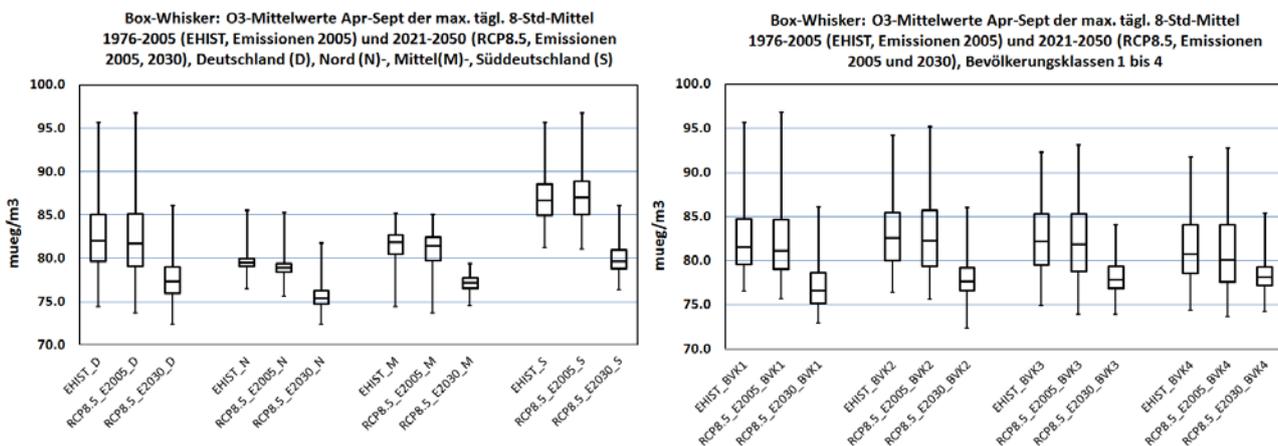
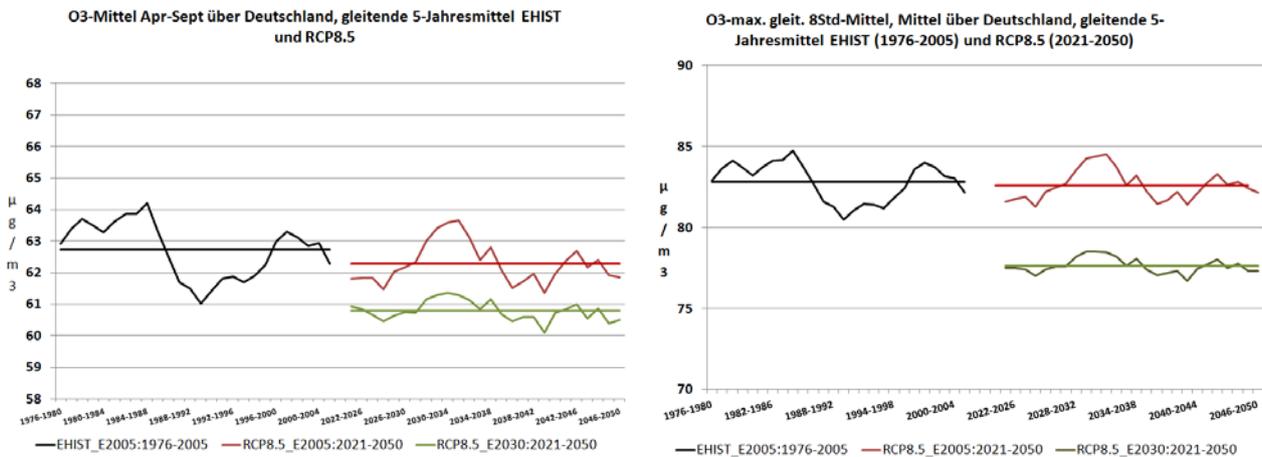


Abbildung 124: Gleitende 5-Jahresmittelwerte gemittelt über Deutschland. 1976–2005 (EHIST mit Emissionen 2005) und 2021–2050 (RCP8.5 mit Emissionen 2005 und Emissionen 2030). Links: Ozonmittelwert April bis September, rechts maximaler tägliches gleitendes 8-Std.-Mittel.



In Tabelle 26 ist die Auswertung der SOMO35-Werte zusammengestellt. Während das rein meteorologische Klimasignal nur zu geringen Änderungen der SOMO35-Werte führt (ansteigende flächengemittelte Abnahmen von geringen Werten in Süddeutschland bis zu knapp 5% in Norddeutschland, lokal aber auch Zunahmen in Süddeutschland, siehe Abbildung 106) kommt es mit dem Emissionssignal überall in Deutschland zu Abnahmen im Bereich von 15 bis 25%. Ähnliches gilt auch für die AOT40-Werte, die durch das rein meteorologische Klimasignal im 30-jährigen Mittel und flächengemittelt nur gering beeinflusst werden, unter dem Einfluss der Emissionsminderung aber stark abnehmen (-45 bis knapp -60%, siehe Tabelle 27).

Tabelle 26: 30-jährige O₃-Mittelwerte SOMO35 jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen > 52.25° Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen < 52.25° und > 50.25° Breite), in Süddeutschland (alle Zellen < 50.25° Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005, Lauf RCP8.5 2021–2050 mit Emissionen 2005 und Emissionen 2030.

O ₃ , µg/m ³ T	EHIST, E2005	RCP8.5, E2005	RCP8.5, E2030
Deutschland	3308	3226	2483
Norddeutschland	2732	2607	2097
Mitteldeutschland	3069	2964	2368
Süddeutschland	4074	4054	2950
BVK1	3290	3202	2436
BVK2	3365	3288	2533
BVK3	3229	3158	2508
BVK4	3055	2981	2509

Tabelle 27: 30-jährige O₃-Mittelwerte AOT40 für Vegetation jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen > 52.25° Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen < 52.25° und > 50.25° Breite), in Süddeutschland (alle Zellen < 50.25° Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005, Lauf RCP8.5 2021–2050 mit Emissionen 2005 und Emissionen 2030.

O ₃ , µg/m ³ h	EHIST, E2005	RCP8.5, E2005	RCP8.5, E2030
Deutschland	8197	8126	3573
Norddeutschland	6285	6289	2990
Mitteldeutschland	7642	7466	3401
Süddeutschland	10497	10464	4276
BVK1	7850	7819	3318
BVK2	8527	8416	3720
BVK3	8611	8496	4065
BVK4	8568	8459	4533

Die einzigen Auswertegrößen, die eine klare positive Reaktion auf das meteorologische Klimasignal zeigen, sind die Anzahl der Überschreitungstage bzw. die Ozon-Überschreitungssumme (Summe der Differenzen der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel > 120 µg/m³ und dem Schwellenwert 120 µg/m³). Wie schon in Kapitel 4.5.1 gezeigt wurde, führt der reine Klimaeffekt zu Zunahmen der Überschreitungssummen im Bereich von 30 bis 70%. Die Emissionsminderung hebt die durch das Klimasignal hervorgerufene Zunahme aber komplett auf und reduziert die Überschreitungssummen auf sehr geringe Werte (Tabelle 28). Dies bedeutet, dass es trotz des positiven Klimasignals bei der Umsetzung der prognostizierten Emissionsminderungen kaum noch zu Überschreitungen des Schwellenwerts von 120 µg/m³ für das maximale gleitende 8-Stundenmittel kommen würde.

Tabelle 28: 30-jährige Mittel der O₃ Überschreitungssumme (Summe der Differenzen der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel > 120 µg/m³ und dem Schwellenwert 120 µg/m³) jeweils im Mittel in Deutschland, in Norddeutschland (alle Zellen > 52.25° Breite), in Mitteldeutschland (alle Zellen < 52.25° und > 50.25° Breite), in Süddeutschland (alle Zellen < 50.25° Breite) und in den Zellen der Bevölkerungsklassen 1 bis 4. Lauf EHIST 1976–2005 mit Emissionen 2005, Lauf RCP8.5 2021–2050 mit Emissionen 2005 und Emissionen 2030.

O ₃ , µg/m ³	EHIST, E2005	RCP8.5, E2005	RCP8.5, E2030
Deutschland	24.0	36.9	1.0
Norddeutschland	16.3	24.2	0.5
Mitteldeutschland	22.9	30.5	1.2
Süddeutschland	32.0	55.1	0.9
BVK1	18.0	28.7	0.4
BVK2	27.5	41.8	1.1
BVK3	36.9	55.4	2.3
BVK4	44.3	64.3	4.4

In Abbildung 125 bis Abbildung 127 sind für SOMO35, AOT40 und die Ozon-Überschreitungssumme die Spannweite der berechneten Werte für die verschiedenen Szenarien in Form von Box-Whisker-Plots zusammengestellt. Abbildung 128 zeigt die entsprechenden gleitenden 5-Jahresmittelwerte.

Die Häufigkeit der Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Std.-Mittel > 120 µg/m³ in Klassen zu 10 µg/m³ gemittelt über den Zeitraum April-September 1976–2005 und 2021–2050 zeigt die Abbildung 129 für Deutschland. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen des Referenzlaufes 1976–2005 und des Zukunftslaufes 2021–2050 mit den Emissionen 2005 sind gering. Erst die Berücksichtigung

der prognostizierten Emissionsminderung bis 2030 führt zu einer deutlichen Veränderung der Häufigkeitsverteilung. Die Häufigkeiten in den sehr niedrigen und in den sehr hohen Klassen nehmen ab während die Häufigkeiten in den mittleren Klassen zunehmen.

Die Abbildung 130 zeigt nur den oberen Teil der Verteilung in Form einer Summenhäufigkeit für alle Werte > 120 µg/m³. Die Häufigkeit der Überschreitungen des Schwellenwerts von 120 µg/m³ entspricht dem mittleren Jahresanteil der Überschreitungstage. In dieser Darstellung zeigt sich die schon diskutierte Zunahme der Häufigkeiten > 120 µg/m³ als Folge des meteorologischen Klimasignals. Diese Zunahme wird dann aber bei weitem kompensiert durch die Verminderung der Ozonspitzenwerte als Folge der prognostizierten Emissionsminderung. Zusätzlich werden in der Abbildung die Summenhäufigkeiten des Evaluierungslaufes CCLM_ERA für den Zeitraum 1976 bis 2005 gezeigt. Wie in Kapitel 4.3.4 bereits diskutiert, ist das photochemische Oxidantienbildungspotenzial der Evaluierungsmeteorologie deutlich höher als das der prognostischen EHIST-Meteorologie, was sich klar in der sehr viel höheren Häufigkeit von 8-Stundenmitteln > 120 µg/m³ ausdrückt. Dieser Umstand muss bei der Bewertung aller Ergebnisse berücksichtigt werden.

Abbildung 125: Spannweite der 30-jährigen Mittel der O₃ SOMO35-Werte 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie mit Emission 2005) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie mit Emission 2005 und Emission 2030). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume).

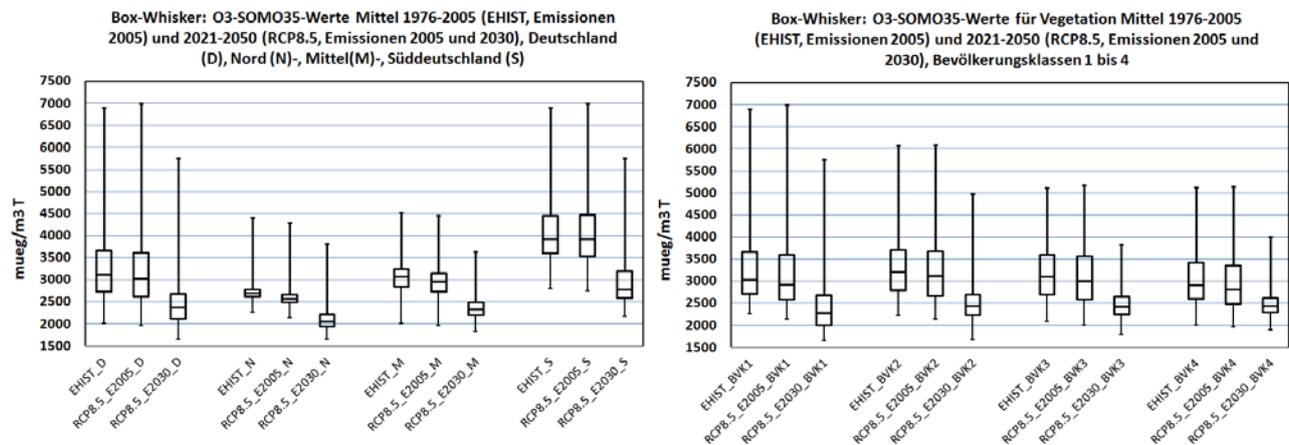


Abbildung 126: Spannweite der 30-jährigen Mittel der AOT40-Werte für Vegetation 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie mit Emission 2005) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie mit Emission 2005 und Emission 2030). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume).

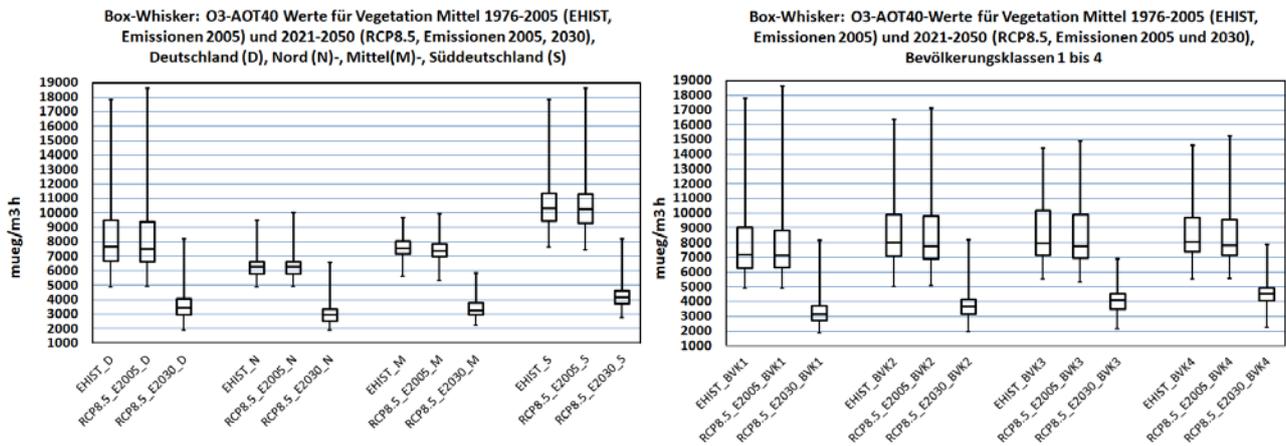


Abbildung 127: Spannweite der 30-jährigen Mittel der O₃ Überschreitungssumme (Summe der Differenzen der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel > 120 µg/m³ und dem Schwellenwert 120 µg/m³). 1976–2005 (CCLM_EHIST-Meteorologie mit Emission 2005) und 2021–2050 (CCLM_RCP85-Meteorologie mit Emission 2005 und Emission 2030). Dargestellt sind der kleinste und der größte berechnete Wert, das 1. Quartil (Boxunterkante), der Median, und das 3. Quartil (Boxoberkante) der Rasterauswertung für den Deutschland-Lauf. Links: Alle Zellen Deutschland (D), Alle Zellen nördlich von 52.25° Breite (N), alle Zellen südlich von 52.25° Breite und nördlich von 50.25° Breite (M) und alle Zellen südlich von 50.25° Breite (S). Rechts: Bevölkerungsklassen 1 (ländlich) bis 4 (Ballungsräume).

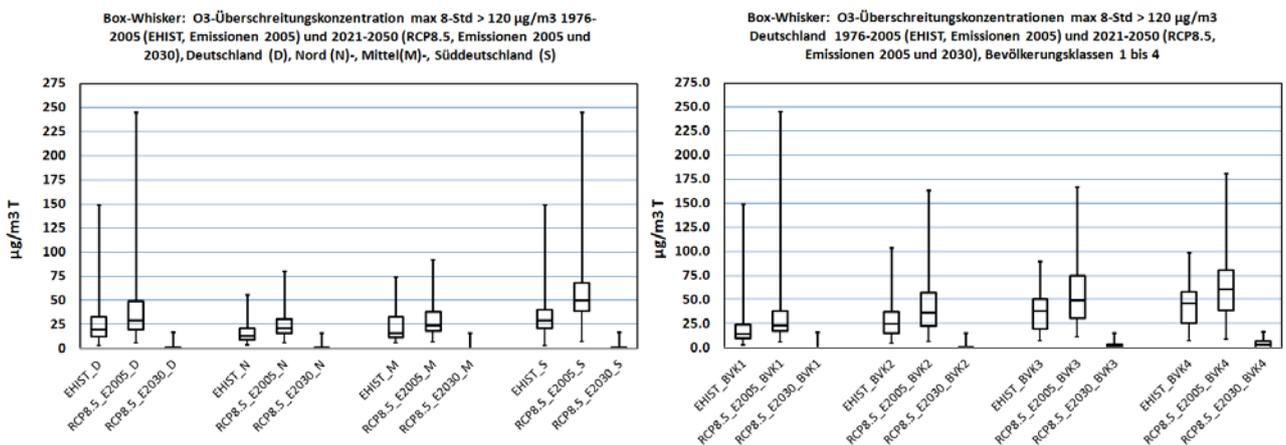


Abbildung 128: Gleitende 5 Jahresmittelwerte gemittelt über Deutschland. 1976–2005 (EHIST mit Emission 2005) und 2021–2050 (RCP8.5 mit Emission 2005 und Emission 2030). Links: SOMO35, Mitte: AOT40 für Vegetation, Rechts: Mittlere Summe der Überschreitungen eines max. tägl. gleitender 8-Std-Mittel > 120 µg/m³

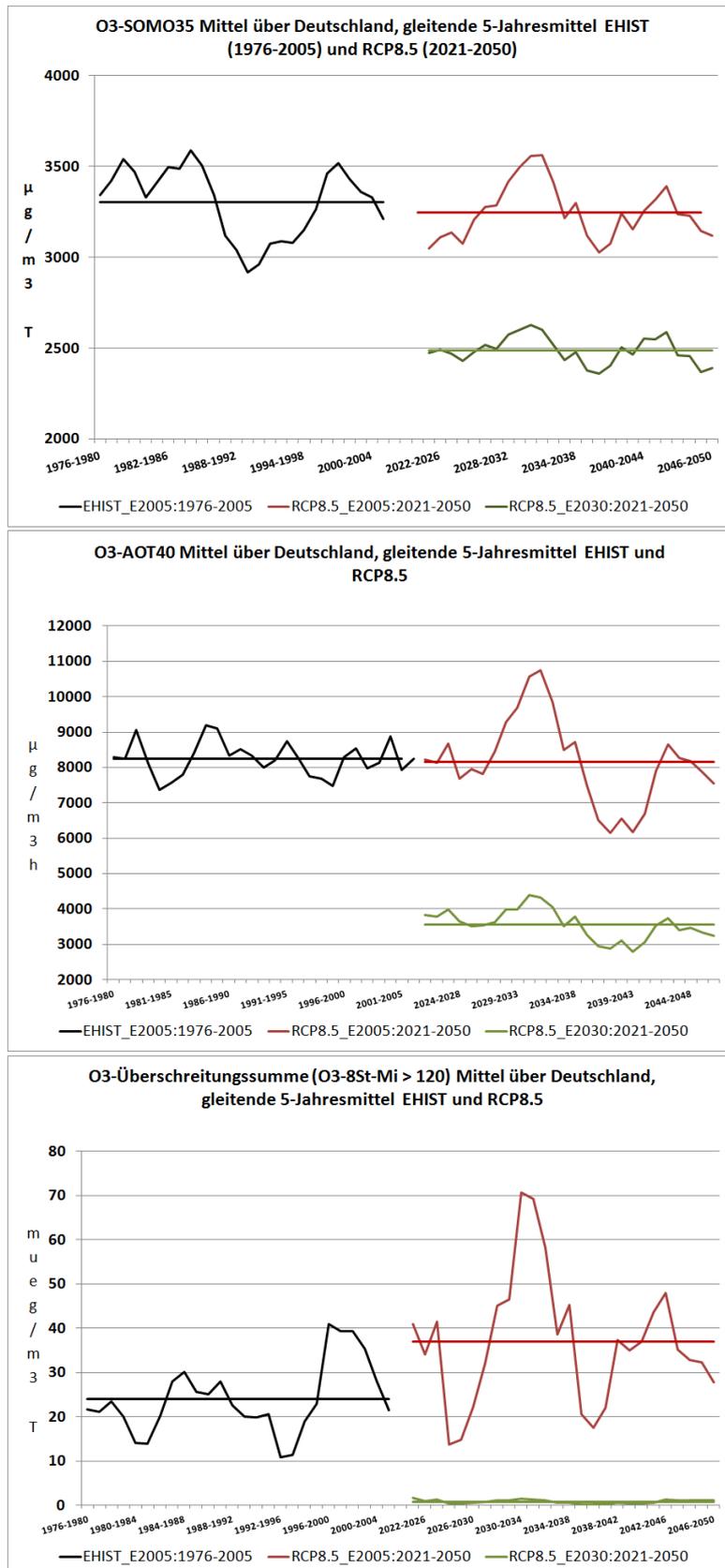


Abbildung 129: Auftrittshäufigkeit der maximalen täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel > 120 µg/m³ in Klassen zu 10 µg/m³ gemittelt über den Zeitraum April-September, 1976–2005 (EHIST mit Emission 2005) und 2021–2050 (RCP8.5 mit Emission 2005 und Emission 2030). Mittel über Deutschland.

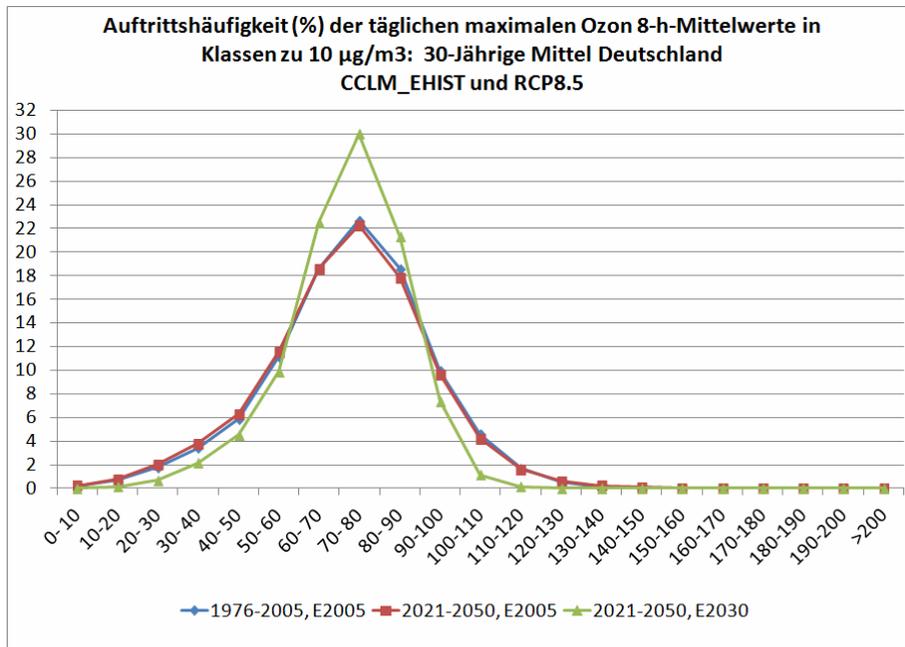
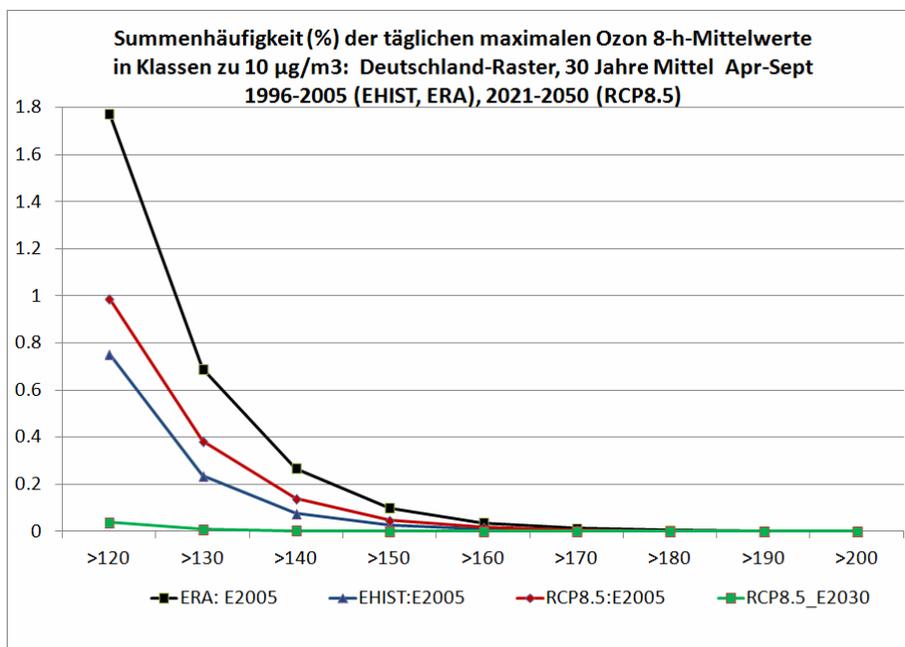


Abbildung 130: Summenhäufigkeit (%) der maximalen täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel > 120 µg/m³ gemittelt über den Zeitraum April-September, 1976–2005 (ERA und EHIST mit Emission 2005) und 2021–2050 (RCP8.5 mit Emission 2005 und Emission 2030) . Mittel über Deutschland.



4.6 Diskussion der Ergebnisse der Chemie-Transport-Modellierung

Ein zentrales Ziel der Untersuchungen im Projekt KLENOS war die chemische Modellierung und Bewertung des Einflusses von klimatischen sowie energiepolitischen Änderungen auf die PM10- und

Ozon-Luftqualität in Deutschland. Dazu wurde das Chemie-Transport-Modell REM-CALGRID mit meteorologischen Datensätzen des Regionalen Klimamodells COSMO-CLM gekoppelt und zur Simulation der Luftschadstoffentwicklung unter dem Einfluss des Klimawandels und energiepolitischer Änderungen (Emissionsszenarien) für eine 30-jährige Vergangenheit- (1976–2005) sowie eine 30-jährige Zukunftsperiode (2021–2050) angewendet.

Der eigentlichen Projektion der Luftschadstoffentwicklung vorgeschaltet wurden Evaluierungsläufe für den Zeitraum 1976 bis 2005. Es wurde untersucht, wie weit sich die Luftqualitätsberechnungen, die auf dem mit Reanalysedaten angetriebenen CCLM-Modelllauf (CCLM_ERA) beruhen von denjenigen unterscheiden, die mit dem von ECHAM6 angetriebenen Modelllauf (CCLM_EHIST) erstellt wurden. Es zeigte sich, dass die CCLM_EHIST-Meteorologie das Ozonbildungspotenzial im Vergleich zu der Evaluierungsmeteorologie CCLM_ERA unterschätzt, d.h. es wird weniger Ozon gebildet (Kapitel 4.4). Bei den NO₂- und den PM₁₀-Konzentrationen liefert die CCLM_EHIST-Meteorologie ebenfalls etwas geringere Konzentrationen als die CCLM_ERA-Meteorologie. Eine Analyse der meteorologischen Daten ergab, dass sowohl CCLM_ERA als auch CCLM_EHIST die beobachteten Niederschläge im Zeitraum 1976 bis 2005 für weite Gebiete Europas überschätzten, CCLM_EHIST dabei aber wesentlich höhere positive Abweichungen aufweist als CCLM_ERA (vgl. Kapitel 3.3.1.2). Auch die monatlichen Mitteltemperaturen im Sommer werden von beiden Meteorologien unterschätzt, wobei die Unterschätzung in Deutschland bei der Meteorologie DE_CCLM_EHIST im Juli und August stärker ist und über 2 K beträgt (Kapitel 3.3.2.1). Beide Faktoren, stärkere Überschätzung des Niederschlags und stärkere Unterschätzung der sommerlichen Temperaturen tragen dazu bei, dass die CCLM_EHIST-Meteorologie ein geringeres Ozonbildungspotential beinhaltet als die CCLM_ERA-Meteorologie. Solche Diskrepanzen zwischen Luftqualitätsberechnungen basierend auf meteorologischen Reanalyse-Daten und Klimadaten wurde auch von Colette et al. (2013) und Manders et al. (2012) festgestellt.

Das rein meteorologisch bedingte Klimasignal der Luftschadstoffentwicklung wurde ermittelt durch den Vergleich der RCG-Ergebnisse für den Zeitraum 1976–2005 berechnet auf Basis der CCLM_EHIST-Meteorologie mit den Ergebnissen für den Zeitraum 2021–2050 berechnet mit der so genannten CCLM_RCP85-Meteorologie (siehe dazu Kap. 2.2.1). Die Auswirkungen einer Klimaveränderung (projiziert vom CCLM für den Zeitraum 2021–2050 in Europa und Deutschland) auf die Konzentrationen von PM₁₀ und NO₂ sind gering. Dies gilt in eingeschränktem Maße auch für Ozon, allerdings nicht für die Ozon-Auswertegrößen, die auf die höheren Ozonbereiche abheben. Abbildung 131 zeigt dazu die relativen Veränderungen der hier betrachteten Auswertegrößen im Projektionszeitraum 2021–2050 bezogen auf den Referenzzeitraum 1976–2005. Die für alle berechneten Jahre als Eingangsgröße verwendeten Emissionen für den Referenzzeitraum 1976 bis 2005 sowie für den Projektionszeitraum 2021 bis 2050 sind diejenigen des Jahres 2005, so dass die Änderungen vollständig auf die sich ändernden klimatischen Bedingungen zurückzuführen sind. Die Änderung der PM₁₀- und der NO₂-Jahresmittelwerte bewegen sich im 1 % bis 3 %-Bereich. Dies gilt für die ganz Deutschland umfassende Auswertung (Abbildung 131) als auch für die Auswertung nach Bevölkerungsklassen (Abbildung 132).

Auch die Ozonmittelwerte April-September, die Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel, die AOT₄₀-Werte für Vegetation und die SOMO₃₅-Werte ändern sich in der über 30 Jahre und flächengemittelten Auswertung für Deutschland nur wenig (Abbildung 131). Dies gilt auch für die Unterteilung Deutschlands in die drei klimatischen Zonen Norddeutschland, Mitteldeutschland und Süddeutschland (Abbildung 133). Allerdings hat die flächenmäßige Auswertung gezeigt, dass es lokal zu größeren Änderungen kommen kann als durch die zusammenfassende Auswertung impliziert wird. In Teilen von Brandenburg und Sachsen sowie in Südbayern erhöhen sich die AOT₄₀-Werte im Projektionszeitraum im Vergleich zum Referenzzeitraum um bis zu 10% (Abbildung 109). Ähnliches gilt für die zeitliche Mittelung. Selbst wenn sich im 30-jährigen Mittel kaum etwas ändert, so zeigt doch die Auswertung der gleitenden 5-Jahresmittel in einzelnen Perioden des Projektionszeitraums

deutlich höhere AOT40-Werte als in vergleichbaren Perioden des Referenzzeitraumes (Abbildung 118).

Bei den Ozon-Überschreitungstagen (Tage mit einem max. gleitenden 8-Std-Mittel $> 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und den Ozon-Überschreitungssummen (Summe der Differenzen der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel $> 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und dem Schwellenwert $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$) zeigt sich der Klimaeffekt bereits deutlich in der zeitlich und räumlich hoch aggregierten Auswertung (Abbildung 131). Nach der Projektion steigt die Anzahl der Überschreitungstage im 30-jährigen Mittel und im Mittel über die Fläche Deutschlands im Vergleich zum Referenzzeitraum um über 30 %. Die Überschreitungssumme, die nicht nur berücksichtigt, ob der Schwellenwert von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ überschritten wird, sondern zusätzlich auch um wie viel er überschritten wird, erhöht sich sogar um mehr als 50 %. Auch bei dieser Größe fallen die relativen Änderungen in Süddeutschland größer aus als in den anderen beiden Klimaregionen. Lokal kann es sogar zu Erhöhungen um 100 bis 200 % kommen (Abbildung 112). Generell deckt sich der hier berechnete Einfluss der zu erwartenden Klimaänderung auf die Ozonkonzentrationen mit den Ergebnissen anderer Studien, die im Bereich Deutschland ebenfalls eine geringe Änderung der mittleren Ozonbelastung mit einer Tendenz zur Ozonabnahme Richtung Norden berechnen (Langner et al. 2012a, 2012b; Colette et al. 2013).

Bei den vorliegenden Auswertungen muss berücksichtigt werden, dass die mit dem Globalmodell ECHAM6 angetriebenen CCLM-Meteorologien, die zur Berechnung der Konzentrationen im Referenzzeitraum und im Projektionszeitraum verwendet wurden, ein geringeres Oxidantienbildungspotential aufweisen als die Evaluierungsmeteorologie CCLM_ERA. Die Auswertungen haben auch gezeigt, dass der Klimaeffekt sich in Regionen mit einem höheren Ozonbildungspotenzial (Süddeutschland im Vergleich zu Mittel- und Norddeutschland) deutlicher auswirkt als in den anderen Regionen, wenn man Auswertegrößen betrachtet, die auf die hohen Ozonbereiche abheben. Das unterstützt die Annahme, dass der ermittelte Klimaeffekt für Ozon wahrscheinlich insgesamt unterschätzt wird. Eine quantitative Bewertung der Unterschätzung ist aber so unsicher, dass darauf verzichtet werden muss.

Ein weiterer Grund für die geringen Änderungen sind die geringen Temperaturerhöhungen in den betrachteten Zeiträumen. Der meteorologische Vergleich des Kontrolllaufs DE_CCLM_EHIST mit der Klimaprojektion des IPCC Klimaszenarios RCP 8.5 (DE_CCLM_RCP85) zeigt für das langjährige Mittel der Temperatur in Deutschland eine Zunahme um 0.8 K (Flächenmittelwert über Deutschland) mit den stärksten Zunahmen in den Wintermonaten und den schwächsten Zunahmen in den Sommermonaten (Kap. 3.4.2), also gerade in denjenigen Monaten deren Klima die Ozonbildung kontrolliert. Die relativ geringe Temperaturzunahme hängt einerseits vermutlich damit zusammen, dass zwischen dem Referenzzeitraum (1976–2005) und dem Projektionszeitraum (2021–2050) nur 15 Jahre liegen und andererseits die Referenzperiode von 1976–2005 bereits nicht unwesentlich vom Klimawandel beeinflusst ist und somit durch eine signifikante Erwärmung gekennzeichnet ist.

Das kombinierte Klima- und Emissionssignal berücksichtigt neben den rein meteorologisch bedingten Auswirkungen zusätzlich die Auswirkungen der Emissionsänderungen im Zeitraum 2005 bis 2030. In diesem Zeitraum nehmen die Ozonvorläuferemissionen NO_x und reaktive Kohlenwasserstoffe in Deutschland um fast 50 % bzw. 15 % ab. Die projizierte Abnahme der PM_{10} -Emissionen ist mit knapp 11 % geringer.

Die Abbildung 134 zeigt dazu die relativen Veränderungen der hier betrachteten Auswertegrößen im Projektionszeitraum 2021–2050 bezogen auf den Referenzzeitraum 1976–2005. Die im Referenzzeitraum verwendeten Emissionen sind diejenigen des Jahres 2005, die Emissionen des Projektionszeitraums diejenigen des Jahres 2030. Die Änderungen geben damit das kombinierte Klima- und Emissionssignal wider. Die Abnahme der Emissionen führt bei allen betrachteten Auswertegrößen zu Änderungen, die die durch das reine Klimasignal bewirkten Änderungen (Abbildung 131) überdecken. PM_{10} - und NO_2 -Jahresmittelwerte nehmen jetzt deutlich ab. Dies gilt für die ganz Deutschland umfassende Auswertung (Abbildung 134) als auch für die Auswertung nach Bevölkerungsklassen

(Abbildung 135). Auch bei den Ozonauswertegrößen kommt es unter dem Einfluss der Minderung der Vorläuferemissionen zu Abnahmen, welche die durch das reine Klimasignal bewirkten Zunahmen (Abbildung 131) durchweg aufheben. Die stärksten Abnahmen werden bei den Ozonmetriken berechnet, die auf die hohen Ozonkonzentrationen abheben (Ozon-Überschreitungstage: Tage mit einem max. gleitenden 8-Std-Mittel $> 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Ozon-Überschreitungssummen: Summe der Differenzen der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel $> 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und dem Schwellenwert $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und AOT40-Werte für Vegetation). Auch die mittleren Ozon-Sommerkonzentrationen nehmen nach den Berechnungen im Flächenmittel über Deutschland und auch für die regionalisierte mittlere Auswertung (Abbildung 136) zwischen 2 % und 5 % ab. Diese Ergebnisse stimmen in der Tendenz überein mit anderen Berechnungen. Auch Langner et al. (2012a) und Colette et al. (2013) zeigen, dass die durch ein sich änderndes Klima hervorgerufenen Ozonerhöhungen durch die prognostizierten Emissionsverminderungen in weiten Teilen Mitteleuropas aufgehoben werden. Ein quantitativer Vergleich ist aber nur schwer möglich, da die Berechnungen auf unterschiedlichen Klima- und Emissionsprojektionen sowie unterschiedlichen Projektionshorizonten und Mittelungszeiträumen beruhen.

In dieser Studie wurden für die hemisphärischen Ozonhintergrundkonzentrationen für alle betrachteten Zeiträume dieselben Werte benutzt. Die berechneten Emissionssignale reflektieren damit ausschließlich die durch Änderung der europäischen und deutschen Emissionen bedingten Änderungen der Luftqualität. Für NO_2 und PM_{10} ist eine Annahme konstanter Hintergrundkonzentrationen gerechtfertigt, da diese Stoffe wegen ihrer relativ kurzen Lebenszeit nur geringfügig über große Distanzen transportiert werden. Dies gilt aber nicht für Ozon. Beobachtungen an hemisphärischen Hintergrundstationen zeigen, dass die Hintergrundkonzentrationen von Ozon tendenziell zunehmen (Derwent et al. 2007, Parrish et al. 2009) was auf Ozonbildung durch global steigende Methankonzentrationen und interkontinentale Transportvorgänge zurückgeführt werden kann. Es ist zu erwarten, dass tendenziell ansteigende hemisphärische Ozonkonzentrationen, die in einem europäischen Modellgebiet zu einer Erhöhung der über die Ränder einströmenden Ozonmassen führen, einen Teil der ozonmindernden Wirkung der Emissionsprojektionen aufheben. Langner et al. (2012a) bestimmten in einem numerischen Experiment, in dem die Hintergrundozonkonzentrationen pro Jahr um 0,1 ppb erhöht wurden, eine Abnahme der ozonverringenden Wirkung von Minderungsmaßnahmen auf die Sommermittelwerte um 30 bis 50 %. Allerdings schwächt sich der Trend der beobachteten Ozonzunahme im hemisphärischen Hintergrund gegenwärtig ab (Derwent et al. 2007) was möglicherweise auf die Auswirkungen globaler Minderungsmaßnahmen zurückzuführen ist. Globale Rechnungen zeigen auch, dass die Entwicklung der hemisphärischen Ozonkonzentrationen stark abhängt von den betrachteten globalen Emissionsszenarien (Young et al. 2013, Szopa et al. 2012). Je nach Szenario kann die globale Hintergrundkonzentration langfristig weiter zunehmen oder auch in eine Abnahme umschlagen. Szopa et al. (2012) berechneten für das hier verwendete Szenario RCP8.5 bis 2050 eine Zunahme der troposphärischen Hintergrundkonzentration, für das Szenario RCP2.6, das eine Begrenzung der globalen Temperaturzunahme bis 2100 um 2°C beinhaltet, dagegen eine Abnahme. Dies bedeutet, dass die hier auf Basis des RCP8.5-Szenarios berechneten positiven Auswirkungen einer Emissionsminderung auf die zukünftigen Ozonkonzentrationen durch steigende Hintergrundkonzentrationen abgeschwächt werden. Eine Quantifizierung dieses Effekts ist ohne entsprechende CTM-Berechnungen aber nicht möglich.

Die hier vorgestellten CTM-Berechnungen zu den Auswirkungen eines sich ändernden Klimas auf die Luftqualität in Deutschland können nur als eine erste Abschätzung verstanden werden. Zur Bestimmung eines robusteren Signals sind weitere Arbeiten notwendig. Diese beinhalten auf der meteorologischen Seite eine Verringerung der festgestellten Abweichungen zwischen den beobachteten und in der Kontrollmeteorologie berechneten Niederschlags- und Temperaturfeldern. Diese Abweichungen dürften eine wesentliche Ursache der Diskrepanz zwischen den Ozonbildungspotentialen der mit

Re-analysedaten angetriebenen CCLM-Daten (CCLM_ERA) und den mit Globalmodelldaten angetriebenen CCLM-Daten (CCLM_EHIST, CCLM_RCP85) sein und führen zu einer beträchtlichen Unsicherheit in den hier berechneten klimabedingten Änderungen der Ozonkonzentrationen.

Abbildung 131: 30-jährige Mittelwerte 2021–2050 normiert mit den 30-jährigen Mittelwerten 1976–2005 (=100%). Beide Berechnungen unter den Emissionsbedingungen 2005. Mittlere Auswertung für ganz Deutschland. PM10- und NO₂-Jahresmittelwerte. O₃-Mittelwerte April-September (O₃_Apr-Sept), Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel (O₃_Max8STD), O₃ AOT40-Werte für Vegetation (O₃_AOT40), O₃ SOMO35-Werte (O₃_SOMO35), O₃ Überschreitungstage (O₃_UEBT= Anzahl der Tage mit einem max. gleitend 8-Std-Mittel > 120 µg/m³), O₃ Überschreitungssumme (O₃_DEL120=Summe der Differenzen der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel > 120 µg/m³ und dem Schwellenwert 120 µg/m³).

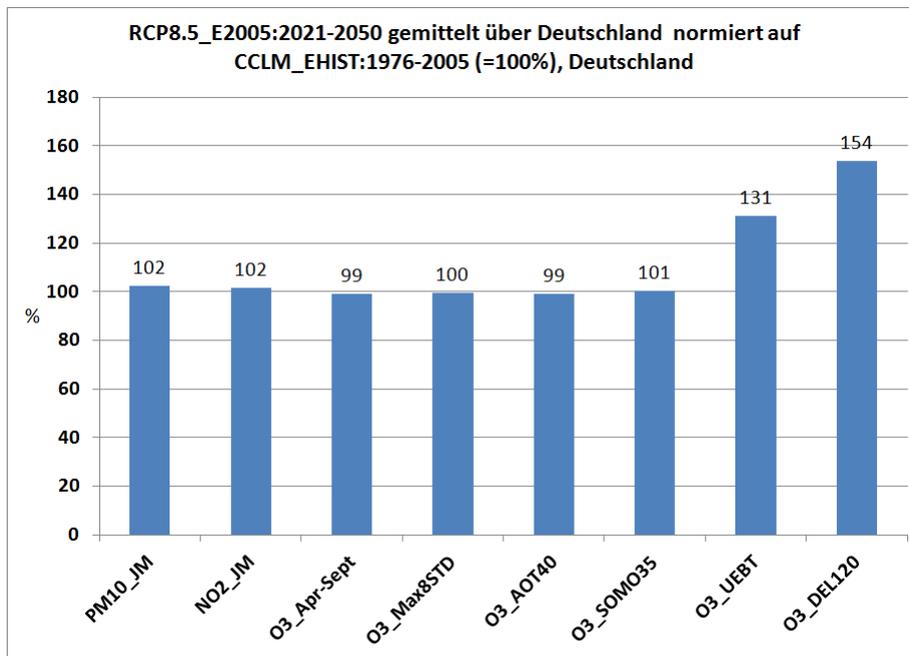


Abbildung 132: 30-jährige Mittelwerte 2021–2050 normiert mit den 30-jährigen Mittelwerten 1976–2005 (=100%). Beide Berechnungen unter den Emissionsbedingungen 2005. Mittlere Auswertung für die Bevölkerungsklassen 1 bis 4. PM10- und NO₂-Jahresmittelwerte

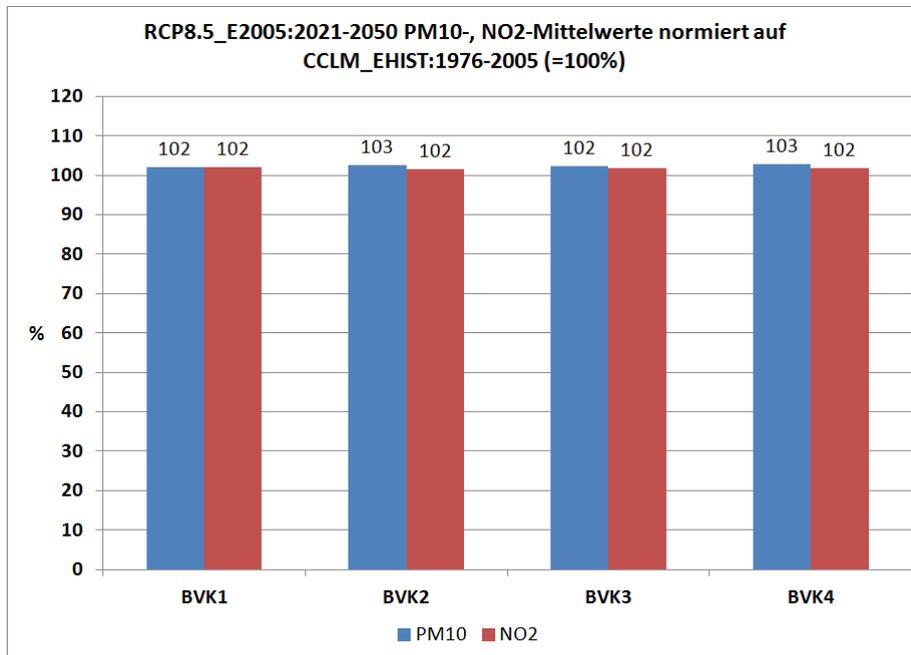


Abbildung 133: 30-jährige Mittelwerte 2021–2050 normiert mit den 30-jährigen Mittelwerten 1976–2005 (=100%). Beide Berechnungen unter den Emissionsbedingungen 2005. Mittlere Auswertung für Norddeutschland, Mitteldeutschland und Süddeutschland. O₃-Mittelwerte April-September (O₃_Apr-Sept), Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel (O₃_Max8STDM), O₃ AOT40-Werte für Vegetation (O₃_AOT40), O₃ SOMO35-Werte (O₃_SOMO35), O₃ Überschreitungstage (O₃_UEBT= Anzahl der Tage mit einem max. gleitend 8-Std-Mittel > 120 µg/m³), O₃ Überschreitungssumme (O₃_DEL120=Summe der Differenzen der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel > 120 µg/m³ und dem Schwellenwert 120 µg/m³).

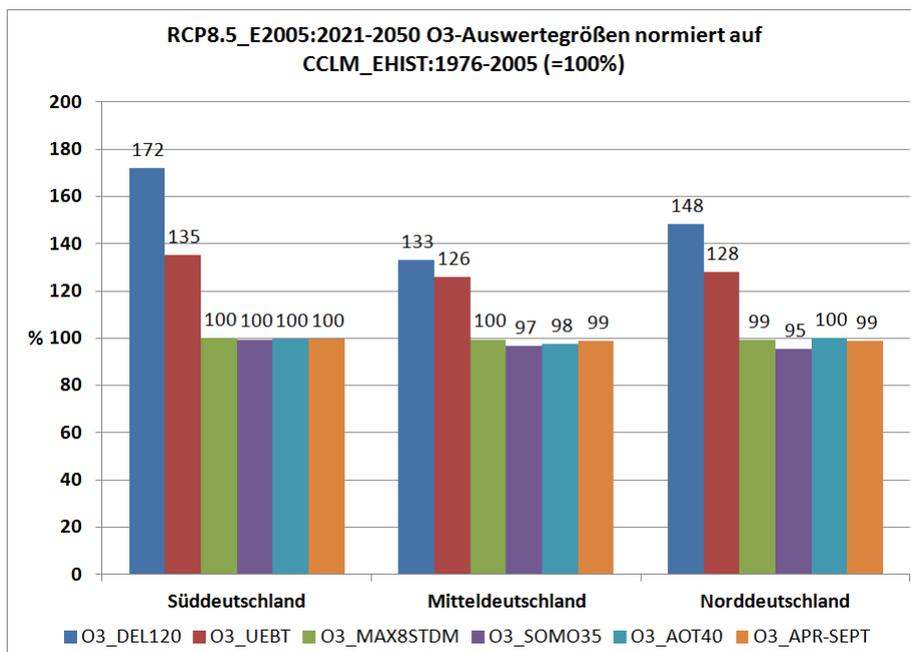


Abbildung 134: 30-jährige Mittelwerte 2021–2050 normiert mit den 30-jährigen Mittelwerten 1976–2005 (=100%). Mittelwerte 2021–2050 unter den Emissionsbedingungen 2030, Mittelwerte 1976–2005 unter den Emissionsbedingungen 2005. Mittlere Auswertung für ganz Deutschland. PM10- und NO₂-Jahresmittelwerte. O₃-Mittelwerte April-September (O3_Apr-Sept), Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel (O3_Max8STD), O3 AOT40-Werte für Vegetation (O3_AOT40), O3 SOMO35-Werte (O3_SOMO35), O3 Überschreitungstage (O3_UEBT= Anzahl der Tage mit einem max. gleitend 8-Std-Mittel > 120 µg/m³), O3 Überschreitungs-summe (O3_DEL120=Summe der Differenzen der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel > 120 µg/m³ und dem Schwellenwert 120 µg/m³).

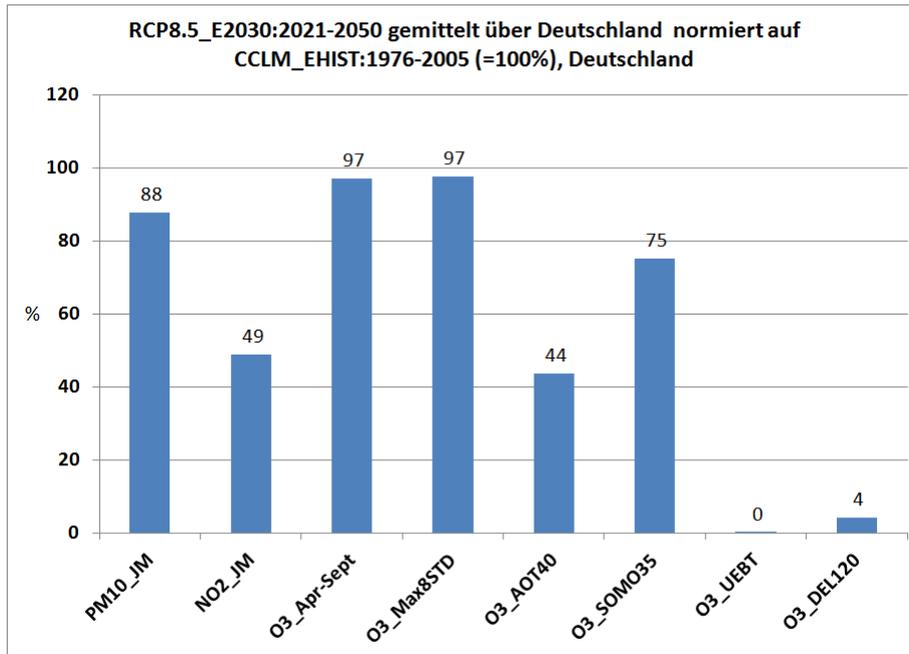


Abbildung 135: 30-jährige Mittelwerte 2021–2050 normiert mit den 30-jährigen Mittelwerten 1976–2005 (=100%). Mittelwerte 2021–2050 unter den Emissionsbedingungen 2030, Mittelwerte 1976–2005 unter den Emissionsbedingungen 2005. Mittlere Auswertung für die Bevölkerungsklassen 1 bis 4. PM10- und NO₂-Jahresmittelwerte

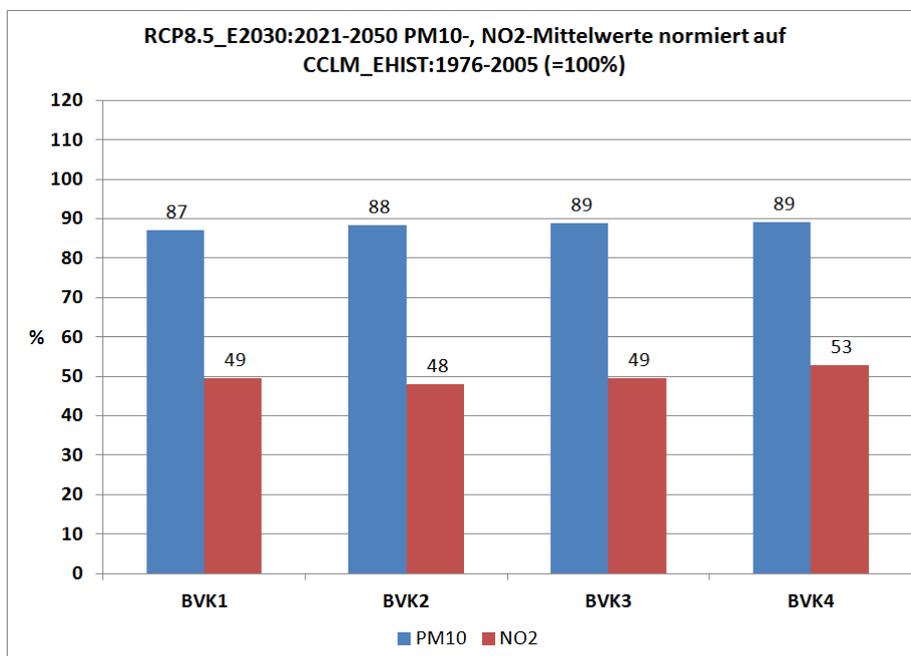
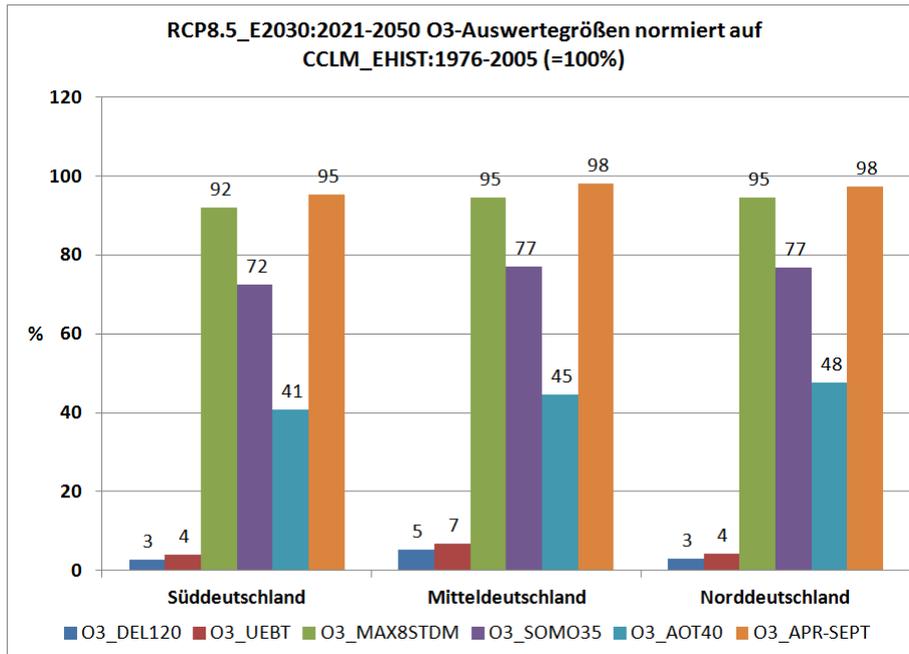


Abbildung 136: 30-jährige Mittelwerte 2021–2050 normiert mit den 30-jährigen Mittelwerten 1976–2005 (=100%). Mittelwerte 2021–2050 unter den Emissionsbedingungen 2030, Mittelwerte 1976–2005 unter den Emissionsbedingungen 2005. Mittlere Auswertung für Norddeutschland, Mitteldeutschland und Süddeutschland. O₃-Mittelwerte April-September (O₃_Apr-Sept), Maxima der täglichen gleitenden Ozon 8-Std-Mittel (O₃_Max8STDM), O₃ AOT40-Werte für Vegetation (O₃_AOT40), O₃ SOMO35-Werte (O₃_SOMO35), O₃ Überschreitungstage (O₃_UEBT= Anzahl der Tage mit einem max. gleitend 8-Std-Mittel > 120 µg/m³), O₃ Überschreitungssumme (O₃_DEL120=Summe der Differenzen der maximalen tägl. gleitenden 8-Std.-Mittel > 120 µg/m³ und dem Schwellenwert 120 µg/m³).



5 Analyse des Zusammenhangs zwischen Wetterlagen und der Überschreitung von Grenz- und Zielwerten für die Luftschadstoffe PM10 sowie Ozon

5.1 Einleitung

Die Weltgesundheitsorganisation schätzt, dass ca. 3,7 Millionen vorzeitige Todesfälle durch Luftverschmutzungen verursacht werden, vor allem in wirtschaftlich schwach entwickelten Ländern und Südostasien (World Health Organization 2014). Insbesondere wird die Rolle von Feinstaub und Ozon unterstrichen, deren aktuell in vielen Städten gemessenen Konzentrationen ein hohes Gesundheitsrisiko für die mehrheitlich in Städten lebende Bevölkerung darstellen. Für Feinstaub, der überwiegend negative Auswirkungen auf das Atmungs- und Herz-Kreislauf-System hat, kann keine Konzentrationsschwelle angegeben werden, unterhalb derer keine nachteiligen Effekte zu erwarten sind. Ozon wirkt sowohl auf die menschliche Gesundheit als auch auf das Pflanzenwachstum schädigend. Beim Menschen führt Ozon zu Atembeschwerden, Entzündungsreaktionen und einer verminderten Lungenfunktion. Die negativen Auswirkungen auf Ökosysteme und Nutzpflanzen werden v. a. durch Blattschäden sichtbar, da Ozon durch die Spaltöffnungen der Blätter aufgenommen wird. Die Folge sind Einbußen bei Ernteerträgen, eine verminderte Qualität landwirtschaftlicher Produkte und Waldschäden.

Um negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt durch zu hohe Feinstaub- und Ozonkonzentrationen vorzubeugen, ist es nötig, die Emissionen von Schadstoffen zu vermeiden oder zu verringern sowie Ziele für die Luftqualität festzulegen. Zu diesem Zweck hat die Europäische Union auf Grundlage der Leitlinien der Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization 2006) u. a. die Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa und den Durchführungsbeschluss 2011/850/EU erlassen. Letzterer regelt den Austausch von Informationen und die Berichterstattung über die Luftqualität. Die Vorgaben der EU wurden in nationales Recht in der 39. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG): Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen umgesetzt. In Tabelle 29 sind die aktuellen Grenz- und Zielwerte für die PM10- und Ozonkonzentrationen aufgelistet. Man beachte, dass der aktuelle Grenzwert für den PM10-Jahresmittelwert in der EU doppelt so hoch ist wie der empfohlene Wert der WHO.

5.2 Ziel und Methodik

Damit überdurchschnittliche Luftverschmutzungen entstehen müssen zwei Kriterien erfüllt sein. Erstens müssen hohe Emissionen auftreten und zweitens mit ungünstigen Wetterverhältnissen zusammentreffen, damit die Akkumulation der Schadstoffe zu einem Überschreiten der geltenden Grenzwerte führt. Diese Ereignisse wurden im Modul 1 näher untersucht, mit dem Ziel einen Zusammenhang zwischen sehr hohen Schadstoffkonzentrationen an PM10 und Ozon in der bodennahen Luftschicht (unabhängig von der Quelle) und den vorherrschenden Wetterlagen nachzuweisen. Dazu wurden aus langen Messreihen Tage mit Überschreitungen der Grenz- und Zielwerte für PM10 und Ozon selektiert. Für PM10 wurde der Tagesmittelgrenzwert von 50 mg/m^3 und für Ozon der Grenzwert von $120 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ für das Tagesmaximum der gleitenden 8h-Mittel verwendet. Jeder Tag an dem diese Grenzwerte an einer Station überschritten wurden, wird als Überschreitungstag gewertet, um ein ausreichend großes Datenkollektiv zu erhalten. Dieser Gruppe wurden die deutschlandweit geltenden objektiven Wetterlagenklassen des DWD zugewiesen. Der DWD weist jedem Tag eine objektive Wetterlageklasse zu. Somit kann auch jedem Überschreitungstag eine Wetterlagenklasse zugeordnet werden. Dadurch kann eine Verbindung zwischen hohen Schadstoffkonzentrationen und typischen Wetterlagen hergestellt werden. Unter der Annahme der Eineindeutigkeit lassen sich im Umkehrschluss aus langen Klimasimulationen die Auftretenshäufigkeit dieser Wetterlagen in der Zukunft

und damit auch das Auftreten von Überschreitungstagen für PM10 und Ozon abschätzen. Folgende Arbeitsschritte wurden durchgeführt:

- ▶ Tage mit Überschreitungen des PM10-Grenz- und Ozonzielwertes herausfiltern
- ▶ Überschreitungstagen objektive Wetterlagenklassen zuordnen
- ▶ Überschreitungswetterlagen identifizieren
- ▶ zukünftiges Auftreten der Überschreitungswetterlagen mit Klimasimulationen analysieren
- ▶ Änderungssignal der Überschreitungswetterlagen und damit Tendenz der Häufigkeit von Überschreitungstagen für PM10 und Ozon bestimmen

Mit den Untersuchungen sollen folgende Fragen beantwortet werden:

1. Gibt es einen Zusammenhang zwischen dem Auftreten bestimmter Wetterlagen und der Überschreitung der Schwellenwerte für Feinstaub und Ozon?
2. Wie ändert sich die zukünftige Auftretenshäufigkeit der „Überschreitungswetterlagen“ und Überschreitungstage?

Tabelle 29: PM10 Grenzwerte und Ozonzielwerte (39. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG): Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 02.08.2010 (BGBl. I S. 1065)

Grenz-/Zielwert	Zeitraum/ Berechnungsvorschrift	Ziel	Empfehlung der WHO
PM10 Grenzwerte			
50 µg/m ³	Tagesmittel	Schutz der menschlichen Gesundheit (höchstens 35 Überschreitungstage im Kalenderjahr)	50 µg/m ³ an höchstens 3 Tagen im Jahr
40 µg/m ³	Jahresmittel	Schutz der menschlichen Gesundheit	20 µg/m ³
Ozon Zielwerte			
180 µg/m ³	Stundenmittel	Informationsschwelle	
240 µg/m ³	Stundenmittel	Alarmschwelle	
120 µg/m ³	Tagesmaximum der gleitenden 8h-Mittel (3-Jahresmittel)	Schutz der menschlichen Gesundheit – ab 2010 höchstens 25 Überschreitungstage im Kalenderjahr (langfristiges Ziel: keine Überschreitungen, ohne 3-Jahres-Mittelung)	100 µg/m ³ keine Überschreitung, ohne 3-Jahres-Mittelung
18.000 µg/m ³	AOT40 ⁴ , Summe aller Stundenmittel von Mai–Juli, 8–20	Schutz der Vegetation – ab 2010 so weit wie möglich einzuhalten	

⁴ Accumulated Ozone Exposure over a threshold of 40 ppb; 40 ppb entsprechen ca. 80 µg/m³

Uhr (Differenz zwischen Messwert und 80 µg/m³, 5-Jahresmittel) (langfristiges Ziel: 6.000 µg/m³, ohne 5-Jahres-Mittelung)

5.3 Datengrundlage

5.3.1 Daten zur Luftqualität

An mehr als 700 Messstationen in Deutschland überwachen die Länder und der Bund kontinuierlich die Qualität der Außenluft. Zum Messumfang gehören neben Ozon (O₃), Feinstaub (PM10) und Stickoxiden (NO und NO₂) eine Vielzahl weiterer Stoffe, z. B. organische Verbindungen und Schwermetalle im Feinstaub. Die Messstationen werden entsprechend der EU-Richtlinie 2011/850/EU nach zwei Merkmalen klassifiziert, der Emissionsquelle (Stationstyp: Verkehr, Industrie, Hintergrund) und der Lage der Station (Stationsumgebung, Tabelle 30). Diese Klassen wurden vom Umweltbundesamt in drei Stationsregime zusammengefasst:

- verkehrsnah: alle Stationen des Stationstyps Verkehr
- städtischer Hintergrund: alle Stationen des Stationstyps Hintergrund und der Stationsumgebung städtisch oder vorstädtisch
- ländlicher Hintergrund: alle Stationen des Stationstyps Hintergrund und weder Stationsumgebung städtisch noch vorstädtisch

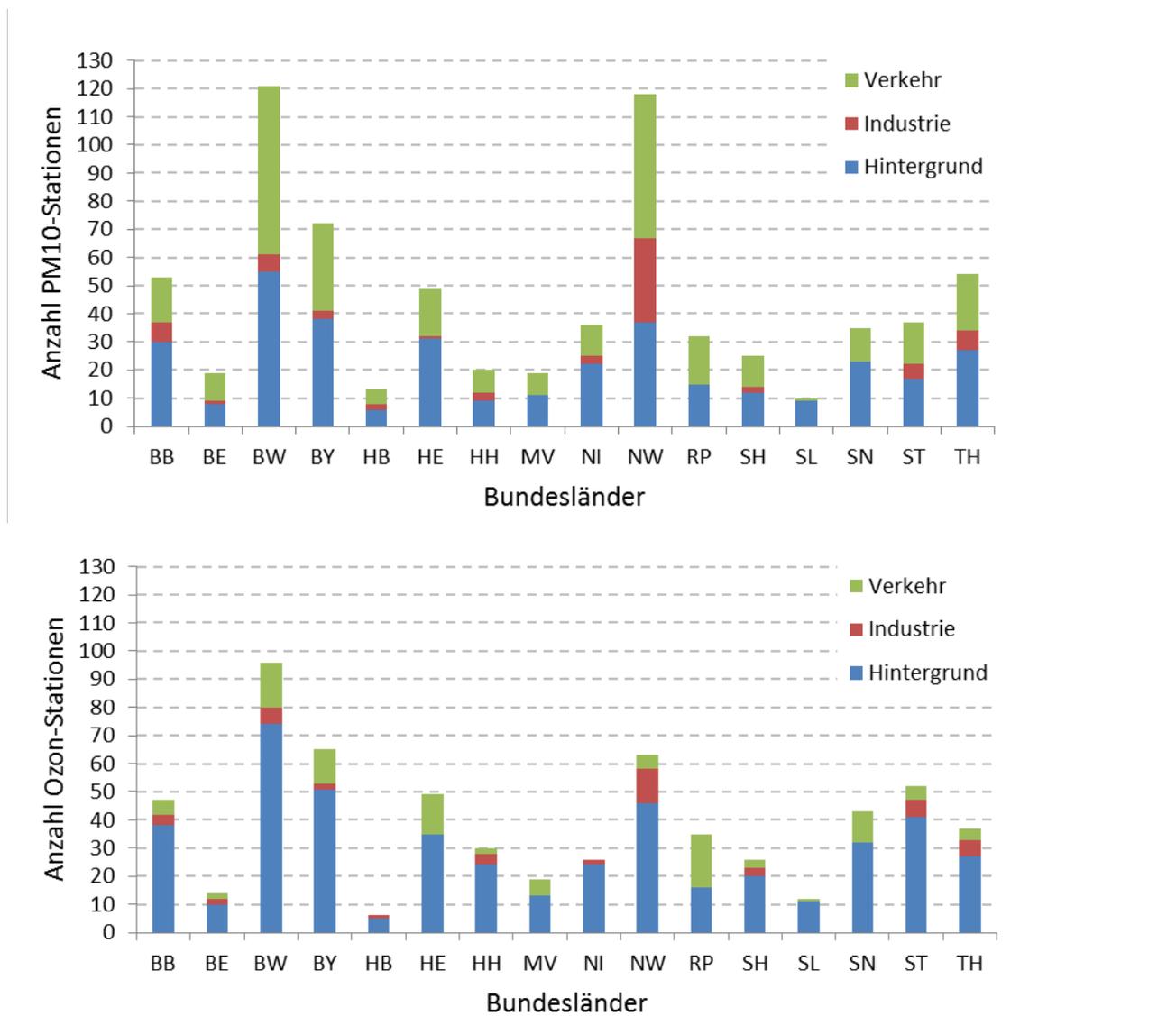
Tabelle 30: Verwendete Klassifikation der Stationsumgebung nach RL 2011/850/EU sowie die entsprechenden Kriterien nach Anhang VIII Richtlinie 2008/50/EG (Ozon) (siehe auch Handbuch „Luftqualitätsdaten- und Informationsaustausch in Deutschland“, Umweltbundesamt II 4.2, Version V3.0)

Stationsumgebung nach Richtlinie 2011/850/EU	Stationsumgebung nach Anhang VIII Richtlinie 2008/50/EG (Ozon)
städtisch	städtisch
vorstädtisch	vorstädtisch
städtisch	stadtnah
ländlich	regional
abgelegen	ländlich Hintergrund

Beim Stationsregime kommt die Kategorie Industrie nicht vor, da es sehr wenige Stationen mit industriellen Emissionsquellen gibt. Für das Projekt wurden bundesweit die Tagesmittelwerte der PM10-Konzentration von 2000 bis 2012 und Tagesmaxima der gleitenden 8h-Mittel der Ozonkonzentration von 1990 bis 2012 ausgewertet. Abbildung 137 zeigt die Anzahl der Messstationen pro Bundesland und Stationstyp für Feinstaub und Ozon. Insgesamt wurde in Deutschland an 713 Stationen Feinstaub und an 620 Stationen Ozon gemessen. Die Messungen erfolgten jedoch nicht an allen Stationen über den gesamten Zeitraum. Auch sind Stationsdichte und Anteile der Messstationen an Stationstyp und Stationsregime in den Bundesländern entsprechend der dortigen Gegebenheiten

und Prioritäten unterschiedlich. Die Tabellen im Anhang 9.6 zeigen eine detailliertere Auflistung der Stationsdichte und Stationsanzahl pro Stationstyp Hintergrund, Industrie und Verkehr und Bundesland.

Abbildung 137: Anzahl der Messstationen pro Bundesland und Stationstyp Verkehr, Industrie und Hintergrund für PM10 (oben) und Ozon (unten).



5.3.2 Objektive Wetterlagenklassifikation des DWD

Für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Überschreitung von PM10-Grenz- und Ozonzielwerten und vorherrschender Wetterlage wurden die objektiven Wetterlagenklassen (oWLK) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) genutzt. Seit dem 01.01.1979 bestimmt der DWD die oWLK anhand des Klassifikationsansatzes nach (Bissolli und Dittmann 2001, Dittmann et al. 1995). Die Klassifikation basiert auf meteorologischen Größen des operationellen, numerischen Wetteranalyse- und Vorhersagesystems des DWD. Sie bezieht sich auf Deutschland sowie benachbarte Regionen und erfolgt täglich zum Analysetermin um 12 Uhr UTC. Die meteorologischen Kriterien zur Bestimmung der objektiven Wetterlagenklassen setzen sich aus der großräumigen Anströmrichtung der Luftmassen, den Zirkulationsformen der Atmosphäre (Zyklonalität) in 950 und 500 hPa sowie dem Feuchtegehalt

der Troposphäre zusammen. Die insgesamt drei Indizes erlauben eine detailliertere Charakterisierung der Wetterlage, was für diese Analyse von Vorteil ist. Aus den drei Indizes resultieren insgesamt 40 mögliche Wetterlagen (Anhang 9.7).

Die **Anströmrichtung** bzw. Advektion der Luftmassen wird anhand der horizontalen Windkomponenten in 700 hPa bestimmt. Dabei lassen sich die Windrichtungen als 90° Segmente innerhalb eines Vollkreises darstellen, welcher beginnend bei 0° in Nordost (NO), Südost (SO), Südwest (SW) und Nordwest (NW) eingeteilt werden kann. Die Hauptwindrichtung wird festgelegt, sofern mindestens zwei Drittel aller im Klassifikationsgebiet gewichteten Windvektoren in einem der genannten Sektoren liegen. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, erfolgt die Kategorisierung der Anströmrichtung als unbestimmt (XX). Das Klassifikationskriterium der **Zyklonalität** bezieht sich auf zwei isobare Flächen bzw. den Luftdruck 950 und 500 hPa. Entlang der beiden Druckflächen wird jeweils die Änderung der geopotentiellen Höhe im Klassifikationsgebiet bestimmt, aus welcher schließlich ein gewichteter Gebietsmittelwert berechnet wird. Das resultierende Gebietsmittel ist ein Maß für die Krümmung der Geopotentialfläche und wird auch als Zyklonalitätsindex bezeichnet. Dieser charakterisiert je nach Vorzeichen die Rotationseigenschaften des Strömungsfeldes. Dabei entspricht ein positives Vorzeichen zyklonaler (Z), ein negatives Vorzeichen antizyklonaler (A) Strömung. Zyklonale Luftströmungen treten in der nördlichen Hemisphäre um Gebiete tiefen Lufrucks auf, wobei umgebene Luftmassen gegen den Uhrzeigersinn abgelenkt werden. Im Gegensatz dazu bilden sich um ein Hochdruckgebiet antizyklonale Luftströmungen aus, welche im Uhrzeigersinn rotieren. Wetterlagen unter zyklonalem Einfluss sind durch die großräumigen Hebungsprozesse in Tiefdruckgebieten meist mit Wolkenbildung und evtl. Niederschlag verbunden sowie an sich relativ (zur Umgebung) kalt. Antizyklonale Wetterlagen hingegen sind durch absinkende Luftmassen in Hochdruckgebieten meist an Wolkenauflösung gekoppelt und relativ warm. Der dritte Index zur Klassifizierung der **Feuchte** von Wetterlagen ist definiert als der gewichtete Gebietsmittelwert des niederschlagsfähigen Wassers (precipitable water) in der Troposphäre. Zu dessen Bestimmung erfolgt zunächst eine vertikale Integration des atmosphärischen Wasserdampfgehaltes über die Isobarenflächen 950, 850, 700, 550 und 300 hPa. Anschließend kann daraus für jedes Niveau (und jeden horizontalen Referenzpunkt) der niederschlagsfähige Wassergehalt abgeleitet werden, welcher abschließend als gewichteter Mittelwert über das Klassifikationsgebiet zusammengefasst wird. Der somit ermittelte Index wird auch als aktueller Feuchteindex bezeichnet. Er wird mit seinem entsprechenden langjährigen Monatsmittelwert (basierend auf der Zeitreihe 01.06.1979–31.12.1996) verglichen. Eine Wetterlage wird letztendlich als feucht (F) klassifiziert, sofern der aktuelle Feuchteindex höher als der dazugehörige langjährige monatliche Mittelwert ist. Im umgekehrten Fall, also kleinerem Feuchteindex, wird die Wetterlage als trocken (T) charakterisiert. Der klassifizierte Feuchtegehalt der Troposphäre darf nicht mit tatsächlich auftretendem Niederschlag gleichgesetzt werden. Der aktuelle als auch der langjährige niederschlagsfähige Wassergehalt der Atmosphäre beschreiben nur einen theoretisch möglichen Niederschlag, welcher lediglich in Verbindung mit entsprechenden Abkühlungs- oder Hebungsprozessen ausfallen kann.

Für die Analyse möglicher klimatischer Änderungen und deren Bedeutung für zukünftige Überschreitungstage für PM10 und Ozon wurde ein Wetterlagen-Datensatz der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) genutzt (Krahe et al. 2010). Die objektiven Wetterlagenklassen wurden auf Grundlage von Modelldaten verschiedener Läufe globaler Klimamodelle (Tabelle 31) unter den Emissionsszenarien A1B, B1 und A2 (IPCC 2000) bestimmt.

5.4 Ergebnisse

5.4.1 Überschreitungen von Feinstaub und Ozon

Die Überschreitungen des Grenzwertes für PM10 ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Tagesmittelwert) und des Zielwertes für Ozon ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Tagesmaximum des gleitenden 8h-Mittelwertes) zeigen typische Jahrgänge. Episoden erhöhter Feinstaubkonzentration sind vor allem ein Merkmal der kalten Jahreszeit. Abbildung

138 (links) zeigt den mittleren Jahresgang der PM10-Überschreitungen in Deutschland für die Jahre 2010-2012 (Abbildungen pro Bundesland in Anlage 0). Erhöhte Ozonkonzentrationen sind im Gegensatz zum Feinstaub vor allem ein Problem des Sommers. Abbildung 138 (rechts) zeigt den mittleren Jahresgang der Ozon-Überschreitungen in Deutschland für die Jahre 1990-2012 (Abbildungen pro Bundesland in Anlage 9.11). Um typische Wetterlagen mit Grenzwertüberschreitungen zu finden, wurden nur die Monate mit den häufigsten Überschreitungen betrachtet. Bei PM10 werden ausschließlich Überschreitungstage in den Monaten Dezember bis März zur weiteren Analyse verwendet. In diesen vier Monaten finden durchschnittlich zwei Drittel aller Überschreitungen pro Jahr statt. Bei Ozon wurden die Monate Mai bis August ausgewählt. In diesen vier Monaten liegen durchschnittlich 85 % aller Überschreitungen. Zusätzlich sind hohe Ozonkonzentrationen in den Sommermonaten nicht nur wegen negativer Effekte auf die menschliche Gesundheit, sondern auch wegen Ertragsausfällen infolge der Pflanzenschädigungen relevant.

Um den Einfluss der Stationslage und Emissionsquelle abzuschätzen, wurden die Jahresgänge der Überschreitungen auch in Abhängigkeit der drei Stationsregime (verkehrsnahe, städtischer und ländlicher Hintergrund, siehe Kap. 5.3.1) dargestellt (Anhang 9.8 und 9.9). Die Maxima der Überschreitungstage liegen ebenfalls in den Monaten Dezember bis März für PM10 und in den Monaten Mai bis August für Ozon. Bei der weiteren Untersuchung wurde deshalb auf eine Berücksichtigung des Stationsregimes verzichtet.

Tabelle 31: Übersicht der für die Wetterlagenklassifizierung (Krahe et al. 2010) verwendeten globalen Klimamodell-Läufe und Szenarien

Modellname	Emissionsszenario (Modell-Läufe)
BCM2	A1B (1)
CNCM3	A1B (1)
	A2 (1)
DMIEH5	A1B (4)
EGMAM	A1B (3)
HADCM3	A1B (1)
MPEH5	A1B (1, 2, 3)
	B1 (1,3)
	A2 (1,3)

Da die Betrachtung für Gesamtdeutschland u. a. klimatische Besonderheiten unberücksichtigt lässt (z. B. Kontinentalität), wurden basierend auf der Häufigkeitsverteilung der Überschreitungen pro Bundesland (Anlage 0, 9.11) jeweils drei Teilgebiete abgegrenzt. Das Kriterium zur Abgrenzung der Teilgebiete ist nicht die absolute Häufigkeit der Überschreitungen, sondern die zeitliche Verteilung der Überschreitung im Jahresverlauf. Die Abgrenzung erfolgte mit Hilfe verschiedener statistischer Tests.

Mit dem Chi-Quadrat-Test wurde zuerst geprüft, ob die Häufigkeitsverteilungen aus der gleichen Grundgesamtheit stammen. Die Nullhypothese wurde abgelehnt. Die Stichproben stammen nicht aus einer Grundgesamtheit, die Unterschiede zwischen den Bundesländern sind hochsignifikant. Die Mittelwertvergleiche mit der einfaktoriellen ANOVA (analysis of variance, Varianzanalyse) ergeben

ebenfalls einen hochsignifikanten Unterschied zwischen den Bundesländern. Mit einem Post-Hoc-Test kann danach ermittelt werden welche Mittelwerte sich signifikant voneinander unterscheiden. Da keine Varianzhomogenität vorliegt (Levene-Test) kommt der LSD-Test (Least Significant Difference Test) dafür zum Einsatz. Auf Grundlage dieses Tests wurden für PM10 und Ozon die Bundesländer zu je drei Gruppen zusammengefasst (Abbildung 139). Bei PM10 deutete der LSD-Test eine Dreiteilung in Nord-Süd-Richtung an (Irrtumswahrscheinlichkeit 0,005). Die zwei Bundesländer Saarland und Baden-Württemberg wurden dem ähnlichsten Teilgebiet Süd zugeordnet. Die Häufigkeitsverteilungen der Überschreitung des Ozon-Zielwertes wurden ebenfalls in drei Gebiete gruppiert. Der LSD-Test zeigte einen West-Ost-Gradienten (Irrtumswahrscheinlichkeit 0,001). Wobei die Test-Unterschiede geringer als beim Feinstaub sind und es einen zentralen Übergangsbereich gibt in dem mehrere Bundesländer zusammengefasst wurden.

Abbildung 138: Häufigkeitsverteilung der Überschreitung des Grenzwertes für Tagesmittelwerte der PM10-Konzentration (2000-2012) und der Überschreitung des Grenzwertes für das Tagesmaximum der gleitenden 8h-Mittelwerte der Ozonkonzentration (1990-2012) in Deutschland

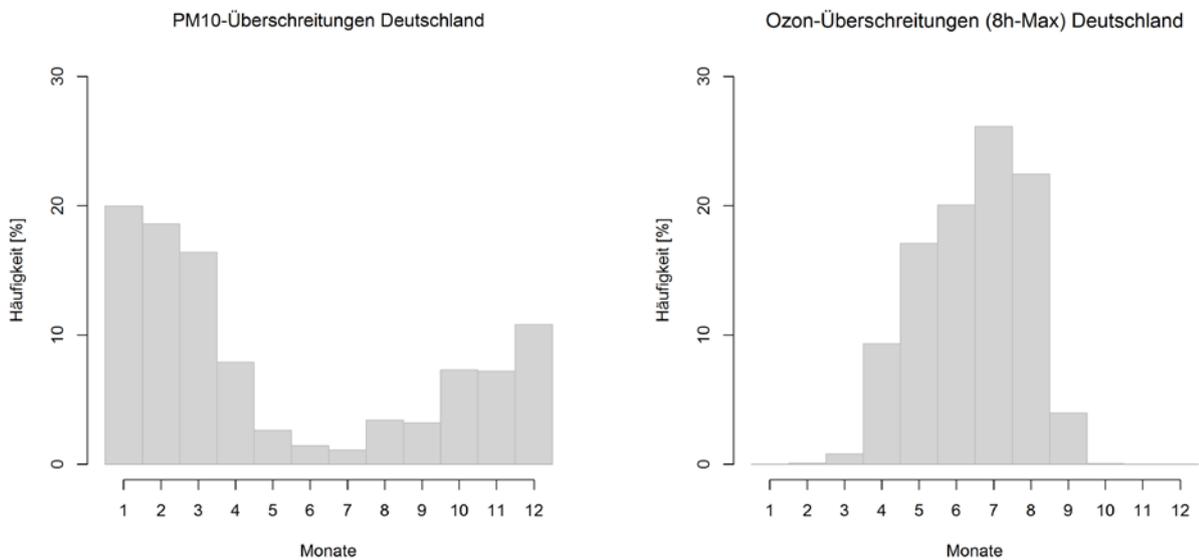
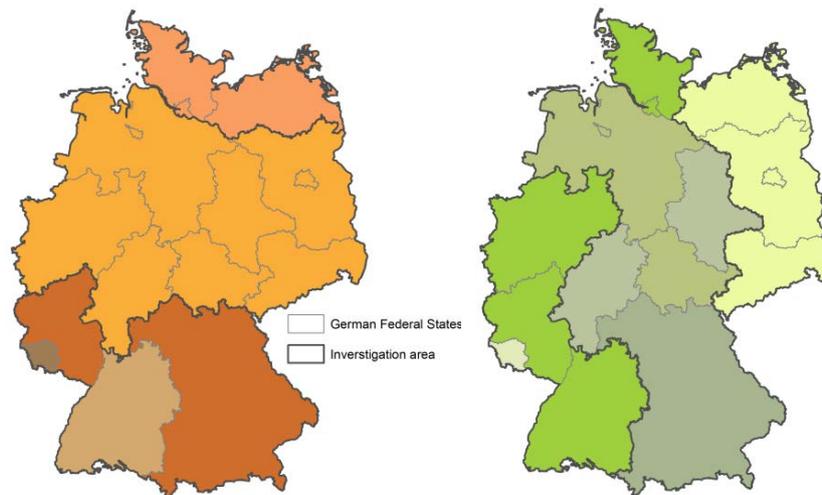


Abbildung 139: Teilgebiete für die Auswertung der Überschreitungen des PM10-Grenzwertes (links) und des Ozon-Zielwertes (rechts). Die Farben geben das Gruppierungsergebnis des LSD-Tests wieder.



Dadurch wurde das Datenkollektiv aus Überschreitungstag mit entsprechender Wetterlage in drei regionale Gruppen unterteilt. Diese regionale Differenzierung trägt dem Umstand Rechnung, dass eine bestimmte Wetterlage, u.a. in Abhängigkeit von der Anströmrichtung, nicht an allen Stationen in Deutschland gleichwahrscheinlich zu einem Anstieg der Schadstoffkonzentrationen führt.

5.4.2 Wetterlagen an Tagen mit Grenzwertüberschreitungen

Überschreitungen des PM10-Grenzwertes treten vor allem bei trockenen Hochdrucklagen auf. Das zeigt auch die Auswertung der objektiven Wetterlagenklassen des DWD für Gesamtdeutschland und die Monate Dezember bis März. Bei Betrachtung aller Indizes fallen die Wetterlagen XXAAT, NWAAT, XXZZT und NOAAT besonders auf (Abbildung 140, rechts). Diese vier von insgesamt 40 Wetterlagenklassen treten an 35 % aller Überschreitungstage auf. Die Grafiken in Anlage 9.12 zeigen zusätzlich die Häufigkeit der einzelnen Wetterlagenindizes Anströmrichtung, Zyklonalität und Feuchte. Nahezu dreiviertel aller an Überschreitungstagen auftretenden Wetterlagen haben den Feuchteindex „trocken“. Wetterlagen mit antizyklonalem Index entweder in Bodennähe (950hPa) oder in der mittleren Atmosphäre (500 hPa) machen 60 % aller Fälle aus. Die Windrichtung scheint auf dieser Skala keine ausschlaggebende Rolle zu spielen. Wichtig ist jedoch die Windgeschwindigkeit, die die Klassifikationsmethode nicht berücksichtigt. Die höchsten Feinstaubkonzentrationen werden typischer Weise an Tagen mit windarmen Wetterlagen und starken Temperaturinversionen gemessen, da dann der Feinstaub nicht abtransportiert wird und sich somit in den unteren Luftschichten anreichert (Singh und Palazoglu, 2011).

An Tagen mit Überschreitungen des Zielwertes des Tagesmaximums der 8h-Mittelwerte der Ozonkonzentration zeigt sich ein auffälligeres Bild. Von den 40 Wetterlagenklassen treten die Lagen SWAAF und SWZAF besonders hervor (Abbildung 140, rechts). An einem Drittel aller Überschreitungstage treten diese zwei Wetterlagen auf. Die Hochdruckwetterlagen XXAAT, NWAAT und XXAAF treten an jeweils 8 % aller Überschreitungstage auf. In Anlage 9.139.12 ist wieder die Häufigkeit der einzelnen Wetterlagenindizes dargestellt. Ganz klar dominieren feuchte Hochdrucklagen mit südwestlicher Anströmung. An 88 % aller Überschreitungstage herrschen antizyklonale Verhältnisse in der mittleren Atmosphäre. Etwas mehr als die Hälfte aller Überschreitungswetterlagen zeigen antizyklonale Verhältnisse in beiden Höhengniveaus. Bei der Anströmrichtung ist aus gesamtdeutscher Sicht der Westsektor dominant. An rund einem Viertel aller Überschreitungstage liefert die Klassifi-

Abbildung 141: Auftretenshäufigkeit von Wetterlagenklassen an Tagen mit Überschreitung des Grenzwertes für Tagesmittelwerte der PM10-Konzentration (2000-2012, DJFM) für das Teilgebiet Nord.

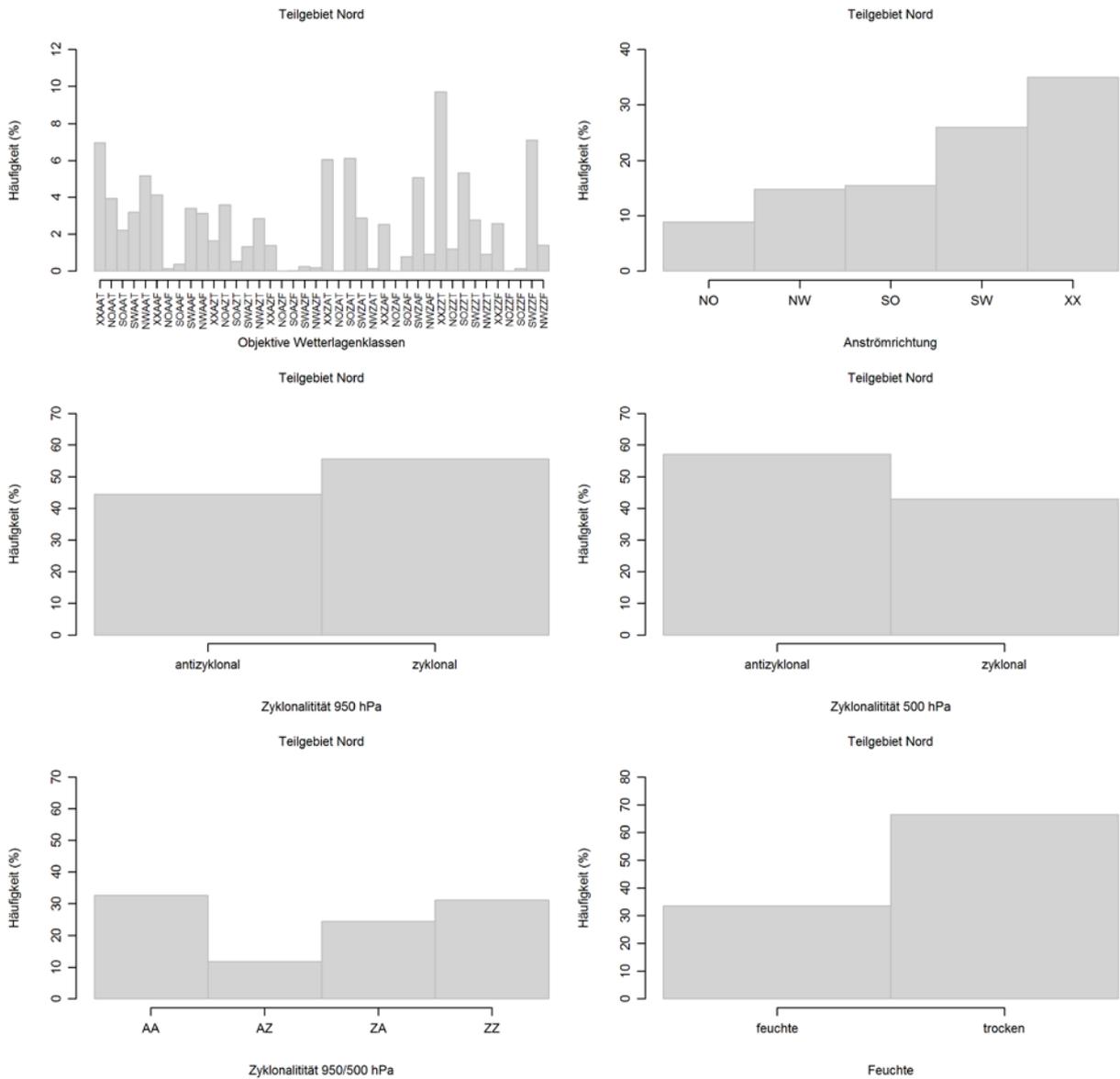


Abbildung 142: Auftretenshäufigkeit von Wetterlagenklassen an Tagen mit Überschreitung des Grenzwertes für Tagesmittelwerte der PM10-Konzentration (2000-2012, DJFM) für das Teilgebiet Mitte.

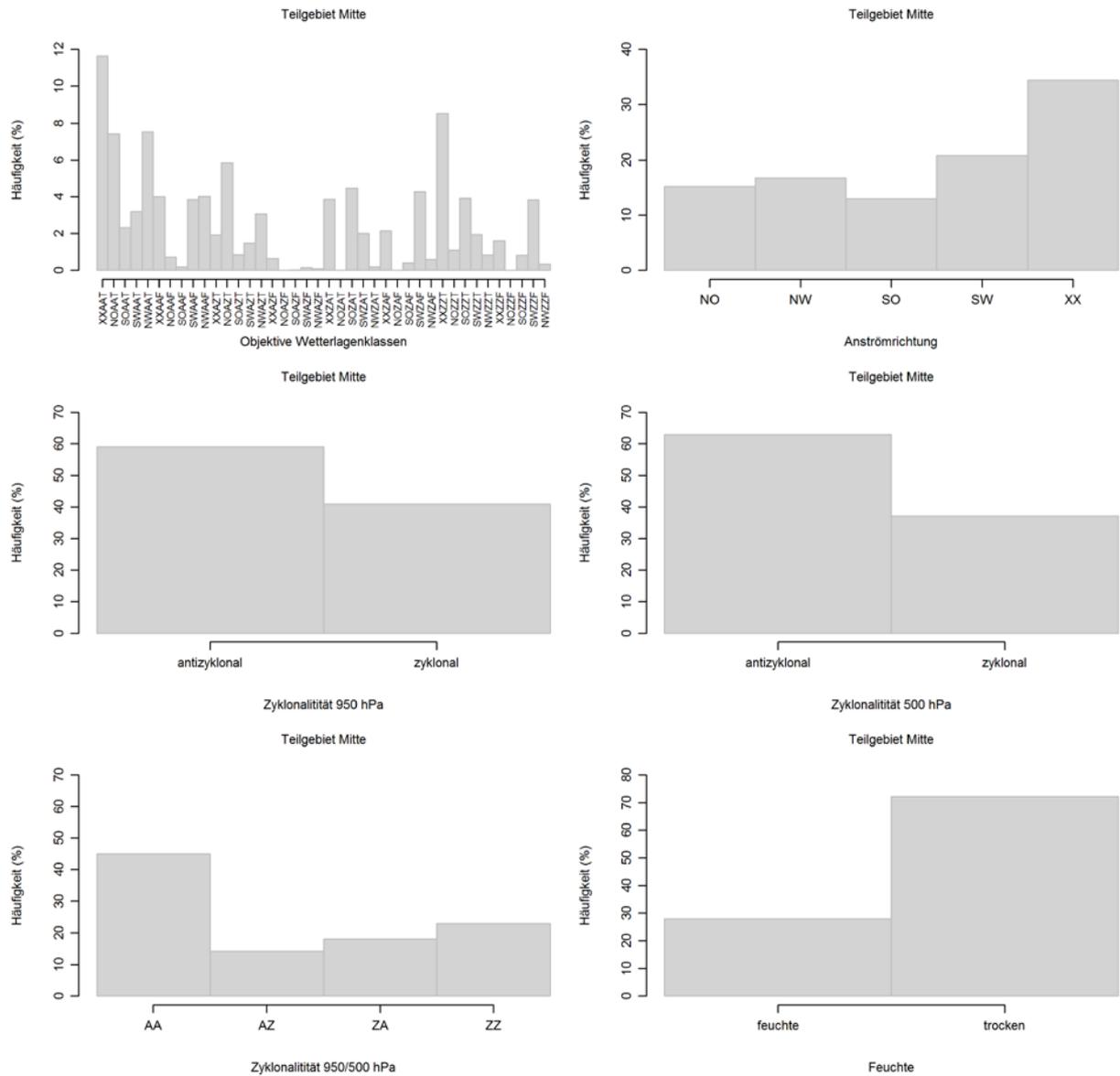


Abbildung 143: Auftretenshäufigkeit von Wetterlagenklassen an Tagen mit Überschreitung des Grenzwertes für Tagesmittelwerte der PM10-Konzentration (2000-2012, DJFM) für das Teilgebiet Süd.

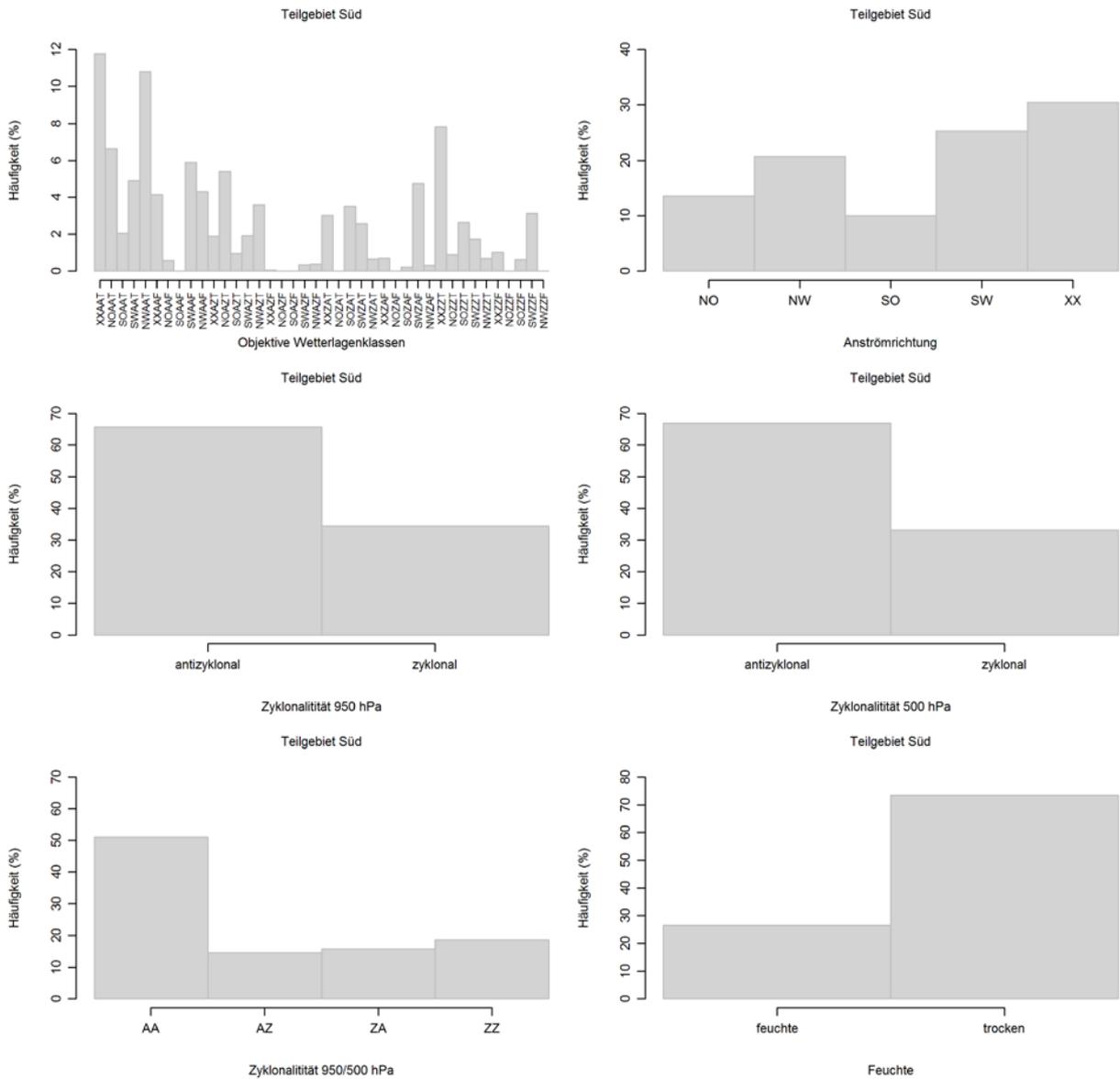


Abbildung 144: Auftretenshäufigkeit von Wetterlagenklassen an Tagen mit Überschreitung des Grenzwertes für das Maximum der 8h-Mittelwerte der O3-konzentration (1990-2012, MJJA) für das Teilgebiet West.

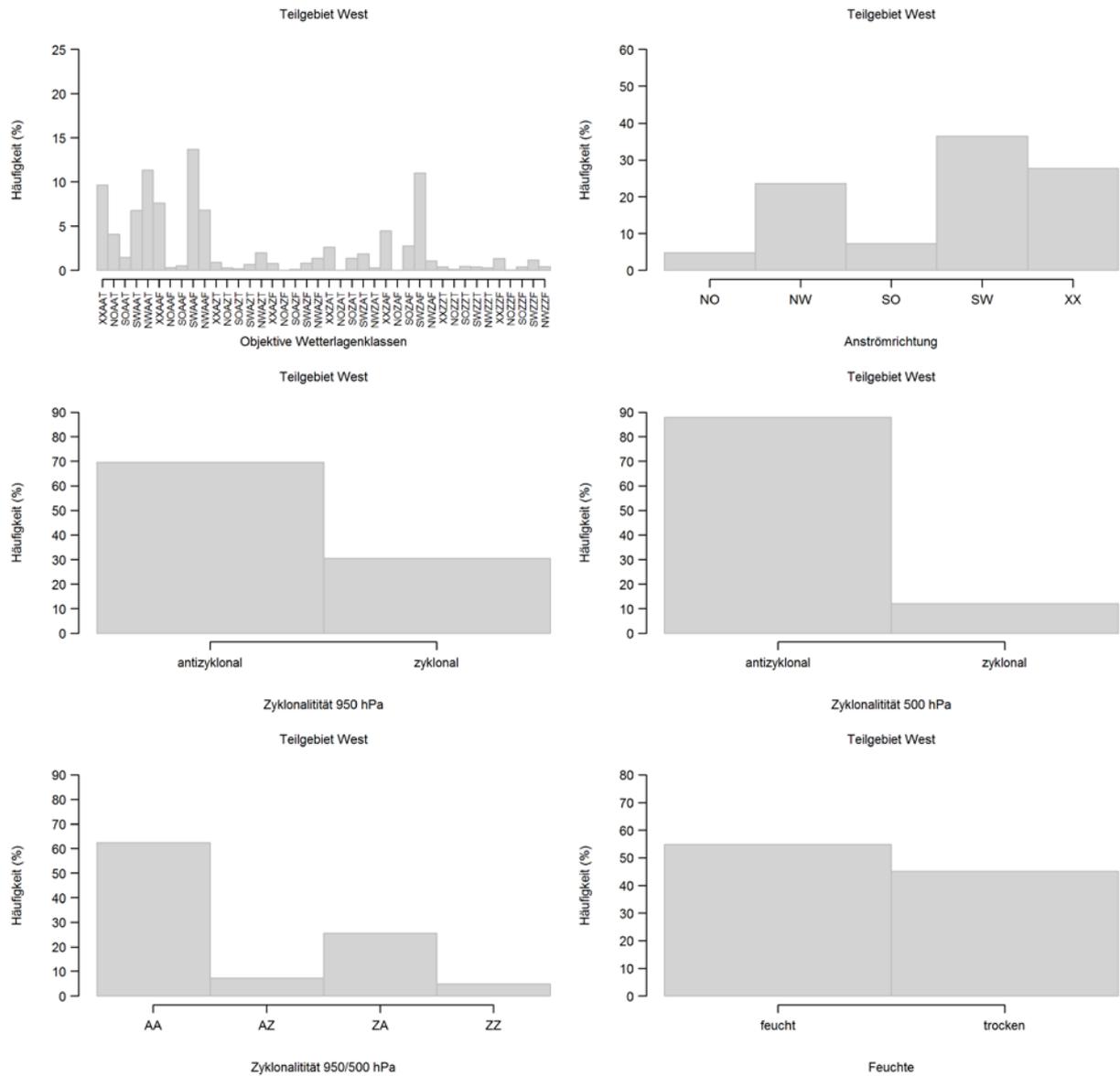


Abbildung 145: Auftretenshäufigkeit von Wetterlagenklassen an Tagen mit Überschreitung des Grenzwertes für das Maximum der 8h-Mittelwerte der O₃-Konzentration (1990-2012, MJJA) für das Teilgebiet Mitte.

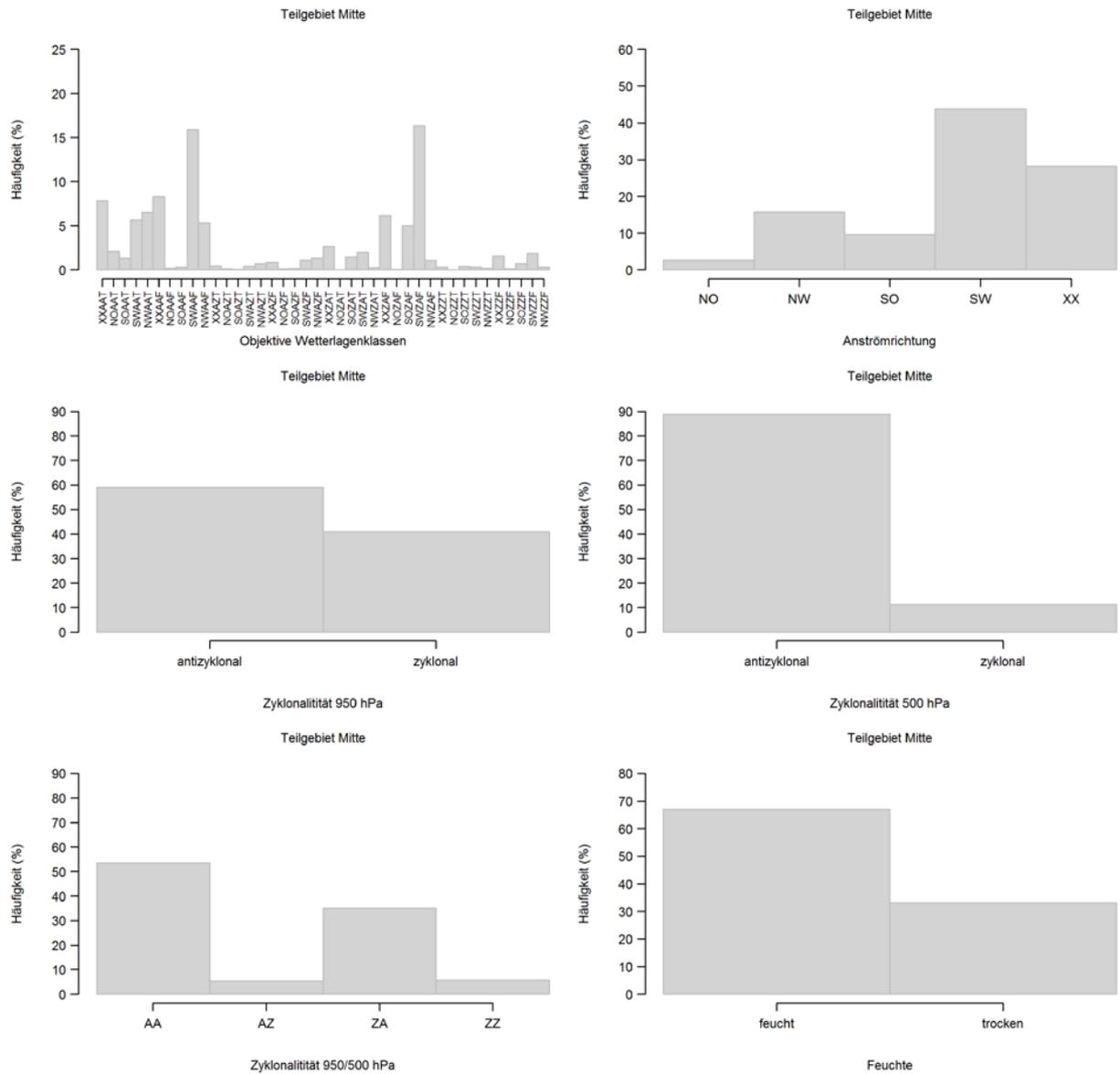
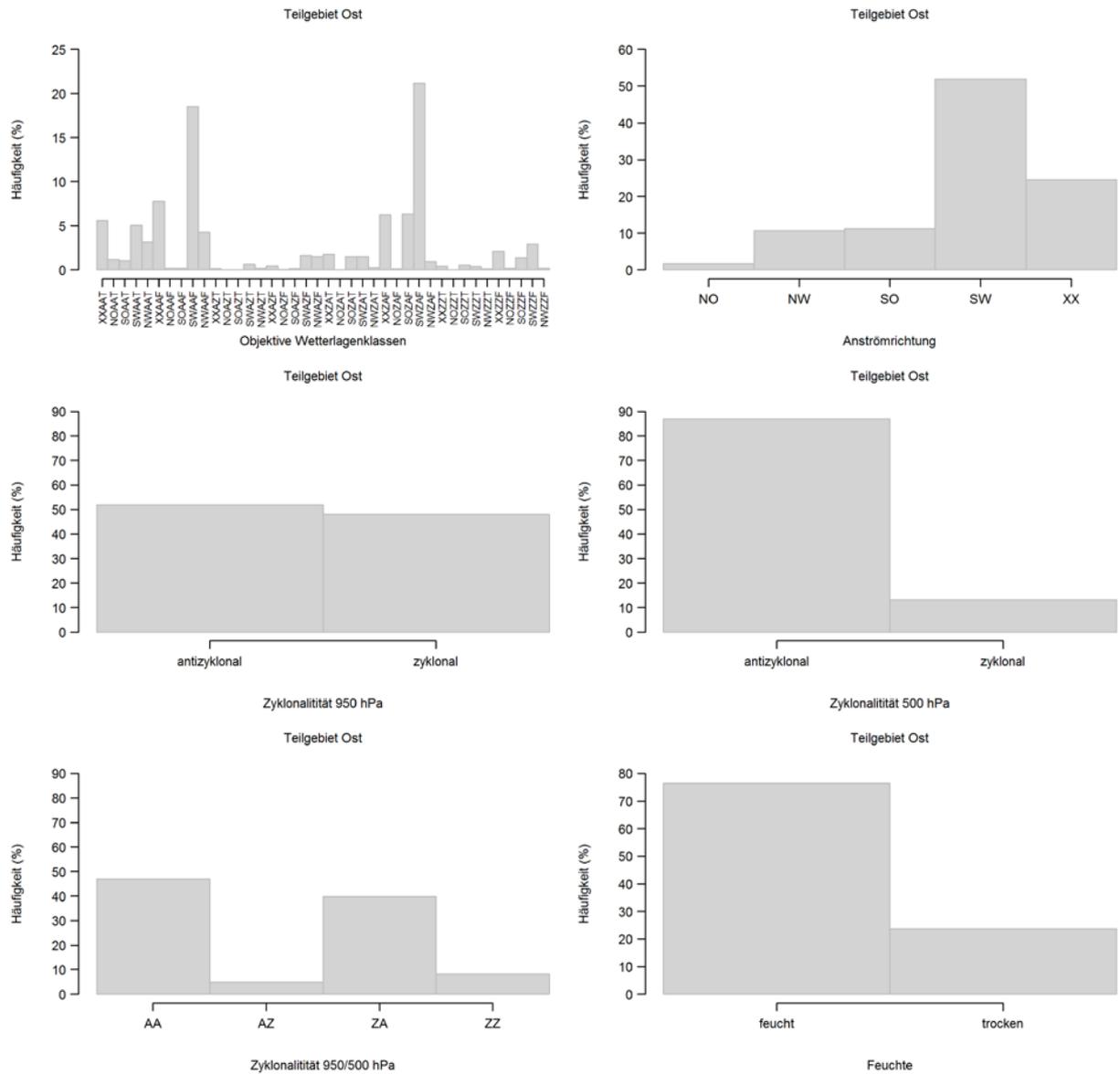


Abbildung 146: Auftretenshäufigkeit von Wetterlagenklassen an Tagen mit Überschreitung des Grenzwertes für das Maximum der 8h-Mittelwerte der O₃-Konzentration (1990-2012, MJJA) für das Teilgebiet Ost.



Um ein räumlich stärker differenzierteres Bild zu erhalten, wurde der Zusammenhang zwischen Überschreitungstagen und objektiven Wetterlagen für die jeweiligen drei Teilgebiete untersucht. Abbildung 141 bis Abbildung 143 zeigen die Häufigkeit der oWLK an den PM10-Überschreitungstagen von Dezember bis März. Die Bedeutung der trockenen Lagen für die Überschreitung des PM10-Grenzwertes ist für alle Gebiete mit ca. 70 % Auftretenshäufigkeit gleichermaßen ausgeprägt. Unterschiede treten bei der Anströmung und der Zyklonalität auf. Während im nördlichen Teil Deutschlands an Überschreitungstagen zyklonale Wetterlagen ebenfalls eine große Rolle spielen, verschiebt sich der Anteil Richtung Süden hin zu den Hochdrucklagen. Auch die Anströmung Nordwest kommt auf Kosten von Südwest und unbestimmter Anströmung an Überschreitungstagen häufiger im Süden vor. Die drei Wetterlagenklassen XXAAT, NWAAT und XXZZT treten an rund 30 % aller Überschreitungstage auf. Ihre Bedeutung nimmt von Norden nach Süden hin zu.

Bei den Ozon-Überschreitungslagen ist das gesamtdeutsche Muster vor allem im östlichen Teilgebiet markant (Abbildung 144, Abbildung 145, Abbildung 146). Dort treten die zwei Wetterlagenklassen SWAAF und SWZAF an rund 40 % aller Überschreitungstage auf. Richtung Osten nimmt auch die Bedeutung der feuchten Wetterlagen zu. Interessant ist der zunehmende Anteil Richtung Osten bei den Überschreitungswetterlagen mit östlicher Anströmung, wofür die stärkere Kontinentalität verantwortlich ist. Bei der Zyklonalität in Bodennähe ist die Bedeutung antizyklonaler Lagen im westlichen Teil größer.

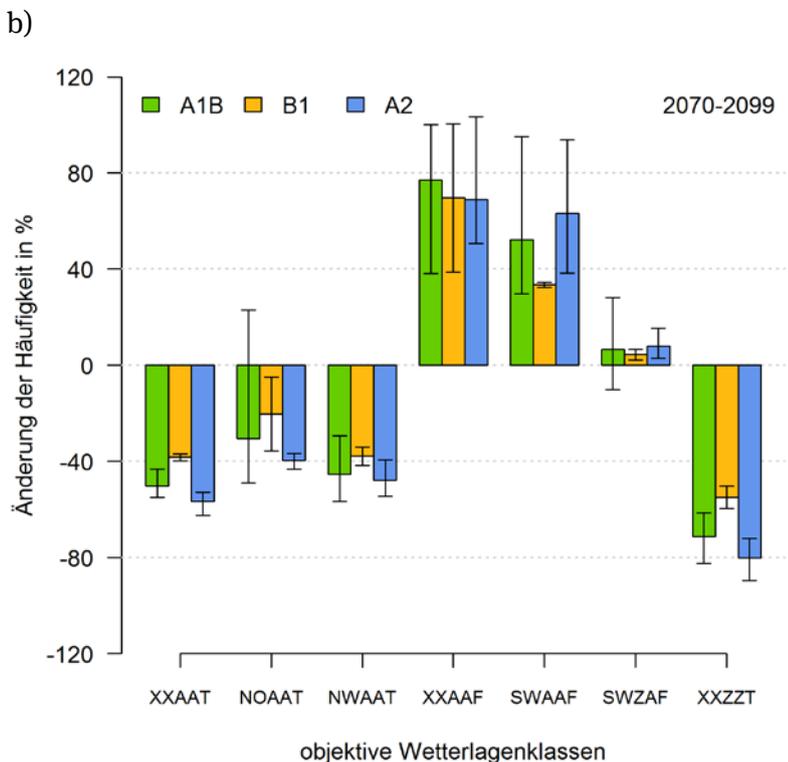
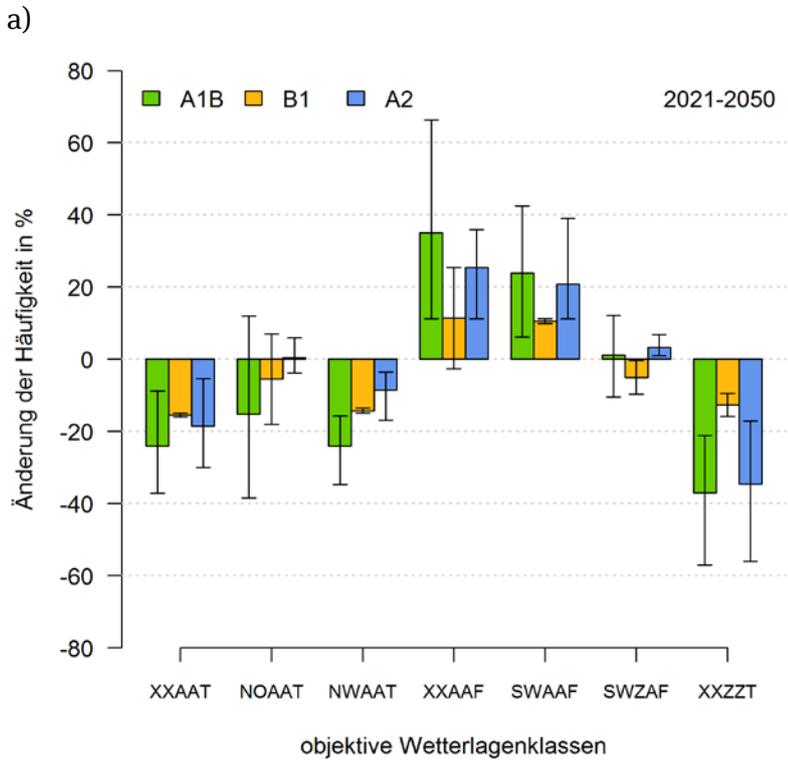
5.4.3 Änderung der Überschreitungswetterlagen bis zum Ende des Jahrhunderts

Die im vorangegangenen Abschnitt ausgewählten Wetterlagen, die vorrangig an Überschreitungstagen für PM10 und Ozon auftreten, sollen nun bezüglich ihrer Auftretenshäufigkeit in der Zukunft ausgewertet werden. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass hier ausschließlich der klimatische Einfluss auf die zukünftige Entwicklung der PM10- und Ozonkonzentrationen betrachtet wird. Abbildung 147 zeigt die Änderung der prozentualen Häufigkeit für die Wetterlagenklassen XXAAT, NOAAT, NWAAT, XXAAF, SWAAF, SWZAF und XXZZT für zwei Zeitscheiben (2021–2050 und 2070–2099) gegenüber der Referenzperiode 1961 bis 1990. Die Änderungen sind Mittelwerte aus einem Ensemble von globalen Klimamodellen für drei Emissionsszenarien (siehe auch Tabelle 31). Die Fehlerbalken zeigen die Spannweite der Ergebnisse, also die minimale und maximale Änderung des Ensembles.

Die trockenen Wetterlagenklassen XXAAT, NOAAT, NWAAT und XXZZT, die überdurchschnittlich häufig zu Überschreitungen des PM10-Grenzwertes führen, zeigen alle eine abnehmende Tendenz. Im Zeitraum 2021 bis 2050 bewegen sich die Änderungssignale zwischen 0 und -38 % je nach Wetterlagenklassen und Szenario, wobei das relative Ausmaß der Änderungen in Abhängigkeit vom Szenario für jede Wetterlagenklasse unterschiedlich ist. Die Schwankungsbreite über das Modellensemble liegt in der gleichen Größenordnung wie das Änderungssignal, so dass bis Mitte des Jahrhunderts kein robustes Signal vorliegt. Das ändert sich für den Zeitraum 2070 bis 2099. Für die Wetterlagenklassen XXAAT, NWAAT und XXZZT bewegen sich die Änderungssignale zwischen -40 und -70 %. Sie sind auch deutlich größer als die Schwankungsbreite des Modellensembles. Eine Ausnahme ist die Wetterlage NOAAT, deren Schwankungsbreite für die Szenarien A1B und B1 sehr hoch ist. Das Szenario A2, welches der aktuellen Entwicklung der CO₂-Konzentration am nächsten kommt, zeigt zum Ende des Jahrhunderts das stärkste Änderungssignal. Die Abnahme der trockenen Wetterlagen erfolgt zugunsten einer Zunahme der feuchten Wetterlagen.

Die Wetterlagenklassen SWAAF und SWZAF, die am häufigsten an Ozon-Überschreitungstagen auftreten, zeigen in der Zukunft unterschiedlich starke Änderungen. Während die Häufigkeit der Wetterlage SWAAF bis zum Ende des Jahrhunderts beim Szenario A2 im Mittel um ca. 60 % zunimmt, bleibt die Auftretenshäufigkeit der Wetterlage SWZAF unter Berücksichtigung des Schwankungsbereiches und der Unsicherheit nahezu konstant (+5 %). Die stärkste Zunahme zeigt die Wetterlage XXAAF mit fast 80 %.

Abbildung 147: Mittlere Änderung der Auftretenshäufigkeit von ausgewählten Wetterlagenklassen im Vergleich zu 1961-1990 an Tagen mit Überschreitungen von PM10-Grenz- und Ozon-Zielwerten. Die Mittelwerte beziehen sich auf das Ensemble der vorhandenen Modellläufe (Tabelle 31), die Fehlerbalken decken die Spannweite des Modellensembles ab – a) Änderungen für 2021–2050, b) für 2070–2099, für die SRES Szenarien A1B, A2 und B1



Auffällig ist, dass die Änderungssignale der drei feuchten Wetterlagen eine deutlich größere Spannbreite haben als die der trockenen Wetterlagen. Hier kommen die Unterschiede zwischen den Klimamodellen besonders zum Tragen. Die Häufigkeiten der beiden trockenen Hochdrucklagen XXAAT und NWAAT, die jeweils 8 % Anteil an Ozonüberschreitungstagen hatten, nehmen bis zum Ende des Jahrhunderts im stärksten Szenario A2 rund 50 % ab.

Eine Übertragung der Änderungssignale der Wetterlagen auf die Anzahl der Überschreitungstage ist, unter Beachtung der Modellunsicherheiten, rein rechnerisch möglich. Die Wetterlagen XXAAT und NWAAT herrschen zusammen durchschnittlich an 16 % aller Ozon-Überschreitungstage. Eine klimawandelbedingte Abnahme dieser Wetterlagen um 50 % bis zum Ende des Jahrhunderts könnte bei gleichen Randbedingungen die Anzahl der Ozon-Überschreitungstage um 8 % reduzieren. Demgegenüber steht die Zunahme der Wetterlagen XXAF, SWAAF und SWZAF, die zu einer Zunahme der Ozonüberschreitungstage von durchschnittlich 21 % führen können. Die vier häufigsten PM10-Überschreitungslagen (XXAAT, NOAAT, NWAAT und XXZZT) nehmen um durchschnittlich 50 % ab. Bei einem Anteil von rund 35 % an den PM10-Überschreitungstagen, würde das zu einer Abnahme von rund 17 % führen. Jedoch wird mit Wetterlagenansatz nur ein Einflussfaktor auf die PM10- und Ozonkonzentration betrachtet. Diese Interpretation ist damit nicht geeignet, belastbare Aussagen zum zukünftigen Auftreten von Überschreitungstagen abzuleiten. Die Untersuchung der Auftretenshäufigkeit typischer Wetterlagen an Überschreitungstagen beleuchtet nur die meteorologischen Bedingungen, die unter der Voraussetzung von ausreichend Emissionen überdurchschnittlich zu Überschreitungen von Grenz- und Zielwerten führen. Damit steht durch die Nutzung von DWD-Standardwerten ein einfaches und schnelles Werkzeug zur Abschätzung ausschließlich klimatischer Änderungen, die die Luftqualität beeinflussen, zur Verfügung. Es ist nicht geeignet gekoppelte Klima-Chemie-Transport-Modellierungen zu ersetzen, sondern nur zu ergänzen.

5.5 Diskussion der Ergebnisse

Zukünftige Klimaänderungen werden sich auf die Schadstoffkonzentrationen und die Häufigkeit der Überschreitung von Grenzwerten auswirken. Je nach Schadstoff und Einflussfaktoren kann es zu positiven oder negativen Änderungen kommen. Im Ergebnis der Analyse des Zusammenhangs zwischen Tagen mit hohen Schadstoffkonzentrationen und der vorherrschenden Wetterlage konnten sowohl für PM10 als auch für Ozon typische Wetterlagen an Überschreitungstagen identifiziert werden. Für die Überschreitung der Grenzwerte beider Schadstoffe sind erwartungsgemäß hochreichend antizyklonale Wetterlagen von Bedeutung. Während für Feinstaub die Überschreitungswetterlagen vom trockenen Typ sind, führen beim Ozon eher die feuchtwarmen Wetterlagen zu Überschreitungen. Die Auswertung der Klimasimulationen zeigte, dass die feuchten Wetterlagen auf Kosten der trockenen Wetterlagen zunehmen. Damit steigt in Zusammenhang mit weiter steigenden Temperaturen aus klimatischer Sicht die Wahrscheinlichkeit für Überschreitungen des Ozonzielwertes. Im Gegensatz dazu entschärfen weniger die trockenen Wetterlagen die Situation bei der Überschreitung des PM10-Grenzwertes. Die parallele Untersuchung mit Hilfe einer gekoppelten Klima-Chemie-Transport-Modellierung (Kapitel 3 und 4) machte jedoch deutlich, dass die energiepolitischen Maßnahmen einen weitaus größeren Einfluss auf die zukünftigen Konzentrationsentwicklungen von PM10 und Ozon haben. Damit eröffnet sich ein bedeutender Handlungsspielraum, um die Luftqualität dauerhaft zu verbessern. Neben der Häufigkeit des Auftretens von Grenzwertüberschreitungen ist auch die Andauer der Überschreitungssituation von Interesse. Laut (Petoukhov et al. 2013) hat sich die Persistenz von Wetterlagen in den letzten Jahren erhöht. In diesem Zusammenhang ist speziell die Entwicklung der temperaturabhängigen biogenen VOC-Emissionen von Bedeutung, denn häufige und vor allem lang andauernd hohe Ozonkonzentrationen können relevante Schäden an landwirtschaftlichen Kulturen und Wäldern hervorrufen.

6 Zeitlich hochaufgelöste Simulationen mit dem Modellsystem COSMO-MUSCAT

Die klimatologischen Untersuchungen zur Entwicklung der Luftqualität im Abschnitt 4 wurden mit dem Modellsystem RCG_CCLM durchgeführt. Solche Klimaprojektionen sind mit einer ganzen Reihe von Unsicherheiten verbunden, die i. Allg. nur durch sehr aufwendige Ensemble-Simulationen abgeschätzt werden können. In solchen Simulationen werden meist unterschiedliche Modelle verwendet, da die Modellgenauigkeit für die Bewertung der Unsicherheiten eine wesentliche Rolle spielt. Ensemble-Simulationen für klimarelevante Zeiträume waren im Rahmen des KLENOS-Projektes auf Grund des erforderlichen sehr großen Rechenaufwandes nicht möglich. Um aber trotzdem einige Hinweise zur Belastbarkeit der Ergebnisse zu bekommen, wurden zusätzlich Simulationen mit dem Modellsystem COSMO-MUSCAT für 2005, dem Jahr für das die Emissionsdaten verfügbar waren, durchgeführt und sowohl mit den RCG_CCLM-Ergebnissen als auch mit Messungen verglichen. Darüber hinaus wurden für zwei Hotspot-Perioden mit hohen PM10- bzw. Ozon-Konzentrationen Simulationen mit unterschiedlichen Modellkonfigurationen durchgeführt, um die Modellunsicherheiten weiter abzuschätzen. Naturgemäß haben insbesondere solche Perioden mit hohen Schadstoffkonzentrationen einen großen Einfluss bei der Bewertung der zukünftigen Luftqualität (vgl. auch Abschnitt 5). Außerdem ist aus zahlreichen Modellstudien bekannt, dass gerade solche extremen Belastungssituationen von Modellen oft nur recht schlecht reproduziert werden können. Die beiden Hotspot-Perioden wurden auf Grund der durchgeführten Analysen in Abschnitt 5 und den Ergebnissen der Jahressimulation für 2005 ausgewählt.

6.1 Ziel und Methodik der Untersuchungen

Das COSMO-MUSCAT-System benutzt als meteorologischen Treiber das Vorhersage-Modell COSMO des Deutschen Wetterdienstes. Dieses Modell wurde im Klima-Modus (als CCLM) an der TU Dresden für die regionalen Klimasimulationen genutzt (vgl. Abschnitt 3). Das Modellsystem COSMO-MUSCAT kann sowohl für detaillierte Prozessstudien als auch für Langzeitsimulationen (mit i. Allg. gröberen horizontalen Auflösungen) verwendet werden. Im Unterschied zu den Simulationen im Abschnitt 3 wird COSMO nicht im Klimamode (als CCLM) sondern im Wettervorhersage-Modus genutzt. Außerdem wird anders als beim offline gekoppelten System RCG-CCLM eine Online-Kopplung verwendet. Durch das implementierte Online-Kopplungsschema werden kleinere zeitliche und räumliche meteorologische Schwankungen direkt für die Ausbreitungsrechnung berücksichtigt. Außerdem können Rückkopplungseffekte der modellierten Aerosol- und Ozonverteilung auf das Wetter berücksichtigt werden. Diese Option ist allerdings im Rahmen von KLENOS nicht genutzt worden.

Die Simulationen mit dem Modellsystem COSMO-MUSCAT verfolgten im Wesentlichen die zwei folgenden Ziele:

(i) Absicherung der RCG-Ergebnisse. Hierzu wurde das komplette Jahr 2005 sowohl mit den durch die TU Dresden simulierten CCLM-ERA-Daten als auch den CCLM-EHIST-Daten modelliert. Die Ergebnisse wurden sowohl mit verfügbaren Messungen als auch mit den RCG-CCLM-Rechnungen verglichen. Im Unterschied zum online-gekoppelten COSMO-MUSCAT wird das RCG-Modell offline mit COSMO-CLM-Daten angetrieben. Außerdem verwendet COSMO-MUSCAT für einige Prozesse detailliertere Parametrisierungen sowie feinere vertikale Gitterauflösungen. Die Anwendung des Modellsystems erfolgt ebenfalls auf 2 Nestern mit folgenden Gitterauflösungen für das COSMO:

- a) Nest N1 (europäische Skale): Horizontale Gitterweite von ca. 28 km, 40 vertikale Schichten bis zu einer Modellhöhe von 25 km Höhe
- b) Nest N2 (Deutschland): Horizontale Gitterweite von ca. 7 km, 50 vertikale Schichten bis zu einer Modellhöhe von ca. 25 km

In MUSCAT kann für ausgewählte Regionen eine feinere Auflösung gewählt werden. Die Modellhöhe wurde auf ca. 6000 m eingeschränkt. Aufgrund der Unterschiede in der Auflösung, dem meteorologischen Antrieb und in einigen Prozessparametrisierungen konnten Differenzen in den Modellergebnissen erwartet werden. Diese gestatten Abschätzungen über die Sensitivität der simulierten Immissionsfelder gegenüber Änderungen in den Eingangsdaten und dem Modell-Setup. Daraus lassen sich Aussagen über die Belastbarkeit der getroffenen Bewertungen von Klimaeinflüssen und Emissionsänderungen ableiten.

Neben dem Vergleich der Jahresmittelwerte und -statistiken wurden die Modellergebnisse speziell für die ausgewählten Episoden mit hohen Schadstoffkonzentrationen verglichen und analysiert. Dabei wird untersucht, ob die Modelle in der Lage sind, Konzentrationsspitzen zu reproduzieren. Außerdem werden für diese Episoden mögliche Ursachen für Abweichungen zwischen den Modellsystemen untersucht.

(ii) Untersuchung des Einflusses der meteorologischen Bedingungen auf hohe Schadstoffkonzentrationen. Die Erfahrungen zeigen, dass Überschreitungsfälle zumeist mit speziellen meteorologischen Bedingungen verbunden sind. Die Identifizierung solcher typischen Wetterlagen mit Hilfe statistischer Klassifizierungsverfahren wurde im Abschnitt 5 dargestellt. Für die Analyse werden sowohl markante synoptische Muster als auch geeignete meteorologische Parameter (Mischungsschichthöhe, Luftfeuchtigkeit) herangezogen. Der Zusammenhang zwischen solchen meteorologischen Kenngrößen und den hohen Schadstoffkonzentrationen wurde mit Hilfe von Simulationen mit dem Chemie-Transport Modell COSMO-MUSCAT untersucht. Dazu sind zwei typische Wettersituationen mit hohen Konzentrationen modelliert worden.

Es erfolgte eine genauere Analyse der Wirkung einzelner meteorologischer Kenngrößen (Mischungsschichthöhe, Luftfeuchtigkeit) und Strömungsmuster auf die Schadstoffkonzentrationen. Dabei wurde untersucht, welche Mechanismen und Wechselwirkungen die hohen Konzentrationen beeinflussen. Anhand der durchgeführten Klimasimulationen wird weiterhin abgeschätzt, ob diese Faktoren in der Zukunft verstärkt oder abgeschwächt wirksam werden.

6.2 Modellbeschreibung und Setup

6.2.1 Das Modellsystem COSMO-MUSCAT

Das am Leibniz-Institut für Troposphärenforschung Leipzig (TROPOS) entwickelte Modellsystem COSMO-MUSCAT dient zur prognostischen Beschreibung (Simulation) der meteorologischen und luftchemischen Eigenschaften der Atmosphäre in mesoskaligen Teilgebieten der Erde. Anwendung findet es für zurückliegende Zeiträume (Hindcast), insbesondere für lufthygienische Untersuchungen aller Art, für die Analyse der Schadstoffbelastung in der Luft und auf dem Boden, für detaillierte Sensitivitäts- und Prozessstudien, zur Erforschung der Wechselwirkung bzw. Rückkopplung zwischen natürlichen meteorologischen Bedingungen und anthropogenen, umweltbelastenden Einflüssen sowie für die Untersuchung des Zusammenhanges zwischen den verschiedenen räumlichen Skalen (Wolke et al. 2004; Heinold et al. 2007, 2012; Stern et al. 2008; Hinneburg et al. 2009; Renner und Wolke, 2010; Wolke et al. 2012). Für die Bereitstellung geeigneter Randwerte für die detaillierten Modellläufe wird zumeist eine hierarchische Gitterstruktur verwendet, bei der von der europäischen bis zur urbanen Skala genestet wird (vgl. z. B. Abbildung 148). Das Modellsystem besteht aus dem online gekoppelten Vorhersagemodell COSMO des Deutschen Wetterdienstes und dem Chemie-Transport-Modell MUSCAT (MULTI-Scale Chemistry Aerosol Transport). Dabei kommt ein Kopplungsschema zur Anwendung, das die von MUSCAT benötigten meteorologischen Felder aus dem simultan mitlaufenden meteorologischen Modell in Zeit und Raum approximiert, wobei die Massenerhaltung gewährleistet wird. COSMO ist ein nicht-hydrostatisches, kompressibles meteorologisches Modell

und verwendet ein horizontal gleichmäßiges Gitter in einem terrain-folgenden Koordinatensystem (Schättler et al. 2009; Baldauf et al. 2011).

COSMO-MUSCAT beschreibt den Transport sowie die chemischen und mikrophysikalischen Umwandlungsprozesse von Spurengasen und Partikelpopulationen. Die Transportprozesse umfassen Advektion, Diffusion, Sedimentation der Partikel, trockene und nasse Deposition. Für eine detailliertere Modellbeschreibung sei auf Wolke et al. (2012, 2004) und die entsprechende Web-Seite (http://projects.tropos.de/cosmo_muscat/) verwiesen. Nachfolgend sollen nur einige Besonderheiten kurz aufgelistet werden:

- Es können unterschiedliche horizontale Gitterauflösungen in einzelnen Teilgebieten verwendet werden. Das vertikale Gitter wird aus dem meteorologischen Modell übernommen.
- Die Zeitintegration erfolgt mit effizienten implizit-expliziten Verfahren, die durch eine Schrittweitensteuerung den Integrationsfehler kontrollieren. Dabei können unterschiedliche implizite Schrittweiten in den einzelnen Teilgebieten generiert werden.
- Eine Modifikation oder das Ersetzen des verwendeten Reaktionsmechanismus ist leicht möglich, da er über ein File in einer vorgegebenen Syntax eingelesen wird. Bei den aktuellen Anwendungen wird meist ein erweiterter RACM-Mechanismus (Stockwell et al. 1997; Karl et al. 2006) angewendet.
- Zur Beschreibung der Aerosolprozesse wurde das Aerosolmodell M7 (Vignati et al. 2004) erweitert und in MUSCAT integriert. Dabei wird die Partikelpopulation durch sieben lognormalverteilte Moden mit unterschiedlicher stofflicher Zusammensetzung repräsentiert. Die Beschreibung der aerosoldynamischen Prozesse (Kondensation, Koagulation, Nukleation, Sedimentation und Deposition) basiert auf der modalen Technik. Für Langzeituntersuchungen wurde alternativ ein massenbasiertes Schema implementiert, das primäre Partikelemissionen sowie sekundär gebildetes anorganisches Aerosol (Sulfat, Nitrat, Ammonium) berücksichtigt. Dieses Schema wurde für die in KLENOS durchgeführten Simulationen angewendet. Ein Schema zur organischen Aerosolbildung ist ebenfalls implementiert.
- Die Eingabe der anthropogenen Emissionen erfolgt als Punkt-, Linien- oder Flächenquellen, aufgelöst nach Zeit und Emittentengruppen. Die biogenen Emissionen werden über eine Parametrisierung in Abhängigkeit vom jeweiligen Bewuchs, der Temperatur und der Tageszeit berechnet (Steinbrecher et al. 2009). Seesalz-Emissionen werden in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, der Temperatur der Wasseroberfläche und dem Seesalz-Gehalt online modelliert. (Sofiev et al. 2011).
- Die Bildung sekundärer organischer Masse aus gasförmigen Vorläufersubstanzen wird mit einem erweiterten SORGAM-Schema (Schell et al. 2001) beschrieben.
- Im Unterschied zum RCG, das für die vertikale Durchmischung und trockene Deposition ein eigenes Grenzschichtmodell nutzt, verwendet MUSCAT die in COSMO berechneten Parameter. Für die KLENOS-Simulationen wurde für die vertikale Turbulenz ein auf der prognostischen turbulenten kinetischen Energie (TKE) basierendes Schema verwendet.
- Für COSMO wurden dieselben Parametrisierungen wie für CCLM verwendet. Für die am TROPOS durchgeführten Simulationen wurde COSMO im Vorhersagemode verwendet. CCLM nutzt den Klima-Mode. Die CCLM-Version basiert auf einer älteren COSMO-Version (Version 4.10). In COSMO-MUSCAT wurde die Version 5.0 verwendet.

6.2.2 Beschreibung der durchgeführten Modellsimulationen

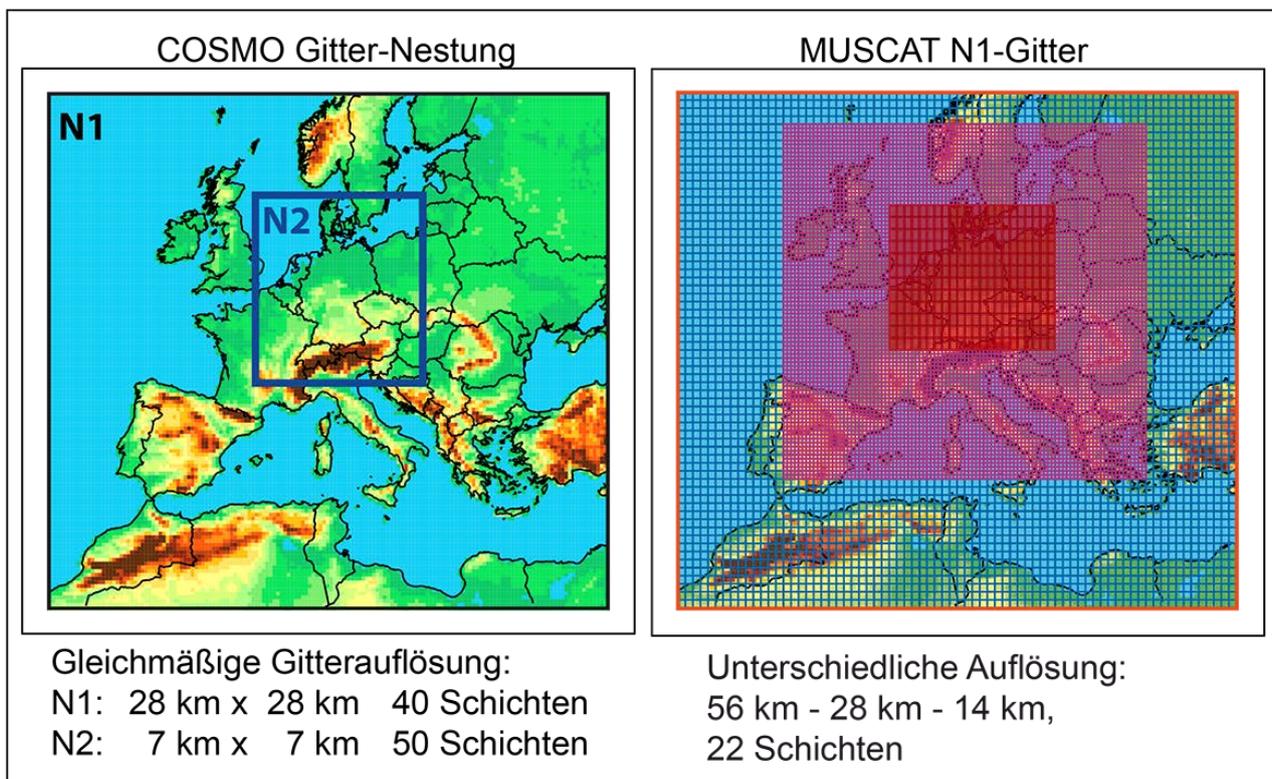
6.2.2.1 Modellgebiete und Rechengitter

Zur Absicherung der RCG-Ergebnisse wurden das Jahr 2005 sowohl mit CCLM_ERA als auch CCLM_E-HIST Antriebsdaten simuliert und die Ergebnisse mit den RCG-CCLM-Rechnungen verglichen. Die Anwendung des Modellsystems erfolgte auf zwei Nestern mit folgenden Gitterauflösungen (vgl. Abbildung 148):

a) **N1 (europäische Skale)**. COSMO verwendet horizontale Gitterweiten von ca. 28 km und 40 vertikale Schichten (Modellhöhe ca. 25 km Höhe). MUSCAT nutzt unterschiedliche horizontale Auflösungen (56 km – 28 km – 14 km) und 22 Modellschichten (Höhe bis ca. 6 km).

b) **N2 (Deutschland)**. COSMO verwendet horizontale Gitterweiten von ca. 7 km und 50 vertikale Schichten (Modellhöhe ca. 25 km). Für die Jahressimulation nutzt MUSCAT das uniforme COSMO-Gitter mit ca. 7 km horizontaler Auflösungen und 30 Modellschichten (Höhe bis ca. 6 km).

Abbildung 148: Modellierungsgebiete und Gitterauflösungen.



COSMO verwendet rotierte Lambda-Phi-Koordinaten in den horizontalen Raumrichtungen, die aus den geographischen Koordinaten durch eine Verschiebung des Nordpols hervorgehen. In der Regel wird die Transformation so gewählt, dass das Simulationsgebiet in Äquaturnähe liegt. Damit werden Singularitäten in Polnähe, wie sie bei den geographischen Koordinaten auftreten, vermieden und man erhält ein horizontales Rechengitter mit "fast quadratischen" Gitterzellen. Die obigen Angaben zur horizontalen Gitterweite beziehen sich auf das rotierte Gitter. Deshalb erhält man beispielsweise in Äquaturnähe für 0.25° eine horizontale Auflösung von ca. 28 km. Da es durch die Koordinatentransformation zu einer "Verzerrung" der Zellen kommt, lassen sich die Gitterweiten in geographischen Koordinaten nur näherungsweise angeben. Bei der Longitude ergibt sich etwa der Faktor 1,6 und bei der Latitude ca. 1,1. Die rotierten sphärischen Koordinaten sind für regionale Modelle sehr flexibel und rechenökonomisch, haben allerdings den Nachteil, dass alle Eingangsdaten im Raster-

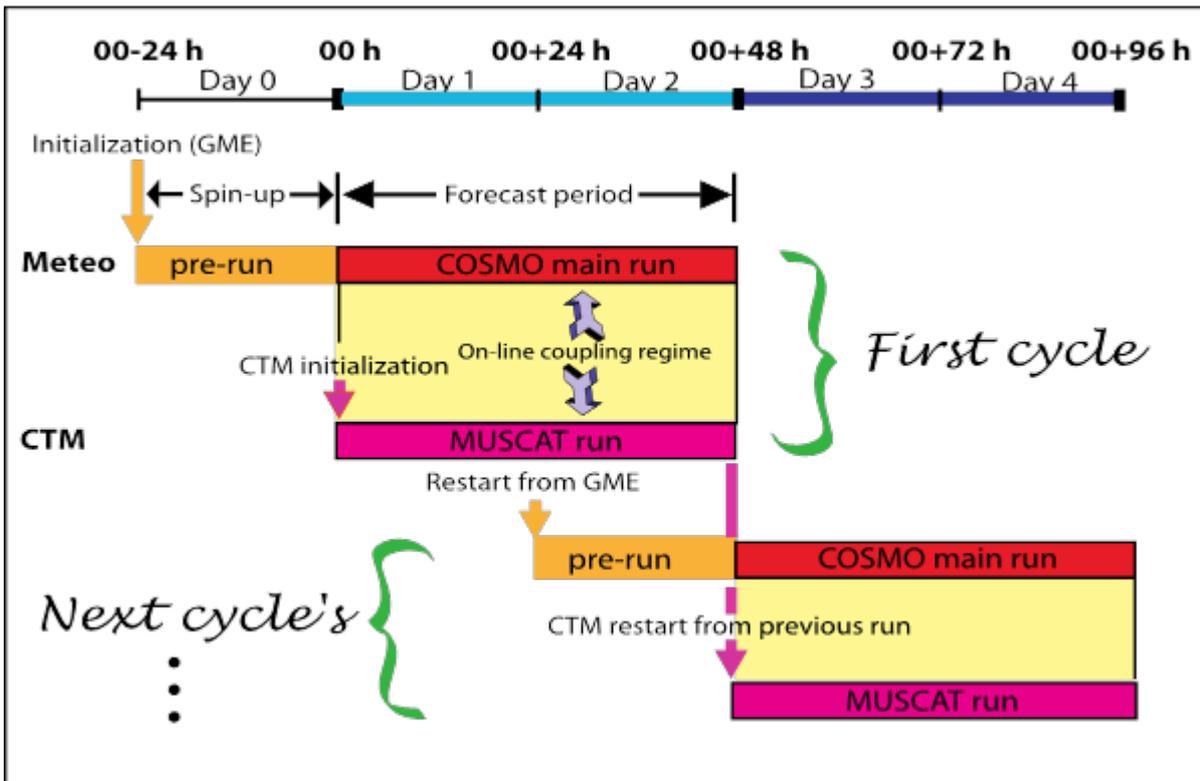
format (z. B. Landnutzung, Flächenquellen) sowie alle Felder für die graphische Darstellung transformiert werden müssen. Für die in KLENOS bereitgestellten Emissions- und Landnutzungsdaten wurden die entsprechenden Preprozessoren modifiziert und weiterentwickelt. Außerdem ist ein Tool genutzt worden, das die Ausgabedateien von COSMO-MUSCAT in ein NetCDF-Format überführt und Gittertransformationen ausführen kann. Nach der Anwendung solcher geeigneter Koordinatentransformationen war es möglich, die RCG-CCLM-Ergebnisse mit den COSMO-MUSCAT-Simulationen zu vergleichen.

In MUSCAT kann für ausgewählte Gebiete eine feinere oder gröbere horizontale Auflösung gewählt werden. Unter Ausnutzung dieser Option wurde bei den N1-Simulationen das Deutschlandgebiet bereits mit einer einmal verfeinerten Auflösung von $0,125^\circ$ gerechnet (vgl. Abbildung 148). Bei den N2-Simulationen wurde ein uniformes Gitter mit der COSMO-Auflösung verwendet. Die Modellhöhe wird in MUSCAT auf ca. 6000 m begrenzt, um Rechenzeit zu sparen. Für die N1-Simulationen wurden die regionalen Klimasimulationen aus Abschnitt 3 verwendet. Es wurde eine Jahressimulation sowohl für die CCLM_ERA-Daten als auch für die CCLM_EHIST-Daten durchgeführt. Die Daten wurden als Rand- und Anfangswerte für COSMO genutzt. Für die N1-MUSCAT-Simulationen wurden als Rand- und Anfangswerte der Konzentrationsfelder klimatologisch bestimmte Höhenprofile eingesetzt.

6.2.2.2 Simulationsregime

Die Simulation erfolgte im “Vorhersage-Regime“ ohne Datenassimilation und “Nudging“, d. h., während des Laufes wird das Modell nur über die Ränder angetrieben. Um ein “Weglaufen“ des Modells (insbesondere im Inneren des Gebietes bei den Europa-Simulationen) zu vermeiden, werden die Langzeitsimulationen in mehreren überlappenden Zyklen durchgeführt (vgl. Abbildung 149). Jeder dieser Zyklen besteht aus einem Tag COSMO-Vorlauf für die Meteorologie und zwei Tagen gekoppeltem Lauf. MUSCAT wird mit den Endkonzentrationen des vorigen Zyklus initialisiert. Vor dem Beginn der Untersuchungsperiode wurde ein Vorlauf von einer Woche gerechnet, bei dem der erste Zyklus mit klimatologischen Profil-Daten gestartet wurde. Die Simulationen erfolgten ohne Berücksichtigung von Rückkopplungseffekten.

Abbildung 149: Schematischer Ablauf der zyklischen COSMO-MUSCAT-Simulationen im “Vorhersage-Regime” (meteorologischer Antrieb nur über die Randwerte, ohne Datenassimilation und “Nudging”).



6.2.2.3 Auflistung der durchgeführten COSMO-MUSCAT-Simulationen

Tabelle 32: Durchgeführte Modellsimulationen mit COSMO-MUSCAT.

Kürzel	Antriebsdaten	Gebiet	Auflösung COSMO	Gitter MUSCAT	2005	Episoden
N1_ERA	CCLM_ERA	N1 (Europa)	28 km	56-28-14	☑	☑
N2_ERA	N1_ERA	N2 (DE)	7 km	7 km	☑	☑
N1_EHIST	CCLM_EHIST	N1 (Europa)	28 km	56-28-14	☑	☑
N2_EHIST	N1_EHIST	N2 (DE)	7 km	7 km	☑	☑
N1_14km	CCLM_ERA	N1 (Europa)	14 km	14 km		☑
N2_14km	N1_14km	N2 (DE)	7 km	7-3.5		☑
N1_GME	GME	N1 (Europa)	28 km	56-28-14		☑
N2_COS_DE	COSMO-DE	N2 (DE)	7 km	7 km		☑

Neben den Jahresläufen wurden für vier weitere Konfigurationen Simulationen für die ausgewählten Episoden durchgeführt, um mögliche Ursachen für Abweichungen zwischen COSMO-MUSCAT, RCG-CCLM und Beobachtungen zu untersuchen (siehe Tabelle 32). Durch die Nx_14km-Simulationen soll die Sensitivität der Ergebnisse gegenüber der Gitterauflösung abgeschätzt werden. Bei den N1_GME- und N2_COS_DE-Läufen erfolgen der Antrieb und die Initialisierung beim Restart mit GME- bzw. COSMO-DE-Reanalysedaten. Dadurch werden verfügbare Messdaten in den Antriebsdaten berücksichtigt. Dies sollte ein "Weglaufen" der modellierten meteorologischen Felder vermeiden und zu einer besseren Übereinstimmung zwischen den simulierten meteorologischen Feldern und Beobachtungen führen.

Nachfolgend werden einige Ergebnisse der durchgeführten COSMO-MUSCAT-Simulationen dargestellt und diskutiert. Im Abschnitt 6.3 werden die Jahresmittelwerte der Läufe für das Jahr 2005 zunächst mit den RCG-CCLM-Rechnungen und anschließend mit Messungen verglichen. Dabei werden sowohl meteorologische Größen als auch Konzentrationen von Partikelmasse und Gasphasen-Spezies ausgewertet. Im Abschnitt 6.4 werden zwei ausgewählte Perioden mehr im Detail diskutiert. Während die erste Episode im Februar 2005 durch eine sehr große Partikelbelastung gekennzeichnet war, traten in der zweiten betrachteten Periode im Mai 2005 hohe Ozon-Konzentrationen auf. Beide Episoden beschreiben jeweils typische Wetterlagen für hohe Schadstoffbelastungen und wurden im Ergebnis der im Abschnitt 5 durchgeführten Wetterlagenanalyse ausgewählt. Außerdem wurden bei der Auswahl gemessene und berechnete Jahreszeitreihen berücksichtigt (vgl. Abschnitte 6.3.1.3 und 6.3.2.3). Für die beiden ausgewählten Episoden wurde ein "Ensemble" von unterschiedlichen Modellläufen gerechnet, um die Sensitivität und Robustheit der Ergebnisse dieser Studie gerade für Perioden mit hoher Schadstoffbelastung abzuschätzen. Deshalb werden die "Ensemble"-Ergebnisse im Abschnitt 6.4 untereinander und mit Messwerten verglichen.

6.3 Vergleich mit RCG-CCLM-Ergebnissen und Messungen für das Jahr 2005

Das Ziel dieses Arbeitsschwerpunktes war die Absicherung der RCG-Ergebnisse. Hierzu sind COSMO-MUSCAT-Simulationen für das komplette Jahr 2005 durchgeführt worden. Die Ergebnisse werden mit den RCG-CCLM-Simulationen im Abschnitt 4.3 verglichen und nachfolgend diskutiert. Der meteorologische Antrieb für das äußere Gebiet N1 erfolgte mit den Modellergebnissen der CCLM-Läufe an der TU-Dresden. Dabei sind für zwei unterschiedliche Szenarien sowohl die EU_CCLM_ERA als auch die

EU_CCLM_EHIST Antriebsdaten verwendet worden. Die Ergebnisse der N2_ERA-Simulation wurden mit den für Deutschland zur Verfügung stehenden Referenzdatensätzen HYRAS für die Temperatur und REGNIE für den Niederschlag verglichen. Außerdem erfolgte ein Vergleich mit den CCLM-Läufen für die meteorologischen Größen und mit den RCG-Modellergebnissen für die atmosphärischen Spurenstoffe. Die Ergebnisse im inneren Nest werden maßgeblich durch die Randdaten beeinflusst. Um hier mögliche größere Unterschiede auszuschließen, werden zunächst die Ergebnisse für das N1-Gebiet verglichen. Der Fokus liegt aber auf dem Vergleich für das Deutschland-Gebiet. Weiterhin sind für die CCLM_ERA-Simulationen umfangreiche Vergleiche mit Messdaten von ausgewählten Stationen des DWD, des UBA und der Landesämter durchgeführt worden. Da bei CCLM_EHIST nicht das reale Jahr 2005 abgebildet wird, erscheint hier ein Vergleich mit realen Messdaten wenig sinnvoll. Der Abschnitt schließt mit einer statistischen Auswertung und exemplarischen Zeitreihen für PM10 und Ozon.

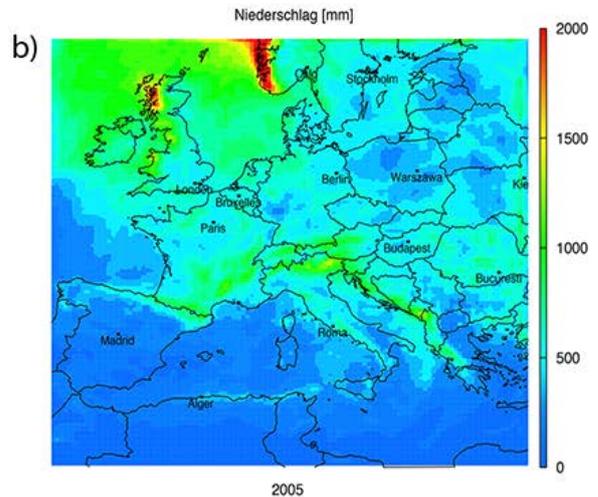
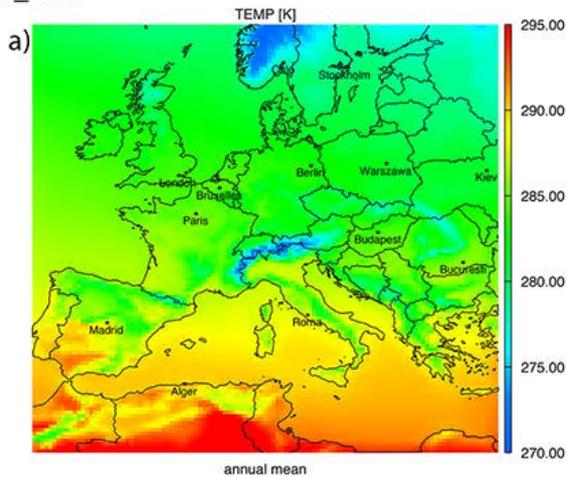
6.3.1 Meteorologie: Temperatur und Niederschlag

6.3.1.1 Vergleich der Europa-Simulationen

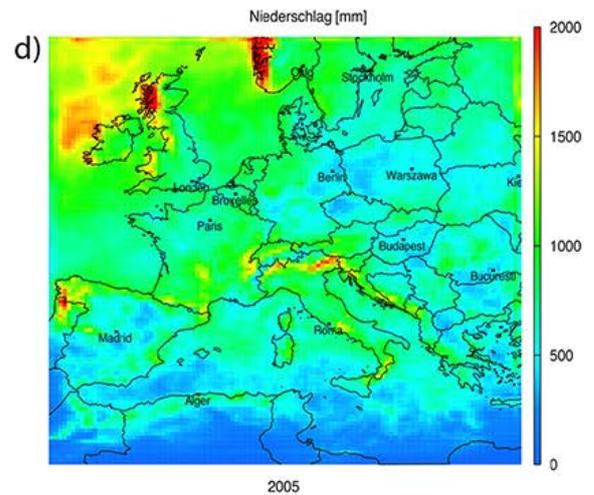
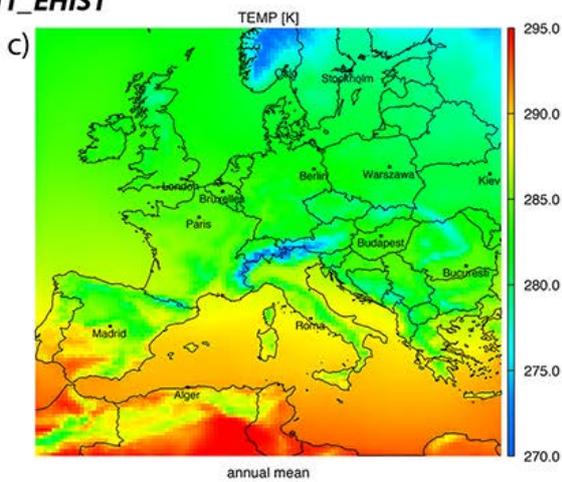
Im Unterschied zu den Klimasimulationen im Abschnitt 3 wurde hier COSMO im Wettervorhersage-Modus genutzt. Außerdem wurde mit der Version 5.0 eine aktuellere Modellversion mit einigen neueren Parametrisierungen verwendet. Dies führt zu Unterschieden in den modellierten meteorologischen Feldern, die zunächst für das Europa-Gebiet diskutiert werden sollen. In Abbildung 150 sind die berechneten Jahresmitteltemperaturen und Niederschlagsmengen für das Jahr 2005 sowohl für die EU_CCLM_ERA als auch die EU_CCLM_EHIST Antriebsdaten dargestellt. Während die Unterschiede zwischen N1_ERA und N1_EHIST in der Jahresmitteltemperatur relativ gering sind, ist die Niederschlagsmenge bei CCLM_EHIST größer. Wie bereits beschrieben, erfolgt der Antrieb über die Randdaten und über eine neue Initialisierung mit den EU_CCLM_ERA-Daten nach jeweils 3 Tagen (vgl. Abbildung 149). Die unterschiedliche Dynamik der verwendeten Modellversionen führt dann im "Inneren" des Modellgebiets zu Differenzen in den meteorologischen Feldern. Dabei tendiert COSMO-MUSCAT zu höheren mittleren Temperaturen, aber etwas geringeren Niederschlägen. In Abbildung 150 (e, f) sind die Differenzen zwischen N1_ERA und EU_CCLM_ERA für Deutschland dargestellt. Die Jahresmitteltemperatur von N1_ERA ist um ca. 1K höher als bei EU_CCLM_ERA. Dagegen ist die durchschnittliche Niederschlagsmenge geringer, insbesondere im Voralpenland mit über 1mm/Tag. Insgesamt sind die Unterschiede zwischen den Modellen aber relativ moderat. Das zeigen auch die Analysen für das N2-Gebiet.

Abbildung 150: Simulierte Jahresmittelwerte 2005 der Temperatur [K] für (a) N1_ERA und (c) N1_EHIST. Berechnete Niederschlagsmenge [mm] für 2005 für (b) N1_ERA und (d) N1_EHIST. Differenzen N1_ERA – EU_CCLM_ERA für die berechneten Jahresmittelwerte 2005 der (e) Temperatur [K] und der (f) Niederschlagsraten [mm/Tag] dargestellt auf dem N2-Gebiet.

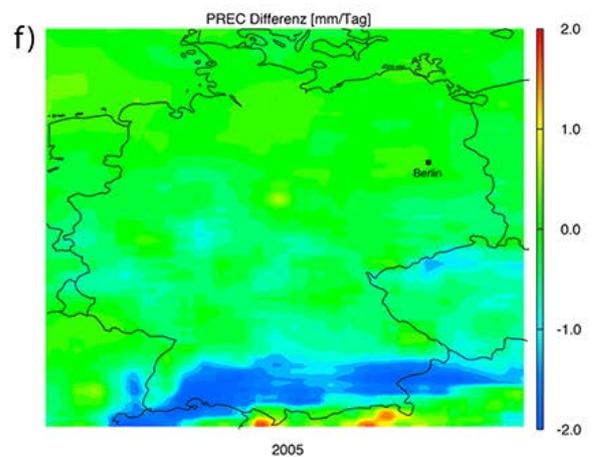
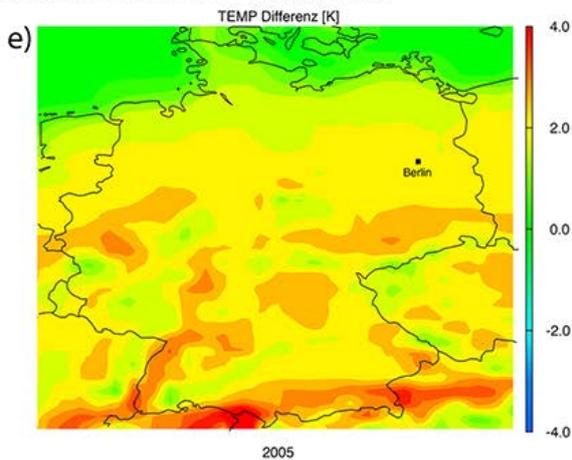
N1_ERA



N1_EHIST



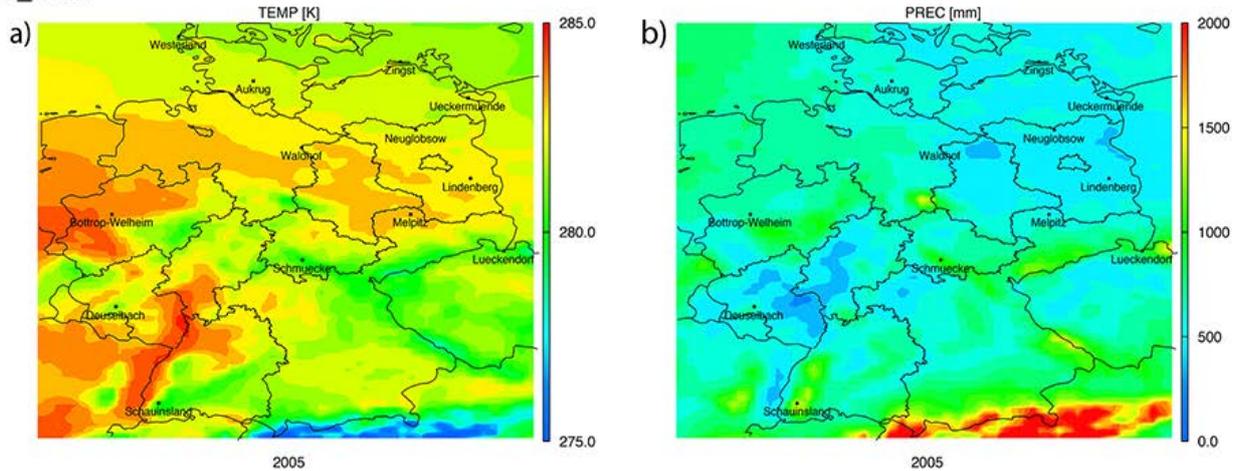
Differenz N1_ERA -- CCLM_ERA



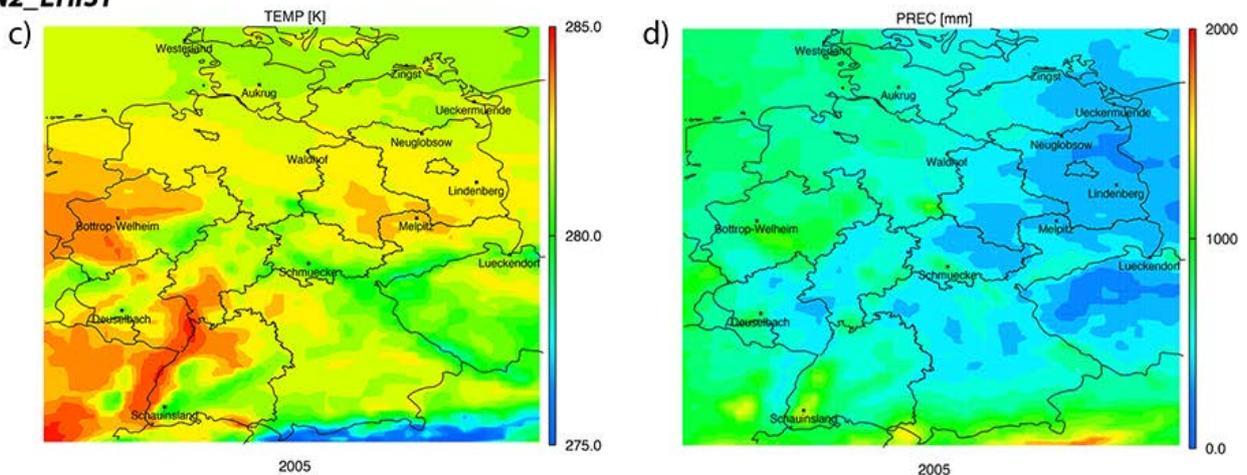
6.3.1.2 Vergleich zwischen den Deutschland-Simulationen und mit Referenzdatensätzen

Abbildung 151: Simulierte Jahresmittelwerte 2005 der Temperatur [K] und die jährliche Niederschlagsmenge [mm] für N2_ERA, N2_EHIST und die entsprechenden Differenzen zu DE_CCLM_ERA.

N2_ERA



N2_EHIST



Differenz N2_ERA -- CCLM_ERA (DE)

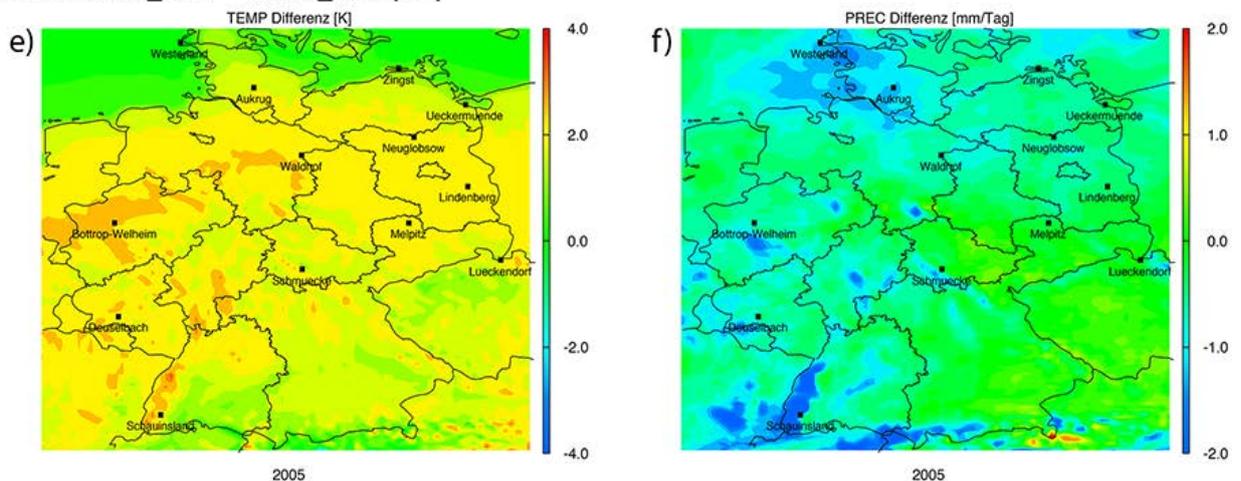


Abbildung 152: Differenzen zwischen den N2_ERA Jahresmittelwerten 2005 und den Referenzdatensätzen HYRAS für die Temperatur [K] (a) und REGNIE für die jährliche Niederschlagsmenge [mm].

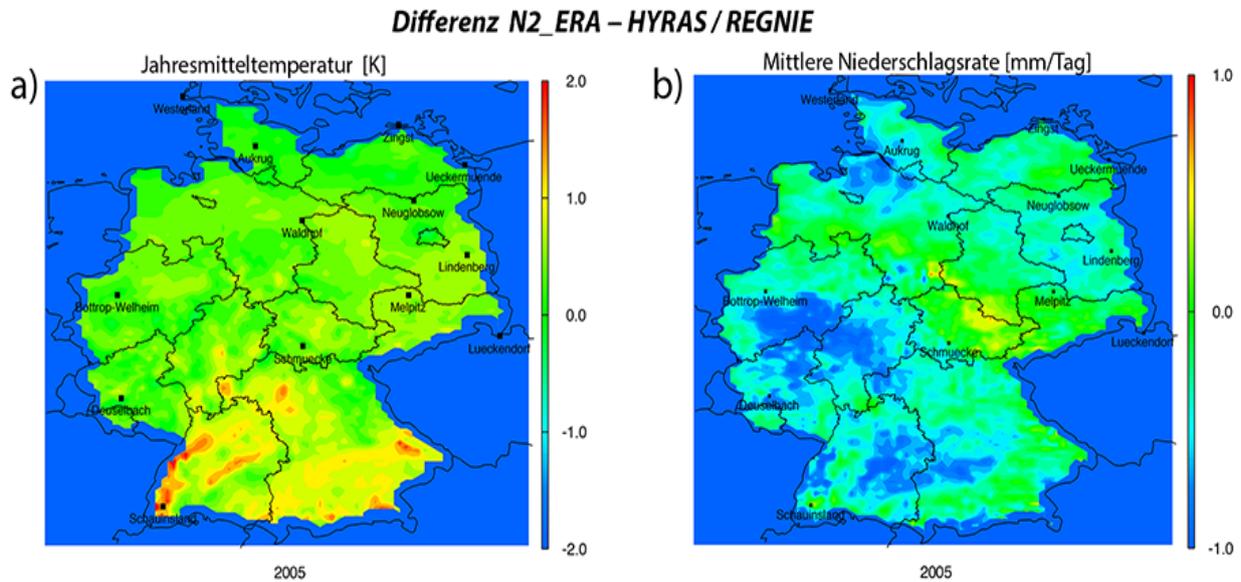
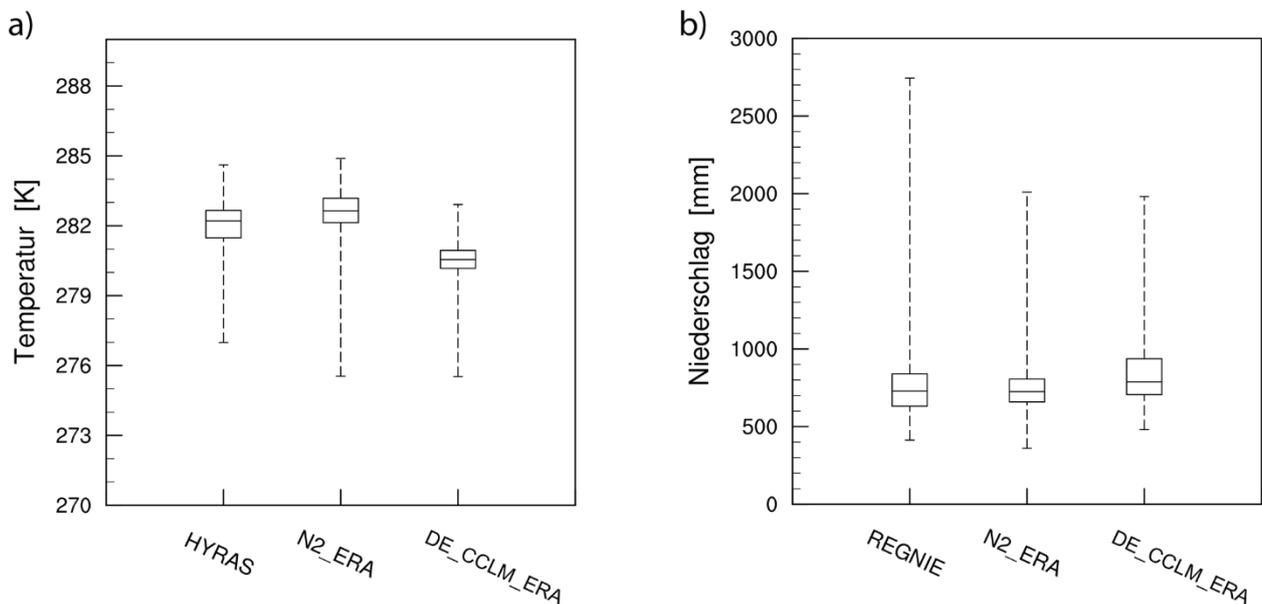


Abbildung 153: Box-Whisker-Plots für die mittlere Temperatur (a) und die Niederschlagsrate (b) für das Jahr 2005.



Die berechneten Werte für die mittlere Temperatur und den Jahresniederschlag 2005 sind in Abbildung 151 dargestellt. Die zugehörigen Box-Whisker-Plots findet man in Abbildung 153. Deutlich sind die höheren Durchschnittstemperaturen im oberen Rheingraben, im Rhein-Main-Gebiet, in Nordrhein-Westfalen und in einem Streifen von den Niederlanden bis nach Sachsen-Anhalt zu erkennen. Ein Vergleich mit den HYRAS-Daten zeigt, dass diese räumlichen Strukturen mit erhöhten Temperaturen auch in den Messungen auftreten. Die Temperaturen werden allerdings im Oberrheingraben mit bis zu 3K überschätzt. Eine ähnliche Überschätzung ist für den Bayerischen Wald zu beobachten. Insgesamt wird die mittlere Temperatur bei N2_ERA nur leicht überschätzt (vgl. die Box-Whisker Plots in Abbildung 153a, wobei die Erhöhung in Süddeutschland etwas deutlicher ist). Wie der Differenz-Plot in Abbildung 151e zeigt, ist diese deutliche Überschätzung in Süddeutschland bei den CCLM_ERA-

Ergebnissen nicht zu beobachten. Allerdings werden hier die Temperaturen in Nord- und Mitteldeutschland relativ stark unterschätzt, was zu einer berechneten mittleren Temperatur führt, die im Median um fast 2K kleiner ist als im HYRAS-Referenzdatensatz (Abbildung 152a).

Der Vergleich der Niederschläge mit den REGNIE-Daten zeigt eine deutliche Unterschätzung der berechneten Regenmenge in Südwest-Deutschland. Diese Regionen liegen aber insgesamt unter den Durchschnittswerten für Deutschland (vgl. Abbildung 151b). Die durch CCLM_ERA berechneten Gesamtniederschläge übersteigen leicht die CCLM_ERA-Werte. Diese sind vergleichbar mit den REGNIE-Niederschlagsmengen (vgl. Abbildung 152b). Beide Modelle generieren sehr große Niederschläge am Alpenrand, die weder in den REGNIE-Messdaten noch in der N1_ERA-Simulation zu beobachten waren.

Auch bei den N2-Simulationen sind die Unterschiede zwischen N1_ERA und N2_EHIST vergleichsweise gering. Die Niederschläge im Alpenraum sind allerdings wesentlich kleiner. Außerdem ist es bei der EHIST-Simulation in Nordost-Deutschland etwas trockener und kühler. Wie bereits ausgeführt, ist ein Vergleich zwischen den ERA- und EHIST-Ergebnissen nur auf einer klimatologischen Zeitskala sinnvoll (vgl. Abschnitt 3). EHIST beschreibt nicht das reale Jahr 2005, sondern "nur" ein statistisches Jahr im 30-jährigen Referenzzeitraum. Deshalb überrascht die relativ gute Übereinstimmung der meteorologischen Jahresmittelwerte zwischen ERA und EHIST.

6.3.1.3 Vergleich der Modellergebnisse mit Messdaten für die Jahressimulation 2005

Zur Analyse der Modellergebnisse und zum Vergleich mit Messdaten wurden Bodenmessungen von 15 Stationen des DWD und die TROPOS-Station Melpitz herangezogen. Exemplarisch werden in Abbildung 154 verschiedene Zeitreihen für die Temperatur und in Abbildung 155 für andere meteorologische Größen für die Station Müncheberg mit Messungen für das Jahr 2005 verglichen. Im Abschnitt 6.4 findet man weitere Vergleiche für die ausgesuchten Episoden. Dort erfolgt die Diskussion für das gesamte Ensemble der durchgeführten Simulationen (vgl. Tabelle 32).

In Abbildung 154 fällt auf, dass die Temperatur bei der CCLM-Simulation auf dem inneren Gebiet zum Teil stark von den Messungen und den anderen Simulationen abweicht. Im dort verwendeten Klima-Modus wird die Simulation kontinuierlich (d. h. ohne Restarts und Datenassimilation) für die 30-jährige Referenzperiode durchgeführt. Der Antrieb erfolgt nur über den Rand. Bodenfeuchte und Bodentemperatur werden akkumuliert. Der EU_CCLM-Lauf folgt den Messungen relativ gut. Das deutet darauf hin, dass die Meteorologie für DE_CCLM_ERA im Inneren des Modells "wegläuft". Die anderen drei Modellläufe reproduzieren die Messungen relativ gut. Allerdings wird die Temperatur während der PM-Episode im Februar 2005 teilweise auch bis zu 5°C unterschätzt (vgl. Abbildung 169). Da N1_ERA durch EU_CCLM_ERA angetrieben wird und durch die Restarts im zyklischen "Vorhersage-Regime" (vgl. Abbildung 149) immer wieder an die EU_CCLM_ERA-Simulation herangezogen wird, liegen die Ergebnisse relativ dicht beieinander. Ähnlich verhält sich N2_ERA, die durch die N1_ERA-Daten angetrieben wird. Die starke Unterschätzung der Temperatur während der PM-Episode Anfang Februar 2005 wird vermindert (vgl. Abbildung 169), wenn der Antrieb zyklisch durch Reanalysedaten erfolgt (z. B. mit GME). Dadurch ist eine Rückkopplung mit den Messungen gegeben. Bei Simulationen im Klima-Modus ist dies natürlich nicht möglich.

Zur Auswahl der beiden mehr im Detail betrachteten Episoden wurden neben der statistischen Analyse im Abschnitt 5 auch die Jahressimulationen mit herangezogen (vgl. Abbildung 161 und Abbildung 163). Die Periode mit sehr hohen PM10-Konzentrationen ist neben niedrigen Temperaturen durch sehr kleine Windgeschwindigkeiten, eine geringe Mischungsschichthöhe und hohe relative Feuchten gekennzeichnet (vgl. Abbildung 154 und Abbildung 155). Niederschlag tritt erst am Ende der Periode auf. Außer der bereits diskutierten Abweichung von DE_CCLM_ERA für die Temperatur wird das von allen Modellen reproduziert. Die Episode mit hohen Ozonkonzentrationen ist ebenfalls windschwach und trocken. Die relative Feuchte ist eher niedrig und die Temperaturen hoch. Diese meteorologischen Bedingungen werden von allen Modellen reproduziert.

Abbildung 154: Vergleich der simulierten Temperatur an ausgewählten Messstationen für das Jahr 2005.

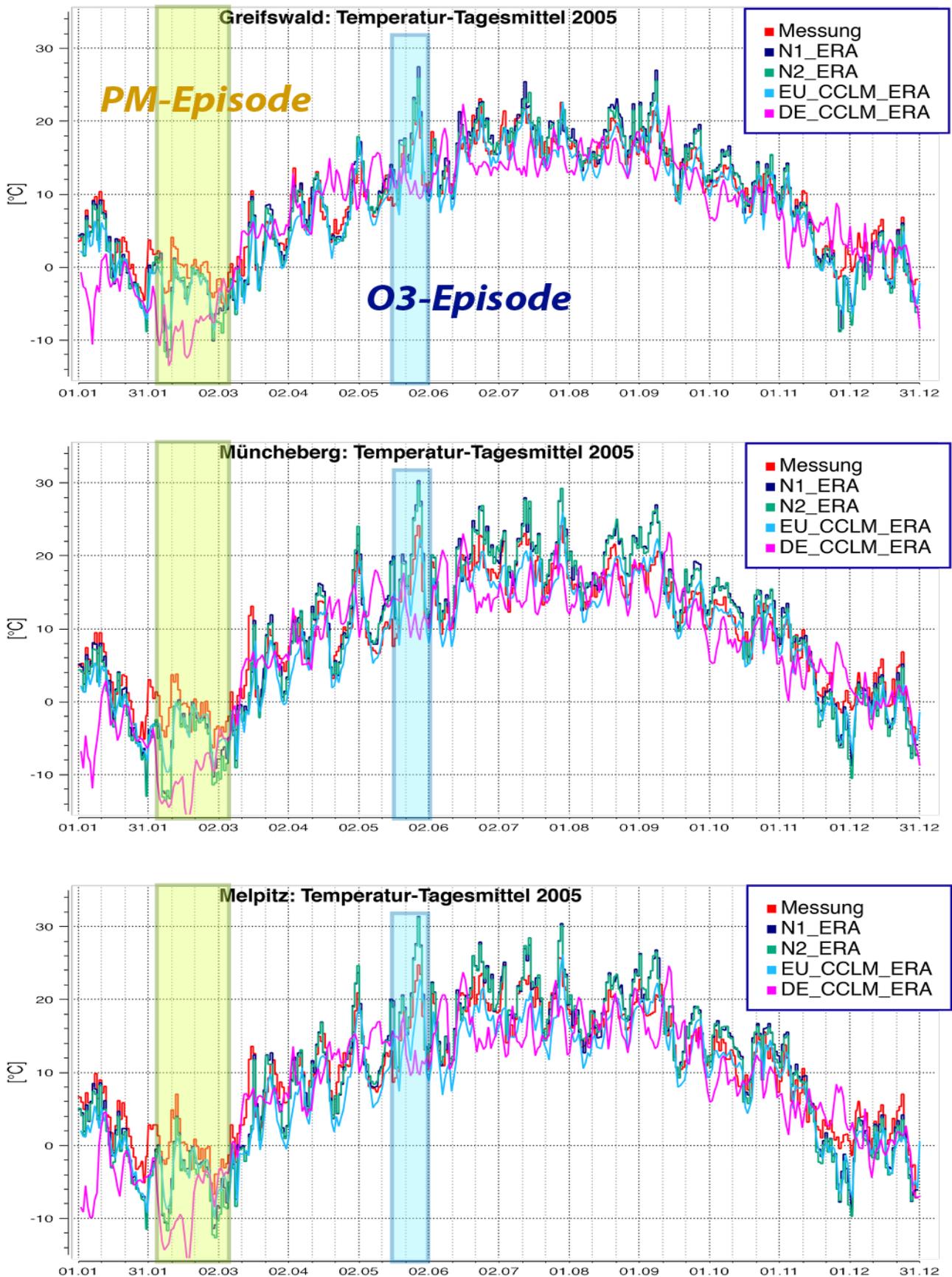
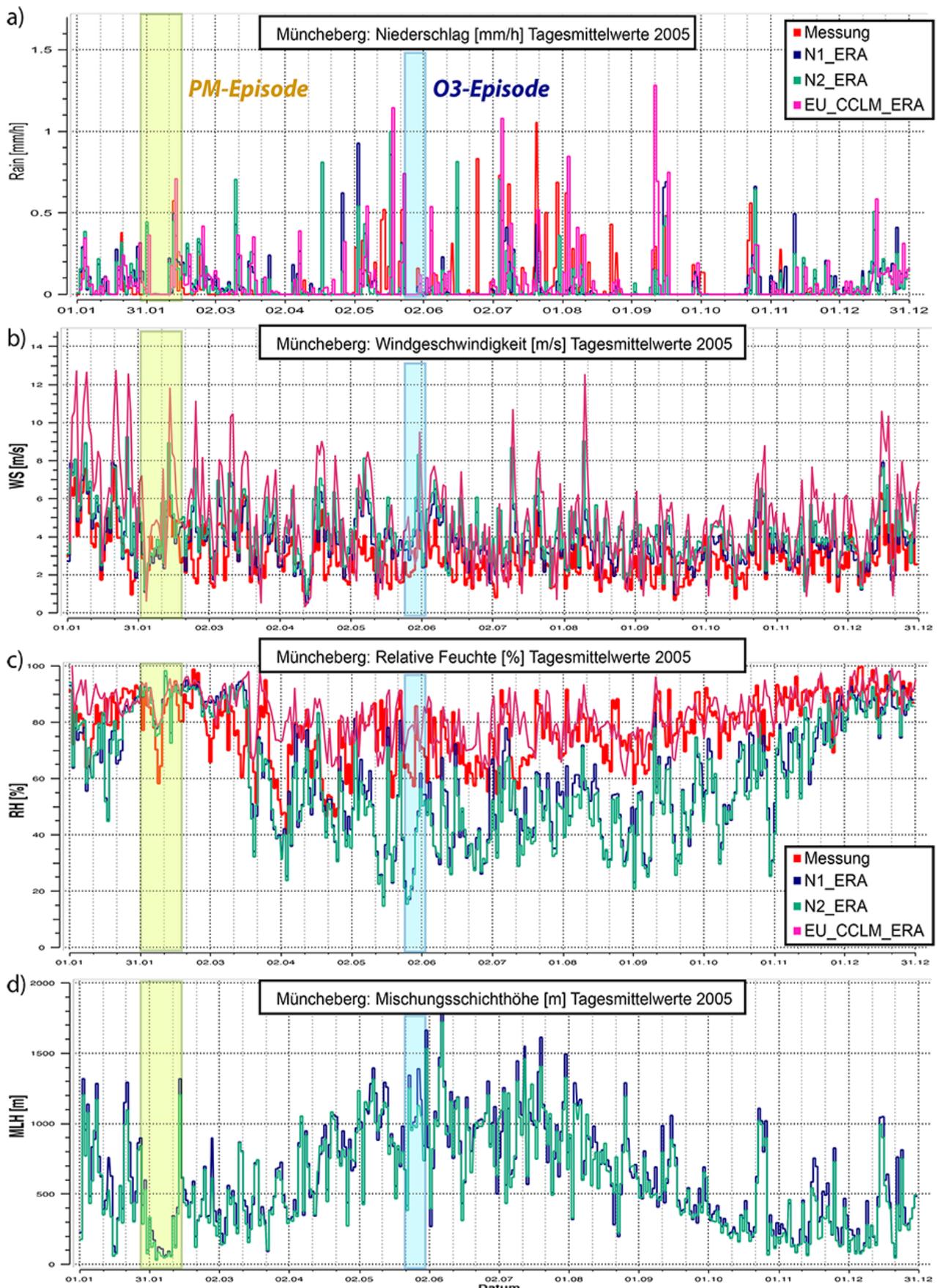


Abbildung 155: Vergleich gemessener und simulierter meteorologischer Zeitreihen für das Jahr 2005 am Standort Müncheberg.



6.3.2 PM, NO₂ und Ozon

6.3.2.1 Vergleich der Europa-Simulationen

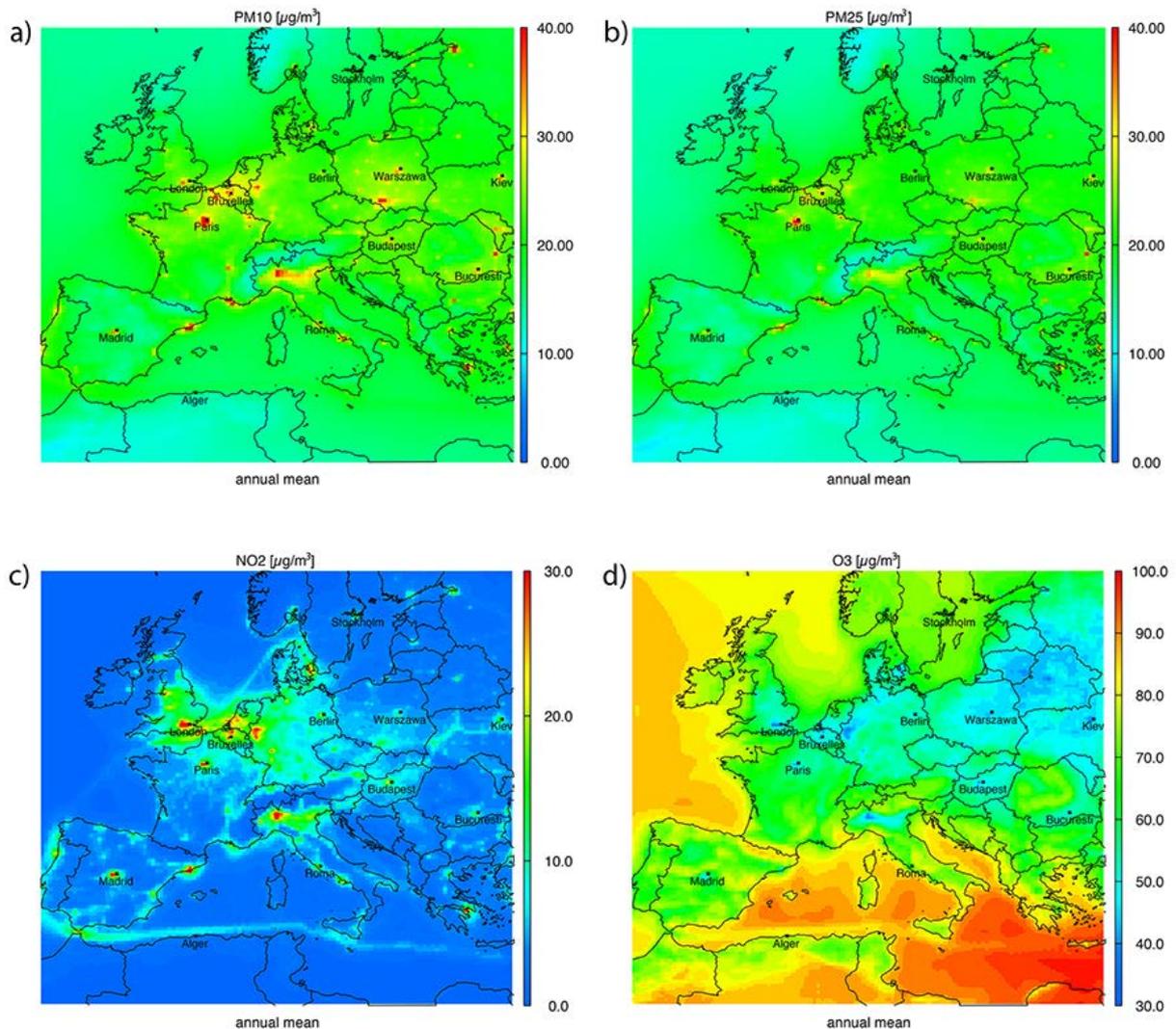
Die Simulationen für das Jahr 2005 wurden mit COSMO-MUSCAT sowohl für die CCLM_ERA als auch für die CCLM_EHIST-Antriebsdaten durchgeführt. Für beide Szenarien wurden die in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen anthropogenen Emissionen verwendet. Biogene und Seesalz-Emissionen wurden online mit den in COSMO-MUSCAT implementierten Ansätzen (Steinbrecher et. al., 2009 für biogene Emissionen; Sofiev et al. 2011) berechnet. Die für N1_ERA berechneten Jahresmittel-Konzentrationen sind in Abbildung 156 dargestellt. Sie werden nachfolgend mit den RCG-CCLM-Ergebnissen für die ERA-Antriebsdaten in Abschnitt 4.3.1 (Abbildung 37 bis Abbildung 39 und Abbildung 42) verglichen.

Für PM₁₀ und PM_{2.5} liefert N1_ERA höhere mittlere Werte als die EU_RCG_CCLM_ERA Simulationen, wobei die räumlichen Strukturen der Konzentrationsfelder vergleichbar sind. In einigen Ballungsräumen (z. B. Paris, Norditalien, Oberschlesisches Becken in Polen) sind die Konzentrationen für N1_ERA wesentlich größer. Auffällig sind auch die erhöhten Konzentrationen in den Benelux-Staaten. Hauptursache ist hier wahrscheinlich die Bildung von Ammoniumnitrat bedingt durch die hohen Ammoniak-Emissionen in diesem Gebiet. Die Bildungsprozesse werden in RCG und COSMO-MUSCAT durch unterschiedliche Mechanismen beschrieben. Für die Sulfatbildung wird dagegen in beiden Modellen eine vergleichbare Parametrisierung verwendet, bei der die Bildungsrate von der Feuchte und dem Wolkenbedeckungsgrad abhängt. Deshalb sind die Unterschiede der mittleren Konzentrationen hier relativ klein. Eine weitere Ursache für höheres PM₁₀ ist eine vermehrte SOA-Produktion. Sensitivitätsstudien haben gezeigt, dass der in MUSCAT implementierte erweiterte SORGAM-Ansatz (Schell et al. 2001) in Verbindung mit dem Schema für biogene Emissionen nach Steinbrecher et al. (2009) höhere SOA-Bildungsraten liefert als das in RCG verwendete originale SORGAM-Modell. Da sowohl SOA als auch Ammoniumnitrat hauptsächlich den kleineren Partikeln zugeordnet wird, erhöht sich vor allem der PM_{2.5}-Anteil am PM₁₀. Deshalb sind die Unterschiede zwischen PM_{2.5} und PM₁₀ für EU_RCG_CCLM_ERA merklich kleiner als für N1_ERA.

Die Verteilung der NO₂-Jahresmittelwerte in Europa ist für beide Simulationen sehr ähnlich mit niedrigen Konzentrationen in den ländlichen Regionen und hohen Konzentrationen in den europäischen Ballungsgebieten. Wie bei den PM-Konzentrationen sind auch für NO₂ die Maximalwerte in den Ballungsräumen (z. B. London, Paris, Ruhrgebiet, Mailand, Barcelona) für N1_ERA größer. Die erhöhten Konzentrationen entlang der internationalen Schifffahrtslinien zeichnen sich in beiden Simulationen deutlich ab.

Abbildung 156(d) zeigt die mit N1_ERA berechneten Ozon-Jahresmittelwerte 2005 für Europa. Die entsprechenden Werte für EU_RCG_CCLM_ERA findet man in Abschnitt 4.3.2 (Abbildung 42). Beide Simulationen führen zu ähnlichen Verteilungen der Ozonjahresmittelwerte, wobei in N1_ERA etwas höhere Werte berechnet wurden. Eine Diskussion möglicher Ursachen erfolgt im nächsten Abschnitt für die Deutschland-Simulationen. Hier findet man auch eine genauere statistische Quantifizierung der Unterschiede in allen Konzentrationsverteilungen.

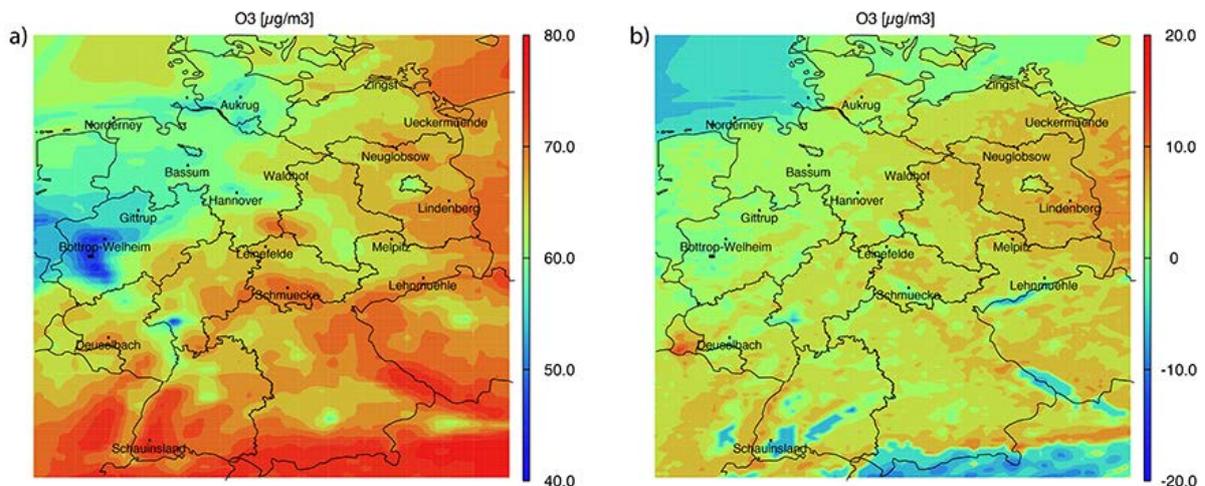
Abbildung 156: Jahresmittel der PM-, NO₂- und Ozon-Konzentration 2005 für Europa und die CCLM_ERA-Antriebsdaten.



6.3.2.2 Vergleich der Deutschland-Simulationen

Ergänzend zu den flächenhaften Vergleichen der Ergebnisse von COSMO-MUSCAT und RCG im höher auflösenden Deutschland-Raster (Abbildung 157 und Abbildung 158) erfolgt wie für Temperatur und Niederschlag eine Auswertung in Form von Box-Whisker-Plots (Abbildung 159), die statistische Informationen der räumlichen Verteilungen der dargestellten Größen in Deutschland zusammenfassen. In Abbildung 157 und Abbildung 158 mit den Konzentrationsfeldern der in N2_ERA berechneten Jahresmittelwerte (linke Spalte) findet man auch Plots der Differenzen zur DE_RCG_CCLM_ERA-Simulation (rechte Spalte), vgl. Abschnitte 4.3.3 und 4.3.4. Hierzu wurden die im gedrehten Koordinatensystem vorliegenden N2_ERA-Ergebnisse in das entsprechende RCG-Gitter transformiert. Die für die EHIST-Antriebsdaten berechneten Konzentrationen findet man in Abbildung 160. Diese werden am Ende dieses Abschnitts separat diskutiert und mit den entsprechenden Werten der DE_RCG_CCLM_EHIST-Simulation in den Abschnitten 4.3.3 und 4.3.4 verglichen.

Abbildung 158: Vergleich der modellierten Mittelwerte für April-September 2005 der Ozon-Konzentrationen für Deutschland.



Bei den PM₁₀-Konzentrationen ergeben sich wie schon im Europalauf für N₂_ERA höhere Jahresmittelwerte, was im Wesentlichen wieder auf die höheren Ammoniumnitrat- und SOA-Konzentrationen zurückzuführen ist. Übereinstimmend bei beiden Simulationen werden die höchsten PM₁₀-Jahresmittelwerte im Ruhrgebiet, entlang der Rheinschiene und im Großraum Stuttgart berechnet. Hier sind auch die positiven Differenzen zu den RCG-Rechnungen am größten. Dagegen werden die in N₂_ERA deutlich sichtbaren erhöhten PM-Konzentrationen in Ostdeutschland mit RCG nicht simuliert. Eine Ursache hierfür könnten die größeren Nitrat-Bildungsraten und ein höherer Ferntransport aus dem Südosten in COSMO-MUSCAT sein. Die höheren PM₁₀- und PM_{2.5}-Konzentrationen in N₂_ERA zeigen sich auch in den Box-Whisker-Plots (Abbildung 159). Der Median der mittleren Konzentrationen von N₂_ERA liegt um ca. 2 µg/m³ über dem der mit RCG berechneten Mittelwerte.

Abbildung 157 (e, f) zeigt die NO₂-Jahresmittelwerte des N₂_ERA-Laufs und die entsprechenden Differenzen zur RCG-Simulation. Wie schon im Europalauf ist die NO₂-Konzentrationsverteilung in Deutschland ähnlich mit niedrigen Konzentrationen in den ländlichen Regionen und hohen Konzentrationen in den Ballungsgebieten (z.B. das Ruhrgebiet, Berlin und die Rhein-Main-Region). Allerdings sind die in N₂_ERA berechneten Konzentrationen insbesondere im Süden und Westen Deutschlands deutlich geringer als die RCG-Ergebnisse. Das führt insgesamt zu einem um ca. 2 µg/m³ kleineren Median in den N₁_ERA-Jahresmittelwerten.

In Abbildung 158 sind die zeitlichen Mittelwerte der Ozonkonzentrationen des N₂_ERA-Laufs und die entsprechenden Differenzen zur RCG-Simulation für die Monate April – September 2005 dargestellt. Da hohe Ozonkonzentrationen und damit auch eine große Belastung mit diesem Schadstoff nur im Sommer zu erwarten sind, erfolgt die Analyse für Ozon nur für das Sommerhalbjahr 2005. Erwartungsgemäß ist eine Zunahme der mittleren Konzentration von Nordwest nach Südost zu beobachten. Bei nordwestlichen Wetterlagen strömt frische Meeresluft insbesondere nach West- und Mitteleuropa, was dort zu geringeren Ozonkonzentrationen führt. Da solche Wetterlagen relativ häufig auftreten, führt das zu dem beobachteten Gradienten in den mittleren Ozonkonzentrationen, der auch in den Ergebnissen der DE_RCG_CCLM_ERA-Simulation deutlich zu sehen ist (vgl. Abbildung 51 in Abschnitt 4.3.4). Allerdings sind hier die berechneten mittleren Konzentrationen um mehr als 10 µg/m³ geringer (vgl. auch die Box-Whisker-Plots in Abbildung 159). Ein Vergleich der zeitlichen Verläufe mit Messungen zeigt (Abbildung 171), dass die Ozonkonzentrationen insbesondere während der Nacht stark überschätzt werden. In früheren Studien mit COSMO-MUSCAT (Solazzo et al. 2012; Im et al. 2015) wurde diese Überschätzung für verschiedene Wettersituationen zwar ebenfalls beobachtet,

war aber nicht so stark ausgeprägt. Eine Ursache hierfür könnte in einer zu starken Einmischung von oben oder einer zu kleinen Deposition während der Nachtstunden liegen. Im Unterschied zum RCG, das für die vertikale Durchmischung und trockene Deposition ein eigenes Grenzschichtmodell nutzt, verwendet MUSCAT die in COSMO berechneten Parameter. Für die KLENOS-Simulationen wurde für die vertikale Turbulenz ein auf der prognostischen TKE basierendes Schema verwendet. In Tabelle 33 sind einige statistische Gütemaße für eine Auswahl von Stationen für verschiedene Modellläufe und Spurenstoffe aufgelistet. Während hier die Ozon-Tagesmittelwerte vom RCG unterschätzt werden, sieht man für N1_ERA und N2_ERA eine deutliche Überschätzung. Vergleicht man anstelle der Tagesmittelwerte die 8h-Mittel, so werden die Werte durch COSMO-MUSCAT sogar leicht unterschätzt. Dies resultiert aus den zu hohen Ozonwerten im Modell während der Nachtstunden.

Abbildung 159: Box-Whisker-Plots für die PM10 (a), PM2.5 (b) und die NO₂ (c) Konzentrationen für das Jahr 2005. Für O₃ erfolgte die statistische Auswertung nur für das Sommerhalbjahr (April-September 2005).

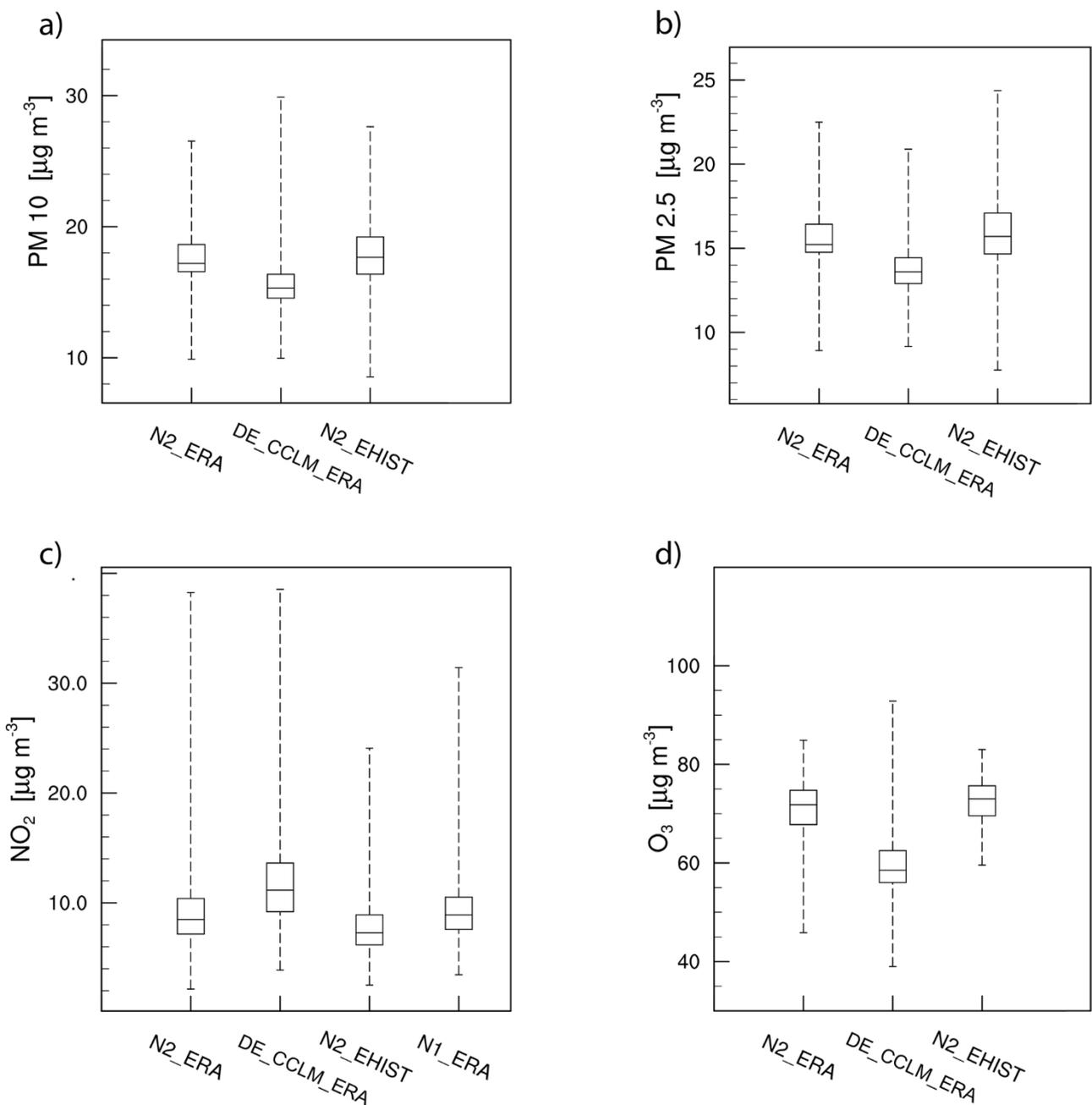
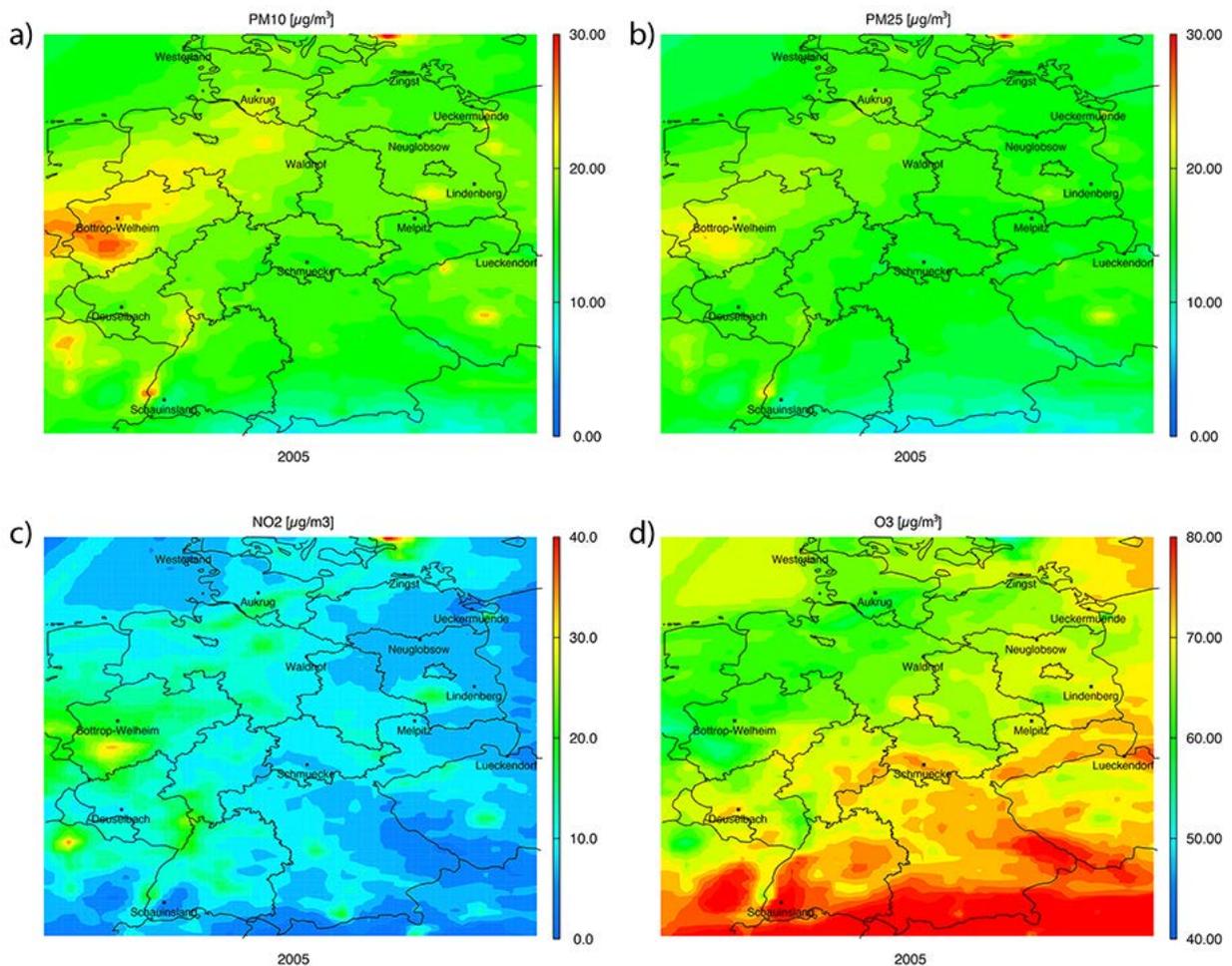


Abbildung 160: Simulierte Jahresmittel der PM-, NO₂- und Ozon-Konzentration 2005 für Deutschland und die CCLM_EHIST-Antriebsdaten.



Die N2_EHIST-Simulationen (Abbildung 160) bestätigen die Ergebnisse der RCG-Simulationen im Abschnitt 4.6.3. Sowohl die räumlichen Muster als auch die Höhe der mittleren Konzentrationen zwischen den ERA- und EHIST-Läufen unterscheiden sich nur wenig. Wie bei den ERA-Simulationen liefert COSMO-MUSCAT etwas höhere PM-Konzentrationen und etwas weniger NO₂ im Vergleich zu RCG (vgl. auch die Box-Whisker-Plots in Abbildung 159). Bei Ozon liegen die höheren N2_ERA-Werte wieder im Bereich von 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Bei beiden Modellen führt die bereits im Abschnitt 6.3.1 diskutierte relativ gute Übereinstimmung der meteorologischen Jahresmittelwerte auch zu ähnlichen mittleren Konzentrationsverteilungen für die Läufe mit EHIST- und ERA-Antriebsdaten.

6.3.2.3 Vergleich mit Messungen

Eine zeitliche Auswertung im Vergleich mit gemessenen Tagesmittelwerten erfolgte für ausgewählte Stationen in Deutschland. Einige statistische Gütemaße für die auf dem inneren Modellgebiet durchgeführten Jahresläufe sind in Tabelle 33 zusammengefasst. Erwartungsgemäß sind die N2_ERA-Ergebnisse der COSMO-MUSCAT-Simulation auf dem inneren Nest statistisch besser als bei N1_ERA. Während N1_ERA die PM10-Konzentration im Mittel um mehr als 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ überschätzt, liegt der berechnete Mittelwert bei N2_ERA knapp unter den Messungen. Der NO₂-Mittelwert wird in beiden Läufen um knapp 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ zu niedrig vorhergesagt. Wie bereits im vorigen Abschnitt diskutiert, werden

die Tagesmittelwerte für Ozon um ca. 5 µg/m³ überschätzt. Die Ursache sind zu hohe Konzentrationen während der Nacht. Vergleicht man aber die 8h-Mittelwerte, so unterschätzen alle Modelle leicht die Messungen. Insgesamt sind die Gütemaße für N2_ERA und DE_RCG für Deutschland vergleichbar.

An einigen wenigen Hintergrundstationen stehen für den Vergleich neben PM₁₀, PM_{2.5} und NO₂ auch Messungen der Aerosolkomponenten zur Verfügung: Westerland, Waldhof, Zingst, Neuglobsow und Melpitz.

Tabelle 33: Statistische Gütemaße (vgl. Abschnitt 3.3, STW = Standardabweichung) für N1_ERA, N2_ERA und DE_RCG_CCLM_ERA vs. gemessene Stundenwerte an ausgewählten Messstationen für das Jahr 2005. Für Ozon wurde die Statistik nur für das Sommerhalbjahr (April – September 2005) erstellt.

Modelllauf	Gütemaß	PM10	NO ₂	O3 (T-MW)	O3 (8h-MW)
Messung	Mittelwert	18,721	11,682	63,548	79,358
	STW	10,551	8,092	30,013	27,263
N1_ERA	Mittelwert	22,944	9,842	69,340	78,367
	STW	13,898	6,306	19,614	18,321
	BIAS	4,223	-1,840	5,049	-0,991
	SRMSE	13,732	9,133	28,686	25,5021
	RSV	1,317	0,779	0,654	0,6720
	PCOR	0,371	0,366	0,432	0,4496
N2_ERA	Mittelwert	17,426	9,892	70,971	78,703
	STW	11,132	5,998	18,954	18,258
	BIAS	-1,295	-1,790	6,681	-0,655
	SRMSE	11,208	8,002	28,673	24,172
	RSV	1,055	0,741	0,632	0,670
	PCOR	0,496	0,432	0,440	0,495
DE_RCG	Mittelwert	16,092	11,885	57,434	75,499
	STW	7,228	9,091	24,043	20,094
	BIAS	-2,629	0,203	-6,105	-3,858
	SRMSE	10,938	9,257	22,891	21,694

RSV	0,685	1,123	0,801	0,737
PCOR	0,365	0,405	0,700	0,655

Abbildung 161: Vergleich gemessener und simulierter Zeitreihen für PM₁₀ [µg/m³] an ausgewählten Messstationen für das Jahr 2005 (Tagesmittelwerte).

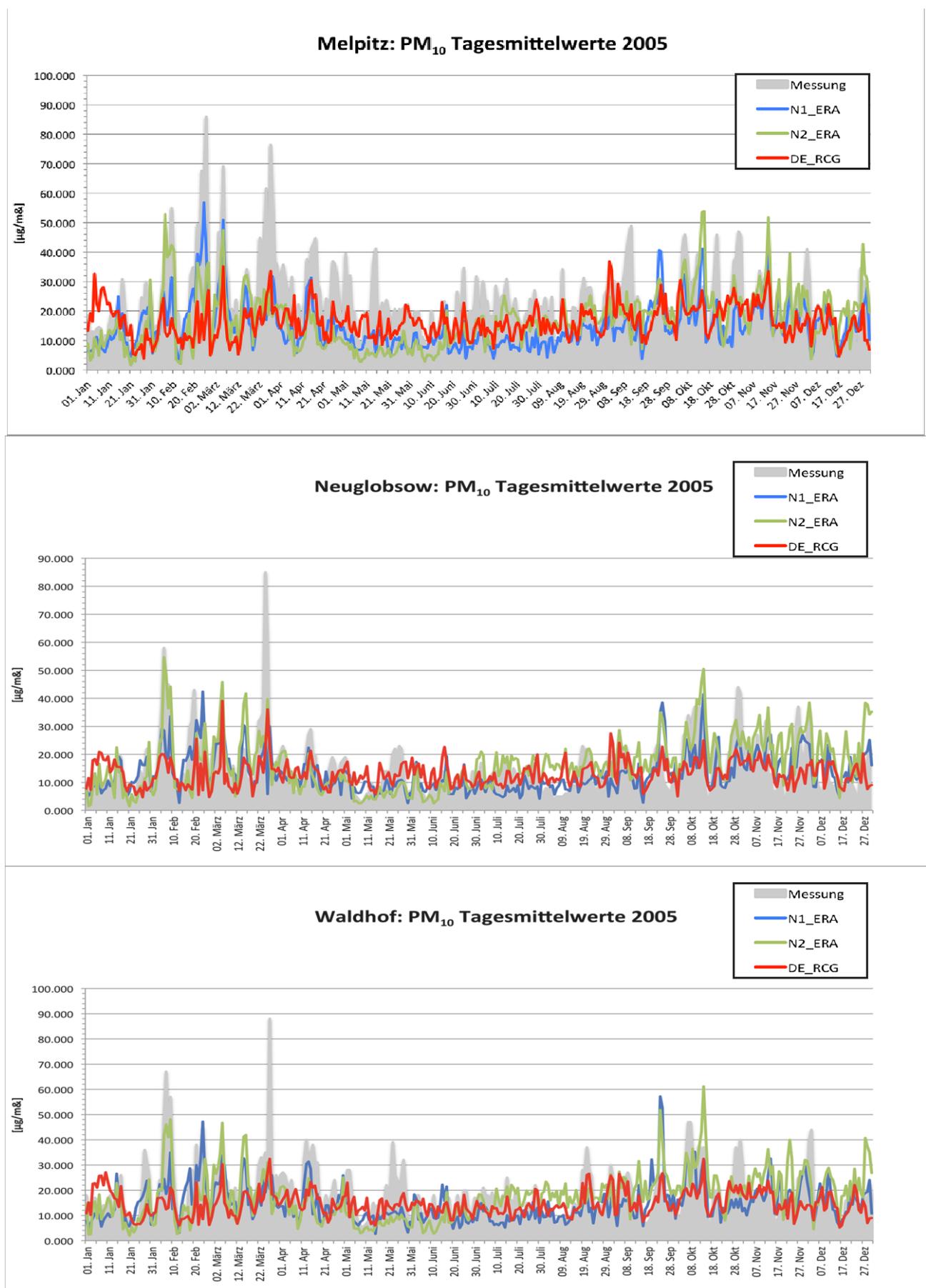
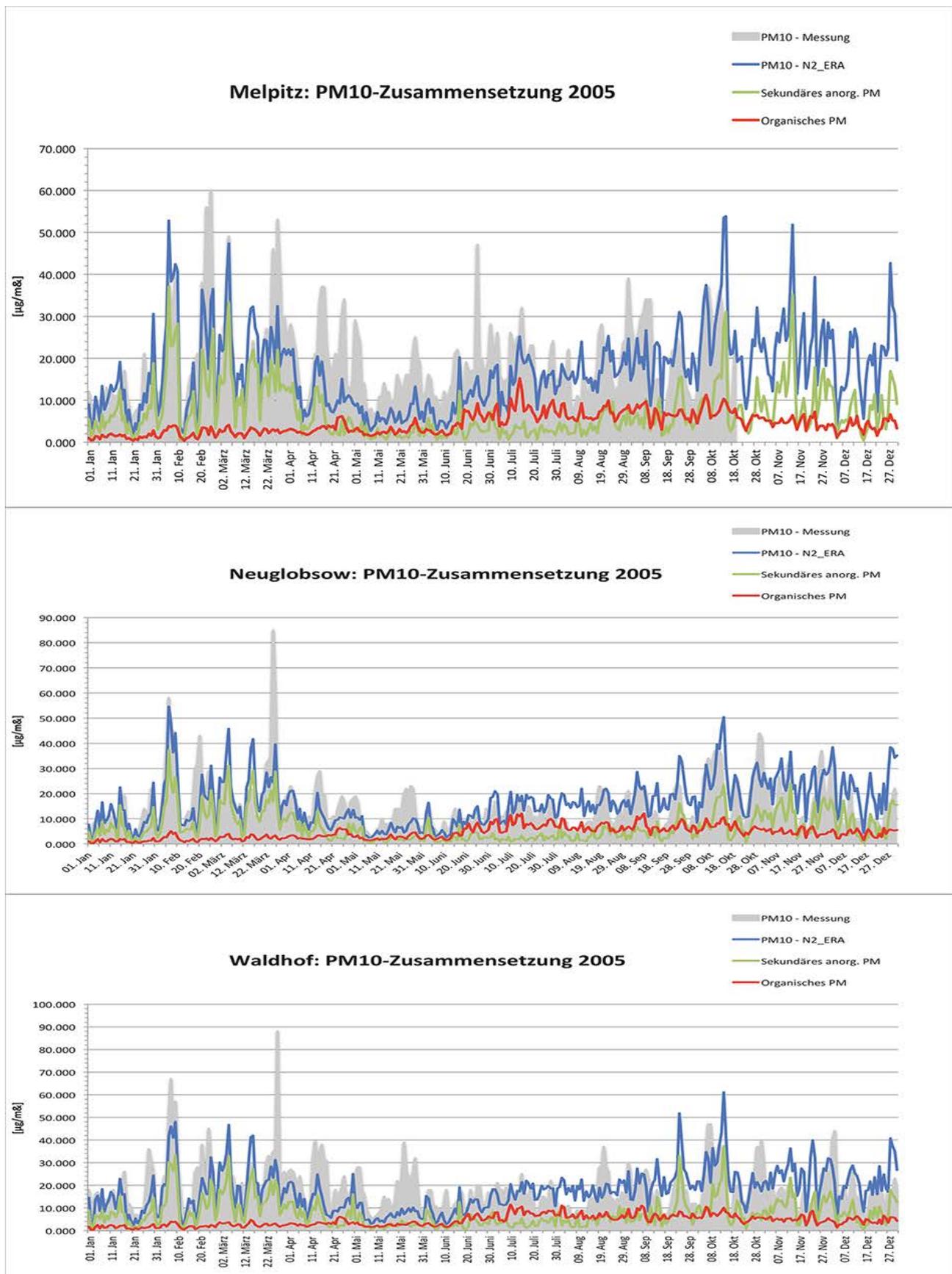


Abbildung 162: Vergleich gemessener und simulierter Zeitreihen für die PM10-Zusammensetzung an ausgewählten Messstationen für das Jahr 2005 (Tagesmittelwerte).

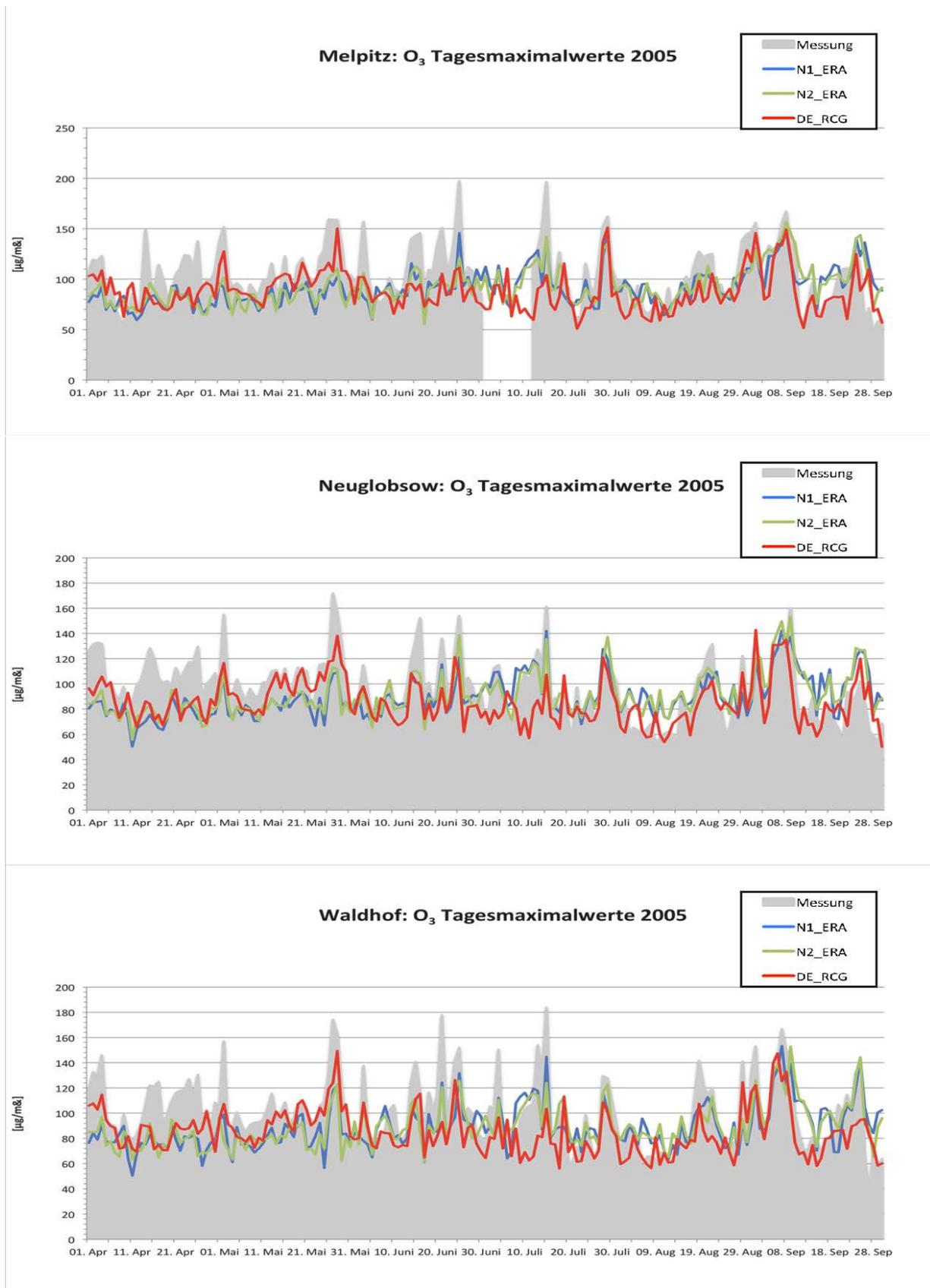


In Abbildung 161 werden PM10-Zeitreihen an 3 Stationen (Melpitz, Neuglobsow und Waldhof) mit Ergebnissen von N1_ERA, N2_ERA und DE_RCG_CCLM_ERA verglichen. Die einzelnen Zeitreihen laufen zwar nicht immer ganz synchron (am besten die beiden ERA-Rechnungen), liegen aber im Mittel im selben Zahlenbereich (10 ... 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) und weisen die Peaks oft zu gleichen Zeiten auf, auch wenn die hohen Messwerte (30 ... 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) durch die Rechnungen nur selten erreicht werden. Den Peak während der PM-Episode Anfang Februar sieht man in allen Modellsimulationen und an allen Stationen. Die beste Übereinstimmung liefert hier N2_ERA. Es werden bei allen 3 Stationen Maximalwerte von über 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vorhergesagt wie in den Messungen. Während N1_ERA noch Spitzenkonzentrationen um die 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ berechnet, unterschätzt DE_RCG_CCLM_ERA die Höhe des Peaks bei allen Stationen sehr stark. Die Ursache für die geringeren Maximalwerte in der N1_ERA-Simulation könnte in der größeren Gitterauflösung liegen.

Abbildung 162 zeigt die beiden Zeitreihen für die sekundären anorganischen und für die organischen Bestandteile vor dem Hintergrund der gemessenen und der mit N2_ERA simulierten PM10-Zeitreihen an 3 Stationen (Melpitz, Neuglobsow und Waldhof). Sekundäres anorganisches PM bleibt im Sommer stets sehr klein (unter 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), macht aber in den übrigen Zeiten einen wesentlichen Anteil an PM10 aus (oft über 50 %). Organisches PM bleibt in der ersten Jahreshälfte überall weit unter 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, während es in der zweiten Jahreshälfte generell bei etwa 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ liegt, ab Herbst jedoch eine sehr langsame Tendenz zum Fallen aufweist. Während die Zusammensetzung über das Jahr zeitlich stark variiert, ist sie für alle 3 Stationen annähernd gleich.

In Abbildung 163 sind die Tagesmaxima der Ozon-Konzentration im Sommerhalbjahr 2005 an 3 Stationen (Melpitz, Neuglobsow und Waldhof) für die Messungen sowie die Ergebnisse von N1_ERA, N2_ERA und DE_RCG_CCLM_ERA dargestellt. Die Skala für die Konzentrationen ist auf den Bereich 0 bis 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ eingestellt. Die einzelnen Zeitreihen laufen zwar nicht immer ganz synchron (am besten die beiden ERA-Rechnungen), liegen aber im Mittel im selben Bereich (80 ... 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) und weisen die Peaks oft zu gleichen Zeiten auf, auch wenn die hohen Messwerte (120 ... 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) durch die Rechnungen nur selten erreicht werden. Am besten werden der zeitliche Verlauf und die Höhe der Peaks durch DE_RCG_CCLM_ERA wiedergegeben. Für die ausgesuchte Ozon-Episode Anfang Mai werden in allen Modellläufen hohe Ozon-Konzentrationen berechnet, wobei auch hier DE_RCG_CCLM_ERA die Höhe am genauesten reproduziert.

Abbildung 163: Vergleich gemessener und simulierter Zeitreihen für die Ozon-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] an ausgewählten Messstationen für das Jahr 2005.



6.4 Untersuchung des Einflusses der meteorologischen Bedingungen auf hohe Schadstoffkonzentrationen

6.4.1 PM10-Episode: 03. – 12. Februar 2005

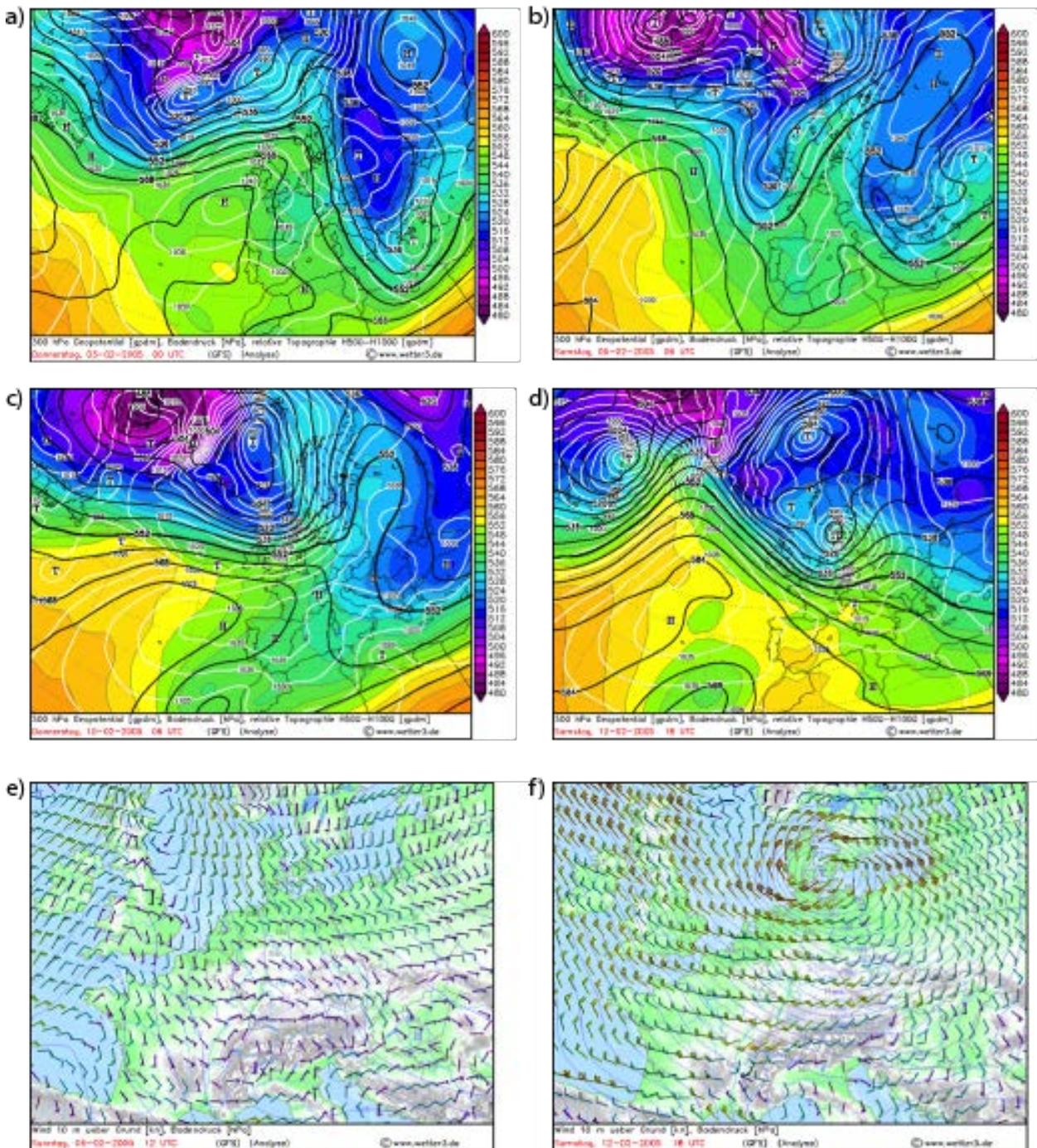
6.4.1.1 Meteorologische Situation

Zu Beginn des Betrachtungszeitraums befanden sich ein Hochdruckgebiet über Westeuropa und ein Tiefdrucksystem über Osteuropa (s. Abbildung 164a). Eine stationäre Front bescherte Deutschland Niederschläge bis über 5 mm/6h. Aus West bis Nordwest wehte ein schwacher Wind (bis ca. 5,5 m/s). Das Tiefdruckgebiet über Osteuropa zog nach Südosten ab und das Hochdruckgebiet über Westeuropa vereinigte sich mit einem zweiten über Russland. Dadurch befand sich Mitteleuropa am 04. und 05.02. unter Hochdruckeinfluss (siehe Abbildung 164b). Über Westeuropa (Britische Inseln, Biskaya-Golf) entwickelte sich ein neues Tiefdrucksystem und über Deutschland verlief wieder die Wetterscheide.

Am 06.02. entstand ein Kaltlufttropfen über Süddeutschland, zog nach Nordosten und löste sich über Polen auf. Das brachte ab dem 08.02. über dem Rhein-Main-Gebiet etwas Niederschlag von ca. 1 mm/6h. Am Boden herrschte in dieser Zeit weiterhin Hochdruck. Vom 04. bis 09.02. war es weitestgehend trocken. Der Wind wehte über Mitteleuropa mit 0 bis ca. 5,5 m/s überwiegend aus südlichen Richtungen (siehe Abbildung 164e). Die Luft war kalt und trocken. Die Temperatur war nur in Westdeutschland am Tag über 0°C. Außerdem gab es kaum tiefe Wolken.

Vom 10. bis 11.02. erreichte der Rand eines starken Tiefdruckgebietes (Kern über Nordatlantik) mit dessen Fronten Norddeutschland (Abbildung 164c.). Die Temperatur wurde milder und sank auch nachts nur selten unter 0°C. Die Niederschlagsmenge betrug bis ca. 5mm/6h. Aus West wehte ein schwacher bis starker Wind (5,5 – über 10 m/s). Am 12.02. zog ein Sturmtief („Ulf“) über Deutschland (Abbildung 164 d und f). Es brachte Niederschläge von über 10mm/6h (Küste) und Windgeschwindigkeiten bis über 20 m/s (Sturm).

Abbildung 164: Meteorologische Situation während der Episode mit hohen PM10-Konzentrationen (3. – 12. Februar 2005): (a) Druckkarte für den 03.02.2005, (b) Druckkarte für den 05.02.2005, (c) Druckkarte 10.02.2005, (d) Druckkarte 12.02.2005, (e) bodennahe Druck und Wind am 06.02.2005, (f) bodennahe Druck und Wind 12.02.2005.



6.4.1.2 Entwicklung der PM-Konzentration

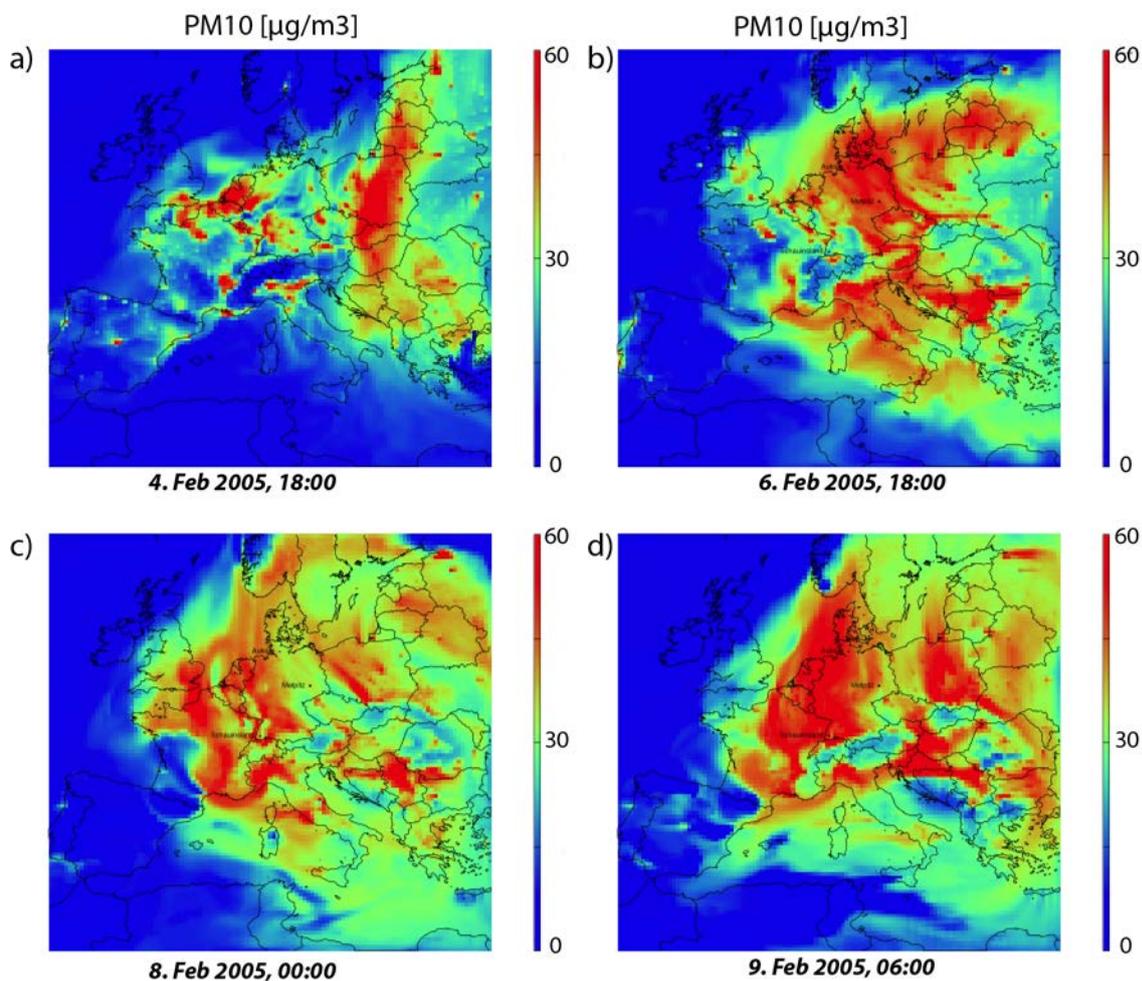
Am 04.02. befand sich ein kleines Hochdruckzentrum über Ostpolen. Dadurch gab es dort nur sehr geringe Windgeschwindigkeiten, so dass PM10 stark angereichert wurde (Abbildung 165a). Ab 05.02. trieb einsetzender Ost-/Südostwind die „Wolke“ über Mitteleuropa/ Deutschland. Gleichzeitig kam es zu einer zusätzlichen Anreicherung in der Luft durch die lokalen Emissionen. Dies war das

erste Maximum, welches in den Diagrammen norddeutscher Messstationen zwischen dem 06. und 07.02. zu sehen ist (Abbildung 166).

Der Wind drehte am 07./08.02. auf Süd und wehte die polnische „Wolke“ nach Norden. Dahinter gelangte kurzzeitig sauberere und durch die Mittelgebirge kanalisierte Luft aus Tschechien nach Nordostdeutschland und sorgte für ein lokales Minimum (Abbildung 165c.).

Inzwischen wurde die Luft über einer Region um den Rhein (Nordfrankreich, Benelux, Westdeutschland) durch lokale Emissionen stark mit PM10 angereichert. Ab dem 09.02. drehte der Wind nun weiter auf Südwest und bewegte diese „Rheinwolke“ nach Norden (Abbildung 165d). So entstand das zweite Maximum am 10./11.02.2005.

Abbildung 165: Entwicklung der PM10-Verteilung in Europa während der PM-Episode im Februar 2005 für die N1_GME-Simulation.



6.4.1.3 Vergleich mit Messungen

Abbildung 166: Vergleich von simulierten Stunden- und gemessenen Tagesmittelwerten der PM₁₀-Konzentration für unterschiedliche Modellkonfigurationen: (a) Melpitz, (b) Neuglobsow, (c) Waldhof. Dargestellt ist jeweils der Zeitraum vom 02.02.2005, 0:00 Uhr bis zum 15.02.2005, 24:00 Uhr.

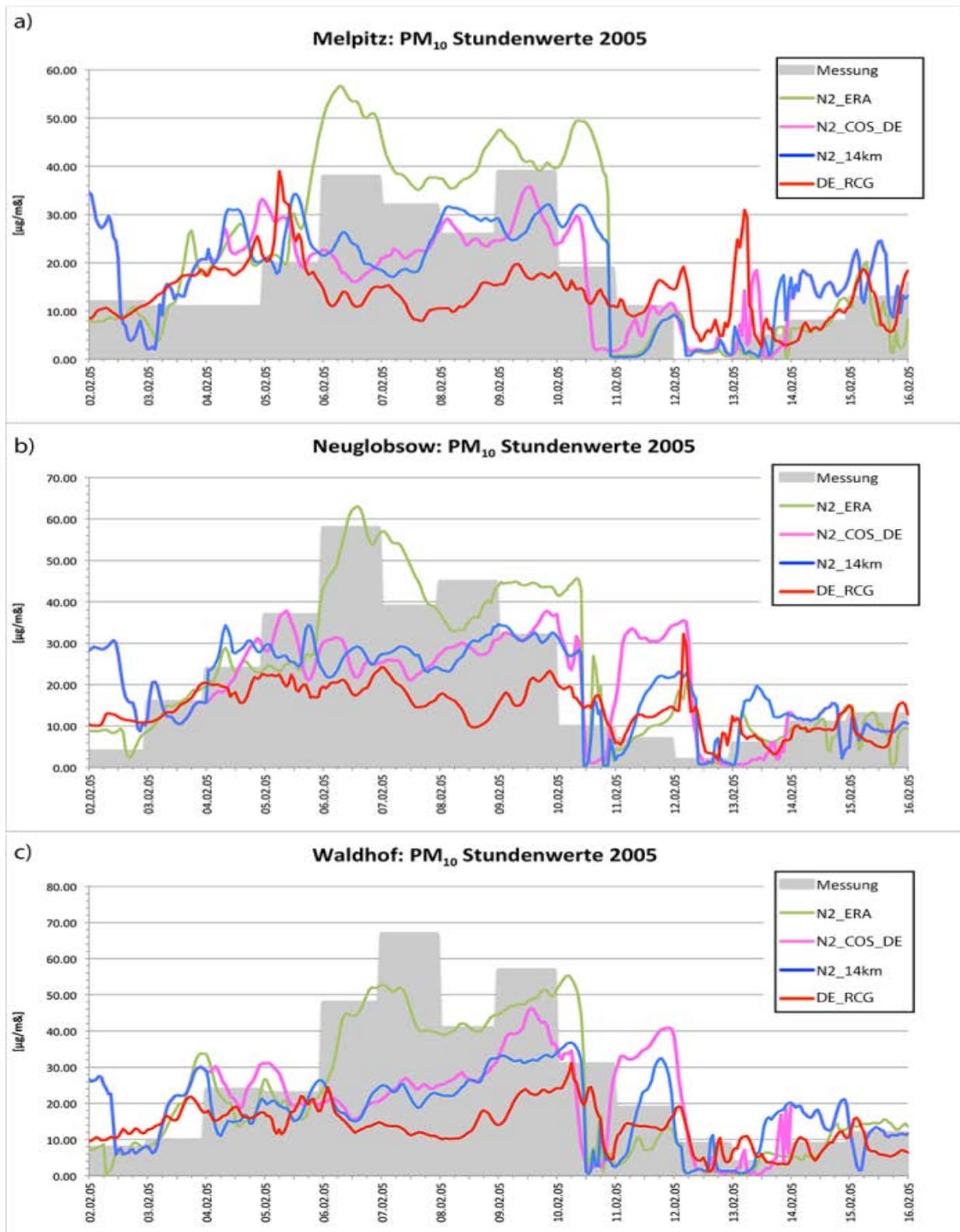
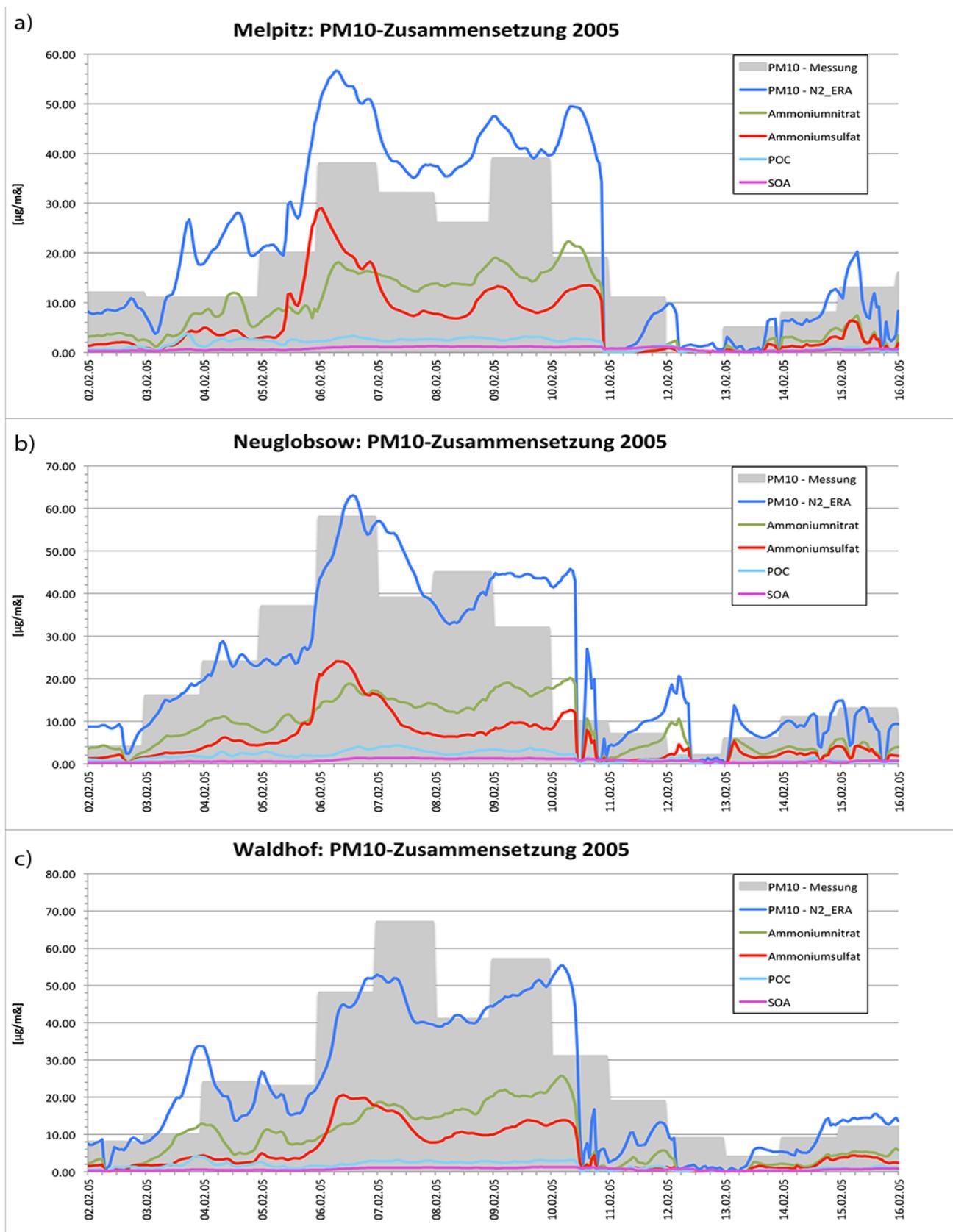


Abbildung 167: Zusammensetzung der in N2_ERA simulierten stündlichen PM10-Konzentrationen für unterschiedliche Standorte: (a) Melpitz, (b) Neuglobsow, (c) Waldhof. Die Konzentrationen sind im Vergleich mit den gemessenen PM10-Tagesmittelwerten für den Zeitraum vom 02.02.2005, 0:00 Uhr bis zum 15.02.2005, 24:00 Uhr dargestellt.



In Abbildung 166 werden die gemessenen PM₁₀-Konzentrationen für 3 Stationen (Melpitz, Neuglobsow, Waldhof) mit verschiedenen Modellsimulationen für das Deutschlandgebiet verglichen. Die beiden Maxima und das Minimum in Abbildung 166 werden von den N2_ERA und N2_14km für Melpitz, Neuglobsow sowie für Waldhof wiedergegeben. Dagegen ist das linke Minimum am 07.02. bei N2_COS_DE und DE_RCG_CCLM_ERA nicht so stark ausgeprägt. In allen Läufen kam der Wind während dieser Zeit und kurz vorher aus östlichen Richtungen, was zu einem starken Eintrag aus dem Ferntransport führte (vgl. Abbildung 165). Die N2_Simulation überschätzt leicht die PM₁₀-Konzentration, was auf den hohen Anteil an gebildeter sekundärer anorganischer Partikelmasse (SIA) zurückzuführen ist (vgl. Abbildung 167). Ammoniumsulfat und Ammoniumnitrat liegen dabei in derselben Größenordnung. Am 06./07.02. wird zunächst mehr Sulfat gebildet und zwischen 08.-10.02. überwiegt die Bildung von Ammoniumnitrat.

6.4.1.4 Diskussion möglicher Ursachen für PM₁₀-Hotspots und der Wechselwirkungen

Nachfolgend sollen mögliche Ursachen für Perioden mit einer hohen Belastung an PM₁₀ diskutiert werden. Neben der primär emittierten Partikelmasse bilden sich in der Atmosphäre auch partikuläre Stoffe aus gasförmigen Vorläufer-Substanzen. Damit hohe Konzentrationen auftreten können, spielen i. allg. mehrere Faktoren zusammen. Zunächst müssen hohe Emissionen in die Atmosphäre freigesetzt werden. Diese können entweder im Nahbereich eingetragen werden und akkumulieren dann bei stagnierenden Wetterlagen (schwacher Wind, geringe vertikale Durchmischung). Sie können aber auch durch Ferntransport aus weiter entfernt liegenden Industrieregionen oder von Brandquellen herantransportiert werden. In der Periode Anfang Februar wurden durch eine Ostströmung zunächst verstärkt Schadstoffe aus Polen, der Ukraine und Südrussland nach Deutschland transportiert (vgl. Abbildung 165). Danach schwächt sich die Strömung ab und es kommt zu einer stagnierenden Wetterlage mit wenig Wind und Durchmischung (vgl. Abbildung 169). Dadurch können die lokal emittierten Schadstoffe nicht wegtransportiert werden. Dies führt zu einem weiteren Anstieg der Partikelkonzentrationen, aber auch zum Anstieg von gasförmigen Substanzen, die durch Kondensation oder chemische Umwandlungen partikuläre Masse bilden können (z. B. Ammoniumsulfat und Ammoniumnitrat aus NH₃ und H₂SO₄ bzw. HNO₃). In Abhängigkeit von den meteorologischen Bedingungen liefert diese sekundär gebildete Partikelmasse einen Großteil der Gesamtmasse. Während biogenes organisches Material vor allem im Sommer unter warmen und sonnigen Bedingungen auftritt, bildet sich SIA verstärkt unter feuchten kühleren Bedingungen. In der untersuchten Periode war es relativ kalt und feucht.

In Abbildung 168 ist die Partikelzusammensetzung gemittelt über die Dauer der gesamten PM-Episode im Februar 2005 für N2_ERA dargestellt. Wie schon im Jahresplot erkennt man auch hier für PM₁₀ und PM_{2.5} sehr gut die Ballungsräume und Hauptverkehrsstraßen. Die SIA-Bildung ist vor allem im Nordosten Deutschlands zu beobachten. Ein Großteil der Vorläufersubstanzen stammt hier aus dem Ferntransport und akkumulierten Emissionen aus dem Großraum Berlin. Der Anteil der sekundär gebildeten Partikelmasse an der Gesamtmasse ist insgesamt sehr groß (vgl. Flächenplot der Jahresmittelwerte in Abbildung 168). Im ländlichen Bereich liegt er im Mittel bei 50 % oder weit darüber. Lediglich in Regionen mit starken Primäremissionen (z. B. Ruhrgebiet, Rhein-Main-Region, Großraum Berlin und München) überwiegt der Beitrag der primär emittierten Partikelmasse. Die entsprechende Zeitreihe für Melpitz (Abbildung 162) verdeutlicht außerdem, dass dieser hohe Anteil über das gesamte Jahr auftritt. Simulierte PM-Spitzen werden im Wesentlichen durch einen starken Anstieg der sekundär gebildeten Partikelmasse verursacht. In den Messwerten können solche hohen Belastungen aber auch bei starken Einträgen durch Ferntransport (aus industriellen Ballungsräumen oder Emissionen durch Brände) oder bei stabilen Wetterlagen mit starken Inversionen hervorgerufen werden. Offenbar kommt es im Falle starker Inversionen zu einer starken Erhöhung der gasförmigen Vorläufersubstanzen, was dann wiederum die Bildung sekundärer Partikelmasse forciert.

Sulfat entsteht aus der Oxidation des Schwefeldioxids wobei der Hauptoxidationspfad über die Nassphase läuft. Die Berechnung der Ammoniumnitrat-Aerosole erfolgt sowohl im RCG als auch in COSMO-MUSCAT mit Hilfe eines Aerosolmoduls, das von einem thermodynamischen Gleichgewichtszustand zwischen der Aerosol- und der Gasphase ausgeht. Aerosoldynamische Prozesse wie Koagulation oder Kondensation von Spurengasen an existierende Partikel wurden innerhalb des Projektes nicht betrachtet. Die Menge des gebildeten Ammoniumnitrats hängt von der Temperatur, der Feuchte und den Konzentrationen der Vorläufersubstanzen Ammoniak und Salpetersäure ab. Alle diese Größen sind sehr heterogen in Raum und Zeit, was dann zu unterschiedlichen Nitrat- und Ammoniumkonzentrationen führt. Das komplexe Zusammenwirken der meteorologischen Einflussgrößen und der Konzentrationen in der Gasphase beeinflusst letztlich die sekundäre Aerosolbildung und damit die PM-Konzentrationen. Wesentliche andere Bestandteile von PM sind der primäre elementare Kohlenstoff (EC), der primär emittierte organische Kohlenstoff (OC) sowie die sekundär gebildeten organischen Aerosole (SOA). Diese Komponenten wurden in den bisherigen Modellrechnungen meist unterschätzt. Die Behandlung dieser Komponenten ist schwierig, da die Emissionsabschätzungen für EC und OC häufig ungenau sind und die physikalisch-chemischen Prozesse, die zur SOA-Bildung führen, nur zum Teil bekannt sind (Simpson et al. 2007).

Abbildung 168: Mittlere Partikelzusammensetzung während der PM-Episode im Februar 2005.

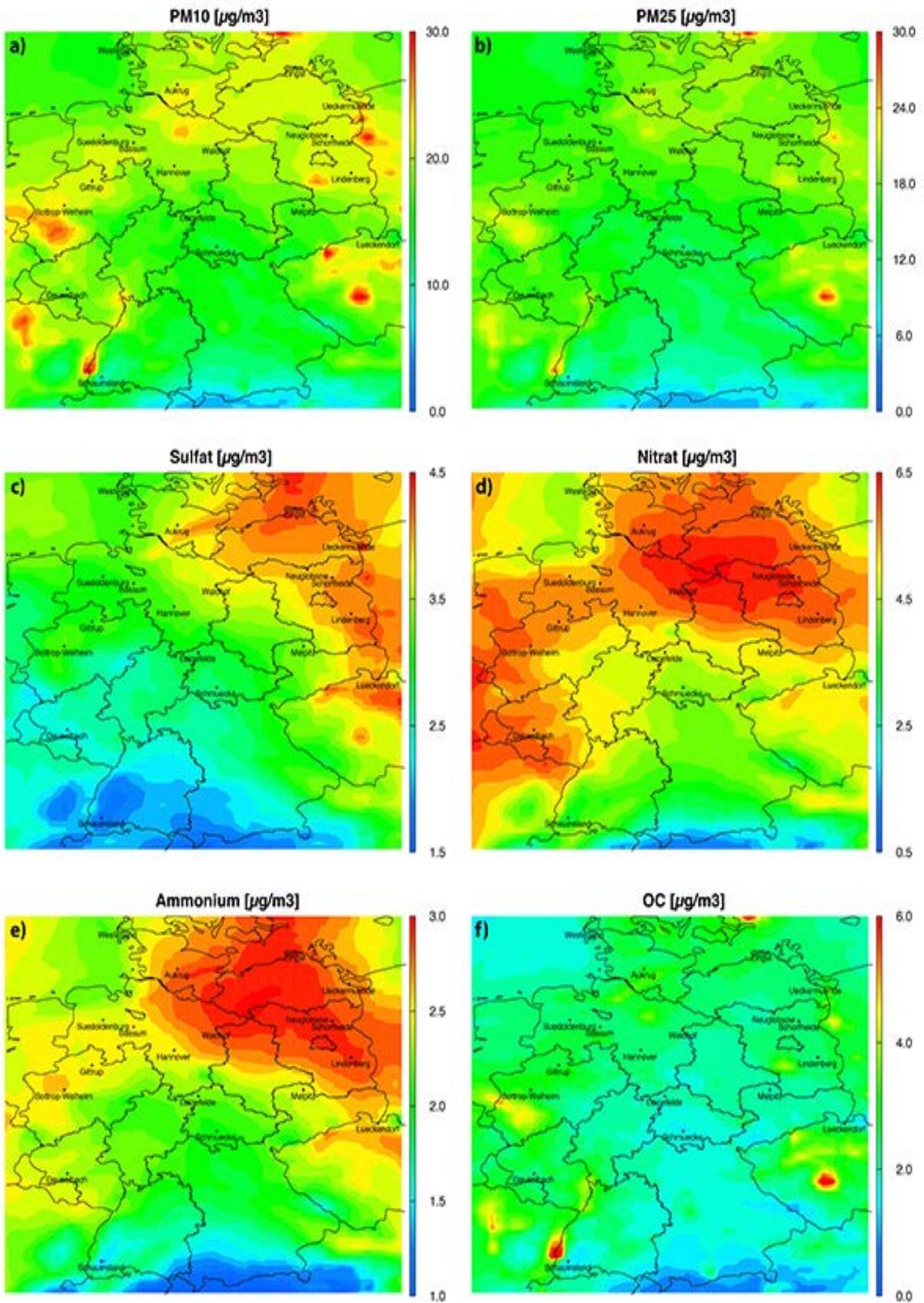
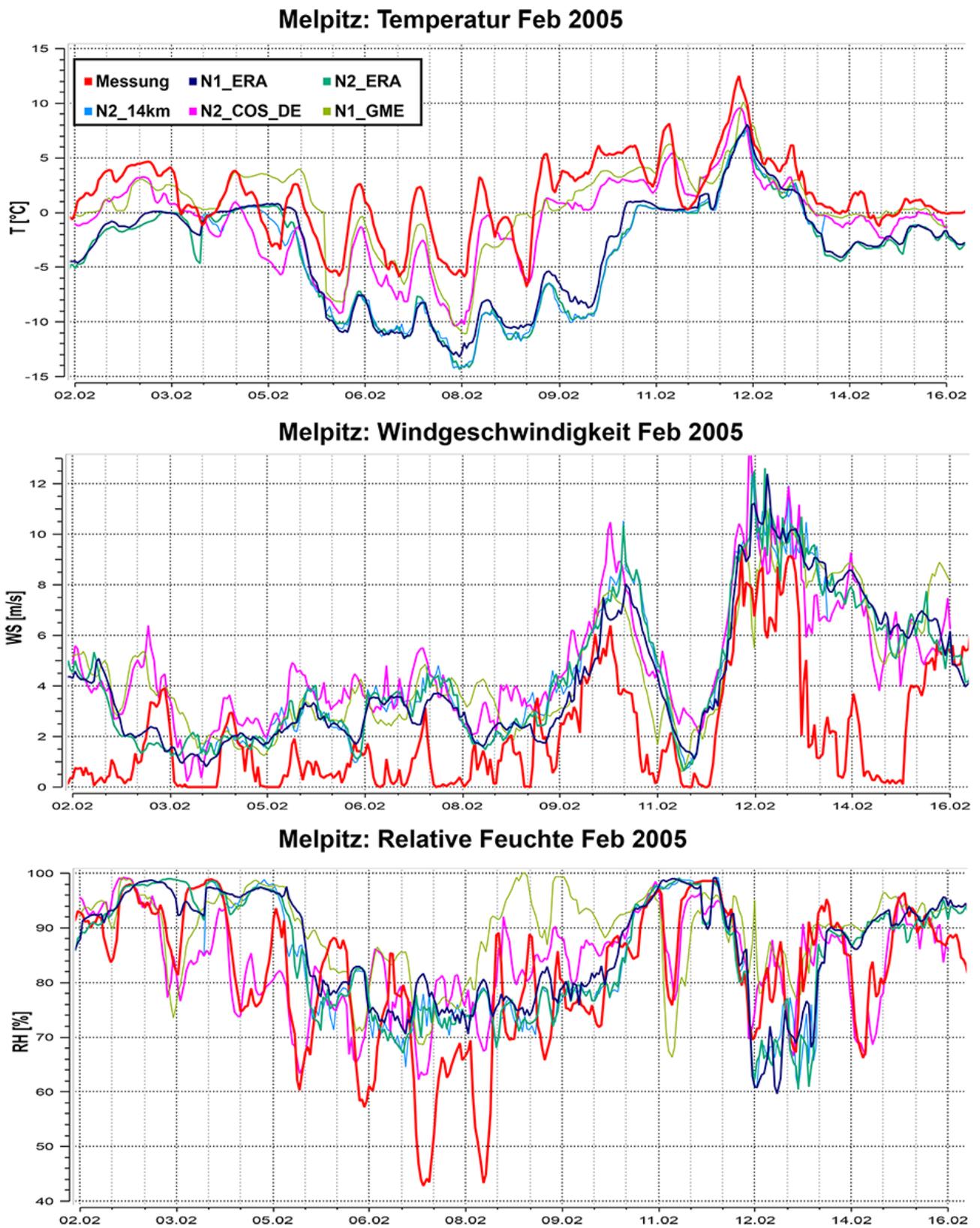


Abbildung 169: Vergleich von simulierten meteorologischen Größen mit Messungen in Melpitz für ein Ensemble unterschiedlicher Modellkonfigurationen und die Februar-Episode: (a) Temperatur, (b) Windgeschwindigkeit, (c) relative Feuchte.



6.4.2 Ozon-Episode: 24. – 31. Mai 2005

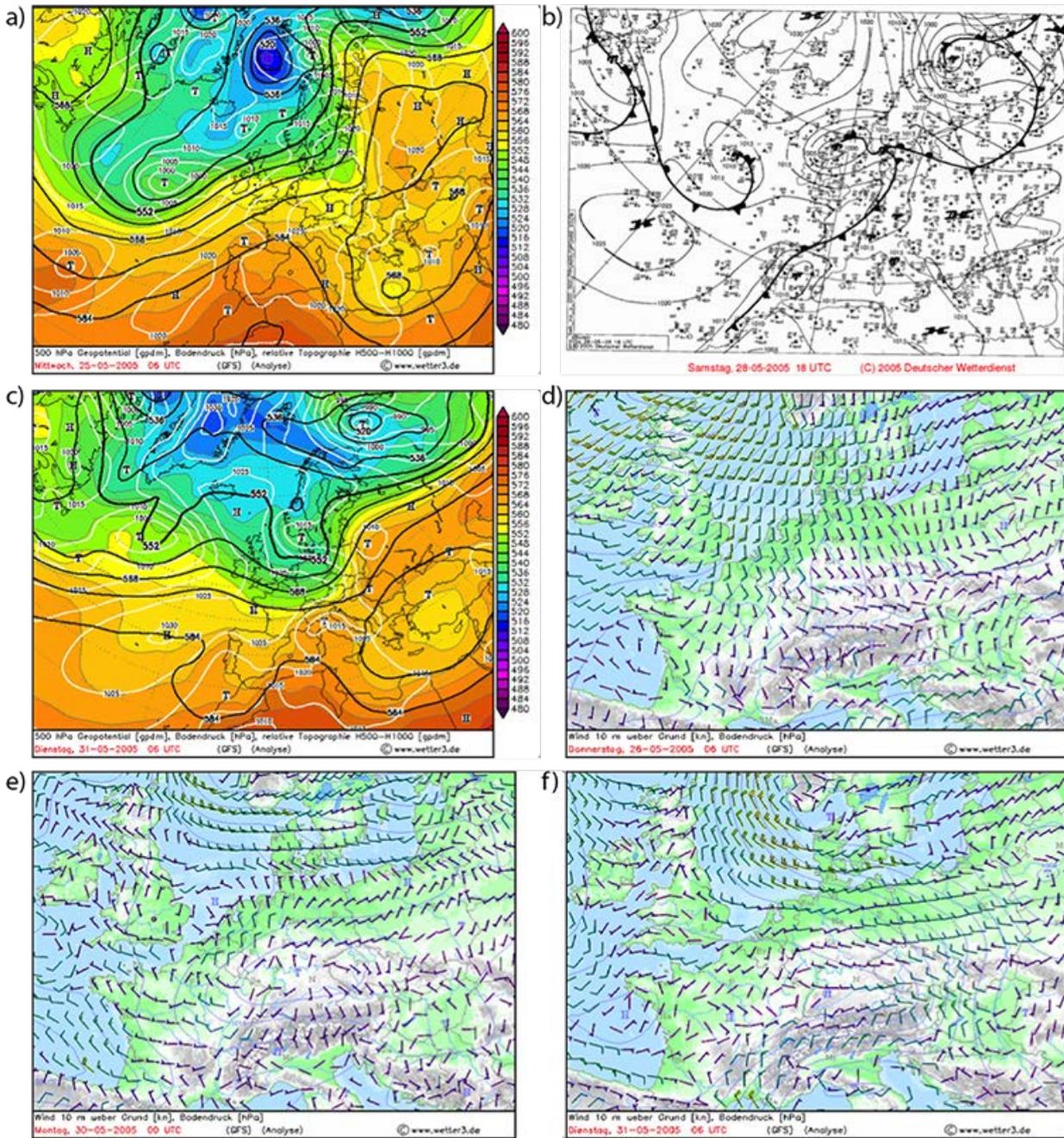
6.4.2.1 Meteorologische Situation

Am 23.05. gab es in ganz Deutschland Niederschläge bis 5mm/6h. Vom 24. bis 27.05. befanden sich Tiefdruckgebiete über den Britischen Inseln bis Skandinavien und über der Ägäis/Türkei. Von der Iberischen Halbinsel bis Russland erstreckte sich ein Hochdruckgebiet (vgl. Abbildung 170a). Die Fronten der Tiefdruckgebiete erreichten teilweise Norddeutschland. Zwischen dem 24. und 26.05. war die Luft kalt und trocken, dann warm und trocken. Es fielen keine Niederschläge. Der Wind wehte mit bis zu 2,5 m/s und drehte am 24.05. von West auf Süd (Abbildung 170d).

Am 28.05. erreichte die Kaltfront eines Tiefs über den Britischen Inseln Nordostdeutschland (b). Die Niederschläge (bis 1mm) setzten aber erst am Abend ein. Nach der Kaltfront drehte der Wind auf West bis Nord und erreichte teilweise Geschwindigkeiten um 5 m/s. Die Temperaturen lagen am 24./25.05. zwischen 10° und 20°C. Vom 26. bis 29.05. stiegen sie am Tage auf über 30°C und fielen nachts nicht unter 15°C.

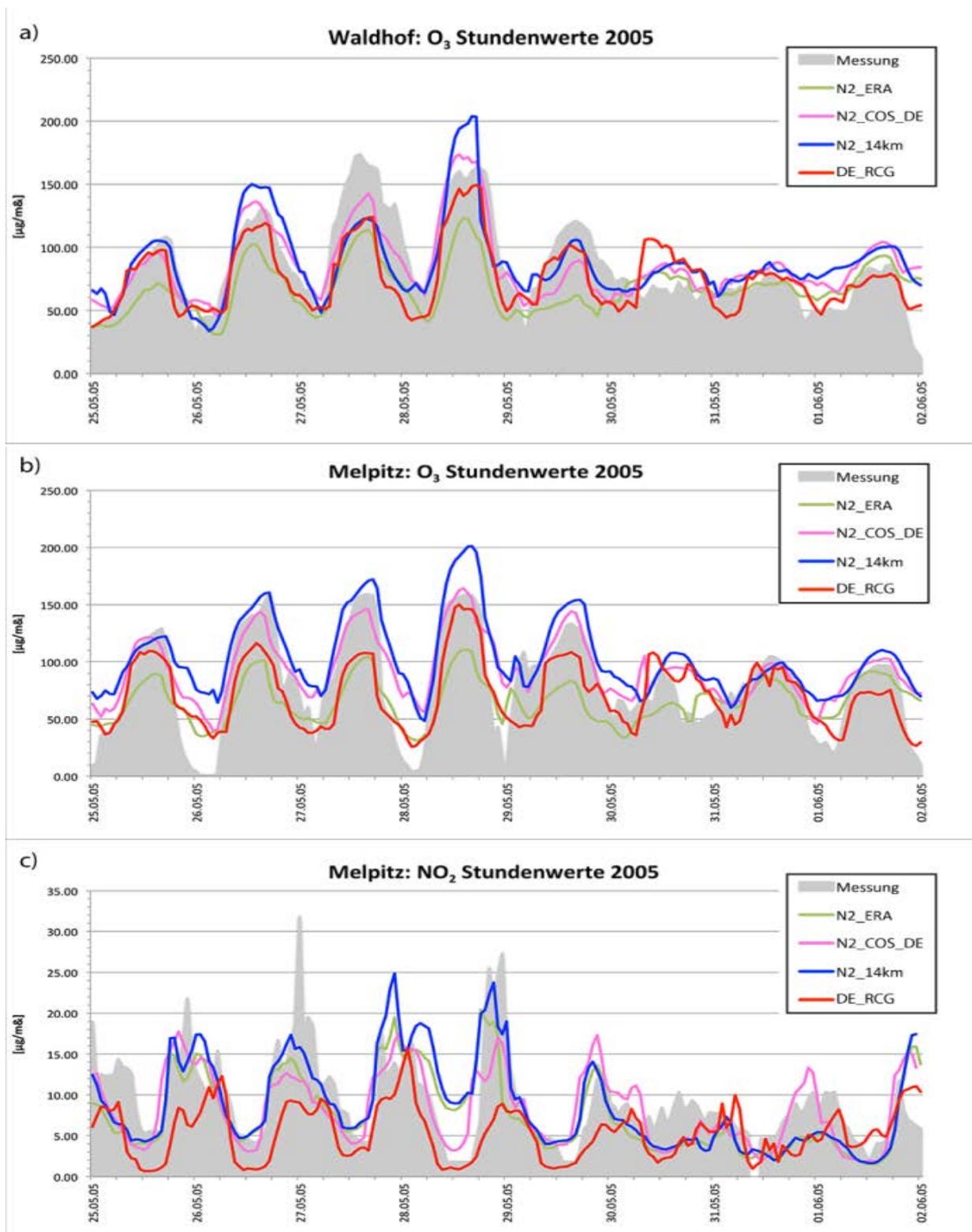
Am 29./30.05. bildete sich ein kleines Tief mit einem Frontensystem über Zentraleuropa (Abbildung 170e). Niederschläge fielen zunächst nur in Südwestdeutschland und erst am 30.05. in ganz Deutschland (bis 5mm/6h). Der Wind wehte aus verschiedenen Richtungen (zum Zentrum) mit 2,5 – 5 m/s. Ab 30.05. abends kam er aus Nordwest. Am 31.05. erreichte wieder ein Hochdruckausläufer Deutschland (Abbildung 170, d und f). In Ost- und Norddeutschland fielen noch bis 1mm/6h Niederschlag. Die Temperaturen lagen ab 30.05. wieder unter 20°C und fielen nachts bis auf 5 °C.

Abbildung 170: Meteorologische Situation während der Ozonepisode (24. – 31. Mai 2005): (a) Druckkarte für den 25.05.2005, (b) Bodenwetterkarte-DWD für den 28.05.2005, (c) Druckkarte für den 31.05.2005, (d) bodennaher Druck und Wind am 26.05.2005, (e) bodennaher Druck und Wind am 30.05.2005, (f) Bodennaher Druck und Wind 31.05.2005.



6.4.2.2 Vergleich mit Messungen

Abbildung 171: Vergleich von simulierten O₃-Konzentrationen mit Messungen für unterschiedliche Modellkonfigurationen in (a) Waldhof und (b) Melpitz. Außerdem wird in (c) der Verlauf der modellierten und gemessenen NO₂-Konzentrationen in Melpitz verglichen. Dargestellt ist jeweils der Zeitraum vom 25.05.2005, 0:00 Uhr bis zum 01.06.2005, 24:00 Uhr.



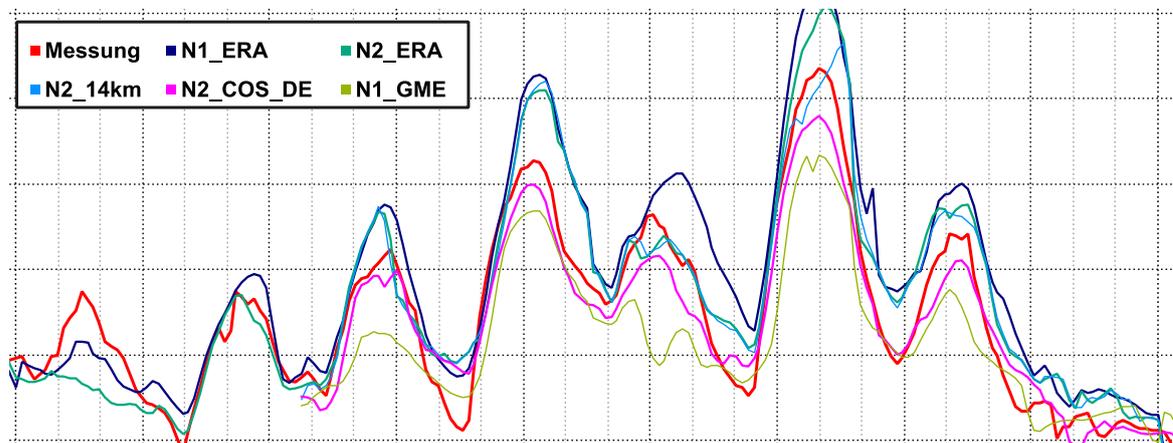
In Abbildung 171 zur O₃-Entwicklung gibt es bei allen Stationen ausgeprägte Tagesgänge. Es gibt hier häufig Abweichungen bei den Maxima und Minima. Wie bereits diskutiert, werden die Nachtkonzentrationen durch COSMO-MUSCAT zum Teil stark überschätzt, wobei in N2_COS_DE eine deutlich bessere Übereinstimmung zu beobachten ist. DE_RCG_CCLM_ERA kann insgesamt besser den Tagesgängen folgen, unterschätzt aber die Maxima deutlich (vgl. Abbildung 171 und Tabelle 33). Ein ähnliches Verhalten ist für die NO₂-Konzentrationen in Melpitz zu beobachten. Hier kann N2_COS_DE und an den ersten 4 Tagen mit voller Einstrahlung auch N2_14km den Tagesgängen am besten folgen.

6.4.2.3 Diskussion möglicher Ursachen für hohe Ozon-Konzentrationen

Die Bildung von Ozon ist in der Regel ein großräumiger Prozess. Die höchsten Ozonwerte treten überwiegend in den Sommermonaten auf, wenn die Vorläuferstoffe vorhanden sind und durch ein länger anhaltendes Hochdruckgebiet die Sonneneinstrahlung besonders intensiv ist. Besonders in den frühen Nachmittagsstunden werden im Verlauf eines Tages die höchsten Ozonwerte gemessen. In angrenzenden ländlichen Regionen werden besonders hohe Messwerte erreicht. Diese Gebiete liegen recht weit von der Quelle der Vorläuferstoffe entfernt. Der Grund hierfür ist, dass das Stickstoffmonoxid vor allem aus Abgasen für den Abbau des Ozons verantwortlich ist. Auf diese Weise fällt die Ozonbelastung für die Innenstädte wesentlich geringer aus. Da die Vorläuferstoffe durch den Wind an den Stadtrand und darüber hinaus transportiert werden, wird die Bildung von Ozon weit entfernt von ihrer Entstehungsquelle begünstigt. Während also das Ozon in großen Ballungsräumen i. allg. durch die erhöhten NO_x-Konzentrationen insbesondere während der Nacht abgebaut wird, bildet es sich im ländlichen Raum neu aus den emittierten Vorläufersubstanzen. Diese Bildungsprozesse verlaufen sehr effektiv, wenn stagnierende Wetterlagen vorliegen und es warm und trocken ist. Da die Ozonbildung ein photolytischer Prozess ist, wird sie durch wolkenfreies Wetter begünstigt.

In Abbildung 172 sind die Zeitverläufe für den Standort Greifswald für ein Ensemble von Modellsimulationen dargestellt. Man erkennt deutlich die relativ große Schwankungsbreite der berechneten Temperaturverläufe in Greifswald. Die Nachttemperaturen können aber durch keine der Modellkonfigurationen reproduziert werden. Relativ gut wird der Verlauf durch die mit den GME-Reanalysedaten angetriebene N2_COS_DE-Simulation berechnet, während die mit den CCLM_ERA-Daten angetriebenen Läufe (N1_ERA, N2_ERA, N2_14km) um bis zu 5°C überhöhte Temperaturen simulieren. Die Zeitreihe der Windgeschwindigkeit zeigt, dass die Modelle die Windgeschwindigkeit überschätzen. Es ist bekannt, dass Schwachwind-Wetterlagen nur sehr schwer durch Modelle reproduziert werden können. Das ist wahrscheinlich auch ein Grund, warum Episoden mit hohen Schadstoff-Konzentrationen oft nicht reproduziert werden können. Abbildung 172c zeigt die Solarstrahlung am Boden in Melpitz. Während der gesamten Woche war fast wolkenfreier Himmel. Dadurch konnte die Solarstrahlung voll auf die Ozonbildung wirken. Erst am 30.05. gab es Bewölkung und sogar Niederschlag (vgl. Abbildung 155a).

Abbildung 172: Vergleich von simulierten meteorologischen Größen mit Messungen für ein Ensemble unterschiedlicher Modellkonfigurationen und die Mai-Episode: (a) Temperatur in Greifswald, (b) Windgeschwindigkeit in Greifswald, (c) Solarstrahlung am Boden. Dargestellt ist jeweils der Zeitraum vom 22.05.2005, 0:00 Uhr bis zum 30.05.2005, 24:00 Uhr.



200

0

6.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Um Unsicherheiten der RCG-CCLM-Simulationen abschätzen zu können, wurde das Jahr 2005 mit COSMO-MUSCAT sowohl für die ERA- als auch für die EHIST-Antriebsdaten simuliert. Dabei konnten die Ergebnisse der RCG-CCLM-Ergebnisse im Wesentlichen bestätigt werden. Die räumlichen Muster der mittleren Konzentrationsverteilungen stimmten weitestgehend überein. Die Unterschiede in der Höhe der mittleren Jahreskonzentrationen für PM₁₀, PM_{2.5} und NO₂ waren mit Werten $\leq 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ relativ gering und lagen damit im Bereich üblicher Schwankungen in Modellvergleichsstudien (Solazzo et al. 2012 a, b; Im et al. 2015 a, b). Bei Ozon wurden durch COSMO-MUSCAT für das Sommerhalbjahr 2005 um ca. $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ höhere Konzentrationen simuliert. Der Vergleich mit Messungen zeigte eine Überschätzung der Konzentrationen während der Nachtstunden. Vergleicht man anstelle der Tagesmittelwerte die 8h-Mittel so liegen RCG und COSMO-MUSCAT im selben Bereich. Das EHIST-Szenario für 2005 beschreibt „nur“ ein statistisches Jahr im 30-jährigen Referenzzeitraum 1976–2005. Ein Vergleich mit Messungen oder den ERA-Ergebnissen, die das reale Jahr 2005 beschreiben, erscheint zunächst wenig sinnvoll. Umso mehr überrascht daher die relativ gute Übereinstimmung zwischen ERA und EHIST sowohl der meteorologischen Jahresmittelwerte als auch der Konzentrationsverteilungen. Die simulierten Unterschiede zwischen beiden Szenarien sind für beide Modelle sehr ähnlich. Insgesamt werden die RCG-CCLM-Ergebnisse und damit die Aussagen dieser klimatologischen Studie durch die COSMO-MUSCAT-Simulationen gestützt. Viel größere Unsicherheiten liegen einerseits in den globalen Klimasimulationen mit ECHAM6 und andererseits im angenommenen Emissionsszenario.

Durch die verwendeten unterschiedlichen COSMO-Versionen und Modell-Setups traten bereits in den modellierten meteorologischen Feldern moderate Differenzen zwischen N1_ERA und EU_CCLM_ERA auf. Die unterschiedlichen Antriebsdaten hatten dann zwangsläufig Einfluss sowohl auf die meteorologischen Felder als auch auf die modellierten Konzentrationsfelder der Spurenstoffe im inneren Gebiet. Um den Einfluss der meteorologischen Änderungen auf die Spurenstoff-Konzentrationen genauer abschätzen zu können, wären entsprechende Sensitivitätsstudien notwendig. Außerdem hätte die Konsistenz zwischen den verwendeten Modellversionen und Setups von CCLM und COSMO hergestellt werden müssen, was erfahrungsgemäß nicht einfach ist und einen größeren Aufwand erfordert hätte. Für die angestrebte Abschätzung der Unsicherheiten der RCG-CCLM-Simulationen erscheint die hier verwendete Vorgehensweise aber sachgemäß zu sein. Nimmt man noch die Simulationen mit den EHIST-Antriebsdaten hinzu, so kann man die durchgeführten COSMO-MUSCAT- und RCG-Läufe als eine „kleine“ Ensemble-Simulation auffassen. Solche Ensemble-Simulationen (Galmarini et al, 2004; Solazzo and Galmarini, 2015) sind die am meisten verwendete Möglichkeit, Unsicherheiten in den Modellergebnissen abzuschätzen und entsprechende Vertrauensbereiche bzw. Eintrittswahrscheinlichkeiten anzugeben. Für so komplexe Modellsysteme wie atmosphärische Chemie-Transport-Modelle ist dies oft die einzige praktikable Vorgehensweise. Bei solchen Ensemble-Simulationen werden dann oft nicht nur die Anfangs- und Randbedingungen variiert, wie in der klassischen Wettervorhersage, sondern auch unterschiedliche Modelle und Setups verwendet (Galmarini et al. 2004). Die Verwendung von Ensemble-Simulationen eröffnet die Möglichkeit, Unsicherheitsbereiche der gekoppelten Chemie-Transportmodellierung zu quantifizieren und aufzuzeigen. Somit wäre es möglich, Aussagen über die Bandbreite der zu erwartenden klimatischen Veränderungen und der Veränderungen der Luftqualität zu treffen.

Für zwei ausgewählte Episoden wurden Ursachen und Wirkungsmechanismen untersucht, die hohe Belastungen an PM₁₀ oder Ozon verursachen. Dabei wurde der Einfluss des Ferntransports und einzelner meteorologischer Kenngrößen (Mischungsschichthöhe, Feuchtigkeit, geringe Windgeschwindigkeit, Sonneneinstrahlung) auf die Schadstoffkonzentrationen analysiert. Wie auch andere Studien gezeigt haben, entstehen solche Hotspots durch die Kombination unterschiedlicher Einflussfaktoren.

Meist treten sie bei Schwachwind- und Inversionswetterlagen nach Trockenperioden auf. Durch eine intensive Sonneneinstrahlung werden sowohl die Ozonbildung als auch die Emissionen biogener Kohlenwasserstoffe verstärkt. Außerdem wird die Bildung von sekundärer Partikelmasse (z. B. Sulfat, Nitrat, SOA) durch hohe Feuchtigkeit und Nebel gefördert. Aber solche Hotspots treten natürlich nur bei hohen Schadstoffemissionen auf, was oft wieder eng mit den meteorologischen Bedingungen verbunden ist.

Die Ergebnisse innerhalb des KLENOS-Projektes legen nahe, dass der Einfluss von Änderungen des regionalen Klimas auf die mittlere Schadstoffbelastung gering ist. Die Auswirkungen von Emissionsänderungen bedingt durch technologische Entwicklungen und energiepolitische Entscheidungen sind hierfür in der Regel wesentlich maßgeblicher. Es ist zu erwarten, dass die Anzahl der Extremereignisse (z. B. warme niederschlagsfreie Perioden mit hohen Ozon-Konzentrationen oder anhaltende sehr kalte Inversionswetterlagen im Winter mit hohen PM-Konzentrationen) zunimmt. Diese Perioden sind stark gesundheitsgefährdend und schädigen die Ökosysteme. Die hohe Schadstoffbelastung in diesen Perioden resultiert sowohl aus extremen meteorologischen Bedingungen als auch den damit verbundenen größeren Emissionen. So werden sich bei sehr kalten Wetterlagen die Emissionen durch Heizung und aus dem Fahrzeugverkehr (Auto, Schiff + Flugzeug) stark erhöhen. Weiterhin ist bekannt, dass Pflanzen in Stresssituationen (sehr warm und trocken) verstärkt organische Gase emittieren, die als Vorläufersubstanzen zur Bildung von Ozon und SOA beitragen. Außerdem führt die Trockenheit zu verstärkten Emissionen von Partikeln (z. B. Ackerstaub, Reifenabrieb). Die Bedeutung dieser Extremereignisse wird in Zukunft steigen.

7 „Lessons Learned“ und Empfehlungen für Folgeuntersuchungen

Neben den im Projekt KLENOS erzielten Ergebnissen sind auch die Grenzen und Unzulänglichkeiten der verwendeten Methoden und Ansätze deutlich geworden. Die Berücksichtigung oder gar Überwindung der hier aufgeführten „Schwachpunkte“ in weiterführenden Studien und Folgeprojekten birgt ein großes Potenzial an zusätzlichem Erkenntnisgewinn im Bereich der Modellierung und Beurteilung zukünftiger Entwicklungen der Luftqualität.

Im Projekt KLENOS wurde für den gekoppelten Modellansatz bestehend aus regionalem Klimamodell (CCLM) und Chemie-Transport-Modell (RCG) eine Modellkette aufgebaut (Abbildung 2). Diese besteht aus der Verwendung eines bestimmten globalen Zukunftsszenarios, welches auf die regionale Skala projiziert wurde. Durch die Verwendung modellierter Klimadaten als meteorologischer Antrieb für ein Chemie-Transport-Modell konnte der Einfluss klimatischer Änderungen auf die Entwicklung von Luftschadstoffen untersucht und abgebildet werden. Die regionale Klimamodellierung, welche auf dem Prinzip des numerisch dynamischen Downscalings basiert, ist jedoch mit Unsicherheiten verbunden. Man kann drei Hauptquellen dieser Unsicherheiten unterscheiden: (i) die interne Variabilität des Klimasystems, (ii) die Modellunsicherheit und (iii) die Szenariounsicherheit (Hawkins und Sutton 2009). Der Anteil dieser Unsicherheiten in Klimaprojektionen, und im Fall von KLENOS auch in Projektionen der Luftqualität, kann nur durch die Verwendung von Ensemblesimulationen quantifiziert werden. Ensemblesimulationen verwenden im Idealfall verschiedene globale Klimamodelle als Antrieb, verschiedene Regionalmodelle und mehrere Zukunftsszenarien. Der Nachteil dieses Ansatzes ist jedoch der Rechenaufwand, der für Ensemblesimulationen notwendig wäre. Hier ist es jedoch inzwischen möglich auf bereits vorhandene regionale Klimaprojektionen für Europa zurückzugreifen (z. B. ENSEMBLE, CORDEX) und das Chemie-Transport-Modell mit verschiedenen regionalen Klimamodellen anzutreiben. Die Verwendung von Ensemblesimulationen ermöglicht Unsicherheitsbereiche der gekoppelten Chemie-Transportmodellierung zu quantifizieren und aufzuzeigen. Zusätzlich lassen sich Aussagen über die Bandbreite der zu erwartenden klimatischen Veränderungen und Veränderungen der Luftqualität treffen. Dies wiederum ließe umfangreichere Rückschlüsse auf eventuell notwendige Maßnahmen zur Emissionsreduktion für verschiedene Szenarien zu.

In KLENOS wurde als zukünftiger Zeithorizont der Zeitraum von 2021 bis 2050 betrachtet. Grund dafür war, dass das erforderliche Emissionsszenario nur bis zum Jahr 2030 verfügbar war. Problematisch hierbei ist, dass bis zum Jahr 2050 das Klimasignal nur schwach ausgeprägt ist und somit der Klimateffekt bei der gekoppelten Chemie-Transport-Modellierung nur wenig zum Tragen kommt. Eine Erweiterung des Zeithorizontes bis zum Jahr 2100 hätte den Vorteil, dass das Klimasignal wesentlich stärker und robuster in Erscheinung tritt.

Weiterhin wäre in der verwendeten Modellkette die Integration eines globalen Chemie-Transport-Modells sinnvoll, um die Ozonrandbedingung des regionalen Chemie-Transport-Modells mit dem Output des Globalmodells koppeln zu können. Das ermöglicht die Berücksichtigung der sich ändernden troposphärischen Ozonkonzentrationen. Momentan werden die Klimaänderungen mit einem konstanten Ozon-Hintergrund gerechnet was eher einen pragmatischen Ansatz darstellt.

Die Evaluierung der Klimamodellergebnisse hat, besonders bei den modellierten Niederschlägen, einen erheblichen Bias in den Simulationsergebnissen aufgezeigt, der sich ungünstig auf die nachfolgende Chemie-Transport-Modellierung auswirkt. So stellt der Niederschlag eine Senke für PM₁₀ dar und die aufgezeigte Unterschätzung der Temperaturen sowie die Überschätzung von Wolkenbedeckungsgrad und Feuchte führten zu einem zu geringen Ozonbildungspotenzial bei den mit dem Globalmodell ECHAM6 angetriebenen Modellläufen. Daraus resultierten deutliche Unsicherheiten bei der nachgeschalteten Chemie-Transport-Modellierung. Als pragmatischer Ansatz wird in vielen Studien eine sogenannte Biaskorrektur durchgeführt, wofür in den letzten Jahren unter dem Begriff model output statistics verschiedene Methoden zur „Korrektur“ von Klimamodellergebnissen entwickelt wurden. Das Hauptproblem von Biaskorrekturen ist jedoch, dass der physikalische Zusammenhang zwischen den meteorologischen Variablen aufgehoben wird, wenn man einzelne Variablen (wie z. B. nur den Niederschlag) korrigiert. Im Projekt KLENOS wurde bewusst auf die Anwendung von Biaskorrekturen verzichtet, da genau dieser physikalische Zusammenhang zwischen bspw. Niederschlag, Feuchte, Bedeckungsgrad, Druck und Temperatur wichtig ist. Die Entwicklung einer Methodik zur gleichzeitigen Biaskorrektur physikalisch voneinander abhängiger Variablen wäre somit ein wichtiger Beitrag zur Verwendung von Regionalmodellergebnissen in der Impaktmodellierung.

Infolge der großen Bedeutung von Extremereignissen (z. B. lange Trockenheit im Sommer 2003, Inversionswetterlage im November 2011) muss einerseits analysiert werden, ob diese zukünftig häufiger auftreten. Dazu könnten nicht nur eigene Klimasimulationen, sondern andere verfügbare Klimadatensätze herangezogen und mit den innerhalb des Projekts entwickelten Methoden untersucht werden. Andererseits sollte versucht werden die Mechanismen und Wechselwirkungen (zwischen Meteorologie, Ökosystem und anthropogenen Emissionen) zu verstehen, die diese hohen Umweltbelastungen verursachen, um daraus geeignete Gegenmaßnahmen abzuleiten. Mittelfristig muss auch an der numerischen Vorhersage solcher Ereignisse gearbeitet werden.

Änderungen der Landnutzung, der Bebauung oder von Ökosystemen (z. B. Renaturierung von Tagebauen) wurden in KLENOS nicht untersucht. Es ist jedoch zu erwarten, dass solche Änderungen auch einen großen Einfluss auf das regionale Klima und die Luftqualität haben. Einerseits werden Luftschadstoffe in Ökosystemen deponiert. Andererseits tragen biogene Emissionen zur Bildung von Ozon und SOA bei. Die Untersuchung des Einflusses dieser Prozesse und der Wechselwirkungen könnte ein weiterer Schwerpunkt zukünftiger Forschungsprojekte sein.

Im Projekt wurde der Zusammenhang zwischen der Überschreitung von Grenz- und Zielwerten der PM₁₀- bzw. Ozon-Konzentration in der bodennahen Luftschicht und Wetterlagen untersucht. Anschließend wurde mit Hilfe von Klimamodellen die zukünftige Änderung im Auftreten dieser typischen Wetterlagen dargestellt. Neben der Häufigkeit des Auftretens von Grenzwertüberschreitungen ist auch die Andauer der Überschreitungssituation von Interesse. Es gibt deutliche Hinweise darauf, dass sich die Persistenz von Wetterlagen erhöht hat. Eine Untersuchung speziell dieses klimatischen

Aspekts in Zusammenhang mit der Ozon- und Feinstaubkonzentration wäre eine sinnvolle Ergänzung der erfolgten Arbeiten.

Die anhaltende Temperaturzunahme lässt das Risiko zu hoher Ozonkonzentrationen weiter steigen, falls es zu keiner Reduktion der Emissionen kommt. Der Sommer 2015 war ein Beispiel und steht stellvertretend dafür, welche Temperaturen in Zukunft immer häufiger zu erwarten sein werden. In diesem Zusammenhang ist speziell die Entwicklung biogener VOC-Emissionen von Bedeutung, die bei steigenden Temperaturen ebenfalls zunehmen. Häufige und vor allem lang andauernd hohe Ozonkonzentrationen (siehe Persistenz von Wetterlagen) können relevante Schäden an landwirtschaftlichen Kulturen und Wäldern hervorrufen.

8 Quellenverzeichnis

- Baldauf, M., A. Seifert, J. Forstner, D. Majewski, M. Raschendorfer, and T. Reinhardt (2011): Operational Convective-Scale Numerical Weather Prediction with the COSMO Model: Description and Sensitivities, *Mon Weather Rev*, 139(12), 3887-3905.
- Benestad RE, Hanssen-Bauer I, Forland EJ (2007): An evaluation of statistical models for downscaling precipitation and their ability to capture long-term trends. *Int J Climatol* 27:649 – 665. doi:10.1002/joc.1421.
- Bissoli P, Dittmann E (2001): The objective weather types classification of the German Weather Service and its possibilities of application to environmental and meteorological investigations. *Meteorol Z* 10:253 – 260.
- Cheng SC, Campbell M, Li Q, Li G, Auld H, Day N, Pengelly D, Gingrich S, Yap D (2007a): A Synoptic Climatological Approach to Assess Climatic Impact on Air Quality in South-central Canada. Part I: Historical Analysis. *Water Air Soil Pollut* 182:131 – 148. doi:10.1007/s11270-006-9327-3.
- Cheng SC, Campbell M, Li Q, Li G, Auld H, Day N, Pengelly D, Gingrich S, Yap D (2007b): A Synoptic Climatological Approach to Assess Climatic Impact on Air Quality in South-central Canada. Part II: Future Estimates. *Water Air Soil Pollut* 182:117 – 130. doi:10.1007/s11270-006-9326-4.
- Christensen JH, Christensen OB (2007): A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change* 81:7 – 30. doi:10.1007/s10584-006-9210-7.
- Christensen JH, Hewitson B, Busuioc A, Chen A, Gao X, Held I, Jones R, Kolli RK, Kwon W-T, Laprise R, Magaña Rueda V, Mearns L, Menéndez CG, Räisänen J, Rinke A, Sarr A, Whetton P (2007): Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp 847 – 940.
- Cuvelier C., P. Thunis, D. Karam, M. Schaap, C. Hendriks, R. Kranenburg, H. Fagerli, A. Nyiri, D. Simpson, P. Wind, M. Schulz, B. Bessagnet, A. Colette, E. Terrenoire, L. Rouïl, R. Stern, A. Graff, J.M. Baldasano, M.T. Pay (2013): ScaleDep. Performance of European chemistry---transport models as function of horizontal spatial resolution. EMEP MSC-W Technical Report I-2013.
- Dawson JP, Racherla PN, Lynn BH, Adams PJ, Pandis SN (2009): Impacts of climate change on regional and urban air quality in the eastern United States: Role of meteorology. *J Geophys Res* 114:1 – 11. doi:10.1029/2008JD009849.
- Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, et al (2011): The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137:553–597. doi: 10.1002/qj.828
- Déqué M, Rowell DP, Lüthi D, Giorgi F, Christensen JH, Rockel B, Jacob D, Kjellström E, de Castro M, van den Hurk B (2007): An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change* 81:53 – 70. doi: 10.1007/s10584-006-9228-x.
- Dittmann, E., Barth, S., Lang, J., Müller-Westermeier, G. (1995): Objektive Wetterlagenklassifikation (Berichte des Deutschen Wetterdienstes No. 197).
- Doty, B. (1995): The Grid Analysis and Display System – GrADS, (<ftp://cola.gmu.edu/grads/beta/doc/gadoc151.pdf>).
- DWD (2016): http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/functions/aktuellemeldungen/160119_zweitwaermetes_jahr_2015.html, aufgerufen am 08.02.2016
- Emberson, L. D., Ashmore, M. R., Cambridge, H. M., Simpson, D., and Tuovinen, J.-P.(2000a): Modelling stomatal ozone flux across Europe, *Environ. Poll.*, 109, 403–413.
- Emberson, L. D., Büker, P., and Ashmore, M. R. (2007): Assessing the risk caused by ground level ozone to European forest trees: A case study in pine, beech and oak across different climate regions, *Environ. Poll.*, 147, 454–466.
- Emberson, L. D., Simpson, D., Tuovinen, J.-P., Ashmore, M. R., and Cambridge, H. M. Towards a model of ozone deposition and stomatal uptake over Europe (2000b): Norwegian Meteorological Institute, Oslo, EMEP MSC-W Note 6/2000, 57 pp., 2000b.
- Foken T (2006): *Angewandte Meteorologie - Mikrometeorologische Methoden*, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. S 112.
- Frei C, Christensen JH, Déqué M, Jacob D (2003): Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and intercomparison for the European Alps. *J Geophys Res* 108. doi:10.1029/2002JD002287.
- Frei C, Schöll R, Fukutome S, Schmidli J, Vidale PL (2006) Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *J Geophys Res* 111. doi:10.1029/2005JD005965.
- Frick C, Steiner H, Mazurkiewicz A, et al (2014): Central European high-resolution gridded daily data sets (HYRAS): Mean temperature and relative humidity. *Meteorologische Zeitschrift* 23:15–32. doi: 10.1127/0941-2948/2014/0560
- Galmarini, S., Bianconi, R., Klug, W., Mikkelsen, T., Addis, R., An-dronopoulos, S., Astrup, P., Baklanov, A., Bartniki, J., Bartzis, J.C., Bellasio, R., Bompay, F., Buckley, R., Bouzom, M., Champion, H., D'Amours, R., Davakis, E., Eleveld, H., Geertsema, G.T., Glaab, H., Kollax, M., Ilvonen, M., Manning, A., Pechinger, U., Persson, C., Polreich, E., Potemski, S., Prodanova, M., Saltbones, J., Slaper, H., Sofiev, M. A., Syrakov, D., Sørensen, J. H., Van der Auwera, L., Valkama, I., and Zelazny, R. (2004): Ensemble dispersion forecasting – Part I: concept, approach and indicators. *Atmos. Environ.*, 38, 4619–4632.

- Giorgi F, Bi X, Pal J (2004): Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. II: climate change scenarios (2071–2100). *Clim Dyn* 23:839 – 858. doi:10.1007/s00382-004-0467-0.
- Giorgi, F., Jones, C., Asrar, G. R. (2009): Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework, *WMO Bulletin*, 58, 175–183.
- Golder, D. (1972): Relations among stability parameters in the surface layer. *Boundary-Layer Meteorology*. Volume 3, Issue 1, pp 47–58.
- Heinold, B., I. Tegen, R. Wolke, A. Ansmann, I. Mattis, A. Minikin, U. Schumann, B. Weinzierl (2012): Simulations of the 2010 Eyjafjallajökull volcanic ash dispersal over Europe using COSMO–MUSCAT, *Atmos. Environ.* **48**: 195–204.
- Heinold, B., J. Helmert, O. Hellmuth, R. Wolke, A. Ansmann, B. Martcorena, B. Laurent and I. Tegen (2007): "Regional modeling of Saharan dust events using LM-MUSCAT: Model description and case studies." *J. Geophys. Res. - Atmos.* **112**(D11): D11204.
- Hinneburg, D., E. Renner, R. Wolke (2009): "Formation of secondary inorganic aerosols by power plant emissions exhausted through cooling towers in Saxony." *Environ. Sci. Pollut. Res.* **16**(1): 25–35 (doi:10.1007/s11356-11008-10081-11355).
- IPCC. (2000): Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York, Cambridge University Press.
- Jacob DJ, Winner DA (2009): Effect of climate change on air quality. *Atmos Environ* 43:51 – 63. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.09.051.
- Jaeger EB, Anders I, Lüthi D, et al (2008): Analysis of ERA40-driven CLM simulations for Europe. *Meteorol Z* 17:349–367. doi: 10.1127/0941-2948/2008/0301
- Jörss, W, L Emele, M. Scheffler, V. Cook, V. Handke, J. Theloke, B. Thiruchittampalam, F. Dünnebeil, W. Knörr, C. Heidt, M. Jozwicka, J.J.P. Kuenen, H.A.C. Denier van der Gon, A.J.H. Visschedijk, R.N. van Gijlswijk, B. Osterburg, B. Lagner, R.Stern (2014): Luftqualität 2020/2030: Weiterentwicklung von Prognosen für Luftschadstoffe unter Berücksichtigung von Klimastrategien. UBA-Texte 35-2014. Umweltbundesamt, Dessau.
- Jozwicka, M., Kuenen, J.J.P., Denier van der Gon, H.A.C., Visschedijk, A.J.H., van Gijlswijk, R.N. (2012): Gridded anthropogenic European emission data for the base year 2005 and projection years 2020, 2025 and 2030. TNO-060-UT-2012. Bericht im Rahmen des Projekts Luftqualität 2020/2030: Weiterentwicklung von Prognosen für Luftschadstoffe unter Berücksichtigung von Klimastrategien, siehe UBA-Texte 35-2014.
- Karl, M., Dorn, H.-P., Holland, F., Koppmann, R., Poppe, D., Rupp, L., Schaub, A., Wahner, A. (2006): Product study of the reaction of OH radicals with isoprene in the atmosphere simulation chamber, SAPHIR. *Journal of Atmospheric Chemistry* 55, 167–187.
- Kerschbaumer, A. (2010a): Abhängigkeit der RCG-Simulationen von unterschiedlichen meteorologischen Treibern. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.
- Kerschbaumer, A. (2010b): Ein Meteorologievergleich zum besseren Verständnis der unterschiedlichen Schadstoffkonzentrationsimulationen mit verschiedenen Chemie-Transport-Modellen Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.
- Kjellström E, Barring L, Jacob D, Jones R, Lenderink G, Schär C (2007): Modelling daily temperature extremes: recent climate and future changes over Europe. *Climatic Change* 81:249 – 265. doi:10.1007/s10584-006-9220-5.
- Kotlarski S, Keuler K, Christensen OB, et al (2014): Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geoscientific Model Development* 7:1297–1333. doi: 10.5194/gmd-7-1297-2014
- Krahe, P., Nilson, E., Gelhardt, U., Lang, J. (2010): Auswertungen ausgewählter globaler Klimamodelle hinsichtlich atmosphärischer Zirkulationsbedingungen im nordatlantisch-mitteuropäischen Sektor (No. BfG-1682). Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.5676/BfG-1682-2011>
- Logan, J. (1998). An analysis of ozonesonde data for the troposphere, recommendations for testing 3-D models and development of a gridded climatology for tropospheric ozone, *J. Geophys. Res.* 104, 16, 1998
- LRTAP Convention (2011): Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends. Chapter 3: Mapping Critical Levels for Vegetation, <http://icpvegetation.ceh.ac.uk/manuals/mappingmanual.html>, 2011.
- LUGV (2010): Auswertung regionaler Klimamodelle für das Land Brandenburg - Teil 2 – Gegenüberstellung klimatologischer Parameter mittels WettReg und WettReg2010 und deren Einordnung in das Ensemble der Regionalmodelle. - Fachbeiträge des Landesamts für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, Land Brandenburg (LUGV), Heft Nr. 115, 283 Seiten
- Maraun D. (2012): Nonstationarities of regional climate model biases in European seasonal mean temperature and precipitation sums. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L06706, doi:10.1029/2012GL051210.
- Pavlik D, Söhl D, Pluntke T, Bernhofer C (2014): Climate change in the Western Bug river basin and the impact on future hydroclimatic conditions. *Environmental Earth Sciences* 72:4787 – 4799. doi: 10.1007/s12665-014-3068-1
- Pavlik D, Söhl D, Pluntke T, Mykhnovych A, Bernhofer C (2012): Dynamic downscaling of global climate projections for Eastern Europe with a horizontal resolution of 7 km. *Environ Earth Sci.* doi:10.1007/s12665-011-1081-1.

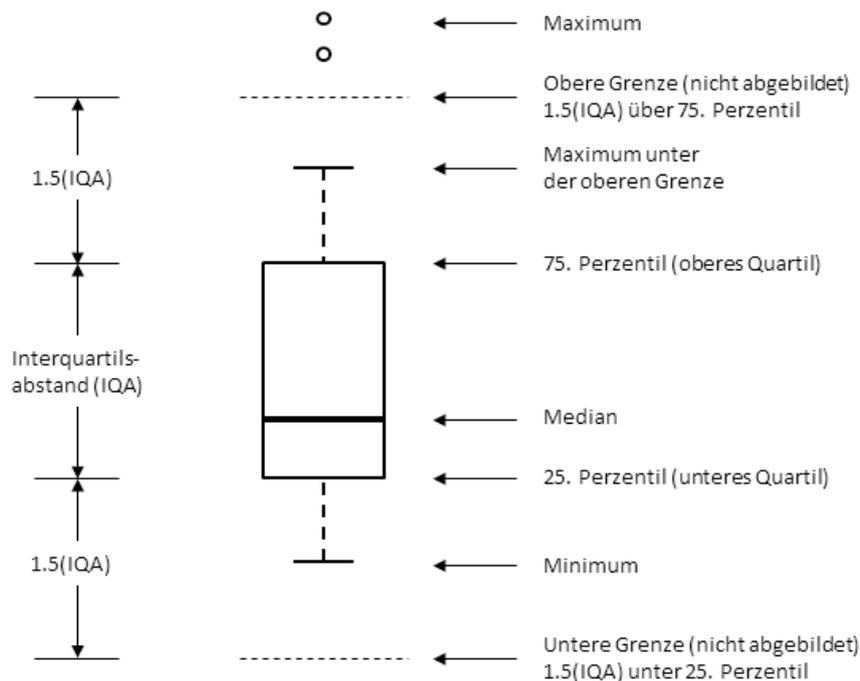
- Petoukhov, V., Rahmstorf, S., Petri, S., Schellnhuber, H. J. (2013): Quasiresonant amplification of planetary waves and recent Northern Hemisphere weather extremes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(14), 5336–5341. <http://doi.org/10.1073/pnas.1222000110>
- R Core Team (2015): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Racherla PN, Adams PJ (2008): The response of surface ozone to climate change over the Eastern United States. *Atmos Chem Phys* 8:871 – 885.
- Räisänen J, Hansson U, Ullerstig A, Döscher R, Graham LP, Jones C, Meier HEM, Samuelsson P, Willén U (2004): European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Clim Dyn* 22:13 – 31. doi:10.1007/s00382-003-0365-x.
- REGNIE (2013): Abteilung Hydrometeorologie: REGNIE (REGionalisierte NIEederschläge): Verfahrensbeschreibung & Nutzeranleitung, interner Bericht im DWD, Offenbach. S. 9 (erhältlich unter: http://www.dwd.de/DE/leistungen/regnie/download/regnie_beschreibung_pdf)
- Renner, E. and R. Wolke (2010): "Modelling the formation and atmospheric transport of secondary inorganic aerosols with special attention to regions with high ammonia emissions." *Atmos. Environ.* **44**(15): 1904-1912.
- Rockel B, Will A, Hense A (2008): The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift* 17:347 – 348.
- Roeckner E, Bäuml G, Bonaventura L, Brokopf R, Esch M, Giorgetta M, Hagemann S, Kirchner I, Kornbluh L, Manzini E, Rhodin A, Schlese U, Schulzweida U, Tompkins A (2003) The atmospheric general circulation model ECHAM5. Max Planck Institute for Meteorology.
- Roesch A, Jaeger EB, Lüthi D, Seneviratne SI (2008): Analysis of CCLM model biases in relation to intra-ensemble model variability. *Meteorol Z* 17:369–382.
- Rowell DP (2005): A scenario of European climate change for the late twenty-first century: seasonal means and interannual variability. *Clim Dyn* 25:837 – 849. doi:10.1007/s00382-005-0068-6.
- Schättler, U., G. Doms, C. Schraff (2009): A description of the nonhydrostatic regional COSMO-Model. Part I: Users Guide. Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 2009. [<http://www.cosmo-model.org>].
- Schell, B., Ackermann, I. J., Binkowski, F. S., and Ebel, A., (2001): Modeling the formation of secondary organic aerosol within a comprehensive air quality model system. *J. Geophys. Res.*, 106, 28275–28293.
- Schoetter R, Hoffmann P, Rechid D, Schlünzen KH (2012): Evaluation and Bias Correction of Regional Climate Model Results Using Model Evaluation Measures. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51:1670–1684. doi: 10.1175/JAMC-D-11-0161.1.
- SCHUCHARDT, B., WITTIG, S. SPIEKERMANN, J. (2010): Klimaszenarien für ‚nordwest2050‘ - Teil 2: Randbedingungen und Beschreibung. - 3. WERKSTATTBERICHT, Juni 2010, 76 S
- Schulzweida, U. (2015): Climate Data Operators – CDO User’s Guide, (<https://code.zmaw.de/projects/cdo/embedded/index.html>).
- Seinfeld, J. and Pandis, S. (1998): *Atmospheric Chemistry and Physics*. John Wiley and Sons, Inc.
- Simpson, D., Benedictow, A., Berge, H., Bergström, R., Emberson, L.D., Fagerli, H., Flechard, C.R., Hayman, G.D., Gauss, M., Jonsson, J.E., Jenkin, M.E., Nyíri, A., Richter, C., Semeena, V.S., Tsyro, S., Tuovinen, J.-P., Valdebenito, Á. Wind, P. (2012): The EMEP MSC-W chemical transport model - technical description. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12, 7825-7865.
- Singh A, Palazoglu A (2011): A Statistical Framework to Identify the Influence of Large-Scale Weather Events on Regional Air Pollution. *J Appl Meteorol Clim* 50:2376 – 2393. doi:10.1175/2011JAMC2669.1.
- Sofiev, M., Soares, J., Prank, M., de Leeuw, G., Kukkonen, J. (2011): A regional-to-global model of emission and transport of sea salt particles in the atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 116 (D21).
- Solazzo, E., S. Galmarin (2015): A science-based use of ensembles of opportunities for assessment and scenario studies. *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 2535–2544, 201, 2015.
- Steinbrecher, R., Smiatek, G., Koeble, R., Seufert, G., Theloke, J., Hauff, K., Ciccioli, P., Vautard, R., Curci, G. (2009): Intra- and inter-annual variability of VOC emissions from natural and seminatural vegetation in Europe and neighbouring countries. *Atmos. Environ.*, 43, 1380–1391.
- Stappeler J, Doms G, Schättler U, et al (2003): Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM. *Meteorol Atmos Phys* 82:75 – 96.
- Stern R (1994): Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen photochemischen Ausbreitungsmodells. FU-Berlin, Berlin.
- Stern R (2009): Das chemische Transportmodell REM-CALGRID - Modellbeschreibung. Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie, Troposphärische Umweltforschung.
- Stern, R. (2010a): The Chemical Transport Model REM-CALGRID. Model's formulation and user's guide. Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie. Bericht im Rahmen des FE-Vorhabens FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. PAREST. Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin, 2010.
- Stern, R. (2010b): Anwendung von chemischen Transportmodellen im Rahmen des PAREST-Projekts: Ergebnisvergleich REM-

- CALGRID, LOTOS-EUROS und MUSCAT-COSMO. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.
- Stern, R., P. Builtjes, M. Schaap, R. Timmermans, R. Vautard, A. Hodzic, M. Memmesheimer, H. Feldmann, E. Renner, R. Wolke and A. Kerschbaumer (2008): "A model intercomparison study focussing on episodes with elevated PM10 concentrations." *Atmos. Environ.* **42**(19): 4567-4588.
- Stevens B, Giorgetta M, Esch M, et al (2013): Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6: ECHAM6. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 5:146–172. doi: 10.1002/jame.20015
- Uppala SM, Kållberg PW, Simmons AJ, et al (2005): The ERA-40 re-analysis. *Q J R Meteorol Soc* 131:2961 – 3012.
- Vignati, E., Wilson, J., Stier, P. (2004): M7: An efficient size-resolved aerosol microphysics module for large-scale aerosol transport models. *Journal of Geophysical Research* 109, D22202, doi: 10.1029/2003JD004485.
- Vogel B, Vogel H, Bäumer D, Bangert M, Lundgren K, Rinke R, Stanelle T (2009): The comprehensive model system COSMO-ART – Radiative impact of aerosol on the state of the atmosphere on the regional scale. *Atmos Chem Phys* 9:8661–8680. doi:10.5194/acp-9-8661-2009.
- WMO (2015): http://www.wmo.int/pages/themes/climate/climate_data_and_products.php; aufgerufen am 17.11.2015, 09:30 Uhr.
- Wolke R, Knoth O, Hellmuth O, Schröder W, Renner E (2003): The Parallel Model System LM-MUSCAT for Chemistry-Transport Simulations: Coupling Scheme, Parallelization and Applications. In: PARCO'03. pp 363–370.
- Wolke, R., O. Knoth, O. Hellmuth, W. Schröder, E. Renner (2004): The parallel model system LM-MUSCAT for chemistry-transport simulations: Coupling scheme, parallelization and application, in: G.R. Joubert, W.E. Nagel, F.J. Peters, and W.V. Walter, Eds., *Parallel Computing: Software Technology, Algorithms, Architectures, and Applications*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 363-370.
- Wolke, R., W. Schröder, R. Schrödner, E. Renner (2012): Influence of grid resolution and meteorological forcing on simulated European air quality: A sensitivity study with the modeling system COSMO–MUSCAT, *Atmos. Environ.* **53**: 110-130.
- World Health Organization (Ed.). (2006): *Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide*. Copenhagen, Denmark: World Health Organization.
- World Health Organization. (2014): *Ambient (outdoor) air quality and health, Fact sheet N°313*. Retrieved September 19, 2014, from <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>
- Zanten, M., F. Sauter, R. Wichink Kruit, J. van Jaarsveld, W. Pul (2010): *Description of the DEPAC Module*. RIVM Report 680180001, Netherlands.
- Zmarsly E, Kuttler W, Pethe H (2007): *Meteorologisch-klimatologisches Grundwissen*, 3. Auflage, Eugen Ulmer Verlag UTB, Stuttgart, S. 182.

9 Anhang

9.1 Konventionen zur Darstellung von Box-Whisker-Plots im Kapitel 3

Abbildung 173: Konventionen zur Darstellung von Box-Whisker-Plots



9.2 RCG Modellierung

9.2.1 Definition der Bevölkerungsklassen

Eine flächenhafte Darstellung der Modellergebnisse für Deutschland erlaubt zwar eine Bewertung für jeden Ort in Deutschland, die vergleichende Bewertung ist aber schwierig, da die Spannweite der Immissionsunterschiede in einem inhomogenen Emissionsgebiet wie Deutschland sehr groß sein kann. Dies gilt insbesondere für die NO₂- und PM₁₀-Konzentrationen, deren maximale Konzentrationen eher in Gebieten mit hohen Emissionsdichten zu finden sind. Zur zusätzlichen Auswertung werden daher für Deutschland Untergebiete in der Abhängigkeit von der Bevölkerungsdichte gebildet. Diesem Ansatz liegt zugrunde, dass hohe Emissionsdichten überwiegend in Gebieten mit hohen Bevölkerungsdichten auftreten.

Die Fläche Deutschlands wird eingeteilt in:

- ▶ Klasse 1: Gebiete mit einer Bevölkerungsdichte < 100 Einwohner/km²
- ▶ Klasse 2: Gebiete mit einer Bevölkerungsdichte > 100, < 510 Einwohner/km²
- ▶ Klasse 3: Gebiete mit einer Bevölkerungsdichte > 510, < 945 Einwohner/km²
- ▶ Klasse 4: Gebiete mit einer Bevölkerungsdichte > 945 Einwohner/km²

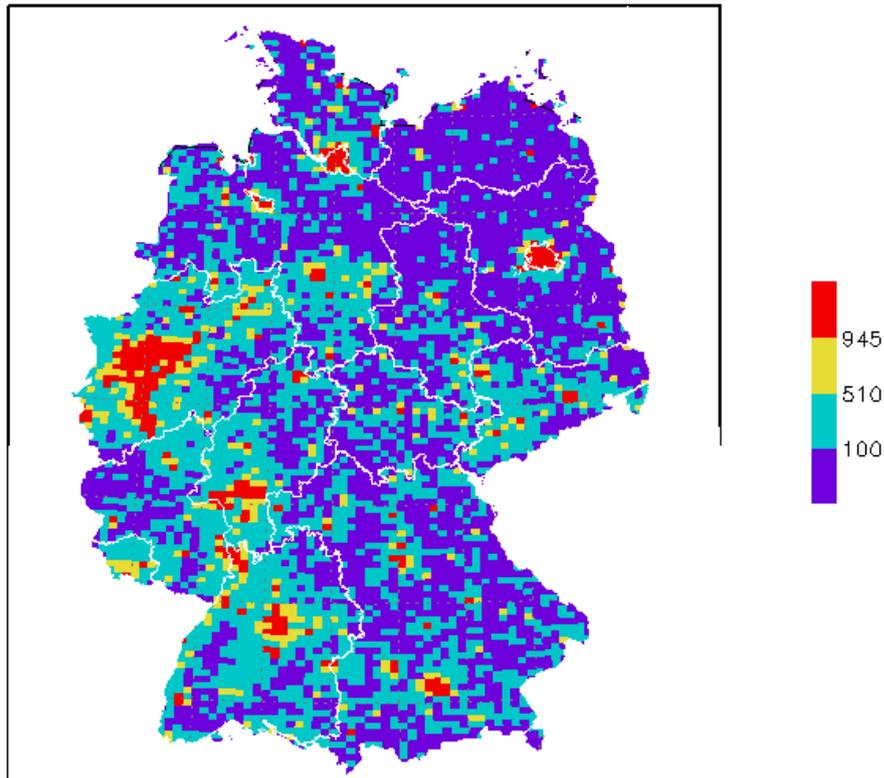
Die Klasse 1 umfasst alle ländlichen Gebiete mit einer geringen Bevölkerungsdichte. Die Obergrenze der Klasse 2 definiert die Bevölkerungsdichte, bei der der Median der Verteilung liegt. Die obere Grenze der Klasse 3 bzw. die Untergrenze der Klasse 4 ist die Bevölkerungsdichte, ab der man von einem Ballungsgebiet spricht.

Die Einteilung in die Bevölkerungsklassen wurde auf Basis der von der EU erstellten Bevölkerungsverteilung vorgenommen (<http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice>). Diese Daten beschreiben den

Bevölkerungsstand von 2001. Die zeigt die aus den Daten abgeleitete Bevölkerungsdichte in Deutschland aggregiert im hier verwendeten Rechenraster von 0.125° Länge x 0.0625° Breite. In den dicht besiedelten Ballungsräumen Deutschlands liegt die Bevölkerungsdichte zwischen circa 5000 bis über 10000 Einwohner pro km².

Abbildung 174: Abbildung 175 Bevölkerungsdichte in Einwohner/km² in 4 Klassen. Zur Klassendefinition siehe Text. Die Auflösung entspricht der Auflösung des Nestes Deutschland: 0.0625° Breite, 0.125° Länge, circa 8 km x 7 km.

Bevoelkerungsdichte in 4 Klassen im Raster Nest 2



GRADS: COLA/IGES

2009-05-18-18:53

9.3 Anpassung des RCG-Modells an die Fragestellung

9.3.1 Interne Berechnung der Grenzschichtvariablen

Der meteorologische Treiber COSMO-CLM liefert keine Felder für die vom RCG-Modell benötigten Stabilitätsmaße „Monin-Obukhov-Länge“ und „Schubspannungsgeschwindigkeit“. Daher müssen diese Größen auf Basis der vorliegenden Information während des Modelllaufes „on the fly“ berechnet werden.

Die Monin-Obukhov-Länge wurde aus den meteorologischen Parameter Bodenwind, Bedeckungsgrad, Sonnenwinkel und einer landnutzungsabhängigen Rauigkeitslänge nach einem empirischen Ansatz berechnet (Golder 1972, siehe auch Seinfeld und Pandis 1998, S. 870 ff):

$$\frac{1}{L} = S(a_1 + a_2 S^2) z_0^{SE}$$

wobei

L = die Monin - Obukhov - Länge

a_1 und a_2 = Konstanten (0.004349 und 0.003724)

z_0 = Rauigkeitslänge.

S ist ein Stabilitätsfaktor, der als Parameter für die atmosphärische Stabilität aus bodennahen Größen abgeleitet werden kann. Er entspricht den sog. Pasquill-Gifford-Stabilitätsklassen (siehe Seinfeld und Pandis 1998, S. 870 ff.):

$$S = -0.5(3.0 - 0.5U + \text{abs}(CE))$$

$$SE = b_1 + b_2 \text{abs}(S) + b_3 S^2$$

mit

U Windgeschwindigkeit am Boden (10 m)

b_1, b_2, b_3 = Konstanten (-0.5034, 0.2310 und - 0.0325)

CE = Expositionsfaktor, der von der Wolkenbedeckung und vom Sonnenstandswinkel abhängt. Die Beziehung zwischen den Stabilitätsklassen S und der Monin-Obukhov-Länge wurde empirisch aus mikrometeorologischen Messungen abgeleitet.

In Abhängigkeit der atmosphärischen Stabilität werden die empirischen Funktionen Φ wie folgt definiert:

für $L > 0$ (stabile Atmosphäre):

$$\Phi\left(\frac{z}{L}\right) = 1 + 4.7\left(\frac{z}{L}\right)$$

und für $L < 0$ (instabile Atmosphäre):

$$\Phi\left(\frac{z}{L}\right) = \left[1 - 15\left(\frac{z}{L}\right)\right]^{-0.25}$$

Für eine neutrale Atmosphäre ($L = \pm \infty$), $\Phi = 1$.

Für die Schubspannungsgeschwindigkeit wird folgender Zusammenhang benutzt:

$$u^* = \frac{\kappa U_r}{f}$$

mit κ der von-Karman-Konstanten (0,4), U_r der Windgeschwindigkeit auf 10 m Höhe und f einer Stabilitätsfunktion.

stabile Atmosphäre:

$$f = \ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right) + 4.7\left(\frac{z_r - z_0}{L}\right)$$

instabile Atmosphäre:

$$f = \ln \left[\frac{1 - \Phi_u \left(\frac{z_r}{L} \right)}{1 + \Phi_u \left(\frac{z_r}{L} \right)} \right] - \ln \left[\frac{1 - \Phi_u \left(\frac{z_0}{L} \right)}{1 + \Phi_u \left(\frac{z_0}{L} \right)} \right] + 2 \tan^{-1} \left(\frac{1}{\Phi_u \left(\frac{z_r}{L} \right)} \right) - 2 \tan^{-1} \left(\frac{1}{\Phi_u \left(\frac{z_0}{L} \right)} \right)$$

wobei z_r die Referenzhöhe angibt und die empirischen Funktionen Φ für diese Referenzhöhe bestimmt werden (Φ_u).

Dieser Ansatz wurde im RCG-Modell implementiert und getestet.

9.3.2 Erweiterung der trockenen Depositionsansätze für Ozon

Der im RCG-Modell enthaltene Ansatz zur Modellierung der trockenen Deposition beruht auf dem von der TNO entwickelten DEPAC-Modell. Dieser Ansatz ist im Detail in Stern (2010) beschrieben. Für dieses Vorhaben wurde die Parametrisierung der stomatären Ozonaufnahme durch einen Ansatz ersetzt, der die Berücksichtigung des Einflusses der Bodenfeuchte auf den Öffnungszustand der Pflanzen-Stomata ermöglicht.

Der stomatäre Blattleitwert g_{sto} wird nach dem Ansatz von Emberson et al. (2000a, 2000b, 2007) aus dem Rezeptorspezifischen maximalen stomatären Blattleitwert g_{max} (in $mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$) und den sogenannten Jarvis-Stewart-Gewichtungsfunktionen berechnet:

$$g_{sto} = g_{max} * [\min(f_{phen}, f_{O_3})] * f_{light} * \max\{f_{min}, (f_{temp} * f_{VPD} * f_{PAW})\}$$

Die Wichtungsfunktionen haben Werte zwischen 0 und 1 und charakterisieren den Einfluss

- ▶ des phänologischen Entwicklungszustandes, f_{phen} ,
- ▶ der Ozonkonzentration, f_{O_3} ,
- ▶ der Lichtintensität, f_{light}
- ▶ der Lufttemperatur, f_{temp} ,
- ▶ des Wasserdampfättigungsdefizits, f_{VPD} ,
- ▶ des für die Pflanze verfügbaren Bodenwassergehalts, f_{sw} .

Dieser Ansatz zur Berechnung des stomatären Blattleitwerts entspricht der Vorgehensweise der UNECE working group on effects, die im „Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends“, Chapter 3 “Mapping Critical Levels for Vegetation” detailliert beschrieben ist (LRTAP Convention (2011)). Die Berechnung der Wichtungsfunktionen und Werte für den maximalen stomatären Blattwiderstand von Pflanzen wurde aus dem Manual übernommen. Die Wichtungsfunktionen des für Deutschland untergeordneten Einflusses des phänologischen Entwicklungszustandes und des Einflusses der Ozonkonzentrationen (Zanten et al. 2010) wurden vernachlässigt ($f=1$).

Die Bodenfeuchte ist ein wichtiger Parameter zur Bestimmung der Stomata-Leitfähigkeit von Pflanzen. Diese Größe bestimmt die Ozon-Aufnahmekapazität und damit den Betrag der trockenen Deposition. In einem sich ändernden Klima wird sich auch die Bodenfeuchte ändern. Weniger Bodenfeuchte führt zu einer reduzierten Ozonaufnahme und damit zu einer Zunahme der Ozon-Konzentrationen.

Zur Berücksichtigung des Einflusses des Bodenwassergehalts wird folgender einfacher Interpolationsansatz verwendet (Simpson et al. 2012): Bei einer Verfügbarkeit von 100% ist der Boden mit Wasser gesättigt, die Feldkapazität ist erreicht. Bei einer Verfügbarkeit von 0% ist der Welkepunkt er-

reicht. Für eine Verfügbarkeit über einem Schwellenwert von 50 % wird maximale Stomata-Leitfähigkeit angenommen, der Wichtungsfaktor f_{sw} wird auf 1 gesetzt. Für eine Verfügbarkeit unter dem Schwellenwert von 50 % wird interpoliert

$f_{sw} = 1$ für $SMI > 0.5$

$f_{sw} = 2 * SMI$ für $SMI < 0.5$

mit:

$SMI = \text{Bodenfeuchteindex (soil moisture index)} = (SW - SW_{\min}) / (SW_{\max} - SW_{\min})$

mit: $SW_{\min} = \text{permanenter Welkepunkt (abhängig von der Bodentextur)} = PWP$

$SW_{\max} = \text{Feldkapazität (abhängig von der Bodentextur)} = FC$

$SW = \text{Bodenwassergehalt}$

Zur Umsetzung dieses Ansatzes werden der Bodenwassergehalt und die Bodentextur im Modellgebiet als gerasterte Eingabegrößen verlangt.

Die Bodentextur wird in COSMO (CCLM) als sogenannter externer Parameter behandelt und geht als zeitlich nicht veränderbare Information in die Modellrechnungen ein. Folgende Bodenarten werden verwendet:

- ▶ Eis
- ▶ Felsen
- ▶ Sand
- ▶ sandiger Lehm
- ▶ Lehm
- ▶ Ton/Lehm
- ▶ Ton
- ▶ Moor
- ▶ Meerwasser
- ▶ Meereis

Die Bodenart wird nur horizontal differenziert. Eine vertikale Differenzierung findet im Bodenmodell des CCLM keine Berücksichtigung. Die Bodentextur wird für die RCG-Berechnungen als gerastertes Feld benötigt. Jeder horizontalen Zelle der beiden Modellgebiete soll der in der Zelle vorherrschende Bodentyp zugewiesen werden.

Der volumetrische Bodenwassergehalt [m^3/m^3] ist im CCLM für 9 Bodenschichten erhältlich:

- ▶ Schicht 1: 1-3.5 cm
- ▶ Schicht 2: 3.5- 8 cm
- ▶ Schicht 3: 8-17 cm
- ▶ Schicht 4: 17-35 cm
- ▶ Schicht 5: 35- 71 cm
- ▶ Schicht 6: 71-143 cm
- ▶ Schicht 7: 143-287 cm
- ▶ Schicht 8: 287-575 cm
- ▶ Schicht 9: 575- 1151 cm

Für die Depositionsberechnungen im RCG-Modell wird der Bodenwassergehalt nur für die pflanzenspezifische Wurzeltiefe benötigt. Die folgende Tabelle 34 zeigt pflanzenspezifische Durchwurzelungstiefen und die Zuordnung zu den Landnutzungsklassen des RCG-Modells. Die Werte geben an, bis zu welcher Tiefe die Pflanze den Hauptteil ihrer Wasserversorgung bezieht.

Tabelle 34: Generischer Pflanzentyp und zugeordnete Landnutzungs-kategorie im RCG-Modell

Generischer Pflanzentyp und zugeordnete Landnutzungs-kategorie im RCG-Modell	Wurzeltiefe nach Mapping Manual
Weizen (Landwirtschaft)	Circa 0-100 cm
Birke (Laubwald)	Circa 0-100 cm
Fichte (Nadelwald)	Circa 0-100 cm
Klee (Grasland)	Circa 0-28 cm

Dementsprechend werden im RCG-Modell nur die Bodenwassergehalte bis circa 1m Tiefe benötigt. Für eine vertikale Differenzierung werden die ersten 7 Klassen des CCLM zu 3 RCG-Klassen zusammengefasst. Der Bodenwassergehalt jeder RCG-Klasse wird dann aus den entsprechenden Klassen des CCLM als mittlerer, mit der Wurzeltiefe der einzelnen CCLM-Klassen gewichteter volumetrischer Bodenwassergehalt berechnet:

- ▶ SOILM_L1: RCG-Klasse 1 von 0 bis 35 cm Tiefe : CCLM-Klassen 1, 2, 3, 4
- ▶ SOILM_L2: RCG-Klasse 2 von 35 bis 71 cm Tiefe: CCLM-Klasse 5
- ▶ SOILM_L3: RCG-Klasse 3 von 71 bis 143 cm Tiefe: CCLM-Klasse 6

Der permanente Welkepunkt (PWP=SWmin) und die Feldkapazität (FC=SWmax) hängen ab von den Bodentypen. In der folgenden Tabelle 35 sind die den CCLM Bodentypen zugeordneten Werte für Welkepunkt und Feldkapazität zusammengestellt.

Tabelle 35: Permanenter Welkepunkt und Feldkapazität für verschiedene Bodentypen

	Bodentyp	Feldkapazität (m ³ /m ³)	Welkepunkt (m ³ /m ³)
1	Eis	-	-
2	Felsen	-	-
3	Sand	0.15	0.07
4	Sandiger Lehm	0.2	0.08
5	Lehm	0.25	0.1
6	Ton/Lehm	0.4	0.25
7	Ton	0.4	0.28
8	Moor	0.66	0.27
9	Meerwasser		
10	Meereis		

Der Ansatz zur Bestimmung des stomatären Blattwiderstands unter Berücksichtigung des Bodenwassergehalts wurde im RCG-Modell implementiert.

9.3.3 Adaption der RCG-Abläufe an langjährige Berechnungen

9.3.3.1 Zusammenfassung der Aerosol-Spezies zu PM10 und PM2.5 während des Modellaufes

Die PM10-Masse im RCG-Modell setzt sich aus den Einzelbeiträgen von 18 Aerosolkomponenten zusammen. In der RCG-Standardmodellversion werden diese Einzelbeiträge erst in der Nachbehandlung zu PM10 bzw. zu PM2.5 zusammengefasst. Die dazu notwendige Abspeicherung aller Aerosolkomponenten würde aber bei der Menge der hier geplanten Modellläufe zu unverhältnismäßig großen Output-Dateien führen. Deshalb wird für KLENOS die Gesamtmasse von PM10 und PM2.5 direkt

im Modell berechnet. Diese Vorgehensweise wurde im Modell implementiert, das dazu um die beiden neuen Spezies PM10 und PM2.5 erweitert wurde. Der Arbeitspunkt wurde ausgeführt und getestet.

9.3.3.2 Optimierung der Datenübergabe zwischen Europa-Lauf und Deutschland-Lauf

Die Übergabe zwischen den Ergebnissen des Europalaufes an den Deutschlandlauf (obere und seitliche Randbedingungen) wurde automatisiert, um eine reibungslose Abarbeitung der 30-jährigen Simulationen zu ermöglichen.

9.3.3.3 Festlegung der hemisphärischen Hintergrundkonzentrationen (Randbedingungen Europa-Lauf)

Anfangs- und Randbedingungen werden dem RCG-Modell zum Teil extern vorgegeben und zum Teil intern abgeleitet. Bei der internen Ableitung werden breitenabhängige und saisonabhängige klimatologische Hintergrundkonzentrationen verwendet. Die dazu verwendete Methodik entspricht der Vorgehensweise im EMEP-Modell (Simpson et al. 2012). Anfangs- und Randbedingungen für Ozon werden aus der Ozon-Klimatologie von Logan (1998) abgeleitet. Die für die Erstellung der Randbedingungen verwendeten großräumigen Hintergrundkonzentrationen wurden überprüft und an den gegenwärtigen Stand des Wissens zu den globalen Hintergrundkonzentrationen angepasst. Diese hemisphärischen Hintergrundkonzentrationen wurden für alle Rechenläufe verwendet.

9.4 Für die Ausbreitungsrechnung verwendete Emissionen in Deutschland: Referenzjahre 2005 und 2030

In diesem Anhang sind die für die RCG-Ausbreitungsrechnungen in Deutschland benutzten Emissionen der Referenzjahre 2005 und 2030 zusammengestellt. Diese Angaben beruhen auf den in Jörss et al. (2014) beschriebenen Szenarien. APS = Aktuelle Politik-Szenario

Tabelle 36: Emissionen (t/Jahr) APS-Referenz 2005, Deutschland für 15 Verursachergruppen

2005		NOX	NMVOC	SOX	NH3	PM25	PM10
1	Combustion in energy and transformation industries	290000.8	11395.2	288566.5	2779.2	10559.7	11974.8
2	Non-industrial combustion plants	92803.5	38482.8	69654.4	2837.6	24166	25563.3
3	Combustion in-manufacturing industry	88827	6742.3	58917.2	980.2	6532.8	8463.6
4	Production processes	97805.8	56845.4	85467.2	12036.5	17525.4	55405.7
5	Extraction and distribution of fossil fuels	7902.7	69626.8	11271.1	0	383	1759
6	Solvent and other product use	0	742623.8	0	1732.5	9068.2	9068.2
7	Road Transport Gasoline	167604.2	168631.2	405.8	22680.1	2099	2099
8	Road Transport Diesel	584171.6	31746.5	429.6	406.7	24474.6	24474.6
9	Brake and Tyrewear	0	0	0	0	10339.1	19140.9
10	Road Transport Volatilisation Losses	0	8378.6	0	0	0	0
11	Road Dust Resuspension	0	0	0	0	4709.8	47098.2
12	Other mobile sources and machinery	192414	59129.1	1822	91	21926.7	21926.7
13	Waste Handling and Disposal	112.7	4.7	19.9	0	5.8	7.3
14	Agriculture	112480.2	254741.9	0	535276.4	6302.2	39466.4
15	Airports	9691.1	1142.7	224.2	139.5	72.9	72.9
	SUM OVER ALL SECTORS	1643814	1449491	516778	578960	138165	266521

Tabelle 37: Emissionen (t/Jahr) APS-Referenz 2030, Deutschland für 15 Verursachergruppen

2030		NOX	NM VOC	SOX	NH3	PM25	PM10
1	Combustion in energy and transformation industries	211924.7	13932.8	135512.2	2094.2	6818.9	7734.6
2	Non-industrial combustion plants	82068	56802.2	40174.7	1706.4	25962.1	27998.3
3	Combustion in-manufacturing industry	112791.9	13868.8	41908.9	1710.1	11418.3	13429.2
4	Production processes	83190.4	54598.1	82732.9	13683.4	11991.9	46262.6
5	Extraction and distribution of fossil fuels	6706.7	62971.2	9563.8	0	387.9	1658.9
6	Solvent and other product use	0	695226.2	0	1732.5	8790.5	8790.5
7	Road Transport Gasoline	23885.3	48195.6	172.6	8962	448.5	448.5
8	Road Transport Diesel	108799.7	9096.4	481.1	607.7	1189.3	1189.3
9	Brake and Tyrewear	0	0	0	0	13287.1	24615.8
10	Road Transport Volatilisation Losses	0	2373	0	0	0	0
11	Road Dust Resuspension	0	0	0	0	6204.2	62041.8
12	Other mobile sources and machinery	93509	24962.5	561.4	71.8	5383.4	5383.4
13	Waste Handling and Disposal	154.3	6.5	27.2	0	8	10
14	Agriculture	112167.9	254741.9	0	550395.6	6285.5	39008.2
15	Airports	16258.5	1493.4	295.2	251.1	76.5	76.5
	SUM OVER ALL SECTORS	851456	1238269	311430	581215	98252	238648

Tabelle 38: Änderung (%) der Emissionen der APS-Referenz 2030 bezogen auf die APS-Referenz 2005, Deutschland.

2030-2005 (%)		NOX	NMVOC	SOX	NH3	PM25	PM10
1	Combustion in energy and transformation industries	-26.9	22.3	-53.0	-24.6	-35.4	-35.4
2	Non-industrial combustion plants	-11.6	47.6	-42.3	-39.9	7.4	9.5
3	Combustion in-manufacturing industry	27.0	105.7	-28.9	74.5	74.8	58.7
4	Production processes	-14.9	-4.0	-3.2	13.7	-31.6	-16.5
5	Extraction and distribution of fossil fuels	-15.1	-9.6	-15.1		1.3	-5.7
6	Solvent and other product use		-6.4		0.0	-3.1	-3.1
7	Road Transport Gasoline	-85.7	-71.4	-57.5	-60.5	-78.6	-78.6
8	Road Transport Diesel	-81.4	-71.3	12.0	49.4	-95.1	-95.1
9	Brake and Tyrewear					28.5	28.6
10	Road Transport Volatilisation Losses		-71.7				
11	Road Dust Resuspension					31.7	31.7
12	Other mobile sources and machinery	-51.4	-57.8	-69.2	-21.1	-75.4	-75.4
13	Waste Handling and Disposal	36.9	38.3	36.7		37.9	37.0
14	Agriculture	-0.3	0.0		2.8	-0.3	-1.2
15	Airports	67.8	30.7	31.7	80.0	4.9	4.9
	SUM OVER ALL SECTORS	-48.2	-14.6	-39.7	0.4	-28.9	-10.5

9.5 Schnittstelle zwischen Regionalem Klimamodell CCLM und Chemie-Transport-Modell RCG

Für die Offline-Kopplung des Regionalen Klimamodells CCLM und des Chemie-Transport-Modells RCG war es eine Grundvoraussetzung, dass die Ausgabedateien des CCLM vom RCG gelesen und verarbeitet werden können. Dafür wurde in enger Absprache zwischen dem Modellentwickler des RCG, Rainer Stern und dem Lehrstuhl für Meteorologie der TU-Dresden ein Konverter entwickelt, der die Ausgabedateien des CCLM in ein für das RCG lesbares Format umwandelt. Dies beinhaltet nicht nur die reine Konvertierung von einem binären Dateiformat in ein anderes Dateiformat, sondern erforderte auch die zusätzliche Berechnung notwendiger Variablen und Parameter.

In Tabelle 39 sind die vom RCG benötigten und die vom CCLM verfügbaren Variablen gegenübergestellt. Zusätzliche Variablen und Konstanten, die zur Berechnung erforderlicher meteorologischer Felder oder für Umrechnungen bereits vorhandener Variablen benötigt werden sind in Tabelle 40 aufgeführt.

Um die vom regionalen Klimamodell CCLM erzeugten meteorologischen Felder in eine für das Chemie-Transport-Modell RCG lesbare Form zu überführen, wurde eine Linux-Shell-Script basierte Routine geschrieben, die sich um den Datentransfer kümmert und alle benötigten externen Programme zur Datenverarbeitung aufruft. Verwendet wurde die Linux-Shell *kornshell*. Das erstellte Shell-Script kann über folgenden Befehl aufgerufen werden:

```
./cclmtorcg_month <year> <month> <nest>
```

Als Eingabeparameter werden die Angaben zum Jahr, Monat und zum Nesting-Schritt (1 oder 2) übergeben. Die erforderlichen Pfadangaben sind hart codiert und müssen bei Bedarf im Script angepasst werden. Alle Berechnungs- und Datenverarbeitungsschritte werden mit Funktionen des Programms CDO (climate data operators, Schulzweida 2015) durchgeführt, welches auf dem ausführenden Rechner installiert sein muss. Weiterhin wird das Programm GrADS (Grid Analysis and Display System, Doty 1995) benötigt, mit welchem die Daten vom NetCDF-Format in ein GrADS-lesbares binäres Datenformat überführt werden können. In den folgenden Abschnitten wird die Funktionsweise der Konvertierungsroutine sowie die vom Programm durchgeführten Be- und Umrechnungen der benötigten Variablen beschrieben.

Tabelle 39: Benötigte RCG Input-Variablen und verfügbare CCLM Output-Variablen (x = nicht vorhanden)

RCG Eingabe-Variablen	CCLM Ausgabe-Variablen	Einheit
Dreidimensionale Felder		
u-Komponente Wind	U - U-component of wind	m*s ⁻¹
v-Komponente Wind	V - V-component of wind	m*s ⁻¹
Temperatur	T - temperature	K
Luftfeuchte	QV - specific humidity	kg*kg ⁻¹
Dichte der Luft	x	
Zweidimensionale Felder		
Bodentemperatur	T_2M – 2m temperature	K
u-Komponente Wind	U_10M – u-component wind	m*s ⁻¹
v-Komponente Wind	V_10M – v-component wind	
Gesamtbedeckung	CLCT - total cloud cover	1
Niederschlag	TOT_PREC - total precipitation amount	kg*m ⁻²

Monin-Obukhov-Länge	x	
Schubspannungsgeschwindigkeit	x	
Mischungsschichthöhe	HPBL - height of boundary layer	m
Schneebedeckung	W_SNOW - surface snow amount	m
Bodenfeuchte	W_SOIL - water content	m

Tabelle 40: Zusätzlich für Berechnungen benötigte Variablen und Konstanten

Variablen/Konstanten	Name	Einheit
Verfügbare CCLM Variablen		
Relative Luftfeuchte	RELHUM	1
Berechnete Variablen		
Luftdruck	$P \rightarrow f(z, g, T_v, R_l)$	hPa
Sättigungsdampfdruck	$E \rightarrow f(T)$	hPa
Gaskonstante feuchter Luft	$R_f \rightarrow f(\text{RELHUM}, E, P)$	$J^*(\text{kg}^*K)^{-1}$
Luftdichte	$L_d \rightarrow f(T, P, R_f)$	$\text{kg} * \text{m}^{-3}$
virtuelle Temperatur	$T_v \rightarrow f(T, QV)$	K
Konstanten		
Gaskonstante trockener Luft	$R_l = 287,058$	$J^*(\text{kg} * K)^{-1}$
Gaskonstante Wasserdampf	$R_d = 461$	$J^*(\text{kg} * K)^{-1}$
molare Masse der Luft	$M_l = 28,966$	$\text{g}^*\text{mol}^{-1}$
molare Masse von Wasser	$M_w = 18,016$	$\text{g}^*\text{mol}^{-1}$
Fallbeschleunigung	$g = 9,81$	m^*s^{-2}

9.5.1 Bodenfeuchte

Die Variable Bodenfeuchte ist in einem dreidimensionalen Datenfeld (rlon, rlat, soil1) gespeichert und beinhaltet den Wassergehalt in jedem Bodenhorizont mit der Angabe in Metern (m). Die Einheit Meter lässt sich folgendermaßen in die Einheit (m^3/m^3) umrechnen (Gl. 5):

$$\frac{\text{Wassergehalt} * \text{Zelllänge} * \text{Zellbreite}}{\text{Horizontmächtigkeit} * \text{Zelllänge} * \text{Zellbreite}} = \frac{\text{Wassergehalt}}{\text{Horizontmächtigkeit}} = \text{Bodenfeuchte in } \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \quad (5)$$

Im regionalen Klimamodell CCLM sind neun Bodenhorizonte festgelegt, die folgende vertikale Schichtung in Metern aufweisen:

1. 0.010 - 0.035
2. 0.035 - 0.081
3. 0.080 - 0.170
4. 0.170 - 0.350
5. 0.350 - 0.710
6. 0.710 - 1.430
7. 1.430 - 2.870
8. 2.870 - 5.750
9. 5.750 - 11.510

RCG benötigt drei Bodenhorizonte mit folgender vertikaler Schichtung ebenfalls in Metern:

1. 0.000 - 0.350
2. 0.350 - 0.710
3. 0.710 - 1.430

Zur Bereitstellung der von RCG benötigten Bodenfeuchte wird diese für den RCG-Horizont 1 von den CCLM-Horizonten 1 bis 4 aggregiert und die Bodenfeuchte der CCLM-Horizonte 5 und 6 wird für die RCG-Horizonte 2 und 3 übernommen.

9.5.2 Luftdichte

Die Dichte der Luft wird von RCG als dreidimensionales Feld in verschiedenen Höhenschichten benötigt. Da diese Variable nicht vom CCLM ausgegeben wird, muss sie nachträglich berechnet werden. Folgender Ansatz wird zur Berechnung der Luftdichte von `cclmtoircg_month` verwendet (Gl. 6).

$$\rho_L = \frac{p}{T * R_{Lf}} \quad (6)$$

ρ_L – Luftdichte [kg/m³], p – Luftdruck [Pa], T – Temperatur [K], R_{Lf} – Gaskonstante feuchter Luft

9.5.3 Luftdruck auf z-levels

Für die Berechnung der Luftdichte wird der aktuelle Luftdruck zu jedem Zeitschritt auf den erforderlichen Höhenschichten der Atmosphäre im Modell RCG benötigt. Vom Modell CCLM wird der Luftdruck auf einer sogenannten geländefolgenden Höhenkoordinate ausgegeben und nicht direkt auf festen Höhenschichten. Aus diesem Grund wurde der Luftdruck für die entsprechenden Höhenschichten mit der barometrischen Höhenformel (Gl. 7) nachträglich berechnet.

$$p_z = p_{z-1} * e^{-\frac{g * z}{R_L * T_{v,z}}} \quad (7)$$

p_z – Luftdruck auf Höhe z [hPa], p_{z-1} – Luftdruck der tiefer liegenden Schicht ($z-1$) [hPa], z – Höhe [m], g – Fallbeschleunigung (9,81 m/s²), $T_{v,z}$ [K] – virtuelle Temperatur der Höhenschicht z ; R_L spezifische Gaskonstante trockener Luft (287.058 J/(kg * K))

9.5.4 Virtuelle Temperatur

Die in Gleichung 7 verwendete virtuelle Temperatur ist die Temperatur, die trockene Luft annehmen muss, damit sie (bei gleichem Druck) dieselbe (geringere) Dichte wie feuchte Luft aufweist (Zmarsly et al. 2007). Sie wird im Konvertierungsscript nach der Gleichung von Guldberg und Mohn (Gl. 8) berechnet.

$$T_v = T * (1 + 0,61s) \quad (8)$$

T_v – virtuelle Temperatur [K], T – Temperatur [K], s – spezifische Feuchte [kg/kg]

9.5.5 Gaskonstante feuchter Luft

Für die möglichst genaue Berechnung der Luftdichte muss die Luftfeuchtigkeit beachtet werden, da diese die Gaskonstante beeinflusst. Die Gaskonstante feuchter Luft wird nach Gleichung 9 berechnet.

$$R_{Lf} = \frac{R_L}{1 - \varphi * \frac{e}{p} * 1 - \frac{R_L}{R_D}} \quad (9)$$

R_{Lf} – Gaskonstante feuchter Luft [J/(kg * K)]; R_L – Gaskonstante trockener Luft = 287.058 J/(kg * K); R_D – Gaskonstante von Wasserdampf = 461 J/(kg * K); φ – Relative Luftfeuchte (0 – 1) [1/F]; p – Luftdruck [hPa]; e – Sättigungsdampfdruck [hPa]

9.5.6 Sättigungsdampfdruck

Der Sättigungsdampfdruck wird für die Berechnung der Gaskonstante feuchter Luft (Gl. 9) benötigt und muss ebenfalls zusätzlich berechnet werden. Für die hier beschriebene Konvertierungsroutine wird der Sättigungsdampfdruck nach der Magnus-Formel in Abhängigkeit von der Temperatur berechnet (Gl. 10, 11).

$$E_w = 6.1 * 10^{\frac{7.5 * T}{T + 273.15}} \quad (10)$$

$$E_i = 6.1 * 10^{\frac{9.5 * T}{T + 265.5}} \quad (11)$$

E_w – Sättigungsdampfdruck über Wasser [hPa]; E_i – Sättigungsdampfdruck über Eis [hPa]; T – Temperatur [°C]

Die Magnus-Formel ist eine empirisch aus Messungen abgeleitete Gleichung, die streng genommen nur über ebenen Wasserflächen (Gl. 10) oder ebenen Eisflächen (Gl. 11) gültig ist. Hier werden beide Gleichungen als Näherungen verwendet, wobei Gleichung 10 den Sättigungsdampfdruck im Temperaturbereich $> 0^\circ\text{C}$ und Gleichung 11 im Temperaturbereich $< 0^\circ\text{C}$ beschreibt.

9.5.7 Spezifische Luftfeuchte

Vom Modell CCLM wird die spezifische Luftfeuchte in der Einheit kg/kg ausgegeben. Zur Verwendung im Modell RCG wird diese in die Einheit ppm(v) umgerechnet (Gl. 12).

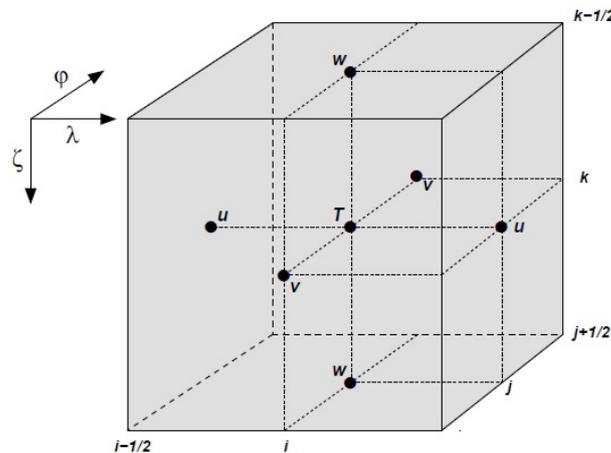
$$s = s_{ppm} * \frac{M_L}{M_W} * 1.000.000 \quad (12)$$

s – spezifische Feuchte [kg/kg]; s_{ppm} – spezifische Feuchte [ppm]; M_L – molare Masse der Luft (28.966 g/mol); M_W – molare Masse von Wasser (18.016 g/mol)

9.5.8 Lage der Windvariablen im Modellgitter

Die u- und v- Komponenten des Windes werden vom Modell CCLM auf allen definierten Höhenlevels sowie auf 10 m Höhe ausgegeben. Ihre zweidimensionalen Ortskoordinaten liegen jedoch nicht auf dem rotierten Lon-Lat-Gitter sondern auf dem sogenannten *staggered grid*. Während beispielsweise der Luftdruck, die Temperatur sowie weitere skalare Variablen in der Zellmitte des numerischen CCLM-Gitters gespeichert werden, befinden sich Geschwindigkeits- oder Impulsvariablen auf den Kanten einer Gitterzelle. Grund dafür ist die Vermeidung von Diskretisierungsfehlern (sog. *odd-even decoupling* bspw. zwischen Druck und Geschwindigkeit). Abbildung 176 zeigt die Konfiguration einer Gitterzelle im CCLM.

Abbildung 176: Gitterzelle des Arakawa-C-Gitters im CCLM mit Speicherung von skalaren Variablen in der Zellmitte und von Impuls- und Geschwindigkeitsvariablen auf den Zellkanten (Schättler et al. 2009).



Das Modell RCG benötigt im Gegensatz zum CCLM alle Variablen zentriert in der jeweiligen Zellmitte. Aus diesem Grund werden die vom CCLM bereitgestellten Windvariablen U , V , U_{10M} und V_{10M} mit dem CDO-Befehl `cdo setgrid,<grid> <ifile> <ofile>` in die jeweilige Zellmitte „verschoben“.

9.5.9 Windgeschwindigkeit

Aus den Variablen U_{10M} und V_{10M} wird über den Satz des Pythagoras die Windgeschwindigkeit berechnet (Gl. 13). Dies jedoch erst nachdem beiden Felder auf das RCG-Gitter interpoliert wurden (siehe Abschnitt 9.5.10).

$$W = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (13)$$

W – Windgeschwindigkeit [m/s], u – horizontale Windkomponente [m/s], v – vertikale Windkomponente [m/s]

9.5.10 Remapping rotierter Felder auf ein unrotiertes, geographisches Gitter

Im Modell CCLM sind die meteorologischen Variablen auf einem rotierten sphärischen Gitter positioniert (vgl. Abschnitt 3.1). Da das Modell RCG jedoch ein normales geographisches Gitter verlangt, müssen die erforderlichen Variablen vom rotierten Koordinatensystem in ein unrotiertes Koordinatensystem überführt werden. Dies wird mittels bilinearer Interpolation über CDO-Routinen, basierend auf der SCRIP-Bibliothek, realisiert. Alle skalaren Felder werden folgendermaßen in ein geographisches, unrotiertes Koordinatensystem überführt. In einem ersten Schritt werden Interpolationsgewichte berechnet (`cdo genbil,<grid> <ifile> <ofile>`), die dann im zweiten Schritt von der Interpolationsroutine zur Interpolation verwendet werden: `cdo remap,<grid>,<weights> <ifile> <ofile>`.

Die Windfelder (U , V , U_{10M} , V_{10M}) werden gesondert behandelt. Mit der Funktion `rotuvb` (`cdo rotuvb,u,v <ifile> <ofile>`) werden die Windkomponenten erst rotiert und im Anschluss wie oben beschrieben auf das RCG-Gitter bilinear interpoliert.

Abbildung 177 zeigt die nach der Rückrotation verfügbaren Daten. Deutlich erkennbar ist, dass die Datenfelder die Meridiane auf der Nordhalbkugel schneiden und erst nach weiterer Reduktion ohne Fehlwerte verfügbar sind (Abbildung 178).

Abbildung 177: Unrotierte CCLM-Daten, Temperatur, vollständige Abbildung (z=4m, t=1).

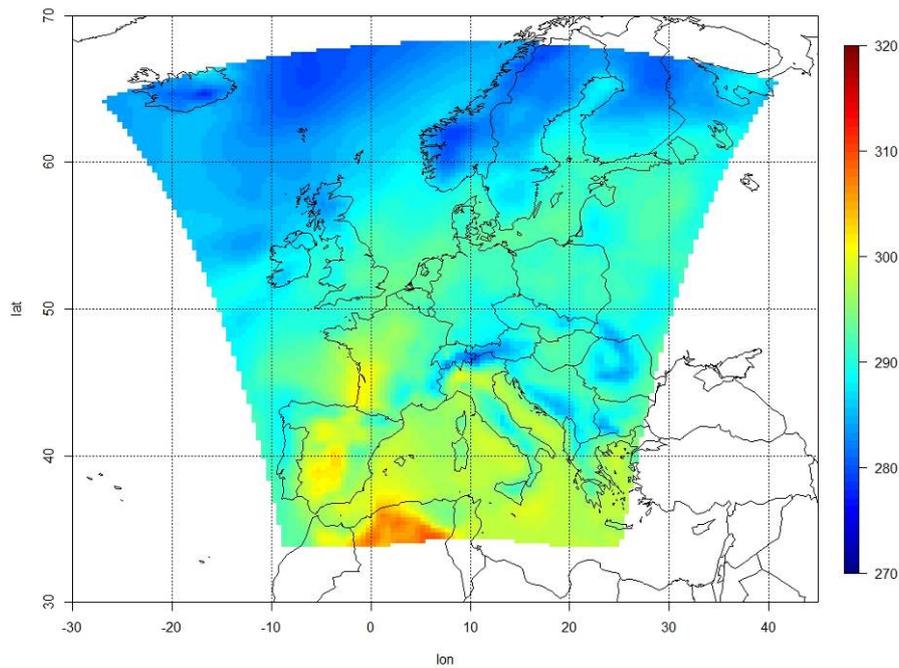
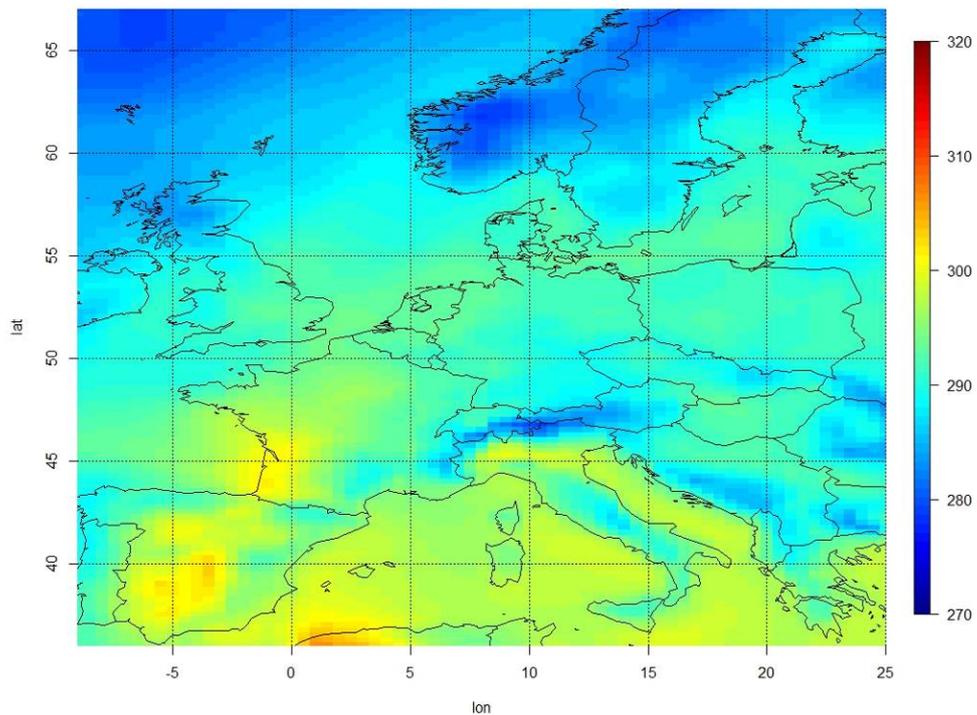


Abbildung 178: Unrotierte CCLM-Daten, Temperatur, resultierende Abbildung ohne missing values (z=4m, t=1).



Folgende Gitterdefinition wurde zur bilinearen Interpolation vom rotierten CCLM-Gitter auf das unrotierte RCG-Gitter verwendet:

```
#  
# gridID 26  
#
```

```
gridtype = lonlat
gridsize = 8820
xname    = lon
xlongname = longitude
xunits   = degrees
yname    = lat
ylongname = latitude
yunits   = degrees
xsize    = 70
ysize    = 126
xfirst   = -9.25
xinc     = 0.5
yfirst   = 35.875
yinc     = 0.25
```

9.5.11 Umwandlung in das binäre GrADS-Format

Die Konvertierung der zusammengestellten und berechneten Datenfelder für RCG werden in einem letzten Schritt vom NetCDF-Format in ein vom Programm GrADS (Doty 1995) lesbares binäres Datenformat überführt (*.dat). Dafür wurde ein GrADS-Script geschrieben (`nc_to_binary.gs`), welches die bereits remappte NetCDF-Datei aufruft und alle Felder über die `fwrite`-Option von GrADS in eine Datei schreibt. Das Konvertierungsscript ruft GrADS im Batchmodus auf, übergibt die erforderlichen Parameter an das GrADS-Script und erstellt danach die zugehörige `ctl`-Datei. Eine Cleanup-Funktion löscht nach jedem Tagesschritt alle temporären Dateien. Die zeitliche Auflösung der Daten beträgt 1 Stunde. Die Daten werden tageweise abgespeichert. Zur Anwendung der "template option", d.h. der Darstellung von file-übergreifenden Zeitreihen mit der GrADS-Darstellungssoftware können die Dateien nur nach dem Datum benannt werden und nicht nach dem Inhalt. Hier ein Beispiel der Benennung für das Jahr 2008:

```
01JAN2008.dat
.
31JAN2008.dat
01FEB2008.dat
.
29FEB2008.dat
01MAR2008.dat
.
31MAR2008.dat
01APR2008.dat
.
30APR2008.dat
01MAY2008.dat
.
31MAY2008.dat
01JUN2008.dat
.
30JUN2008.dat
01JUL2008.dat
.
31JUL2008.dat
01AUG2008.dat
.
31AUG2008.dat
01SEP2008.dat
.
30SEP2008.dat
01OCT2008.dat
.
31OCT2008.dat
01NOV2008.dat
.
31NOV2008.dat
01DEC2008.dat
.
31DEC2008.dat
```

Zu jedem Datensatz gehört ein sog. control file mit identischem Namen aber der Endung *.ctl. Dieser Kontrollfile dient zur Beschreibung der binären Daten. Datenfile und Kontrollfile müssen in demselben Verzeichnis abgelegt werden. Der Verzeichnisname dient zur inhaltlichen Identifizierung der Daten.

Insgesamt wurden folgende meteorologischen Daten erstellt und verwendet:

Europa-Gebiet und Deutschland-Gebiet:

- ▶ TRAMPER-Analysen (erstellt an der FU Berlin, nur für 2005 benötigt)
- ▶ CCLM angetrieben von ERA Reanalyse Daten (1975-2005)
- ▶ CCLM angetrieben von ECHAM, "historische" Daten (1975-2005)
- ▶ CCLM angetrieben von ECHAM, Szenario RCP 8.5 (2021–2050)

Für die einzelnen Datensätze wird folgende Kennung benutzt, die mit in den Kontrollfile aufgenommen wird und dann neben dem Verzeichnisnamen zur Identifizierung der Daten benutzt werden kann (vgl. auch Abbildung 1 und Tabelle 3: Bezeichnung und Zeitraum der CCLM Modellläufe.

- ▶ EU_TRAMPER (nur 2005)
- ▶ EU_CCLM_ERA (1975-2005)
- ▶ EU_CCLM_EHIST (1975-2005)
- ▶ EU_CCLM_RCP85 (2021–2050)

- ▶ DE_TRAMPER (nur 2005)
- ▶ DE_CCLM_ERA (1975-2005)
- ▶ DE_CCLM_EHIST (1975-2005)
- ▶ DE_CCLM_RCP85 (2021–2050)

Die folgende Datei zeigt als Beispiel den Kontrollfile für die meteorologischen Daten vom 1. Januar 2005 basierend auf den TRAMPER-Analysen für Europa.

```
DSET ^%d2%mc%y4.DAT
TITLE 01JAN2005.dat EU_TRAMPER
UNDEF -99999.9
OPTIONS TEMPLATE BIG_ENDIAN
XDEF 110 LINEAR -12.2500000000 0.5000000000
YDEF 145 LINEAR 33.8750000000 0.2500000000
ZDEF 14 LEVELS 4 20 50 100 200 400 800 1200 1600 2000 2500 3000 3500 4000
TDEF 24 LINEAR 00Z01JAN2005 1HR
VARS 14
UMWIND 14 99 [M/S]
VMWIND 14 99 [M/S]
MTEMP 14 99 [K]
MFEUCHT 14 99 [PPM]
MDICHTE 14 99 [KG/M**3]
NIED 0 99 [MM/H]
BWIND 0 99 [M/S]
BTEMP 0 99 [K]
BEDECKUN 0 99 [.1FR]
MIXHOE 0 99 [M]
SNOWCOV 0 99 [M]
SOILM_L1 0 99 [m**3/m**3]
SOILM_L2 0 99 [m**3/m**3]
SOILM_L3 0 99 [m**3/m**3]
ENDVARS
```

Die Kontrolldatei für die entsprechenden TRAMPER-Daten Deutschland hat folgenden Inhalt:

```
DSET ^%d2%mc%y4.DAT
TITLE 01JAN2005.dat DE_TRAMPER
UNDEF -99999.9
OPTIONS TEMPLATE BIG_ENDIAN
XDEF 128 LINEAR 2.8125000000 0.1250000000
YDEF 160 LINEAR 46.0312500000 0.0625000000
ZDEF 14 LEVELS 4 20 50 100 200 400 800 1200 1600 2000 2500 3000 3500 4000
```

```
TDEF      24 LINEAR 00Z01JAN2005 1HR
VARS      14
UMWIND    14 99 [M/S]
VMWIND    14 99 [M/S]
MTEMP     14 99 [K]
MFEUCHT   14 99 [PPM]
MDICHTE   14 99 [KG/M**3]
NIED      0 99 [MM/H]
BWIND     0 99 [M/S]
BTEMP     0 99 [K]
BEDECKUN  0 99 [ .1FR]
MIXHOE    0 99 [M]
SNOWCOV   0 99 [M]
SOILM_L1  0 99 [m**3/m**3]
SOILM_L2  0 99 [m**3/m**3]
SOILM_L3  0 99 [m**3/m**3]
ENDVARS
```

Die Kennung zur Identifizierung der Daten steht in der 2. Zeile nach dem Namen des zum Kontrollfile gehörenden binären Datensatzes ("TITLE"). Die Kontrolldateien aller Datensätze müssen diesem Aufbau gehorchen.

Die mit der Konvertierungsroutine erstellten meteorologischen Daten wurden geprüft und in einigen Details verbessert. Die resultierenden meteorologischen Felder wurden für einige Termine mit den entsprechenden Feldern der an der FU Berlin verwendeten TRAMPER-Analysen verglichen. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Ableitung der Felder (TRAMPER: Optimale Analyse der Beobachtungen, EU_CCLM_ERA: Modellrechnungen) kann die Übereinstimmung als gut bezeichnet werden.

9.6 PM10- und Ozon Messstationen in den Bundesländern und Deutschland

Auflistung der Stationsdichte und Stationsanzahl pro Stationstyp Hintergrund, Industrie und Verkehr für alle Bundesländer und Deutschland – PM10

Verteilung der PM10-Messstationen					Anteil Stationstyp [%]			Anzahl pro Stationstyp		
Kürzel	Bundesland	Stationsanzahl	Fläche km ²	Stationsdichte	Hintergrund	Industrie	Verkehr	Hintergrund	Industrie	Verkehr
BB	Brandenburg	53	29477	0.0018	57	13	30	30	7	16
BE	Berlin	19	891.8	0.0213	42	5	53	8	1	10
BW	Baden-Württemberg	121	35752	0.0034	45	5	50	55	6	60
BY	Bayern	72	70553	0.0010	53	4	43	38	3	31
HB	Bremen	13	419.4	0.0310	46	15	38	6	2	5
HE	Hessen	49	21115	0.0023	63	2	35	31	1	17
HH	Hamburg	20	755.2	0.0265	45	15	40	9	3	8
MV	Mecklenburg-Vorpommern	19	23174	0.0008	58	0	42	11	0	8
NI	Niedersachsen	36	47618	0.0008	61	8	31	22	3	11
NW	Nordrhein-Westfalen	118	34084	0.0035	31	25	43	37	30	51
RP	Rheinland-Pfalz	32	19847	0.0016	47	0	53	15	0	17
SH	Schleswig-Holstein	25	15763	0.0016	48	8	44	12	2	11
SL	Saarland	10	2570	0.0039	90	0	10	9	0	1
SN	Sachsen	35	18420	0.0019	66	0	34	23	0	12
ST	Sachsen-Anhalt	37	20446	0.0018	46	14	41	17	5	15
TH	Thüringen	54	16171	0.0033	50	13	37	27	7	20
D	Deutschland	713	357376	0.0020	49	10	41	350	70	293

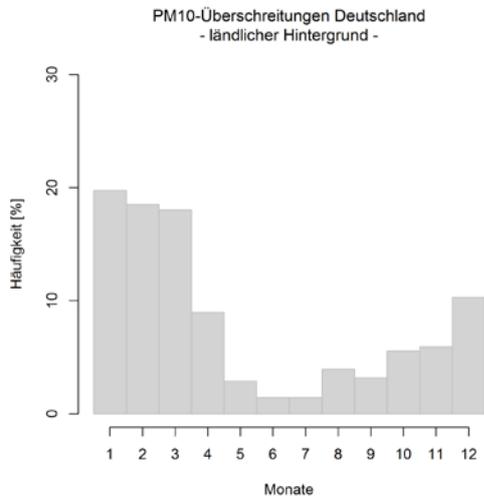
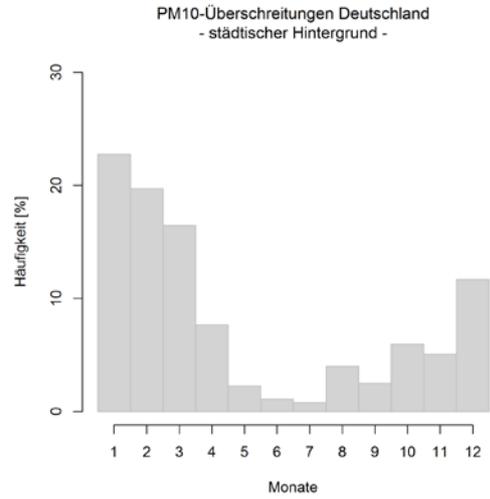
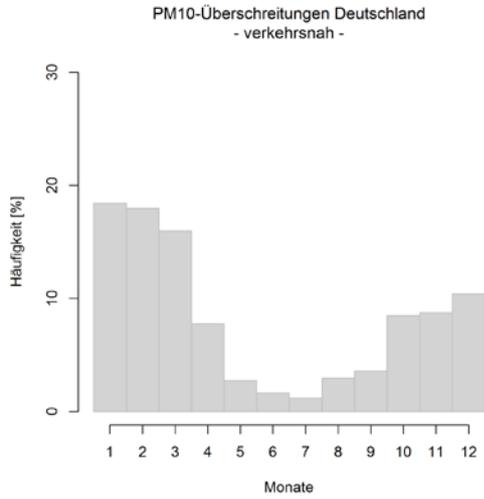
Auflistung der Stationsdichte und Stationsanzahl pro Stationstyp Hintergrund, Industrie und Verkehr für alle Bundesländer und Deutschland – Ozon

Verteilung der Ozon-Messstationen					Anteile pro Stationstyp [%]			Anzahl pro Stationstyp		
Kürzel	Bundesland	Stationsanzahl	Fläche km ²	Stationsdichte	Hintergrund	Industrie	Verkehr	Hintergrund	Industrie	Verkehr
BB	Brandenburg	47	29477	0.0016	81	9	11	38	4	5
BE	Berlin	14	891.8	0.0157	71	14	14	10	2	2
BW	Baden-Württemberg	96	35752	0.0027	77	6	17	74	6	16
BY	Bayern	65	70553	0.0009	78	3	18	51	2	12
HB	Bremen	6	419.4	0.0143	83	17	0	5	1	0
HE	Hessen	49	21115	0.0023	71	0	29	35	0	14
HH	Hamburg	30	755.2	0.0397	80	13	7	24	4	2
MV	Mecklenburg-Vorpommern	19	23174	0.0008	68	0	32	13	0	6
NI	Niedersachsen	26	47618	0.0005	92	8	0	24	2	0
NW	Nordrhein-Westfalen	63	34084	0.0018	73	19	8	46	12	5
RP	Rheinland-Pfalz	35	19847	0.0018	46	0	54	16	0	19
SH	Schleswig-Holstein	26	15763	0.0016	77	12	12	20	3	3
SL	Saarland	12	2570	0.0047	92	0	8	11	0	1
SN	Sachsen	43	18420	0.0023	74	0	26	32	0	11
ST	Sachsen-Anhalt	52	20446	0.0025	79	12	10	41	6	5
TH	Thüringen	37	16171	0.0023	73	16	11	27	6	4
D	Deutschland	620	357376	0.0017	75	8	17	467	48	105

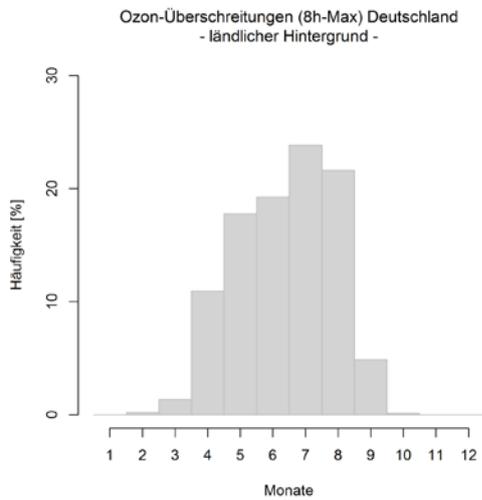
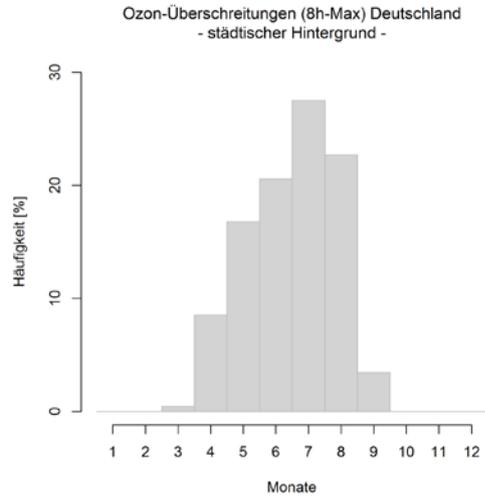
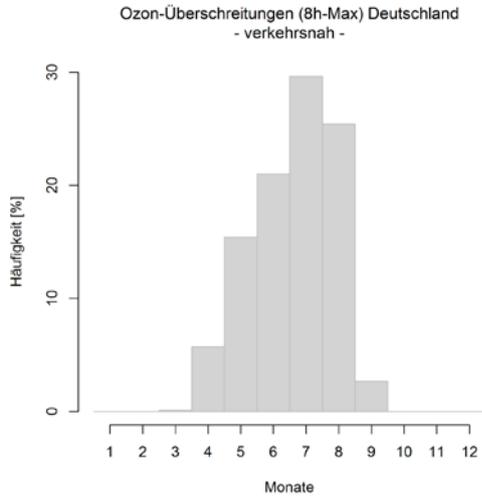
9.7 Objektive Wetterlagenklassen des DWD

Nr.	Kennung	Anströmrichtung	Zyklonalität in 950 hPa	Zyklonalität in 500 hPa	Feuchte
1	XXAAT	nicht definiert	antizyklonal	antizyklonal	trocken
2	NOAAT	Nordost	antizyklonal	antizyklonal	trocken
3	SOAAT	Südost	antizyklonal	antizyklonal	trocken
4	SWAAT	Südwest	antizyklonal	antizyklonal	trocken
5	NWAAT	Nordwest	antizyklonal	antizyklonal	trocken
6	XXAAF	nicht definiert	antizyklonal	antizyklonal	feucht
7	NOAAF	Nordost	antizyklonal	antizyklonal	feucht
8	SOAAF	Südost	antizyklonal	antizyklonal	feucht
9	SWAAF	Südwest	antizyklonal	antizyklonal	feucht
10	NWAAF	Nordwest	antizyklonal	antizyklonal	feucht
11	XXAZT	nicht definiert	antizyklonal	zyklonal	trocken
12	NOAZT	Nordost	antizyklonal	zyklonal	trocken
13	SOAZT	Südost	antizyklonal	zyklonal	trocken
14	SWAZT	Südwest	antizyklonal	zyklonal	trocken
15	NWAZT	Nordwest	antizyklonal	zyklonal	trocken
16	XXAZF	nicht definiert	antizyklonal	zyklonal	feucht
17	NOAZF	Nordost	antizyklonal	zyklonal	feucht
18	SOAZF	Südost	antizyklonal	zyklonal	feucht
19	SWAZF	Südwest	antizyklonal	zyklonal	feucht
20	NWAZF	Nordwest	antizyklonal	zyklonal	feucht
21	XXZAT	nicht definiert	zyklonal	antizyklonal	trocken
22	NOZAT	Nordost	zyklonal	antizyklonal	trocken
23	SOZAT	Südost	zyklonal	antizyklonal	trocken
24	SWZAT	Südwest	zyklonal	antizyklonal	trocken
25	NWZAT	Nordwest	zyklonal	antizyklonal	trocken
26	XXZAF	nicht definiert	zyklonal	antizyklonal	feucht
27	NOZAF	Nordost	zyklonal	antizyklonal	feucht
28	SOZAF	Südost	zyklonal	antizyklonal	feucht
29	SWZAF	Südwest	zyklonal	antizyklonal	feucht
30	NWZAF	Nordwest	zyklonal	antizyklonal	feucht
31	XXZZT	nicht definiert	zyklonal	zyklonal	trocken
32	NOZZT	Nordost	zyklonal	zyklonal	trocken
33	SOZZT	Südost	zyklonal	zyklonal	trocken
34	SWZZT	Südwest	zyklonal	zyklonal	trocken
35	NWZZT	Nordwest	zyklonal	zyklonal	trocken
36	XXZZF	nicht definiert	zyklonal	zyklonal	feucht
37	NOZZF	Nordost	zyklonal	zyklonal	feucht
38	SOZZF	Südost	zyklonal	zyklonal	feucht
39	SWZZF	Südwest	zyklonal	zyklonal	feucht
40	NWZZF	Nordwest	zyklonal	zyklonal	feucht

9.8 Jahrgang der PM10-Grenzwertüberschreitungen in Abhängigkeit des Stationsregimes

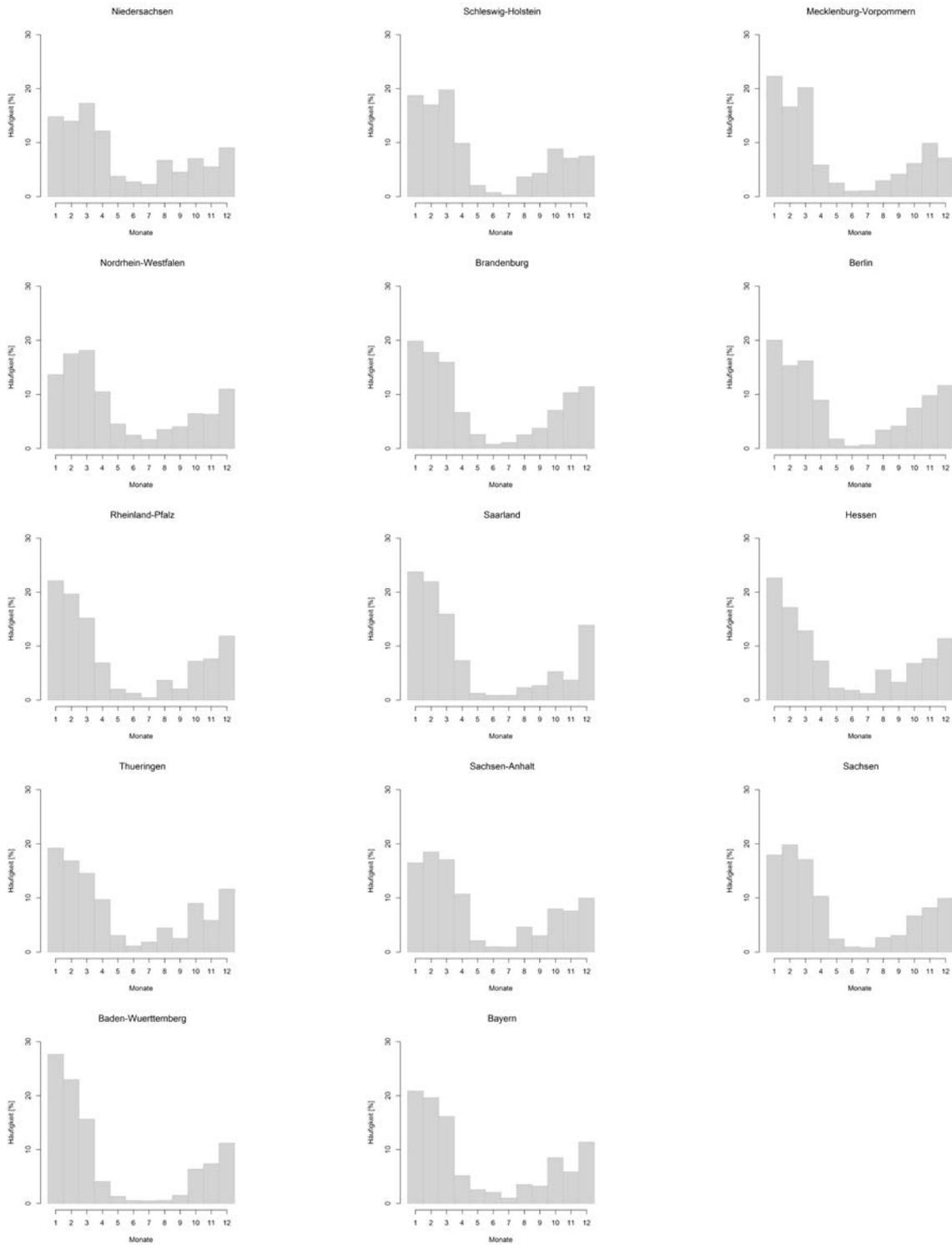


9.9 Jahrgang der Ozon-Zielwertüberschreitungen in Abhängigkeit des Stationsregimes



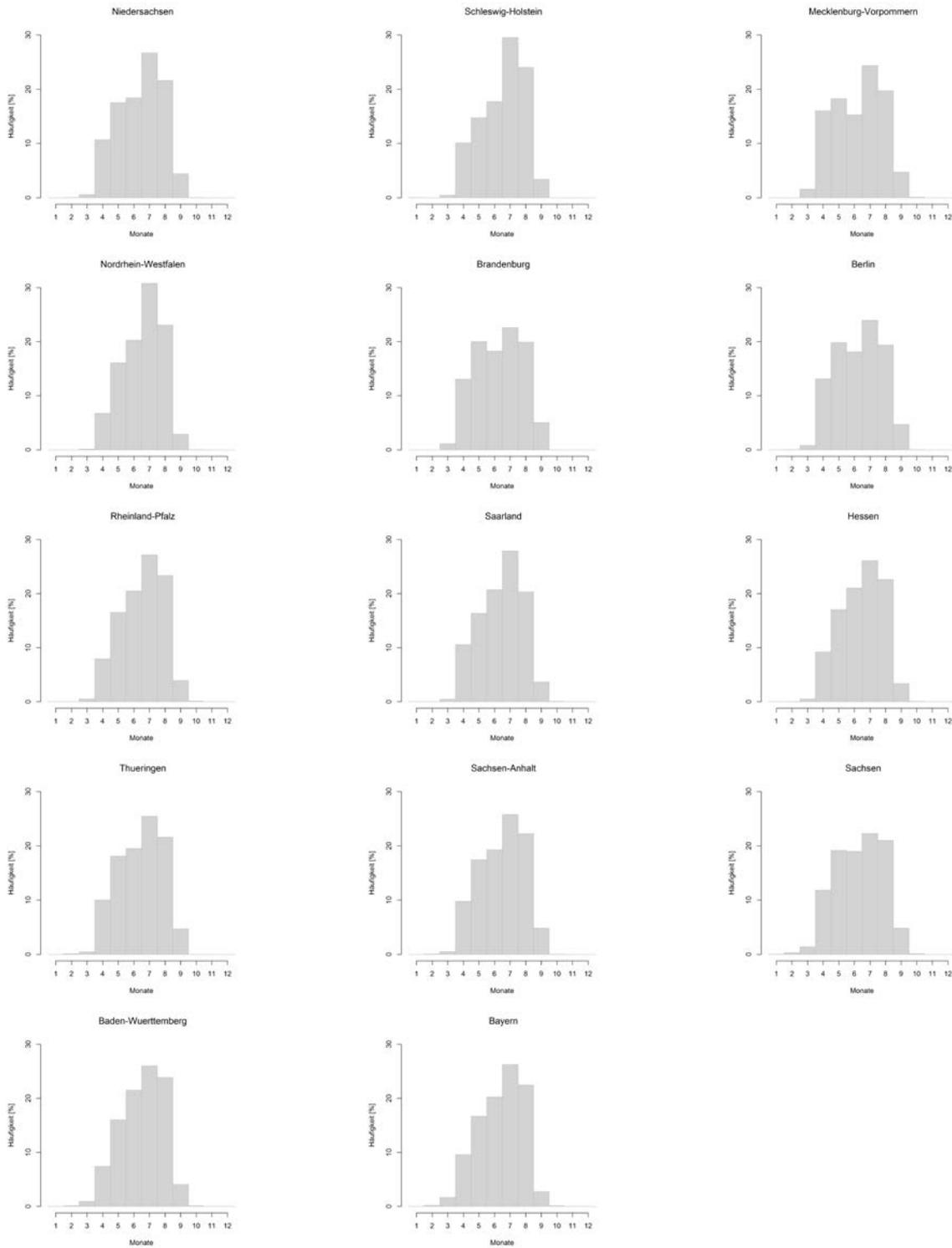
9.10 Jahrgang der PM10-Grenzwertüberschreitungen pro Bundesland

PM10-Grenzwert: Tagesmittelwert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$

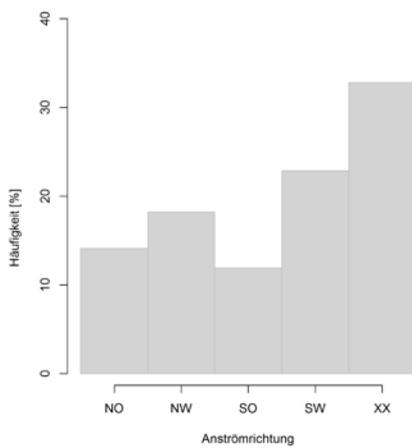
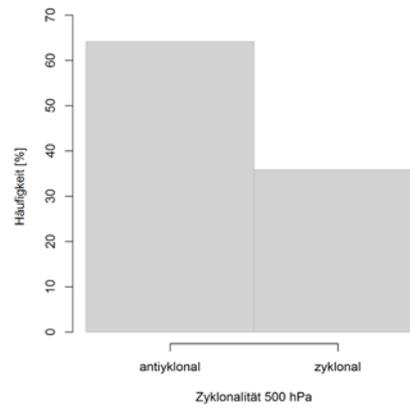
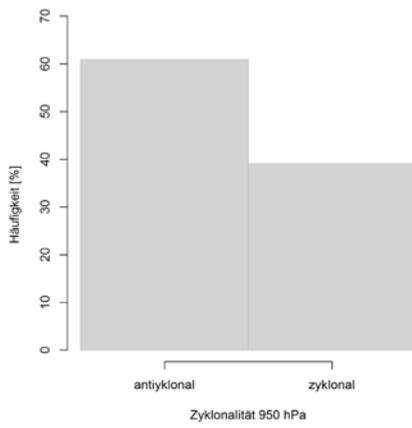
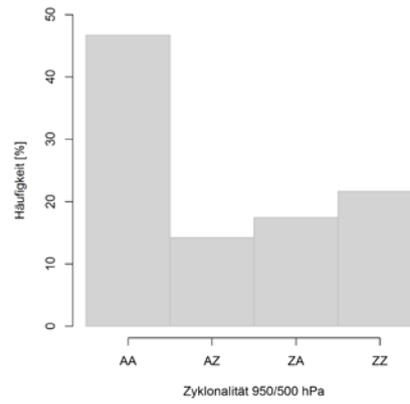
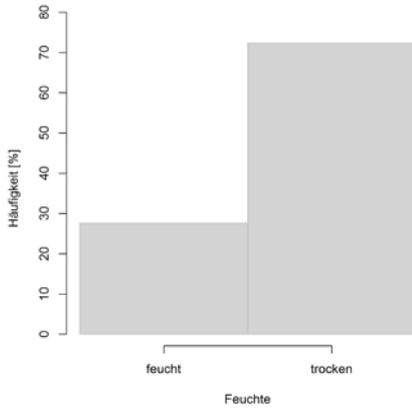


9.11 Jahrgang der Ozon-Zielwertüberschreitungen pro Bundesland

Ozon-Zielwert: Tagesmaximum des gleitenden 8h-Mittelwertes von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$



9.12 Auftretenshäufigkeit von Wetterlagenindezes an Tagen mit Überschreitung des Grenzwertes für Tagesmittelwerte der PM10-Konzentration (2000-2012, DJFM, Deutschland)



9.13 Auftretenshäufigkeit von Wetterlagenindizes an Tagen mit Überschreitung des Grenzwertes für das Maximum der 8h-Mittelwerte der O₃-konzentration (1990-2012, MJJA, Deutschland)

