

Forschungsbericht KLIMOPASS

Klimawandel und Luftqualität

Eine Vorstudie für Baden-Württemberg

von A. Ferrone, B. Vogel, C. Kottmeier

Gefördert mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM)

März 2012

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe
KONTAKT	Dr. Kai Höpker, Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel; Tel.:0721/56001465, Kai.Hoepker@lubw.bwl.de ;
AUFTRAGGEBER	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg - Forschungsprogramm Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden- Württemberg (KLIMOPASS)
BEARBEITUNG	Dr. Andrew Ferrone, Dr. Bernhard Vogel, Prof. Dr. Christoph Kottmeier Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Meteorologie und Klimaforschung Wolfgang-Gaede-Str. 1 76131 Karlsruhe
BEZUG	http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/ ID Umweltbeobachtung U43-W03-N10
STAND	März 2012, Internetausgabe Mai 2013

Nachdruck für kommerzielle Zwecke - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung der LUBW unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

ZUSAMMENFASSUNG	4
1 EINLEITUNG UND MOTIVATION	5
2 DIE HITZEWELLE IM JAHRE 2003	6
3 DAS MODELLSYSTEM COSMO-ART	7
3.1 Modellgebiet und Konfiguration	7
4 RESULTATE UND DISKUSSION	10
4.1 Darstellung der Superstoffe in COSMO-ART während des Sommers 2003	10
4.2 Einfluss der Aerosole auf die Temperatur in 2m Höhe	12
5 SCHLUSSFOLGERUNG	16
6 REFERENZEN	17

Zusammenfassung

Änderungen der Lufttemperatur, der Luftfeuchte, der Strahlung, des Windes, der Bewölkung und des Niederschlages beeinflussen in direkter Weise die räumlichen und zeitlichen Verteilungen der Konzentration von gas- und partikelförmigen Luftbeimengungen. Gleichzeitig stellen sich Rückkopplungsprozesse dadurch ein, dass die sich ändernde Aerosolbelastung sich auf den Strahlungshauhalt, die Wolkenbildung und die Niederschlagsverteilung auswirkt.

Ziel dieser Studie ist es das regionale Modellsystem COSMO-ART erstmals über einen Zeitraum von zwei Monaten über Europa anzuwenden. Im Gegensatz zu anderen regionalen Modellen berechnet COSMO-ART sowohl die meteorologischen Größen als auch die Luftqualität und ermöglicht es somit die gesamte Prozesskette beginnend mit den gasförmigen Emissionen bis hin zur Änderung des Atmosphärenzustandes durch Aerosolpartikel auf der regionalen Skala zu beschreiben. Somit ist es möglich erstmals die Bedeutung von Rückkopplungsmechanismen auf die Luftqualität und den Zustand der Atmosphäre für das betrachtete Gebiet zu quantifizieren.

Es wurden Simulationen für den Sommer 2003 durchgeführt. Das Jahr 2003 wurde gewählt, weil sich der Sommer durch eine extreme Hitzewelle ausgezeichnet hat. Die extreme Wetterlage stellt eine besondere Herausforderung für die Modellierung der Luftqualität dar. Zudem wird in Folge des anthropogenen Klimawandel die Zahl der Hitzewellen wahrscheinlich zunehmen und der Sommer 2003 gibt somit Hinweise auf mögliche wärmere Sommer vom Ende dieses Jahrhunderts.

Da dies die erste kontinuierliche Simulationen mit COSMO-ART über einen solch langen Zeitraum darstellt, kann man festhalten, dass das Modellsystem sowohl den längerfristigen Verlauf der Spurenstoffe wiedergibt aber auch mehr oder weniger stark ausgeprägt Schwankungen auf täglicher und wöchentlicher Basis darstellen kann. Das Modell liefert mit Beobachtungsdaten vergleichbare Daten für Feinstaubkonzentration über Europa, auch wenn die hohen Werte Anfang August nicht wiedergegeben werden konnten. Dies erklärt sich durch die nicht Berücksichtigung der vorliegenden Modellversion von einigen Prozesse.

Insbesondere wurde der Einfluss der Aerosole auf die Temperatur in 2m Höhe untersucht. Hier wurden Erniedrigungen der mittleren Temperatur für den gerechneten Zeitraum insbesondere im Mittelmeerraum bis über 1 K festgestellt welche auf die hohen Konzentrationen von Mineralstaub und Seesalz zurückzuführen sind. In Zentraleuropa und auch in Deutschland sind die Änderungen mit einer niedrigen statistischen Signifikanz versehen während im östlichen Teil des Modellgebietes einige Gebiete u.a. westlich vom Ballungsgebiet von Moskau mit einer signifikanten Erhöhung der Temperatur im Vergleich zum Referenzlauf simuliert werden. Diese könnte auf eine persistente Änderung der Dynamik der Atmosphäre zurückgeführt werden.

Über Baden-Württemberg stellen wir eine Erniedrigung der Temperatur bis zu 0.5 K fest. Die stärksten Erniedrigungen befinden sich am östlichen Rand des Rheingrabens wo auch die höchsten statistischen Signifikanzen in Baden-Württemberg auftreten.

Die gezeigten Arbeiten haben uns erlaubt ein erprobtes Werkzeug zur Verfügung zu stellen und wichtige Erfahrung mit längeren Simulationsperioden und deren Auswertung zu gewinnen, welche in einem Folgeprojekt die Änderung der Luftqualität für Klimaszenarien ermöglichen werden.

1 Einleitung und Motivation

Änderungen der Lufttemperatur, der Luftfeuchte, der Strahlung, des Windes, der Bewölkung und des Niederschlages über einen längeren Zeitraum werden unter dem Begriff Klimaänderung zusammengefasst. Sämtliche zuvor genannten Größen beeinflussen in direkter Weise die räumlichen und zeitlichen Verteilungen der Konzentration von gas- und partikelförmigen Luftbeimengungen.

Diese Einflüsse können wie folgt zusammengefasst werden (Raes et al, 2010):

Die Temperatur, der Niederschlag und die Strahlung beeinflussen direkt die Emissionen von verschiedenen chemischen Substanzen, sowie die Geschwindigkeit mit denen chemische Reaktionen ablaufen. Diese werden auch durch die Luftfeuchtigkeit beeinflusst, welche aber vor allem für das Partikelwachstum durch die Aufnahme von Wassermolekülen von großer Bedeutung sind. Dies zusammen mit der nassen Deposition in Wolken beeinflussen die die atmosphärische Verweilzeit der chemischen Substanzen.

Der Transport und die turbulente Verdünnung von chemischen Substanzen in der Atmosphäre werden direkt durch den Wind und die Stabilität der Atmosphäre beeinflusst.

Diese Aufstellung verdeutlicht, dass selbst dann, wenn die Menge der anthropogenen Emissionen sich in den nächsten Jahrzehnten nicht ändern würden, kommt es als Folge einer Klimaänderung zu einer Änderung der Luftqualität. Vogel (1995) konnte an Hand einer synthetischen Ozonreihe für Eggenstein unter Verwendung eines statistischen Verfahrens zeigen, dass es zwischen 1875 und 1994 zu einem Anstieg der des Jahresmittelwertes um 20% gekommen wäre, wenn man die Emissionsverhältnisse von 1990 voraussetzt.

Bisher wurden die direkten Einflüsse der Klimaparameter auf die Luftqualität in Modellanwendungen berücksichtigt. So fanden Forkel und Knoche (2007), dass sich bei Vorgabe konstanter anthropogener Emissionen die Anzahl der Tage mit Überschreitungen der Ozongrenzwerte im Zeitraum 2031-2039 bezogen auf den Zeitraum 1991 bis 2000 deutlich erhöhen wird. Wie sich diese Erhöhung auf die Aerosolkonzentrationen auswirkt, und wie ihrerseits diese Modifikationen die Temperatur und den Niederschlag modifizieren konnte nicht untersucht werden.

Was bisher nicht untersucht wurde sind die Rückkopplungsprozesse, die sich dadurch einstellen, dass die sich ändernde Aerosolbeladung auf den Strahlungshauhalt, die Wolkenbildung und die Niederschlagsverteilung. So verdichten sich Hinweise darauf, dass die Emissionsminderungsmaßnahmen im Falle von Aerosolpartikeln über Europa zu einem verstärktem Temperaturanstieg geführt haben.

In dieser Studie werden diese Rückkopplungseffekte das erste Mal über einen zweimonatigen Zeitraum simuliert und analysiert. Die Hitzewelle von 2003 In Europa wurde dafür ausgewählt da diese Rückkopplungseffekt nicht vernachlässigbar sind hat sich während der extremen Hitzewelle in 2003 durch das Auftreten sehr hoher Ozonkonzentrationen auch in Baden-Württemberg manifestiert.

2 Die Hitzewelle im Jahre 2003

In einem ersten Schritt wurden die Sommermonate von 2003 analysiert. Diese Periode ist von Bedeutung da sie sich durch eine extreme Hitzewelle mit langanhaltender Trockenheit ausgezeichnet hat, die durch eine persistente antizyklonale synoptische Wetterlage hervorgerufen wurde. Der ungewöhnlich klare Himmel über mehrere Monate führte zu einer Austrocknung der Böden, welche, durch den fehlenden latenten Wärmefluss, die Temperatur in weiten Teilen Mitteleuropas auf bis zu 40° C ansteigen ließen (Black et al., 2004).

Insbesondere zum dem Ende der Hitzewelle, Anfang August, haben mehrere Studien einen Anstieg der Todesfälle in der Höhe von 35 000 Personen in mehreren Ländern Europas aufgezeigt (z.B. Filleul et al., 2006; Stedman, 2004; Confalonieri et al., 2007 und darin gelistete Referenzen). Diese Fälle können auf direkte Einwirkungen der hohen Temperaturen auf den Körper (z.B. Atem-, Herz und Kreislaufprobleme) zurückgeführt werden.

Durch den klaren Himmel war die ganze Hitzewelle auch von einer starken photochemischen Aktivität geprägt, welche, zusammen mit der Stagnation der Luftmassen, zu ungewöhnlich hohen Ozon Konzentrationen führte (Vautard et al., 2005). Filleul et al., 2006 zeigten, dass in einigen französischen Städten, wie z.B. Straßburg drei Viertel der zusätzlichen Todesfälle auf die erhöhten Ozon Konzentrationen zurückzuführen waren, während es in Paris noch rund 7% waren.

Die Stagnation der Luftmassen kombiniert mit der hohen Anzahl von Feuern durch die hohen Temperaturen und die starke photochemische Aktivität, führte zu einer ungewöhnlich hohen Aerosolkonzentration im betroffenen Gebiet (Hodzic et al., 2006).

Dies zeigt die besondere Bedeutung der Luftqualität in diesem Fall und macht die Analyse mit dem Modellsystem COSMO-ART von großem Interesse. Die extreme Wetterlage stellt eine besondere Herausforderung für die Modellierung der Luftqualität dar (Vautard et al., 2005) und ist ein interessanter Test für das gekoppelte Modellsystem.

Im aktuellen Klima, muss die Hitzewelle von 2003 als Extremereignis angesehen werden (Schär and Jendritzky, 2004). In Folge des anthropogenen Klimawandel, wird die Zahl der Hitzewellen wahrscheinlich zunehmen (Meehl et al., 2007). Schär et al. (2004) haben gezeigt dass das 2003 Ereignis den Mittelwerten von regionalen Projektionen für das Ende des 21. Jahrhunderts unter dem A2 Szenario ähnelt. Somit gibt die Analyse dieser Periode Hinweise auf mögliche wärmere Sommer vom Ende dieses Jahrhunderts.

3 Das Modellsystem COSMO-ART

Klassische Luftqualitätsmodelle beschreiben zwar den Einfluss eines sich ändernden Klimas auf die Konzentrationen von gas- und partikelförmigen Luftbeimengungen, lassen aber die Auswirkungen der sich ändernden Konzentrationsverteilungen auf die atmosphärischen Zustandsgrößen außer Betracht. So wird beispielsweise eine Änderung der Rußkonzentration die Strahlungsflüsse modifizieren. Dadurch werden die Heizraten sowohl in der Atmosphäre als auch am Boden modifiziert, was wiederum modifizierte Ausbreitungsbedingungen zur Folge hat.

Mit COSMO-ART (Vogel et al., 2009) wurde, basierend auf dem operationellem numerischen Wettervorhersage Modells COSMO (Baldauf et al., 2011) des Deutschen Wetterdienstes (DWD), in den letzten Jahren am KIT ein Modellsystem entwickelt, welches es erstmals gestattet, sowohl den meteorologischen Zustand als auch die Atmosphärenchemie sowie die Dynamik der Aerosole auf der regionalen Skala in einem kohärenten Rahmen zu beschreiben. Nur die Meteorologie am Rand des simulierten Gebietes und die anthropogenen Emissionen (siehe Abschnitt 3.1 für genauere Informationen) werden vorgeschrieben und COSMO-ART ermöglicht es somit die gesamte Prozesskette beginnend mit den gasförmigen Emissionen bis hin zur Änderung des Atmosphärenzustandes durch Aerosolpartikel auf der regionalen Skala zu beschreiben.

Dieses Modellsystem erlaubt, die Wechselwirkung zwischen Aerosolpartikeln und dem Atmosphärenzustand zu beschreiben. Damit lassen sich nun erstmals die Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Luftqualität auch unter Berücksichtigung der Wechselwirkungsprozesse zwischen Aerosol und Atmosphärenzustand simulieren. Dieses Modellsystem wird für die hier beschriebenen Arbeiten eingesetzt.

3.1 MODELLGEBIET UND KONFIGURATION

Das Modellgebiet (Abb. 1) umfasst nahezu ganz Europa inklusive der gesamten Ostsee, dem Mittelmeer und dem Schwarzen Meer mit 332 x 328 Gitterpunkten bei einer Maschenweite von 0.125° (ungefähr 14 km). Vom Boden bis in etwa 24 km Höhe wird die Atmosphäre mit 40 Schichten aufgelöst. Die Variablen des Modells werden also bei jedem Zeitschritt von 40 s auf 4,4 Millionen Gitterpunkte berechnet.

Eine Besonderheit des regionalen Modells ist das im Raum begrenzte Gebiet das simuliert wird und das Modell benötigt Informationen zum globalen Zustand der Atmosphäre an den Rändern des Gebietes. In diesem Fall wurden die sogenannten Reanalysen (ERA-interim; Dee et al., 2011) des *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) benutzt, welche das beobachtete Wettergeschehen so genau wie möglich auf einem regelmäßigem Gitter (spektrales T255 Gitter mit einer Maschenweite von ungefähr 60km) darstellen. Diese Information wird dem regionalen Modell alle 6 Stunden zugeführt und mit Hilfe des Ansatzes von Davies (1976) auf das regionale Modellgitter angepasst.

Da die Temperatur in Bodennähe durch den latenten Wärmefluss stark mit der Bodenfeuchte gekoppelt ist, muss diese korrekt dargestellt werden um einen korrekten Lauf zu gewährleisten. Wie in Kapitel 2 beschrieben war der Boden besonders während der Hitzewelle stark ausgetrocknet. Da dieser Parameter aber nur sehr sporadisch und ungenau bekannt ist, wird in der Klimaversion des COSMO Modell (COSMO model in CLimate Mode, CCLM; Rockel et al., 2007) das Modell während der ersten Phase (typisch zwischen 1 und

5 Jahren) des Laufes einschwingen gelassen, damit die Bodenfeuchte sich in einem plausiblen Wert erreichen kann.

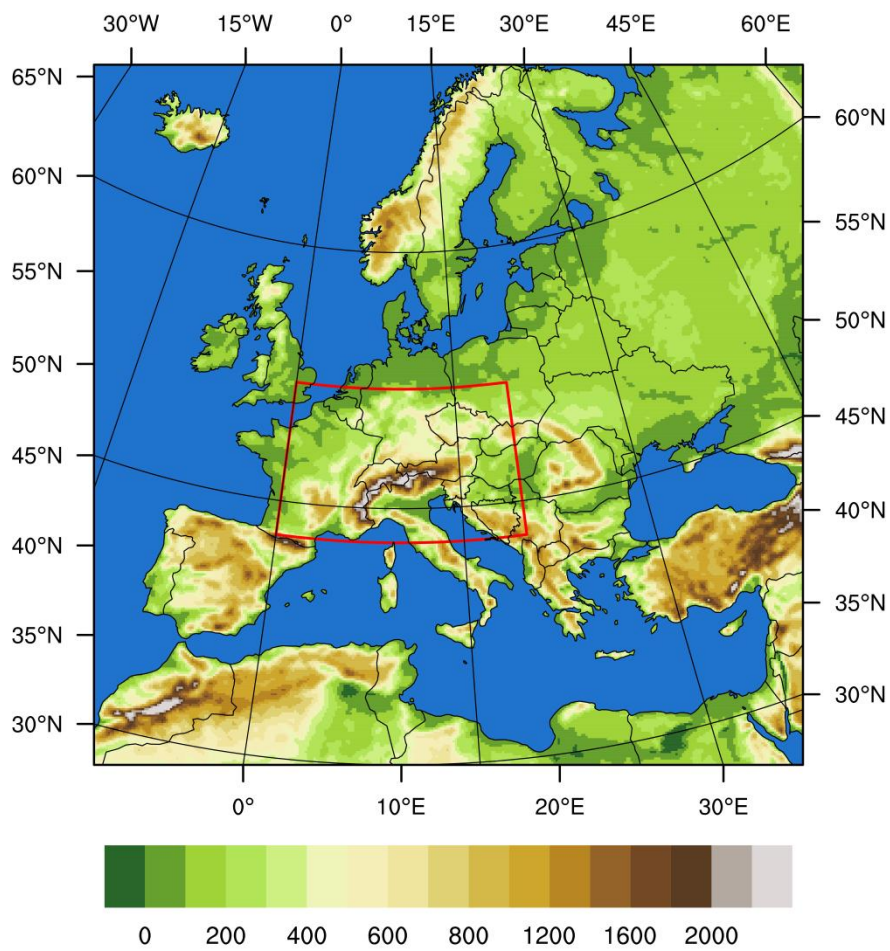
In dem vorliegenden Fall wurde die Hitzewelle korrekt dargestellt (siehe Kapitel 4) wenn das Modell am 1. Januar 2002 initialisiert wurde und bis in den Sommer 2003 durchgehend laufen gelassen wurde. Diese Einschwingphase wurde allerdings nur für das COSMO Modell durchgeführt, also ohne prognostische Berechnung von Aerosolen und Chemie in der Atmosphäre, da diese Rechnung zu viel Rechenzeit gekostet hätten. Vom 15. Juni 2003 an wurde der Lauf mit dem COSMO Modell weiter fortgesetzt. Dieser Lauf wird im Folgenden als Referenzlauf bezeichnet. Mit den identischen Startbedingungen für die meteorologischen Variablen wurde am 15. Juni auch ein Lauf mit COSMO-ART gestartet d.h Aerosole und deren Wechselwirkungen mit der Atmosphäre wurden berücksichtigt.

Zusätzlich zu den meteorologische Variablen wurden beim COSMO-ART Lauf 60 chemische Substanzen prognostisch gerechnet, welche über den sogenannten RADMKa (Regional Acid Deposition Model Version Karlsruhe; Vogel et al., 2009) chemischen Mechanismus untereinander und mit den Aerosolen gekoppelt sind. Die Aerosole und ihre Verteilung werden durch 111 zusätzliche Tracer dargestellt, welche in sieben, sich überlappenden Moden im Modell zusammenfasst werden. Die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Moden werden mit MADEsoot (Modal Aerosol Dynamics Model for Europe extended by Soot; Riemer et al., 2003) berechnet.

Die Aerosolmoden beinhalten u.a. einen Mode für Ruß und zwei mit Ruß gemischten Moden, sowie jeweils 3 Moden für Seesalz und Mineralstaub. Die natürlichen Emissionen von Spurenstoffen werden im Modell parametrisiert (Vogel et al., 2009; Lundgren, 2010; Stanelle et al., 2010) und sind abhängig von den meteorologischen Variablen. Die anthropogenen Emission wurden, basierend auf den Daten die von TNO(Niederlanden) im Rahmen des MACC(Monitoring Atmospheric Composition and Climate; Kuenen et al., 2011; Denier van der Gon et al., 2010) Projekt entwickelt wurden, vorgeschrieben und beinhalten einen wöchentlichen Zyklus.

Der Zustand der einzelnen Aerosolmoden (inkl. Seesalz und Mineralstaub) fließt auch in die Berechnung der lang- und kurzwelligem Strahlung im GRAALS (General Radiative Algorithm Adapted to Linear-type Solutions) Strahlungsschema (Ritter and Geleyn, 1992) ein. Auf diese Weise wird eine Wechselwirkung zwischen den Aerosolen und den meteorologischen Variablen im Modell realisiert. Ein expliziter Einfluss der Aerosole auf die Wolken (wie bei Bangert et al., 2011) wurde in diesem Fall nicht angewandt. Allerdings können Wechselwirkungen zwischen den atmosphärischen Parametern und den Aerosolen auch die Wolkenparameter beeinflussen. Ein solcher Effekt wird oft als indirekter Effekt bezeichnet (Forster et al., 2007).

Die Spurenstoffe werden mit vorgegebenen Werten initialisiert und werden an den Rändern des Modells auf null relaxiert. Spurenstoffe die aus dem Modellgebiet heraus advehiert werden, können also nicht zurückfließen auch wenn die atmosphärische Zirkulation dies erlauben würde, und es werden keine Spurenstoffe in das Modellgebiet hinein advehiert.



Modelltopographie in m

Abbildung 1: Topographie des Modellgebietes mit einer Maschenweite von 14 x 14 km. Die rot umrandete Fläche zeigt das Gebiet auf welches sich die Modellauswertung konzentrieren wird.

4 Resultate und Diskussion

Wie in Kapitel 3 beschrieben, wurden 2 Läufe für den Sommer 2003 gemacht. Ein Lauf bei dem das COSMO Modell ohne prognostische Variablen für Chemie und Aerosole laufen gelassen wurde und ein zweiter Lauf bei dem das COSMO-ART Modellsystem benutzt wurde. Zuerst wird der Verlauf von einigen relevanten anthropogenen und natürlichen Spurenstoffen im Modell dargestellt und ein Vergleich der simulierten und beobachteten Feinstaubbelastung gemacht. Anschließend folgt eine Analyse des Einflusses der Aerosole im Modell auf die Temperatur über das gesamte Modellgebiet sowie einen Ausschnitt über Baden-Württemberg dargestellt und diskutiert.

4.1 DARSTELLUNG DER SPURENSTOFFE IN COSMO-ART WÄHREND DES SOMMERS 2003

Abb. 2 zeigt den Verlauf des bodennahen Volumenanteils einiger relevanten chemischen Substanzen (Schwefeldioxid und Ozon) und der Massenkonzentrationen der Ionen Sulfat, Nitrat und Ammonium, sowie von Ruß, Seesalz und Mineralstaub, wie sie vom Modellsystem berechnet werden. Die folgende Analyse wird sich auf das in Rot eingerahmte Gebiet in Abb. 1 fokussieren, welches als Auswertungsgebiet bezeichnet wird.

Da bisher noch keine kontinuierliche Simulationen mit COSMO-ART über einen solch langen Zeitraum durchgeführt wurden, kann man festhalten, dass das Modellsystem einen längerfristigen Verlauf der Spurenstoffe wiedergibt, der von mehreren kurzfristigen Variationen überlagert wird. Insbesondere sticht bei allen Verläufen ein mehr oder weniger ausgeprägter Tageszyklus heraus.

Insbesondere beim Schwefeldioxid und beim Ozon kann man eine Korrelation des längerfristigen Verlaufs mit den Temperaturen feststellen (vgl. Abb. 4). Dies kann sich einerseits durch eine erhöhte Photolyserate in diesen Perioden erklären, aber auch durch eine Stagnation der Luftmassen über dem betrachteten Gebiet führt sowohl zu einem Temperaturanstieg als auch zu einem Anstieg der chemischen Substanzen. Zusätzlich führen die höheren Temperaturen zu einem Anstieg der biogenen Kohlenwasserstoffe und zu einer Beschleunigung der chemischen Umwandlungsvorgänge.

Insbesondere bei den Aerosolen kann man einen klaren Einfluss der synoptischen Situation auf die Konzentrationen erkennen. Besonders der Einfluss von einer Luftmasse vom Atlantik her in der Nacht vom 1. auf den 2. Juli sticht klar hervor. Die Konzentrationen aller Spurenelemente nehmen drastisch ab, da die Luftmasse relativ sauber ist, sich allerdings mit Seesalz anreichern konnte, wodurch dieses in das Auswertungsgebiet hinein advehiert wird.

Auch stechen zwei Perioden mit hohen Mineralstaubkonzentrationen am Boden während des simulierten Zeitraums hervor. Beide mal wurde der Staub im westlichen Teil von Nordafrika aufgewirbelt und über Spanien von Westen her ins Auswertungsgebiet transportiert.

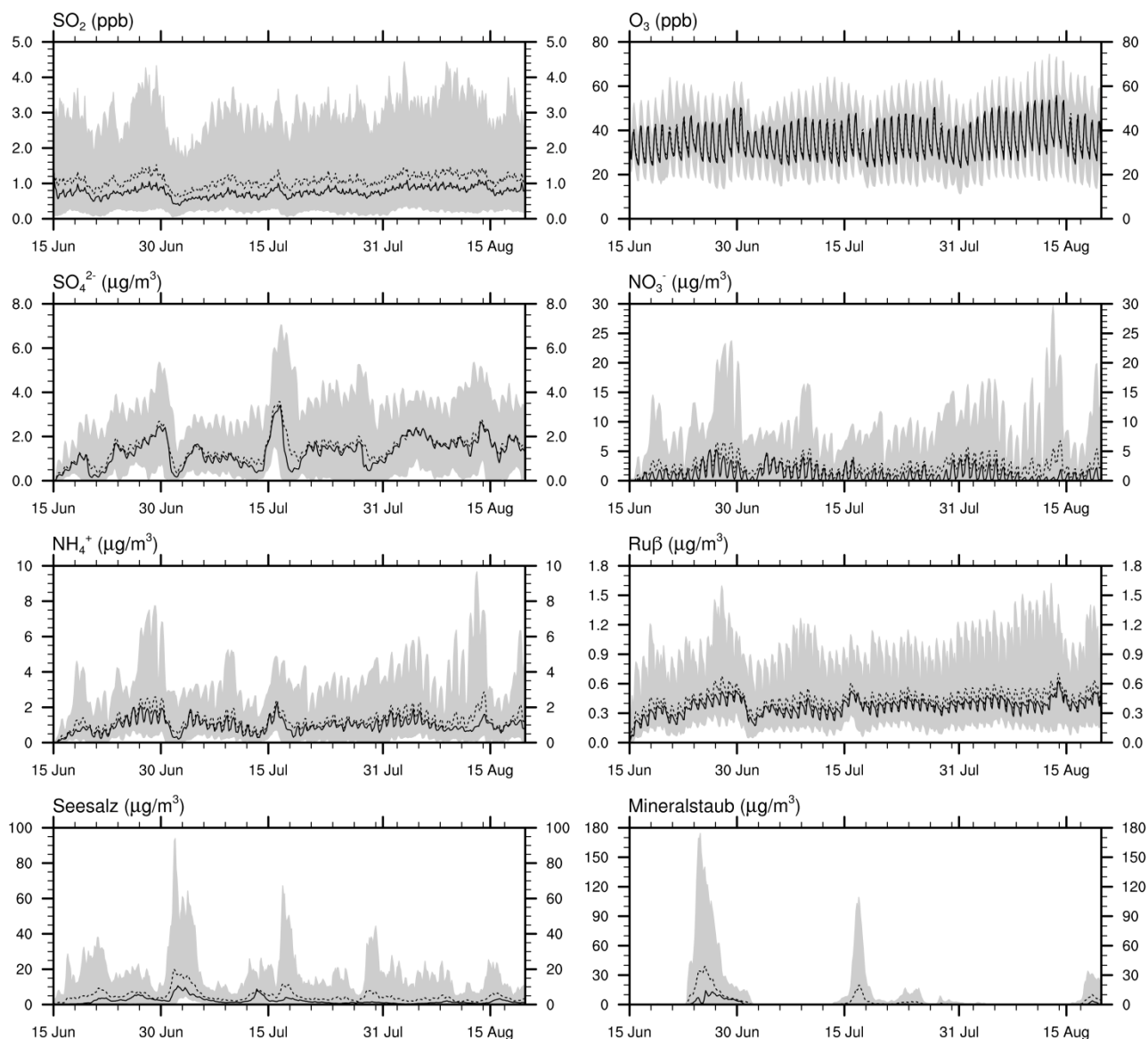


Abbildung 2: Verlauf der simulierten bodennahen Volumenanteilen von Schwefeldioxid (SO₂), Ozon (O₃) und der Konzentrationen von Sulfat (SO₄²⁻), Nitrat (NO₃⁻) und Ammonium (NH₄⁺) Ionen, sowie von Ruß, Seesalz und Mineralstaub vom 15. Juni bis zum 20. August 2003. Die durchgezogene schwarze Linie stellt die medianene Werte, die gestrichelte graue Linie den Mittelwert und die graue Fläche liegt zwischen dem 5. und dem 95. Perzentil, der Werte in dem in Rot eingerahmten Gebiet in Abb. 1.

Abbildung 3 zeigt den Verlauf der PM₁₀¹ Konzentration wie sie von Bodenstationen über Europa verteilt für jede 3. Stunde gemessen wurde über den hier analysierten Zeitraum. Die Daten stammen aus dem AIRBASE Datensatz (European AIR quality dataBASE, <http://airbase.eionet.europa.eu/>) und nur Stationen die im Rahmen vom EMEP Programm (European Monitoring and Evaluation Programme ,EMEP, <http://www.emep.int>) einer speziellen Qualitätskontrolle unterzogen wurden, wurden hier dargestellt, was in diesem Fall zwischen 17 und 25 Station entspricht (da nicht an jedem Zeitpunkt Daten von allen Stationen zu Verfügung stehen)

¹ Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 1 µm werden vollständig einbezogen, bei größeren Partikeln wird eine Trennfunktion angewendet welche mit zunehmender Partikelgröße abnimmt und bei ca. 15 µm schließlich 0 erreicht. Die Bezeichnung PM₁₀ leitet sich daher ab dass bei ca. 10 µm genau die Hälfte der Partikeln in die Gewichtung eingehen.

Da die der Initialisierung des Modellsystems alle Aerosolgrößen auf null gesetzt wurden dauert es 4-5 Tage bis die PM10 Konzentration eine vergleichbare Größe wie die Beobachtungen erreichen. Danach ist sowohl der Verlauf als auch die Amplitude des Tagesgangs durchaus mit den Beobachtungen vergleichbar. Allerdings kann der Anstieg der Konzentrationen während der Periode mit den höchsten Temperaturen von Anfang bis Mitte August nicht mit dem Modell reproduziert werden. Dies kann durch eine Vernachlässigung der Emissionen durch Wildfeuer und eine weniger detaillierte Darstellung der sekundär organischen Aerosole (SOA) in der verwendeten Modellversion erklärt werden. Beide spielten in dieser Periode eine wichtige Rolle (Hodzic et al., 2006).

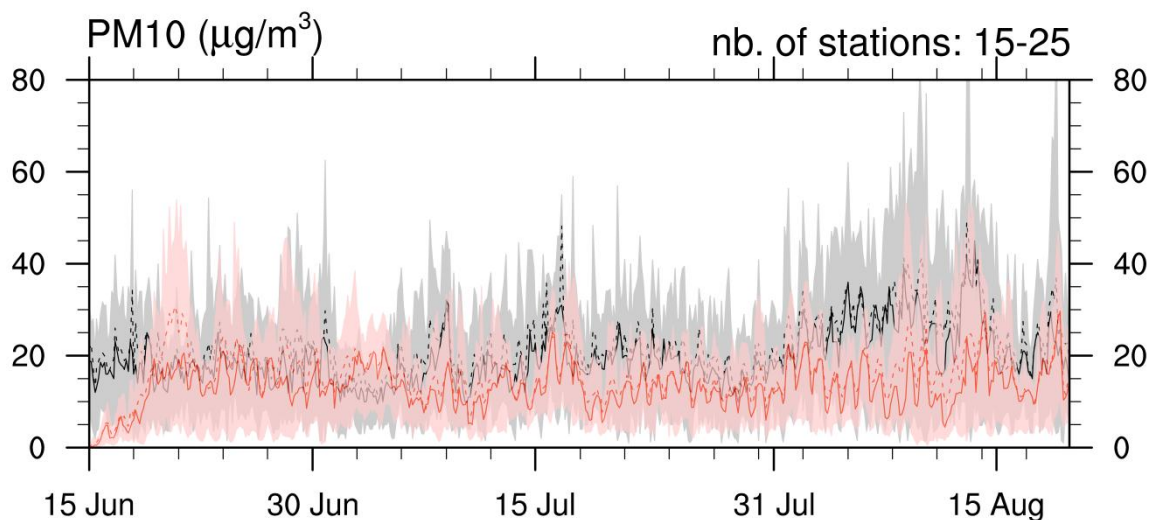


Abbildung 3: Verlauf der PM10 Konzentrationen vom 15. Juni bis zum 20. August 2003, gemessen an EMEP Station in der AIRBASE Datenbank (in schwarz/grau) und an den äquivalenten räumlichen und zeitlichen Gitterpunkten in der untersten Modellschicht von COSMO-ART (in rot/rosa). Die durchgezogenen Linien stellen die medianen Werte, die gestrichelten Linien den Mittelwert und die graue/rosa Fläche liegt zwischen dem 5. und dem 95. Perzentil, der berücksichtigten Werte.

4.2 EINFLUSS DER AEROSOLE AUF DIE TEMPERATUR IN 2M HÖHE

In Abb. 4 wird der Verlauf der Tagesmitteltemperatur in 2m Höhe gemittelt über das Auswertungsgebiet dargestellt. Als Beobachtungen werden die sogenannten E-OBS Daten benutzt (Haylock et al., 2008). Die Tagesmittelwerte von COSMO und von COSMO-ART wurden auf das 0.25° x 0.25° Gitter der Beobachtungsdaten interpoliert und mit diesen verglichen, wobei Gitterzellen über dem Meer nicht berücksichtigt wurden.

Wir können feststellen dass das COSMO Modell den Verlauf des Mittelwertes der Temperatur in 2m Höhe in dem ausgewerteten Gebiet korrekt wiedergibt und somit den Verlauf der Hitzewelle in 2003 widerspiegelt. Allerdings wird für den ausgewerteten Zeitraum die Temperatur vom Modell unterschätzt. Da die Meteorologie des Modells vom 1. Januar 2002 im Modellgebiet frei läuft, und nur von den Rändern angetrieben wird kann man allerdings durch die chaotische Natur des Klimasystems keine so genaue Wiedergabe erwarten, als wenn das COSMO Modell im Wettervorhersage oder Analyse Modus, mit regelmäßiger Datenassimilation im Modellgebiet, betrieben wird.

Der Vergleich von COSMO-ART und COSMO zeigt dass die mittlere Temperatur in COSMO-ART fast über den gesamten Zeitraum leicht tiefer ist als im COSMO Modell. Da die meistens Aerosole vor allem die kurzwellige einkommende Sonnenstrahlung streuen und wenig Strahlung absorbieren (mit Ausnahme des

Ruß) waren diese tieferen Temperaturen zu erwarten. Insbesondere stechen die Perioden zwischen dem 23. und dem 27. Juni, sowie zwischen dem 2. und 10. Juli hervor, in denen die stärksten negativen Abweichungen bis zu 2 K in der Tagesmitteltemperatur in 2m Höhe über das Referenzgebiet gemittelt auftreten. Die erste Periode wird durch das erste Mineralstaub Ereignis, das in Sektion 4.1 beschrieben wurde bestimmt, während in der 2. Periode die Konzentrationen vom Seesalz, durch den Einfluss einer Luftmasse vom Nordatlantik, sehr hoch sind (siehe Sektion 4.1).

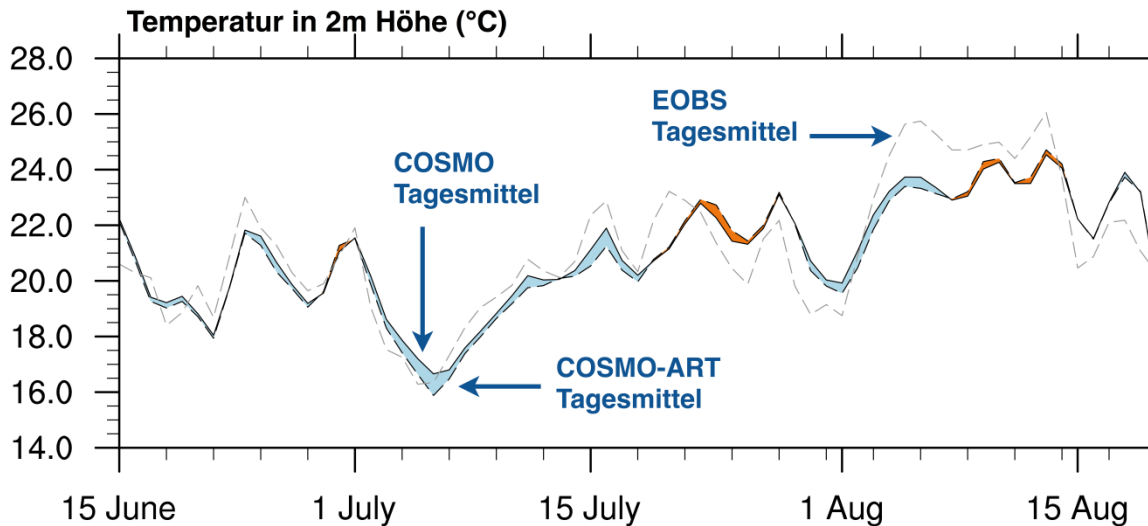


Abbildung 4: Verlauf der Tagesmitteltemperatur in 2m Höhe vom 15. Juni bis zum 20. August 2003, gemittelt über das in Rot eingerahmte Gebiet in Abb. 1, wie sie beobachtet wurde (aus dem EOBS Datensatz, grau gestrichelt) und wie sie vom COSMO (schwarz durchgezogen) und COSMO-ART (schwarz gestrichelt) gerechnet wurde. Wenn die mittleren Temperaturen des COSMO-ART tiefer sind als die des COSMO wird der Unterschied blau eingefärbt, während er orange eingefärbt wird in Perioden wo die Temperaturen im COSMO-ART höher sind als im COSMO Modell.

Die Perioden zwischen dem 27. Juni und dem 2. Juli und vom 9. bis zum 14. August, sowie eine kurze Periode um den 11. Juli fallen auch auf, da hier das Mittel der Temperaturen in COSMO-ART höher sind als im COSMO Modell. Dieses etwas unerwartete Resultat kann durch 2 Effekte erklärt werden. Einerseits kann eine Wechselwirkung mit den Wolken (indirekter Effekt, siehe Kapitel 3) einen niedrigeren Wolkenbedeckungsgrad in COSMO-ART hervorrufen, welches zu höheren Temperaturen führen könnte. Andererseits könnte die Verteilung der absorbierenden Ruß Aerosole diesen Effekt hervorrufen.

Die Verteilung dieser Differenzen ist allerdings nicht gleichmäßig über das gesamte Modellgebiet verteilt, wie in Abb.4 gezeigt, in der die Verteilung der durchschnittlichen Temperaturdifferenz über den simulierten Zeitraum zwischen dem Lauf mit COSMO-ART und dem Lauf mit COSMO dargestellt ist. Nur Gitterpunkte an denen der Unterschied zwischen beiden Läufen signifikant auf dem *wahrscheinlichen*² Niveau ist werden eingefärbt, während Punkte wo die Läufe *sehr wahrscheinlich* unterschiedlich sind werden durch die gepunkteten Flächen gekennzeichnet. Die statistische Signifikanz wird mit einem statistischen Student t-test mit äquivalenten Freiheitsgraden nach Zwiers und von Storch (1995) ermittelt.

Die stärksten negativen Differenzen, teils deutlich über 1 K in diesem Monatsmittel und mit hoher statistischer Signifikanz treten über Nordafrika und ein wenig abgeschwächt über den gesamten Mittelmeerraum

² Für die Einschätzung der Unsicherheit mittels statistischer Analyse werden folgende Wahrscheinlichkeitsbereiche nach IPCC(2007), verwendet: sehr wahrscheinlich >90%; wahrscheinlich >66%.

auf. Diese Unterschiede können sich durch die starken Konzentrationen von Mineralstaub in Kombination mit Seesalz in diesen Gebieten erklären.

In Zentraleuropa sind die Unterschiede nicht so stark ausgeprägt und man erkennt eine Erniedrigung der Temperaturen im südlichen Teil und wenig Änderungen im nördlichen Teil. Im östlichen Teil des Modellgebietes erkennt man Gebiete mit einer signifikanten Erhöhung der Temperatur, u.a. etwas westlich vom Ballungsgebiet von Moskau. Die Emissionen dieses Ballungsgebietes führen zu erhöhten Rußkonzentration, allerdings ist die Korrelation mit den Erhöhungen in der Temperatur nicht hoch genug, dass man die Absorption von den Ruß Aerosolen als einzige Quelle dieser Erhöhungen betrachten kann. Wahrscheinlicher ist eine persistente Änderung der Dynamik der Atmosphäre durch die Aerosole welche zu diesen Änderungen führt.

Über den Ozeanen gibt es keine Signifikanten Änderungen, da die Temperaturen der Seeoberfläche vom globalen Modell vorgegeben werden, und somit jede Änderung die durch den hohen Seesalzgehalt der Atmosphäre hervorgerufen werden könnte nicht signifikant ist.

Abbildung 6 zeigt einen Ausschnitt des Modellgebietes über Baden-Württemberg der Verteilung der durchschnittlichen Temperaturdifferenz in 2m Höhe. Man erkennt, dass die Temperatur quasi über das gesamte gezeigte Gebiet um bis zu 0.5 K erniedrigt wird, die statistische Signifikanz aber unter dem *wahrscheinlichen* Niveau liegt. Die stärkste Erniedrigung befindet sich am östlichen Rand des Rheingrabens nördlich und südlich von Freiburg im Breisgau, wo auch die höchsten statistischen Signifikanzen in Baden-Württemberg auftreten.

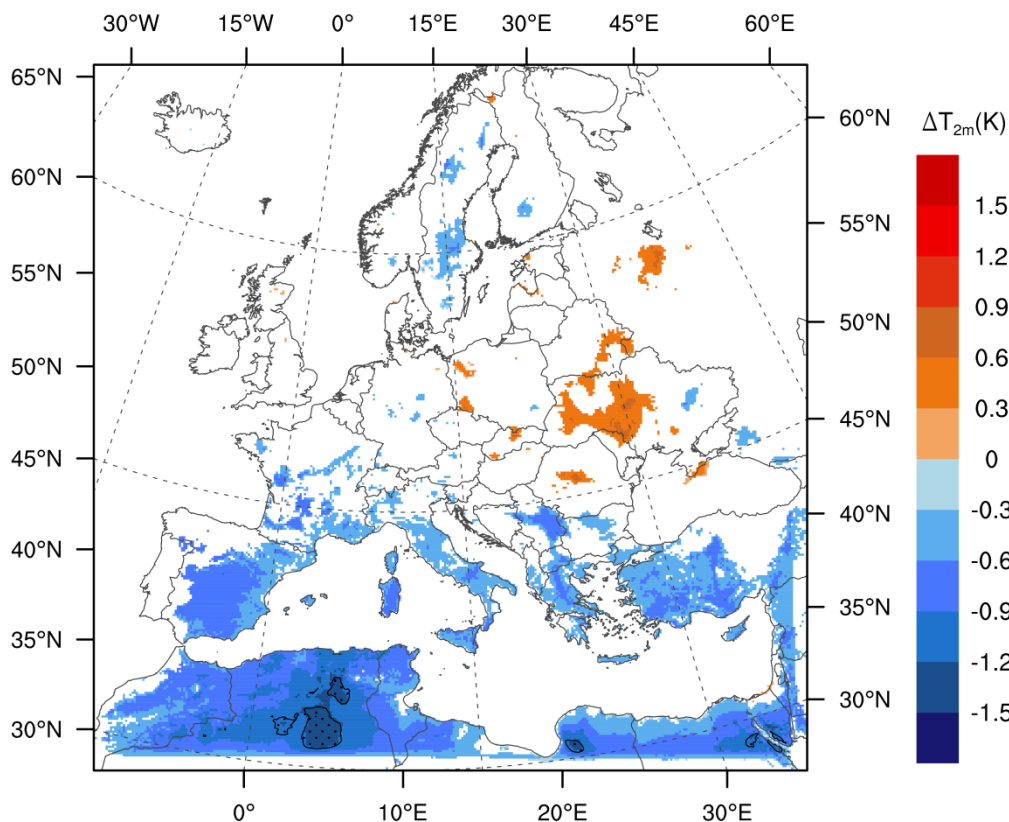


Abbildung 5: Verteilung der durchschnittlichen Temperaturdifferenz in 2m Höhe über den Zeitraum vom 15. Juni bis zum 20. August 2003 zwischen dem Lauf mit COSMO-ART und dem Lauf mit COSMO. Die weiße Fläche zeigt Gitterpunkte an denen der Unterschied zwischen beiden Läufen nicht signifikant auf dem *wahrscheinlichen* Niveau ist, während Gitterpunkte wo die Läufe *sehr wahrscheinlich* unterschiedlich durch die gepunkteten Flächen gekennzeichnet sind.

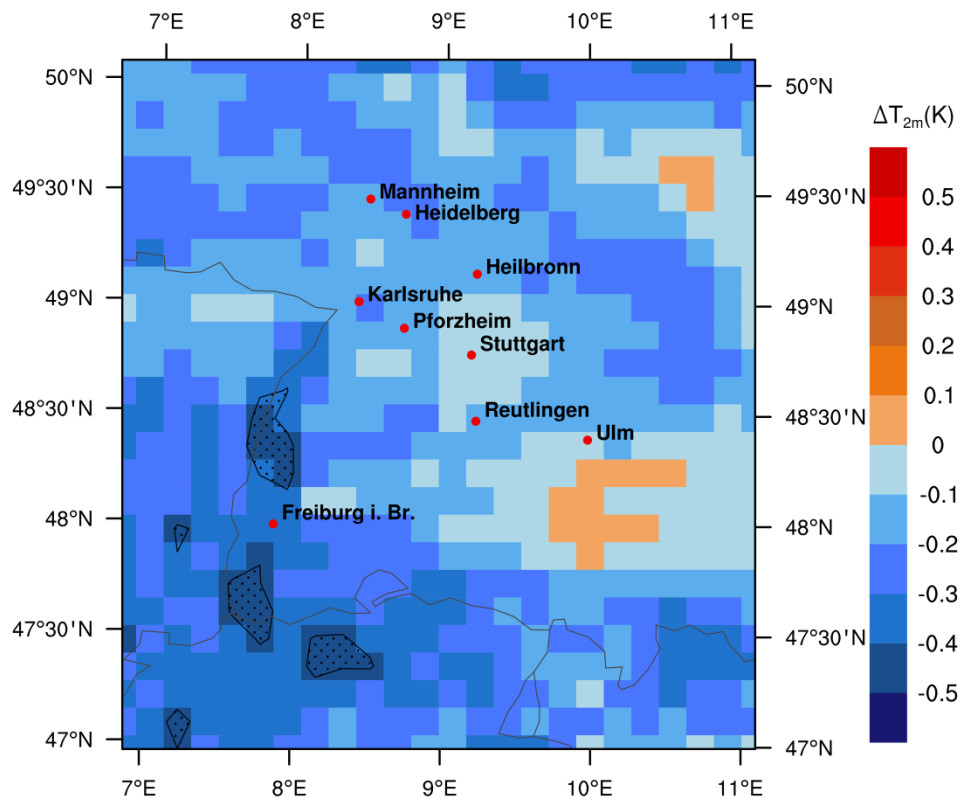


Abbildung 6: Ausschnitt über Baden-Württemberg der Verteilung der durchschnittlichen Temperaturdifferenz in 2m Höhe über den Zeitraum vom 15. Juni bis zum 20. August 2003 zwischen dem Lauf mit COSMO-ART und dem Lauf mit COSMO. Die gepunkteten Flächen kennzeichnen Gitterpunkte an denen der Unterschied zwischen beiden Läufen signifikant auf dem *wahrscheinlichen* Niveau ist.

5 Schlussfolgerung

In dieser Studie wurde das regionale Modellsystem COSMO-ART erstmals kontinuierlich über einen Zeitraum von mehr als einem Monate über Europa angewandt. Der simulierte Zeitraum erstreckt sich vom 15. Juni bis zum 20. August 2003, welcher von einer Hitzewelle geprägt worden war, die Ihren Höhepunkt im August erreicht hat.

Das COSMO Modell, ohne prognostische Berechnungen von Spurengasen, wurde am 1. Januar 2002 initialisiert und wurde bis zum 20. August 2003 durchgerechnet. Die Hitzewelle wird korrekt vom Modell wiedergegeben. Die Aerosole die von COSMO-ART gerechnet werden, erniedrigen die mittlere Temperatur in 2m Höhe insbesondere im Mittelmeerraum bis über 1 K durch die hohen Konzentrationen von Mineralstaub und Seesalz in diesen Gebieten. In Zentraleuropa und auch in Deutschland sind die Änderungen mit einer niedrigen statistischen Signifikanz versehen welche sich nach Süden hin erhöht und Änderungen im Bereich von 0.5 K simuliert werden.

Im östlichen Teil des Modellgebietes werden einige Gebiete u.a. westlich vom Ballungsgebiet von Moskau mit einer signifikanten Erhöhung der Temperatur im Vergleich zum Referenzlauf simuliert. Diese Erhöhung könnte auf den ausgestoßenen Ruß zurückgeführt aber auch durch eine persistente Änderung des Zustandes der Atmosphäre über diesen Gebieten erklärt werden.

Das Modellsystem gibt auch den längerfristigen Verlauf der Spurenstoffe wieder aber auch mehr oder weniger stark ausgeprägt Schwankungen auf wöchentlicher Basis werden dargestellt. Für einige Spurenstoffe kann ein besonders ausgeprägter täglicher Zyklus im Modell beobachtet werden, welcher in gröber aufgelösten globalen Modellen oft nicht präsent ist. In Perioden in denen Mineralstaub aus Nordafrika oder Seesalz vom Atlantik her über Mitteleuropa transportiert wurde, war die Erniedrigung der Tagesmittelwerte der Temperatur besonders ausgeprägt. Über Baden-Württemberg stellen wir eine Erniedrigung der Temperatur bis zu 0.5 K fest. Die stärksten Erniedrigungen befinden sich am östlichen Rand des Rheingrabens wo auch die höchsten statistischen Signifikanzen in Baden-Württemberg auftreten.

Ein Vergleich der Feinstaubkonzentrationen aus dem Modell mit Beobachtungsdaten über Europa zeigt dass nach einer Initialisierungsphase des Modellsystems dass sowohl der Verlauf als auch die Amplitude des Tagesgangs vergleichbar ist. Allerdings kann der Anstieg der Konzentrationen während der Periode mit den höchsten Temperaturen von Anfang bis Mitte August nicht mit dem Modell reproduziert werden. Dies kann durch eine Vernachlässigung der Emissionen durch Wildfeuer und eine weniger detaillierte Darstellung der sekundär organischen Aerosole in der verwendeten Modellversion erklärt werden.

Die gezeigten Arbeiten haben uns erlaubt ein erprobtes Werkzeug zur Verfügung zu stellen und wichtige Erfahrung mit längeren Simulationsperioden und deren Auswertung zu gewinnen, welche in einem Folgeprojekt die Änderung der Luftqualität für Klimaszenarien ermöglichen werden.

6 Referenzen

Baldauf, M., Seifert, A., Förstner, J., Majewski, D., Raschendorfer, M., & Reinhardt, T. (2011). Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities. *Monthly Weather Review*, 110407135458082. doi:10.1175/MWR-D-10-05013.1

Bangert, M., Kottmeier, C., Vogel, B., & Vogel, H. (2011). Regional scale effects of the aerosol cloud interaction simulated with an online coupled comprehensive chemistry model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(9), 4411-4423. doi:10.5194/acp-11-4411-2011

Black, E., Blackburn, M., Harrison, G., Hoskins, B., & Methven, J. (2004). Factors contributing to the summer 2003 European heatwave. *Weather*, 59(8), 217-223. doi: 10.1256/wea.74.04.

Confalonieri, U., B. Menne, R. Akhtar, K.L. Ebi, M. Hauengue, R.S. Kovats, B. Revich and A. Woodward, (2007). Human health. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 391-431.

Davies, H. C. (1976). A lateral boundary formulation for multi-level prediction models. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 102(432), 405-418. doi:10.1002/qj.49710243210

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137(656), 553–597. Wiley Online Library. doi:10.1002/qj.828

Denier van der Gon, H., Visschedijk, A., van der Brugh, H., and Dröge, R. (2010). A high resolution European emission data base for the year 2005, A contribution to UBA- Projekt PAREST: Particle Reduction Strategies. TNO-report TNO-034-UT-2010-01895 RPTML.

Filleul, L., Cassadou, S., Médina, S., Fabres, P., Lefranc, A., Eilstein, D., et al. (2006). The Relation Between Temperature, Ozone, and Mortality in Nine French Cities During the Heat Wave of 2003. *Environmental Health Perspectives*, 114(9), 1344-1347. doi: 10.1289/ehp.8328.

Forkel, R., Knoche, R., (2007), Nested regional climate–chemistry simulations for central Europe, *C. R. Geoscience* 339 734–746.

Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland (2007). Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. 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.

- Haylock, M.R., N. Hofstra, A.M.G. Klein Tank, E.J. Klok, P.D. Jones and M. New (2008). A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res (Atmospheres)*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201
- Hodzic, a, Vautard, R., Chepfer, H., Goloub, P., Menut, L., Chazette, P., et al. (2006). Evolution of aerosol optical thickness over Europe during the August 2003 heat wave as seen from CHIMERE model simulations and POLDER data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(7), 1853-1864. doi: 10.5194/acp-6-1853-2006.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- Kuenen, J., Denier van der Gon, H., Visschedijk, A., and van der Brugh, H. (2011). High resolution European emission inventory for the years 2003–2007. TNO-report TNO-060-UT-2011-00588.
- Lundgren, K. (2010). *Direct Radiative Effects of Sea Salt on the Regional Scale*. Ph.D. thesis, Karlsruhe, Institute of Technology.
- Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao (2007). Global 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.
- Raes, F., Liao, H., Chen, W.-T., Seinfeld, J.H., (2010), Atmospheric chemistry climate feed-backs, *J. Geophys. Res.*, 115, D12121, doi:10.1029/2009JD013300.
- Riemer, N., Vogel, B., Vogel, H., and Fiedler, F. (2003). Modeling aerosols on the mesoscale-γ: treatment of soot aerosol and its radiative effects. *J. Geophys. Res.*, 108, 4601. doi:10.1029/2003JD003448.
- Ritter, B. and Geleyn, J. F. (1992). A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations. *Mon. Weather Rev.*, 120, 303–325, doi:10.1175/1520-0493(1992)120<0303:ACRSFN>2.0.CO;2.
- Rockel, B., Will, A., & Hense, A. (2008). The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift*, 17(4), 347-348. doi:10.1127/0941-2948/2008/0309
- Schär, C. and G. Jendritzky (2004). Climate change: hot news from summer 2003. *Nature*, 432, 559-560
- Schär, C., P.L. Vidale, D. Lüthi, C. Frei, C. Häberli, M.A. Liniger and C. Appenzeller (2004). The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427, 332-336.
- Stanelle, T., Vogel, B., Vogel, H., Bäumer, D., and Kottmeier, C. (2010). Feedback between dust particles and atmospheric processes over West Africa during dust episodes in March 2006 and June 2007. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 10771–10788, doi:10.5194/acp-10-10771-2010.
- Stedman, J. (2004). The predicted number of air pollution related deaths in the UK during the August 2003 heatwave. *Atmospheric Environment*, 38(8), 1087-1090. doi: 10.1016/j.atmosenv.2003.11.011.
- Vautard, R., Honore, C., Beekmann, M., & Rouil, L. (2005). Simulation of ozone during the August 2003 heat wave and emission control scenarios. *Atmospheric Environment*, 39(16), 2957-2967. doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.01.039.

Vogel, B. (1995), Ozonanstieg in der Troposphäre während der letzten 100 Jahre – Welchen Beitrag liefert das Klima?, *Annalen der Meteorologie*, 31, 26-27. Deutscher Wetterdienst, Offenbach.

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.

Zwiers, F. W., von Storch, H. (1995). Taking serial correlation into account in tests of the mean. *J. Climate*, 8, 336–351.

