

AP 4: Optimierung sowie Effizienzsteigerung von Vorhersagematerial zum Erstellen von Warnungen und Vorhersagen

„Sensitivitätsstudien mit AROME und SURFEX bezüglich des Zusammenhanges zwischen Bodenfeuchte und Konvektionsauslösung (aufbauend auf FFG-Projekt CRESSIDA)“

Ziele: g) Die Vorhersage von Luftmassengewittern wird verbessert (um schon früher korrekt warnen zu können)

Versuchsaufbau

Im Teilbereich des Projektes wird der Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und Konvektion im Modell AROME untersucht, um den Einfluss der Bodenfeuchte auf konvektive Niederschläge besser zu verstehen. Damit soll abgeschätzt werden, ob dieser Parameter – entweder aus dem Modell oder aus Satellitenmessungen (z.B. ASCAT, Sentinel-1) – einen sinnvollen Beitrag zum Sweetspot Indikator (SSI) liefern könnte.

Alle Tests werden mit dem Vorhersagemodell AROME durchgeführt, wobei die Modellkonfigurationen für die Versuche so gewählt wurden, dass sie möglichst dem (zum Zeitpunkt der Berechnung) aktuellen operationellen Betrieb entsprechen.

Für die Initialisierung des Modelles gibt es mehrere Möglichkeiten. Entweder man verwendet eine Kurzfristvorhersage von AROME oder man verwendet das Coupling-Modell (in diesem Fall IFS time-lagged, analog zum operationellen Betrieb) zur Berechnung der Anfangsbedingungen. Darüber hinaus können die Hydrometeore wahlweise 0 gesetzt werden oder aus den Modellen übernommen werden. Ein Test hat ergeben, dass die Initialisierung mit einer AROME-Prognose inklusive Hydrometeorologien plausible Ergebnisse bringt.

Eine Umstellung im Vergleich zum operationellen Betrieb gibt es beim Bodenmodell. Um die Bodenfeuchte besser prognostizieren zu können, wird das ISBA Diffusionsschema verwendet, bei dem der Boden mit 14 Schichten modelliert wird. Dafür mussten sowohl der Programmcode von AROME adaptiert als auch die Konvertierungssoftware GL an die neuen Ausgabefelder angepasst werden. Darüber hinaus enthalten die Atmosphärendateien mehr vertikale Level (5hPa-Schritte von 1000 bis 800hPa, 10hPa-Schritte bis 700hPa, darüber 25hPa-Schritte) als im operationellen Betrieb üblich, um eine detailliertere Auswertung der Konvektionsparameter durchführen zu können.

Nach all diesen Änderungen ist die erste Fallstudie gerechnet worden, um zu überprüfen, ob die Änderung der anfänglichen Bodenfeuchte in verschiedenen Tiefen überhaupt einen merkbaren Einfluss auf die Modellprognose hat. Um die Anfangsbedingungen für die Bodenfeuchte modifizieren zu können, ist das Python-Paket EPYGRAM (<https://www.umr-cnrm.fr/gmapdoc/meshtml/EPYGRAM/index.html>) verwendet und erweitert worden. Damit ist es möglich, an jedem Modellgitterpunkt die vorgegebenen Werte durch neue Werte zu ersetzen.

Für den 2.5.2016 wurden folgende Änderungen an den Anfangsbedingungen der Bodenfeuchte vorgenommen:

'surface', 'indicatorOfTypeOfLevel': 1, 'name': 'unknown', 'level': 0, 'table2Version': 1, 'editionNumber': 1, 'shortName': 'unknown', 'paramId': 0, 'indicatorOfLevel': 2016-05-03 06:00:00

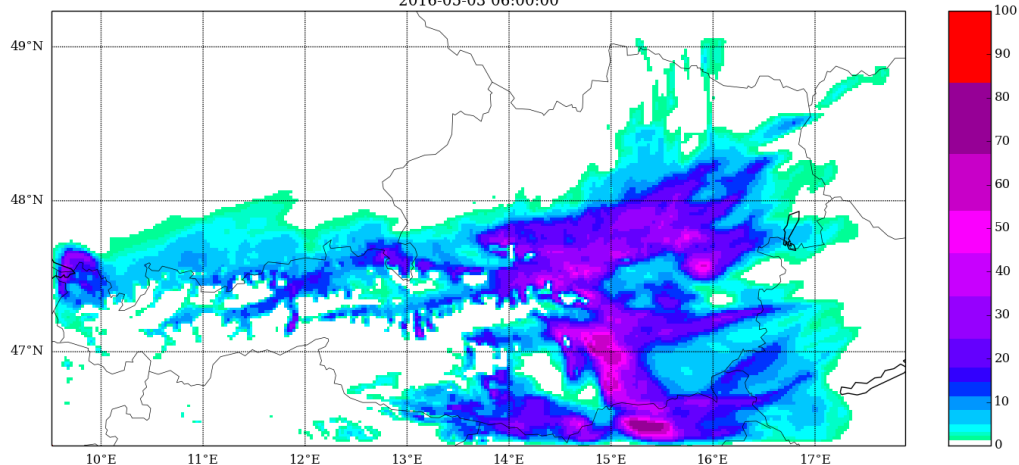


Abbildung 2: Wie Abbildung 1, aber für Lauf WWILT.

Anhand dieser ersten Fallstudie sind folgende Experimente definiert worden, die für alle Tage der Testperiode durchgerechnet worden sind:

- EXP1: Referenzlauf ohne Änderungen
- EXP2: alle Bodenfeuchtwerte in den Schichten 1-8 werden durch den entsprechenden Welkepunkt (WWILT) ersetzt
- EXP3: alle Bodenfeuchtwerte in den Schichten 1-8 (je nach aktueller Bodentiefe) werden durch den entsprechenden Sättigungswert (WSAT) ersetzt
- EXP4: Schichten L1-4 werden auf WWILT und Schichten L5-8 auf WSAT gesetzt
- EXP5: Schichten L1-4 werden auf WSAT und Schichten L5-8 auf WWILT gesetzt

Mit den letzten beiden Versuchen soll die Sensitivität des Modelles in Hinblick auf Verdunstung über die Oberfläche bzw. die Transpiration der Pflanzen für die Atmosphärenanfeuchtung getestet werden. Um diese Untersuchung korrekt durchführen zu können, wäre es wichtig, das Modell mit mehreren sog. Patches zu betreiben. Das bedeutet, dass in jeder Modellgitterzelle unterschiedliche Vegetationstypen gleichzeitig berücksichtigt werden können. Die technischen Tests dazu konnten während der Projektlaufzeit jedoch nicht erfolgreich abgeschlossen werden und sind daher für 2018 geplant.

Für die Validierung der Versuche wurden folgende Auswertungen gemacht:

- Verifikation gegen T2M- und Niederschlags-Messungen von SYNOP/TAWES-Stationen in Ö
- Zeitliche Entwicklung der Bodenfeuchte an einzelnen Gitterpunkten
- Differenzgraphiken der 30-stündigen Niederschlagssummen
- Untersuchung von Konvektionsparametern

Die Testperiode

Auswahl der Tage

Zur Untersuchung des Zusammenhanges sind zuerst Tage ausgesucht worden, die drei Kriterien erfüllen:

- 1.) automatische Strömungslagenklassifikation WLK733: keine vorherrschende Anströmrichtung
Klasse 0 = gradientschwach oder zyklonal oder antizyklonal
- 2.) mehr als 50 Blitze auf österreichischem Staatsgebiet
- 3.) innerhalb des Zeitraumes Mai-Juni 2016

Das Ergebnis sind folgende 23 Tage:

02.05.2016, 08.05.2016, 12.05.2016, 13.05.2016, 19.05.2016, 23.05.2016, 24.05.2016, 25.05.2016, 26.05.2016, 29.05.2016, 01.06.2016, 03.06.2016, 04.06.2016, 05.06.2016, 06.06.2016, 07.06.2016, 08.06.2016, 09.06.2016, 11.06.2016, 18.06.2016, 19.06.2016, 26.06.2016, 27.06.2016

Verifikation gegen TAWES-Messungen

Bei der Speicherung der T2M-Werte des Modelles ist es leider zu einem Fehler gekommen, wodurch nicht für alle Gitterpunkte Werte gespeichert sind. Deswegen wurde für die Verifikation stattdessen TG1, die Bodentemperatur der obersten Bodenschicht (1cm dick), verwendet. Die Absolutwerte der Verifikation sind damit nicht sonderlich aussagekräftig, für die Untersuchung ist aber ohnedies der relative Unterschied der Experimente zueinander relevant.

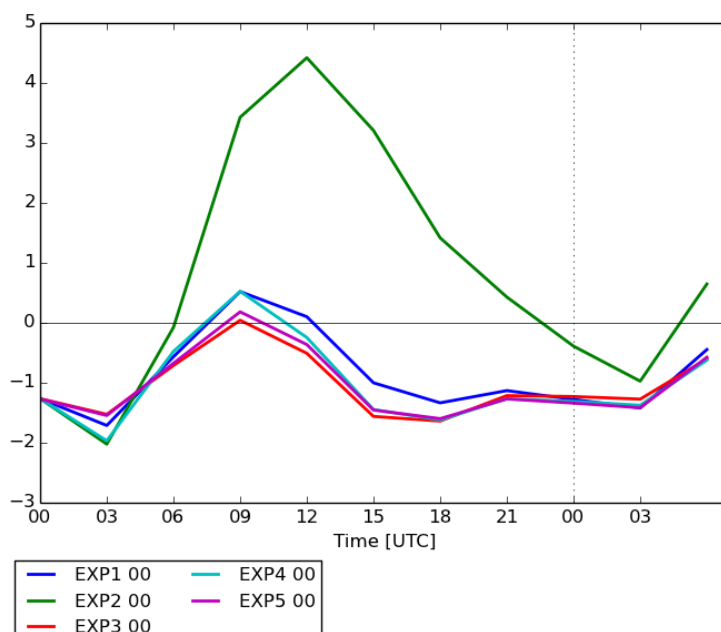


Abbildung 3: Mittlerer Bias (Modell TG1 gegen TAWES T2M) für den Zeitraum 2.5.-27.6.2016 für alle verfügbaren TAWES-Stationen in Österreich.

Im Bias (Abbildung 3) sticht besonders der trockene Lauf (EXP2) heraus. Das ist plausibel, da durch die fehlende Feuchte tagsüber die Umwandlung von einfallender Strahlung in latente und fühlbare Wärme stark verändert ist. Der trockene Boden kann sich viel schneller und stärker aufheizen, da wesentlich weniger Energie zur Verdunstung benötigt wird. Diese stärkere Erwärmung wirkt sich auch noch in der Nacht aus, am Folgetag (06 UTC, letzter Zeitschritt) beginnt schon wieder die rasche Erwärmung.

Im Gegensatz dazu ist der feuchte Lauf (EXP3) durch einen geringeren Tagesgang als der Referenzlauf (EXP1) gekennzeichnet. Die beiden feucht/trocken-Experimente (EXP4 und 5) liegen dazwischen. Bei EXP4 (oben trocken) zeigt sich relativ rasch die Anfeuchtung von unten: um 03UTC noch gleich mit dem trockenen Lauf, von 06-09UTC gleich mit dem Referenzlauf, danach sehr nahe am feuchten Lauf. EXP5 (oben feucht) hingegen unterscheidet sich kaum vom feuchten Experiment, die künstliche Abtrocknung tiefer unten ist also ziemlich irrelevant für die Kurzfristprognose.

Bei der Punktverifikation für Niederschlag an TAWES-Stationen (Abbildung 4) zeichnet sich AROME normalerweise durch einen feuchten Bias tagsüber (09-18UTC) aus, das heißt, das Modell produziert im Durchschnitt zu viel Niederschlag. Dieses Problem tritt auch bei EXP3, 4 und 5 auf, wobei die Unterschiede zu EXP1 klein sind. Alle 3 Experimente zeigen jedoch von 13-16UTC einen höheren positiven Bias als der Referenzlauf. EXP2, der trockene Lauf, zeigt fast keinen feuchten Bias, nur zwischen 12 und 17UTC treten leicht positive Werte auf.

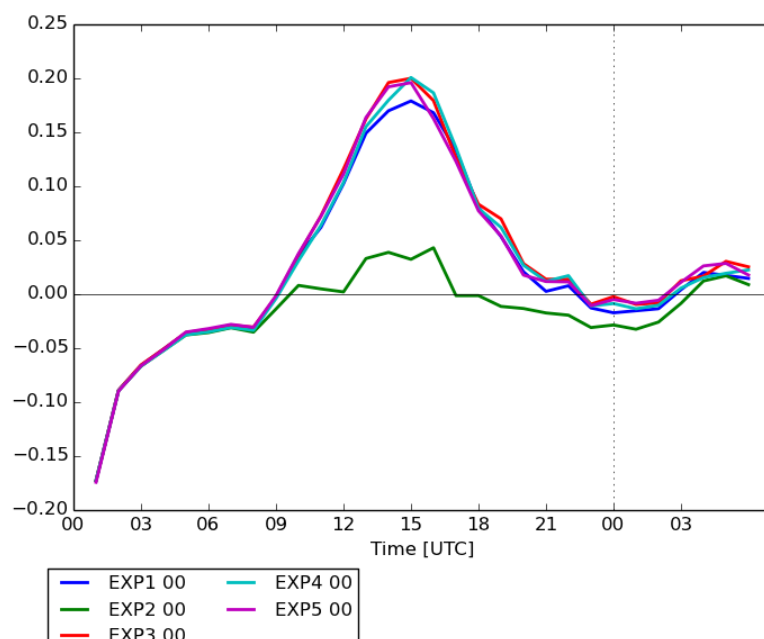


Abbildung 4: Mittlerer Bias des Niederschlages (Modell gegen TAWES) für den Zeitraum 2.5.-27.6.2016 für alle verfügbaren TAWES-Stationen in Österreich.

Dieser Effekt wirkt sich auch positiv auf den RMSE (Abbildung 5) aus. EXP2 zeigt tagsüber den geringsten RMSE, während EXP3-5 am frühen Nachmittag (15UTC) etwas schlechter sind als EXP1. Der RMSE für EXP2 ist fast signifikant (Wilcoxon-Mann-Whitney-Test) besser als die anderen Läufe. Für die 23 untersuchten gradientschwachen Tage im Mai und Juni liefert EXP2 18mal das beste (=geringster RMSE) und 4mal das zweitbeste Ergebnis. Die Verbesserung in der Niederschlagsprognose geht allerdings mit der Verschlechterung der Temperaturprognose (Abbildung 3) einher, EXP2 verbessert also einen Parameter auf Kosten eines anderen.

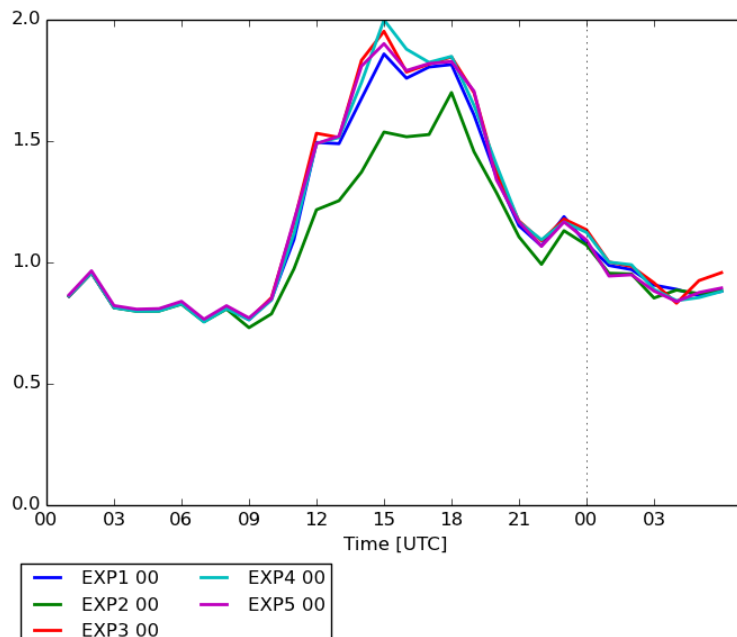


Abbildung 5: Wie Abb. 4, aber für den RMSE.

Zeitliche Entwicklung der Bodenfeuchte an einzelnen Gitterpunkten

Wenn trockener Boden die Konvektion und damit die Niederschlagsbildung hemmt (was eine der Ausgangshypothesen ist), sollte der Effekt auch bei EXP4 zu sehen sein, da hier die obersten Bodenschichten zu Beginn ausgetrocknet werden. Warum das nicht passiert, kann anhand von einzelnen Gitterpunkten untersucht werden, bei denen der zeitliche Bodenfeuchteverlauf untersucht wird. Alle ausgesuchten Gitterboxen liegen in flachen Regionen und weisen geringe Anteile an Wald und Gebäuden auf. Die Auswirkung der anfänglichen Bodenfeuchteänderung wird hier anhand einer Gitterbox im Murtal, nahe Zeltweg, dargestellt. Der 23.6.2016 war ein gradientschwacher Tag, in der ausgewählten Gitterzelle gab es in EXP1 ebendort keinen Niederschlag. Der Boden zeichnet sich in der Nacht durch eine sehr gleichmäßige vertikale Verteilung der Bodenfeuchte aus (Abbildung 6). Mit beginnender Einstrahlung trocknet zuerst die oberste Schicht (WG1) aus (0.29 -> 0.27), gefolgt von den Schichten 2, 3 und 4. Wahrscheinlich kommt es hier zu einem Wassertransport nach oben, und nachdem die Schichten nach unten hin immer dicker werden, wirkt sich der Transport in tieferen Schichten schwächer aus. Auch die tieferen Schichten verzeichnen eine sehr geringe Abnahme. Nach Sonnenuntergang wird Wasser in die oberen Schichten transportiert, das Ausgangsniveau des Vortages wird jedoch nicht mehr erreicht. Das ist dadurch erklärbar, dass Niederschlag die einzige Wasserquelle für den Modellboden ist. Horizontale Austauschprozesse von Wasser im Boden finden im Modell nicht statt.

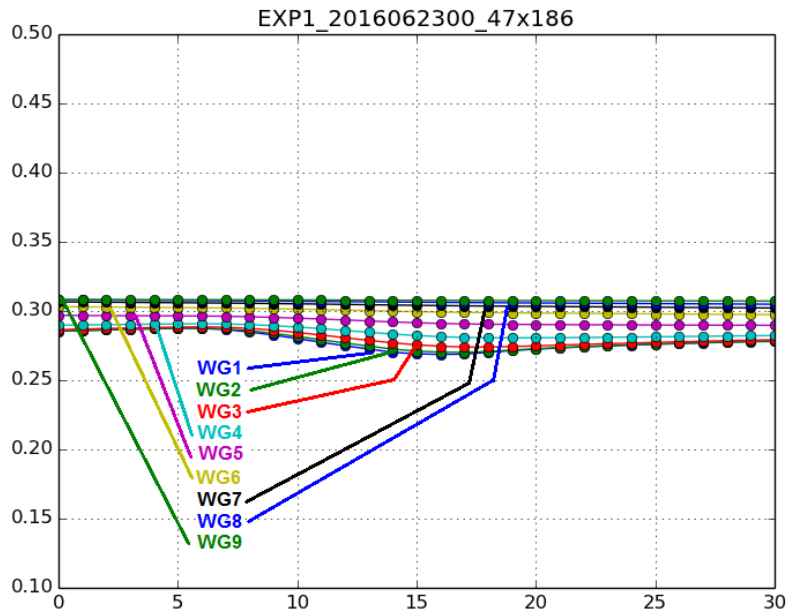


Abbildung 6: Entwicklung des Bodenwassergehaltes (kg/kg; y-Achse) für die Schichten 1 (Oberfläche) bis 9 im Referenzlauf über einen Zeitraum von 30 Stunden, beginnend am 23.6.2016, 00UTC. Dargestellt ist Gitterzelle 47/186 im Murtal.

Wird der Boden zu Beginn ausgetrocknet (ohne dabei auch die Bodentemperatur zu ändern!), so trocknet die oberste Schicht im Laufe des Tages viel stärker – etwa doppelt so stark - aus (0.18 -> 0.13), weil die Wasserzufuhr von unten fehlt bzw. stark eingeschränkt ist (Abbildung 7, links). WG2 sinkt während der 30 Vorhersagestunden etwas, WG3-7 bleiben praktisch konstant. WG8 wird langsam von unten (aus WG9) angefeuchtet, da die Schicht 9 anfänglich nicht verändert wurde.

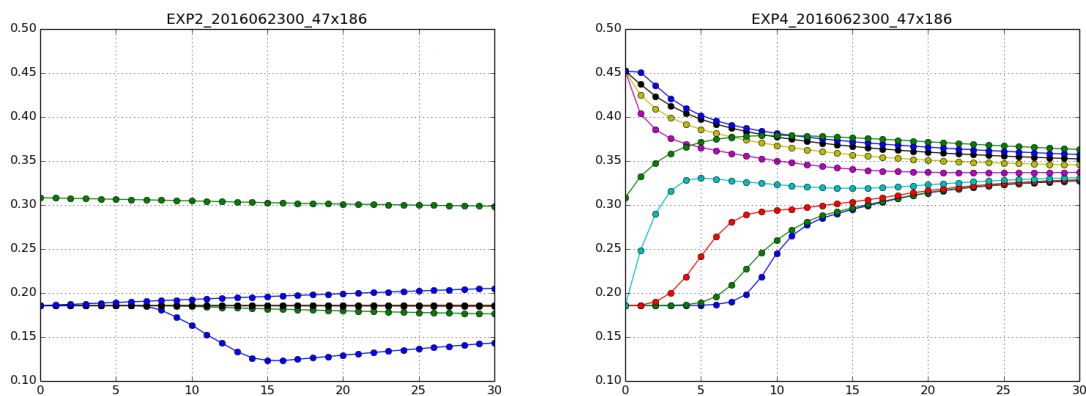


Abbildung 7: Wie Abb. 6, aber für EXP2 (links) und EXP4 (rechts).

Bei EXP4 werden die oberen 4 Schichten ebenfalls zu Beginn ausgetrocknet, die Schichten darunter (5-8) werden jedoch angefeuchtet. Der Wassertransport nach oben setzt hier rasch ein, sodass WG4 bereits nach 2 Stunden wieder den ursprünglichen Wert aufweist (0.29) und nachher sogar feuchter wird als im Referenzlauf EXP1 (Abbildung 7, rechts). Etwas zeitverzögert werden auch WG3, WG2 und WG1 immer feuchter. Durch den Wassertransport in den Nachtstunden tritt der

Abtrocknungsprozess, der in EXP1 und EXP2 ab 8UTC auftritt, in diesem Experiment nicht auf. Im Gegenteil dazu steigt WG1 sogar im Laufe des Nachmittages an, sodass um 16UTC (WG1-Minimum in EXP1 und 2) der Wassergehalt deutlich höher als in der Früh ist. Die Abtrocknung der oberen Schichten hat also durch den effizienten Wassernachschub aus tieferen Schichten eine ganz andere Auswirkung als in EXP2.

Wird der Boden in der Tiefe (Schicht 5-8) getrocknet und an der Oberfläche (Schicht 1-4) angefeuchtet, ergibt sich folgendes Bild (Abbildung 8, links). Die Schichten 8 und 7 werden von unten mit Wassernachschub versorgt, wodurch WG9 im Laufe der 30 Stunden leicht absinkt. WG6 bleibt praktisch konstant, diese Schicht bekommt weder von oben noch von unten neues Wasser. WG5 wird sehr rasch auf Kosten von WG1-4 feuchter. Nach 15 Stunden herrschen in den oberen 5 Schichten fast gleiche Zustände wie in EXP1, die Änderung in den oberflächennahen Schichten hat also keine langfristige Auswirkung.

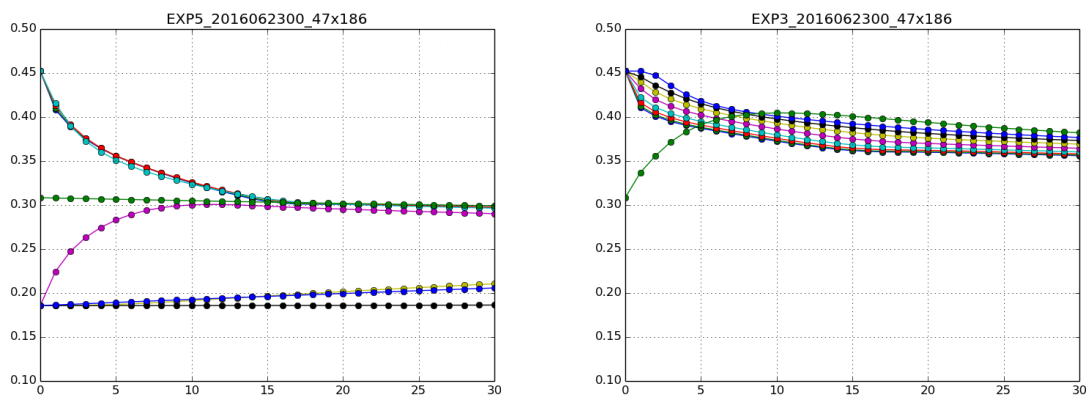


Abbildung 8: Wie Abb. 8, aber für EXP5 (links) und EXP3 (rechts).

Wird zu Beginn der Vorhersage der Boden mit Wasser gesättigt (EXP3; Abbildung 8, rechts), so wird dieses Wasser sehr rasch nach unten weitergeleitet und an Schicht 9 übergeben. Auch hier ist der Prozess nach etwas 15 Stunden praktisch abgeschlossen und ein Gleichgewichtszustand erreicht.

Das prinzipielle Verhalten ist an anderen untersuchten Gitterpunkten vergleichbar, lediglich die Amplitude der Änderungen ist unterschiedlich.

Differenzgraphiken der 30-stündigen Niederschlagssummen

Wird die Niederschlagsverteilung an einzelnen Tagen untersucht, so lassen sich grob 2 Fälle unterscheiden. An Tagen mit isolierter lokaler Konvektion zeigen sich zwischen EXP1, 3, 4 und 5 Variationen in der räumlichen Aufteilung, die Niederschlagsaktivität ist aber vergleichbar, wie das Beispiel für 24.6.2016 zeigt (Abbildung 9). Lediglich der trockene Lauf (EXP2) unterscheidet sich deutlich durch geringere konvektive Aktivität und allgemein geringere Intensität der Zellen (Abbildung 10).

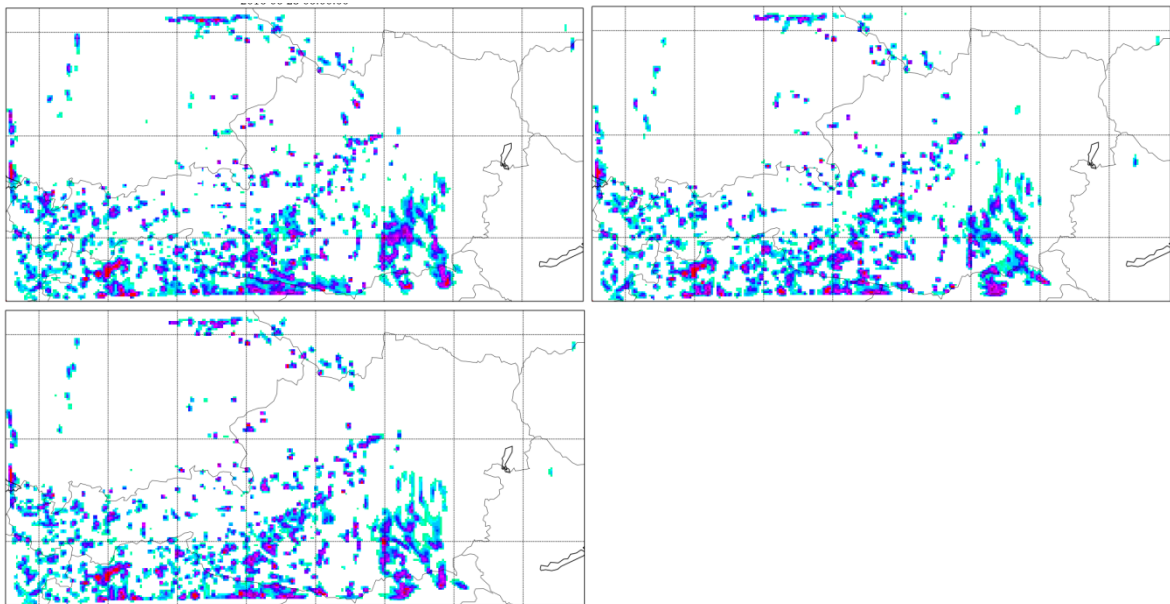
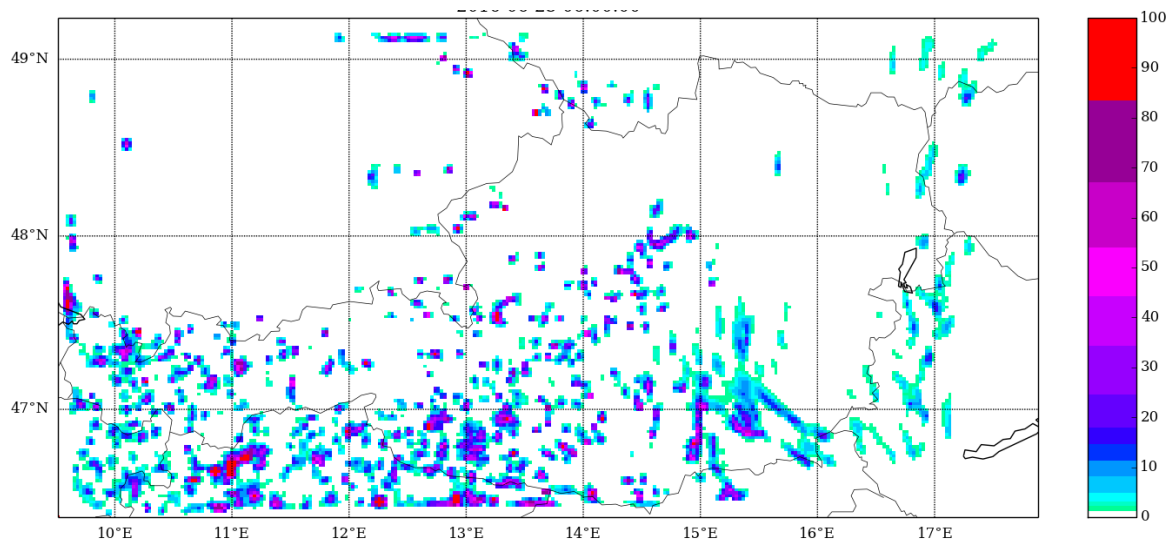


Abbildung 9: 30stündige Niederschlagssumme von 24.6.2016 00UTC - 25.6.2016, 06UTC. EXP1 (oben), EXP3 (Mitte links), EXP4 (Mitte rechts) und EXP5 (unten).

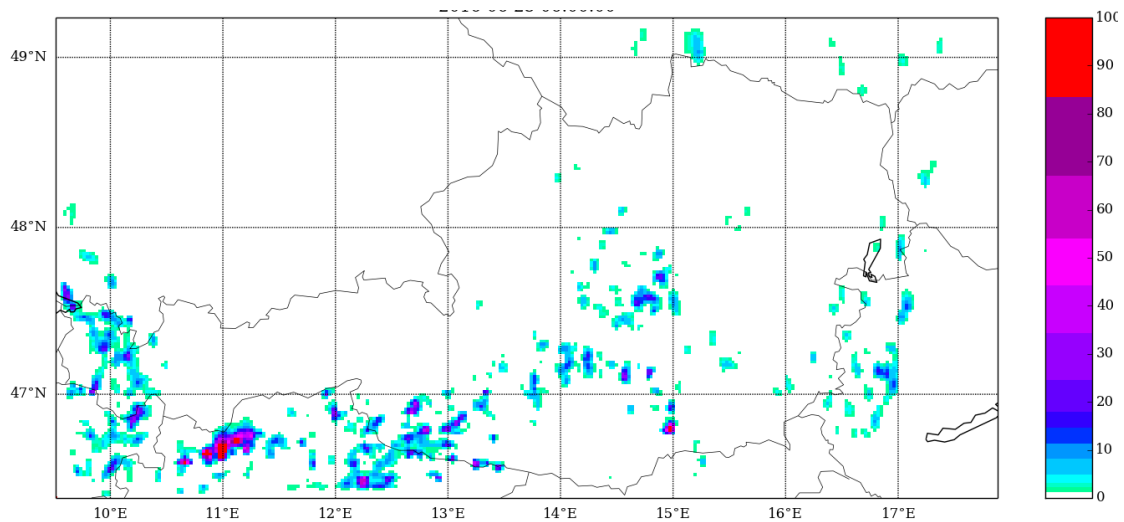


Abbildung 10: Wie Abb. 9, aber für EXP2.

Für Tage mit starker, großflächiger Konvektion lassen sich aus der geringen Anzahl an Fallstudien keine regelmäßig auftretende Strukturunterschiede zwischen den einzelnen Experimenten festlegen. Die einzige erkennbare Tendenz ist die leichte Abnahme der Niederschlagssummen für EXP2. Ein Großteil der Unterschiede in der Niederschlagsverteilung ergibt sich jedoch nur aus der unterschiedlichen Lage der einzelnen Zellen.

Untersuchung von Konvektionsparametern

Für eine Abschätzung der Auswirkungen veränderter Bodeneigenschaften auf die Konvektionsbereitschaft der Atmosphäre wurde das Verhalten der Convective Available Potential Energy (CAPE) in den verschiedenen Experimenten untersucht.

Die Berechnung von CAPE ist sehr sensitiv auf die Wahl der Ausgangsgrößen für aufsteigende Luftpakete. Eine Berechnung lediglich mit der Temperatur und Feuchtigkeit auf Stationshöhe (2m über Grund) kann tagsüber unproportional viel und nachts unproportional wenig CAPE suggerieren. Stattdessen empfiehlt sich eine Mittelung über eine bestimmte Mächtigkeit der Grenzschicht, um zu berücksichtigen, dass ein Gewitter für seine Bildung und seinen Fortbestand ein gewisses Reservoir an Luft mit positiver CAPE benötigt. In Vorhersagemodellen ist die Berechnung von CAPE allerdings eine „Black Box“ mit meist unterschiedlicher und unbekannter Methodik, die eine Vergleichbarkeit und Interpretation der ausgegebenen Werte erschwert.

Für die vorliegende Untersuchung wurde daher CAPE aus dem Output von AROME (Temperatur, spezifische Feuchtigkeit und Geopotenzial auf verschiedenen Druckflächen) selbst berechnet. CAPE tritt dann auf, wenn genügend Feuchtigkeit in Bodennähe (der sogenannten Grenzschicht) und eine ausreichend starke vertikale Temperaturabnahme darüber zusammenkommen. Für ein besseres Verständnis wurden auch diese beiden Komponenten selbst berechnet.

Als Grenzschicht wurde dabei eine 100 hPa dicke Schicht über der lokalen Modelltopografie definiert. Die Grenzschichtfeuchte wurde von den Luftpaketen in der Mitte dieser Grenzschicht genommen, also 50 hPa unter dem lokalen Bodendruck (entspricht im Tiefland ca. 500 Meter über der lokalen Modelltopografie). Die dortigen Werte unterscheiden sich im Allgemeinen nicht wesentlich und nicht systematisch vom korrekten Weg einer dichtegewichteten Mittelung, ihre Berechnung ist aber deutlich weniger rechenaufwändig. Der vertikale Temperaturgradient wurde vom Oberrand der Grenzschicht, also von 100 hPa unter dem lokalen Bodendruck (entspricht im Tiefland ca. 1000 Meter über der lokalen Modelltopografie), bis zum 500-hPa-Niveau berechnet.

(Diese Annahmen wurden auch schon in anderen Studien in den USA und Europa getroffen und werden auch von uns im Sinne einer physikalisch schlüssigen, transparenten und portierbaren Vereinheitlichung begrüßt. Auf diesem Wege kann etwa die Berechnung von CAPE und anderen Konvektionsparametern auf die gleiche Weise aus AROME und INCA erfolgen, um Unterschiede zwischen Modell und Beobachtungsdaten auf einen Blick sichtbar zu machen.)

Im Zuge der Untersuchungen zeigte sich, dass sich die Modellkonvektion an einem gegebenen Tag in den einzelnen Experimenten räumlich und zeitlich sehr unterschiedlich entwickeln konnte, sodass Aussagen auf Basis fixer Termine zur Verwässerung neigen. Sowohl CAPE als auch ihre beiden Komponenten, bodennahe Feuchtigkeit und vertikaler Temperaturgradient, nehmen im Tagesgang zu. Konvektion tritt speziell während gradientschwacher Wetterlagen bevorzugt am Nachmittag auf,

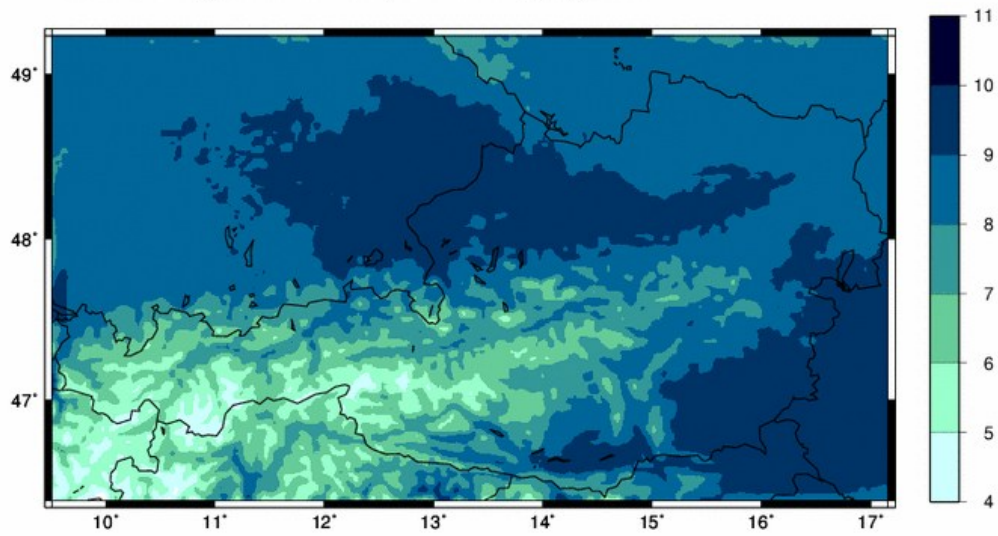
wenn die tageszeitliche Erwärmung am stärksten ist und auch die Konvektionsparameter ihre instabilsten Werte erreichen. Um tageszeitliche Unterschiede der Konvektion zwischen den einzelnen Experimenten auszubügeln, wurden also die jeweiligen Tageshöchstwerte der Parameter berechnet.

Über trockenen Böden fließt der tägliche solare Strahlungsgewinn zum Großteil in die Erwärmung der bodennahen Luftschichten, während er über feuchten Böden überwiegend in Verdunstung investiert wird und zu einer Anfeuchtung der bodennahen Luft führt. Die konvektiv durchmischte Grenzschicht wächst also über trockenen Böden schneller in die Höhe als über feuchten Böden. Anders ausgedrückt in Form der „Zutaten“ für Konvektion: Über trockenen Böden erhöht sich der vertikale Temperaturgradient im Tagesgang stärker, über feuchten Böden nimmt die bodennahe Luftfeuchtigkeit stärker zu.

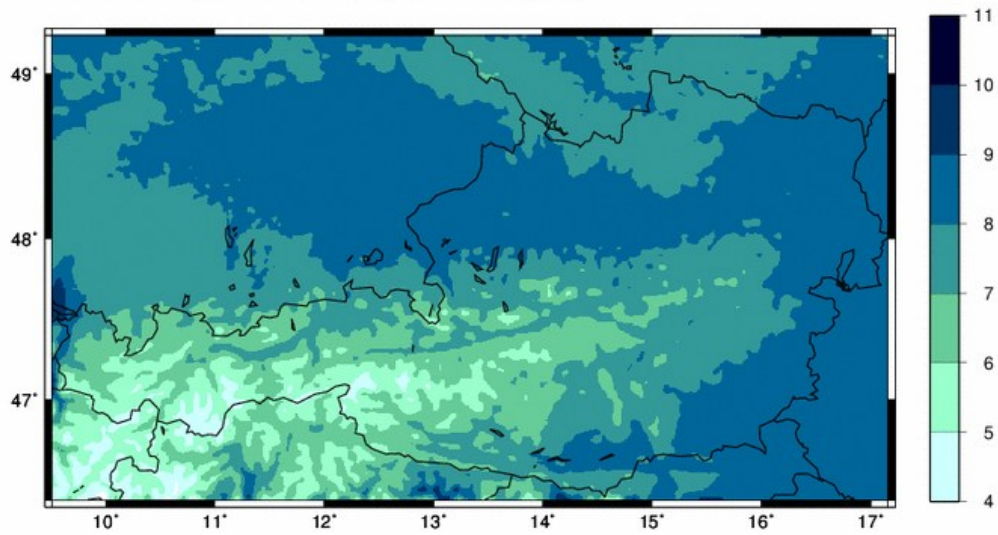
Das lässt sich auch schön in Kompositkarten dieser beiden Größen für die Referenzläufe sowie die trockenen (EXP2) und die feuchten Experimente (EXP3) über alle 23 Tage der Testperiode erkennen (Abbildung 11 und Abbildung 12). Im Vergleich zum Referenzlauf nimmt über flachen Regionen im trockenen Experiment die Grenzschichtfeuchte um annähernd 1 g/kg ab (Abbildung 11, Mitte) und der mittlere vertikale Temperaturgradient um 0.1-0.2 K/km zu (Abbildung 12, Mitte). Im feuchten Experiment sind die Änderungen entsprechend gegengleich, wenn auch dem Betrag nach für die Grenzschichtfeuchte nur etwa halb so groß (Abbildung 11, unten) und für den mittleren vertikalen Temperaturgradienten fast unmerklich (Abbildung 12, unten). Der Bodenzustand im Referenzlauf dürfte also ziemlich feucht gewesen sein. Fast keine Änderungen sind im Bergland erkennbar; wegen des generell geringen Wasserspeichervermögens unterscheiden sich die Bodeneigenschaften dort bei trockener und feuchter Ausgangslage kaum voneinander.

Das gegengleiche Verhalten der beiden „Zutaten“ (stärkere Erwärmung versus stärkere Anfeuchtung) macht es zunächst unklar, wie sich eine veränderte Bodenfeuchte auf CAPE auswirkt. Abbildung 13 löst auf, dass der mittlere Tageshöchstwert von CAPE im trockenen Experiment merkbar abnimmt (Mitte) und im feuchten Experiment merkbar zunimmt (unten). Wiederum sind die Unterschiede im Flachland am größten – typische Wertebereiche sind hier von 300 bis 600 J/kg im Referenzlauf, von 100 bis 300 J/kg im trockenen Experiment sowie von 400 bis 800 J/kg im feuchten Experiment – und im Bergland, auch wegen der ohnehin schon geringen Magnitude von CAPE, kaum merkbar. Die geringere CAPE in trockenen Situationen ist eine Folge der früher erreichten Auslösungstemperatur und der rascheren Verteilung der bodennahen Feuchtigkeit in größere Höhen durch Thermik. Dadurch können sich keine sogenannten „Loaded-Gun“-Situationen ausbilden, in der eine Inversion den vertikalen Austausch unterdrückt und dadurch den Aufbau von hoher bodennaher Feuchte und entsprechend viel CAPE ermöglicht. Über feuchten Böden werden solche Situationen hingegen begünstigt.

mean of daily peak boundary layer moisture [g/kg] EXP1



mean of daily peak boundary layer moisture [g/kg] EXP2



mean of daily peak boundary layer moisture [g/kg] EXP3

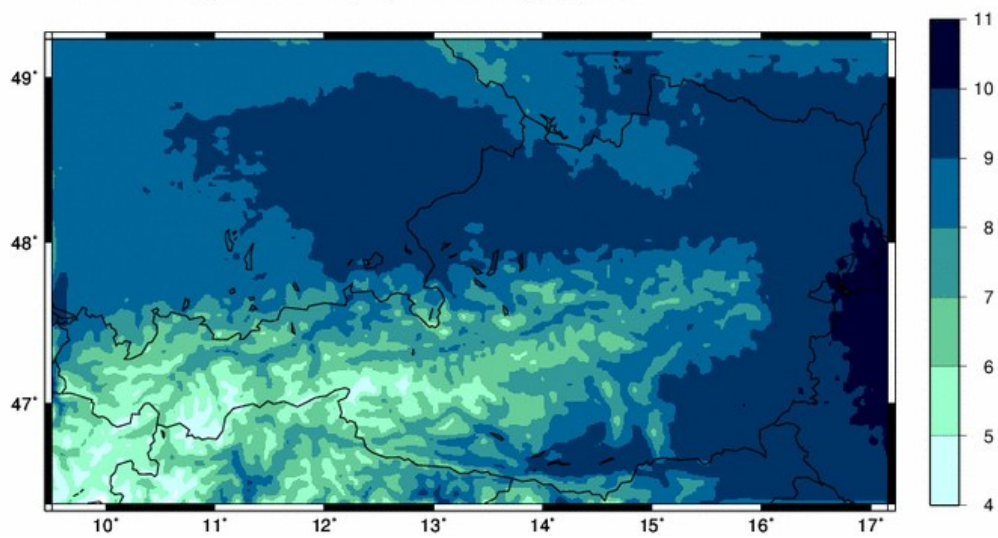
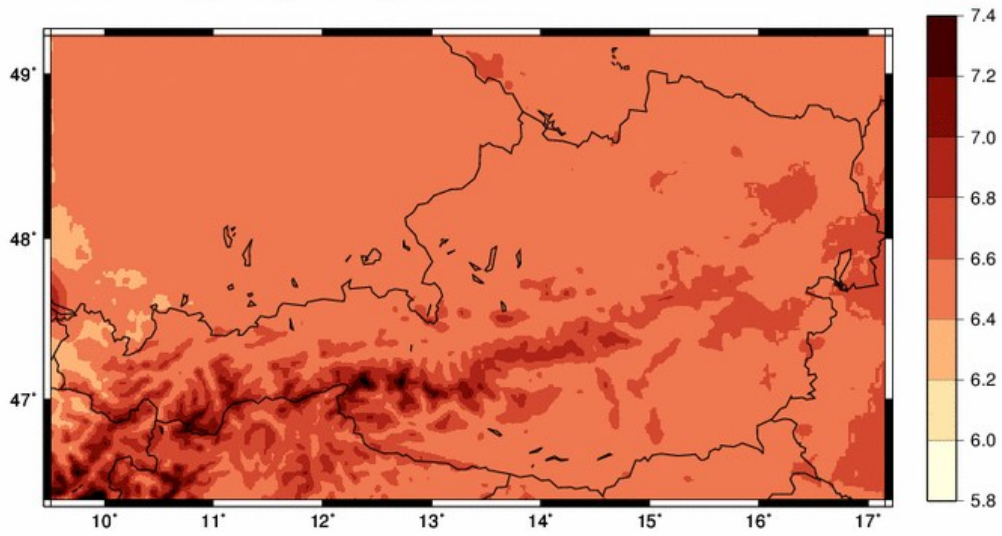
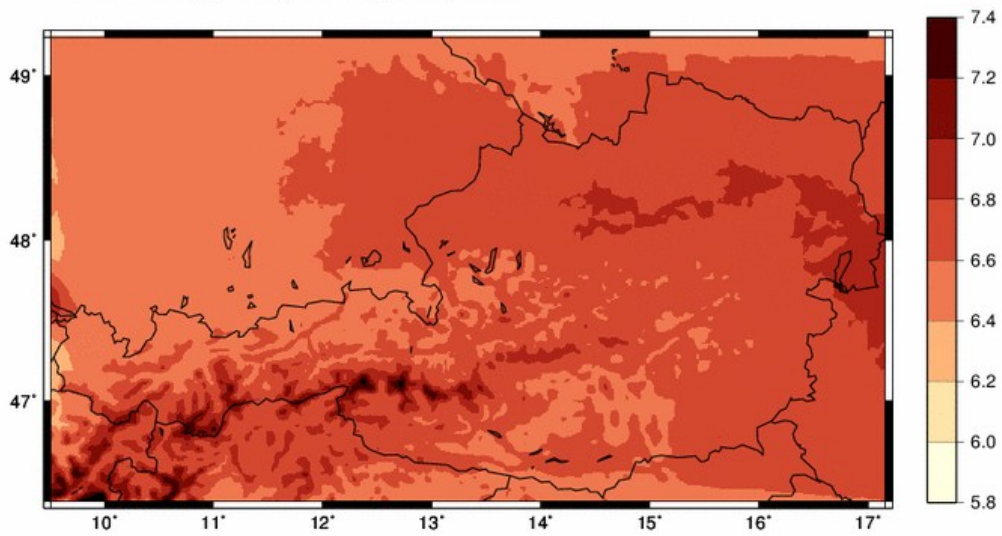


Abbildung 11: Mittelwert des jeweiligen Tageshöchstwertes der spezifischen Feuchte in der Grenzschicht über alle 23 Tage der Testperiode. Oben: Referenzlauf EXP1. Mitte: trockenes Experiment EXP2. Unten: feuchtes Experiment EXP3.

mean of daily peak lapse rates [K/km] EXP1



mean of daily peak lapse rates [K/km] EXP2



mean of daily peak lapse rates [K/km] EXP3

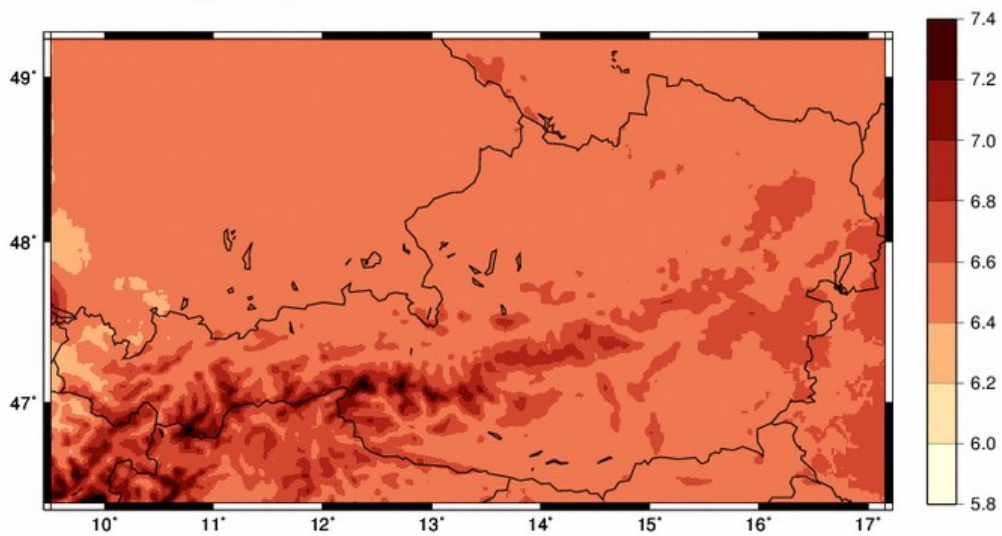
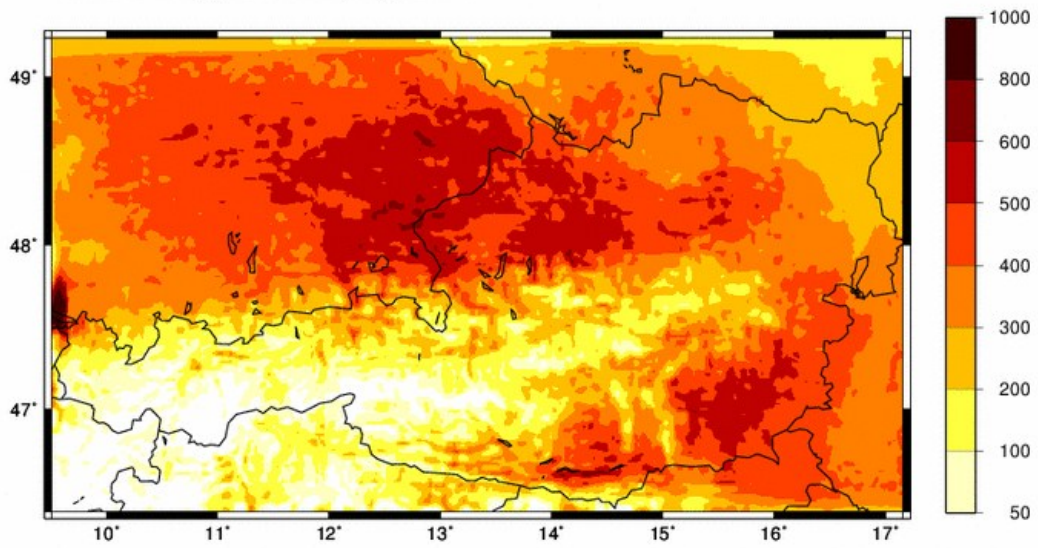
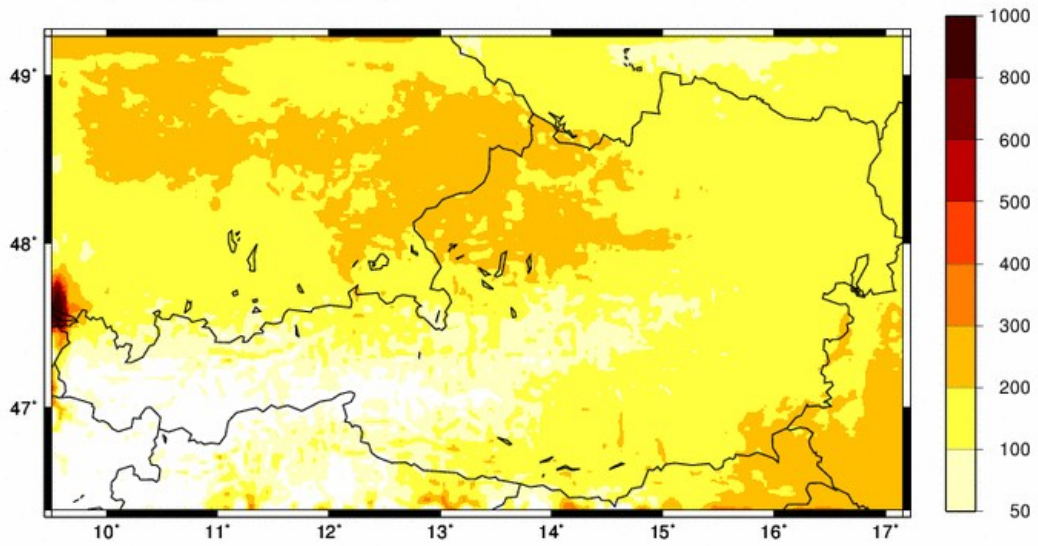


Abbildung 12: Wie Abb. 11, aber für den mittleren vertikalen Temperaturgradienten zwischen der Grenzschicht und 500hPa.

mean of daily peak CAPE [J/kg] EXP1



mean of daily peak CAPE [J/kg] EXP2



mean of daily peak CAPE [J/kg] EXP3

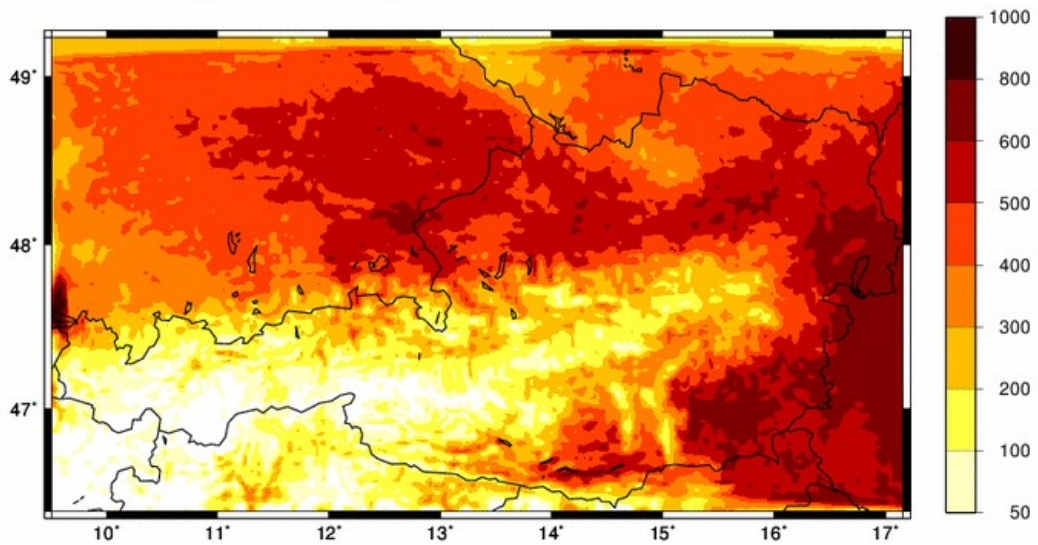


Abbildung 13: Wie Abb. 11, aber für CAPE.

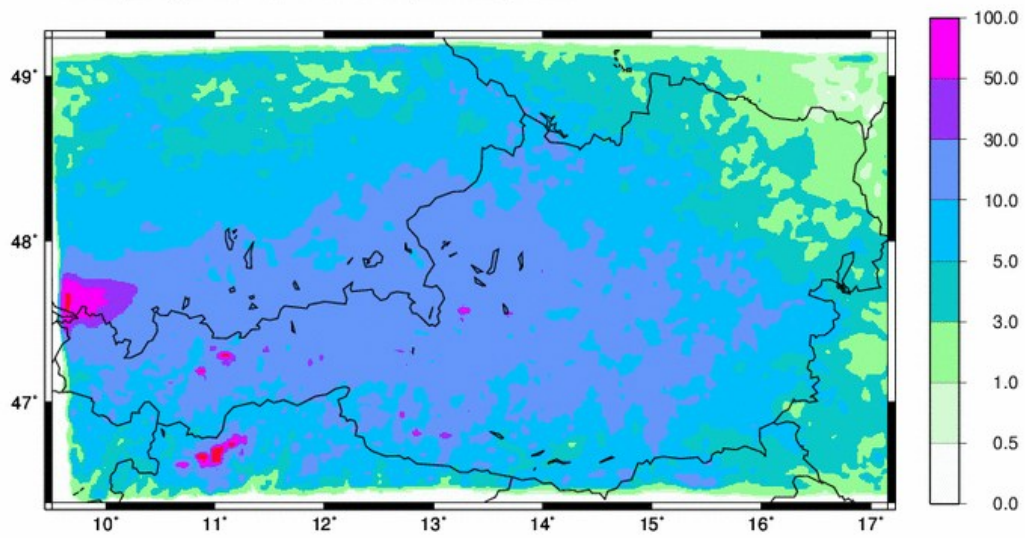
Inwieweit, und ob überhaupt, sich eine höhere CAPE auch tatsächlich in mehr konvektive Niederschläge übersetzt, ist ebenfalls nicht von vornherein eindeutig. Bei feuchterer, aber weniger warmer Grenzschicht tritt schließlich auch die Auslösung hochreichender Konvektion später ein oder bleibt mitunter sogar ganz aus. Zur Untersuchung dieser Frage wurden in Abbildung 14 die über alle 23 Untersuchungstage gemittelten Tagesniederschläge dargestellt.

Neben ein paar Artefakten wie extremer Modellkonvektion im Bodenseeraum (zu hohe Wassertemperatur in der Initialisierung) sowie über einzelnen hochalpinen Gebirgsstöcken ist eine deutliche Teilung in ein niederschlagsreiches Bergland und niederschlagsarme Tiefländer augenscheinlich. Diese Charakteristik ist typisch für gradientschwache, konvektiv geprägte Wetterlagen, auch wenn sie durch den positiven Bias des Niederschlages von AROME (vgl. Abbildung 4) noch etwas überzeichnet wird. Die Unterschiede zwischen der Referenz und den beiden Experimenten sind aufgrund dieser starken Gegensätze nur schwer erkennbar. Besser treten sie in den Differenzplots der folgenden beiden Abbildungen hervor.

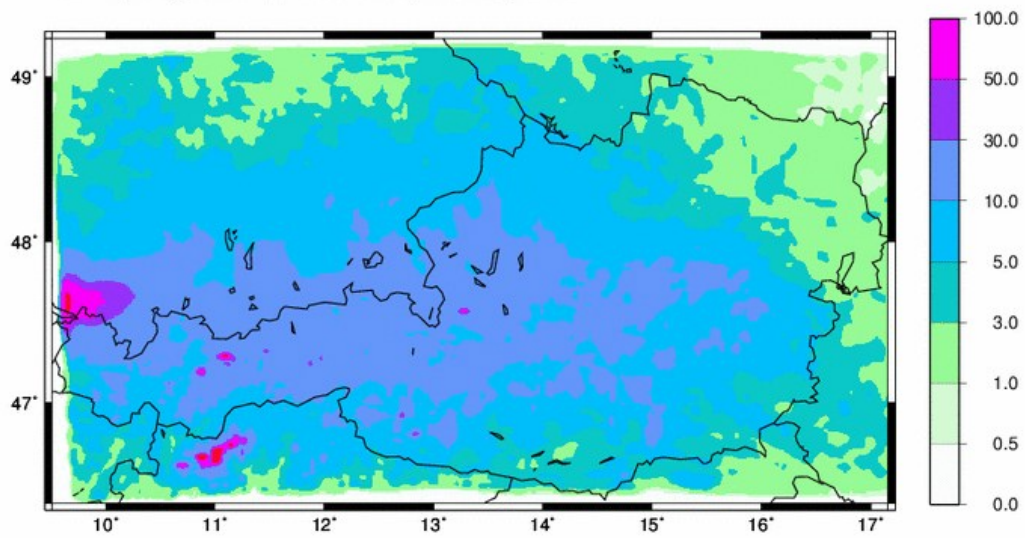
Abbildung 15 zeigt die absoluten Differenzen des mittleren Tagesniederschlages zwischen den jeweiligen Experimenten und dem Referenzlauf. Im trockenen Experiment (Abbildung 15, oben) nehmen die Niederschläge vor allem entlang der nördlichen und südlichen Alpenränder (von den Nordtiroler Kalkalpen bis ins Salzkammergut sowie von Kärnten bis zum steirischen Randgebirge) ab, oft im Bereich von durchschnittlich 2-6 mm pro Tag, stellenweise auch noch mehr. Diese Abnahmen strahlen auch noch ein Stück weit in die Alpenvorländer aus (von Oberbayern bis Oberösterreich und im Grazer Becken). Die Änderungen in den Zentralalpen sind wiederum nur gering. Auch im östlichen Flachland sind nur geringe absolute Änderungen sichtbar, was dort vor allem in der Niederschlagsarmut an sich begründet ist. Im feuchten Experiment (Abbildung 15, unten) sind insgesamt etwas mehr Gebiete mit zunehmenden als mit abnehmenden Niederschlägen sichtbar, auch wenn die Änderungen hier vergleichsweise gering bleiben und das fleckige Muster wegen der begrenzten Stichprobe eine Interpretation erschwert.

Zwecks Bereinigung um den unterschiedlichen Niederschlagsreichtum zeigt Abbildung 16 die prozentuellen Änderungen des trockenen (Abbildung 16, oben) sowie des feuchten Experimentes (Abbildung 16, unten) im Verhältnis zum Referenzlauf, der die 100%-Marke bildet. Die Tendenz zu weniger Niederschlag bei trockener Ausgangslage und mehr Niederschlag bei feuchter Ausgangslage tritt nun noch besser hervor. Außerdem sind die relativen Änderungen im niederschlagsarmen östlichen Flachland am größten, auch wenn sie in absoluten Zahlen zuvor nur gering gewirkt haben.

mean precipitation 06 to 06 UTC [mm/24h] EXP1



mean precipitation 06 to 06 UTC [mm/24h] EXP2



mean precipitation 06 to 06 UTC [mm/24h] EXP3

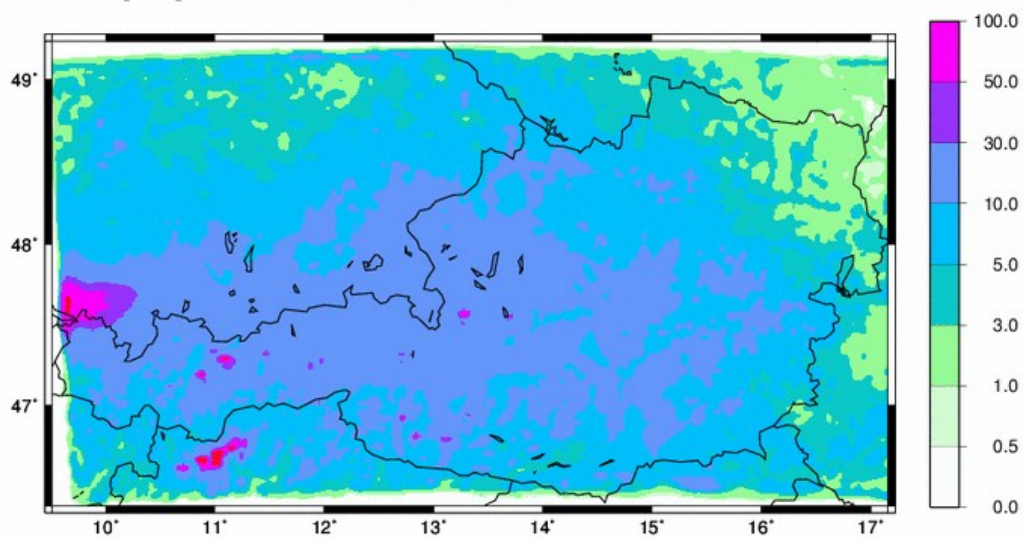
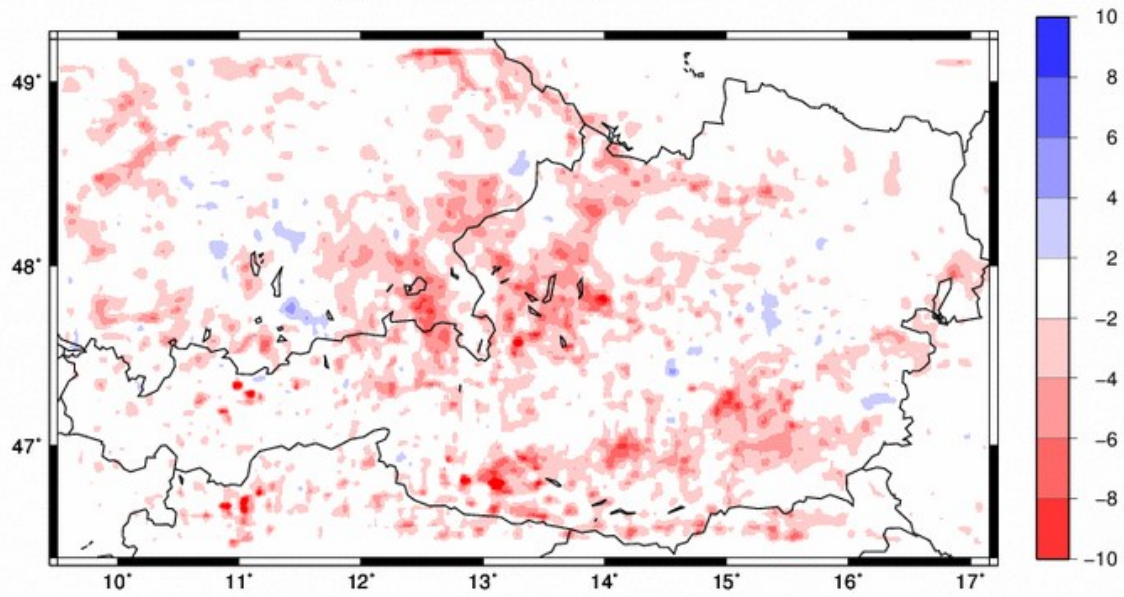


Abbildung 14: Mittlere 24-stündige Tagesniederschläge über alle 23 Tage der Testperiode. Oben: Referenzlauf EXP1. Mitte: trockenes Experiment EXP2. Unten: feuchtes Experiment EXP3.

difference of mean daily precipitation 06 to 06 UTC [mm/24h] EXP2 – EXP1



difference of mean daily precipitation 06 to 06 UTC [mm/24h] EXP3 – EXP1

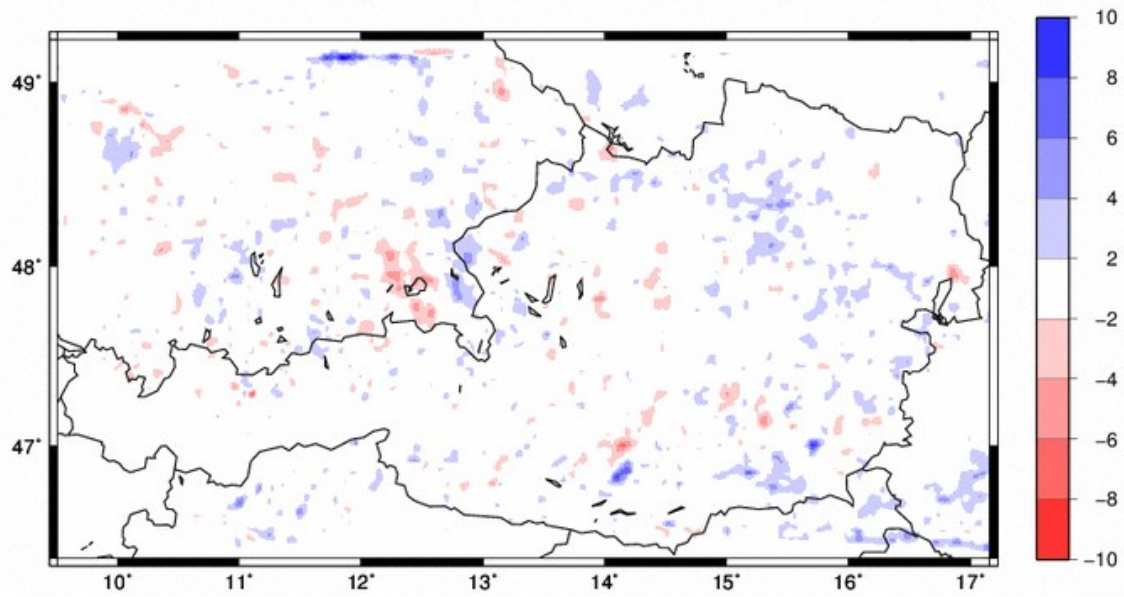
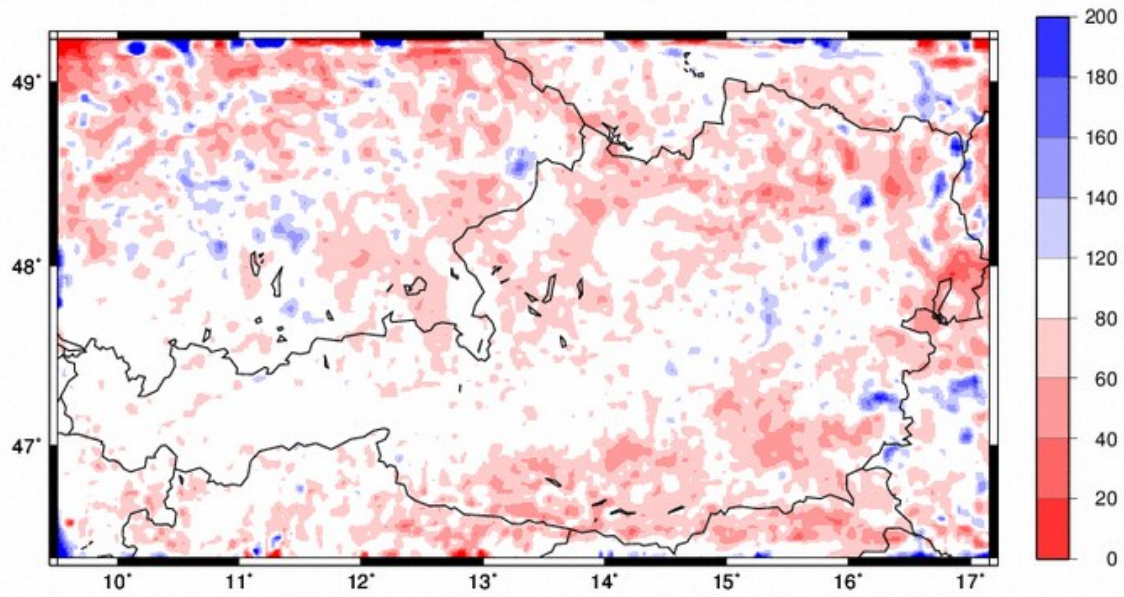


Abbildung 15: Differenz zwischen den mittleren 24-stündigen Tagesniederschlägen des trockenen Experimentes EXP2 und des Referenzlaufes EXP1 (oben) sowie des feuchten Experimentes EXP3 und des Referenzlaufes EXP1 (unten).

ratio of mean daily precipitation 06 to 06 UTC [%] EXP2/EXP1



ratio of mean daily precipitation 06 to 06 UTC [%] EXP3/EXP1

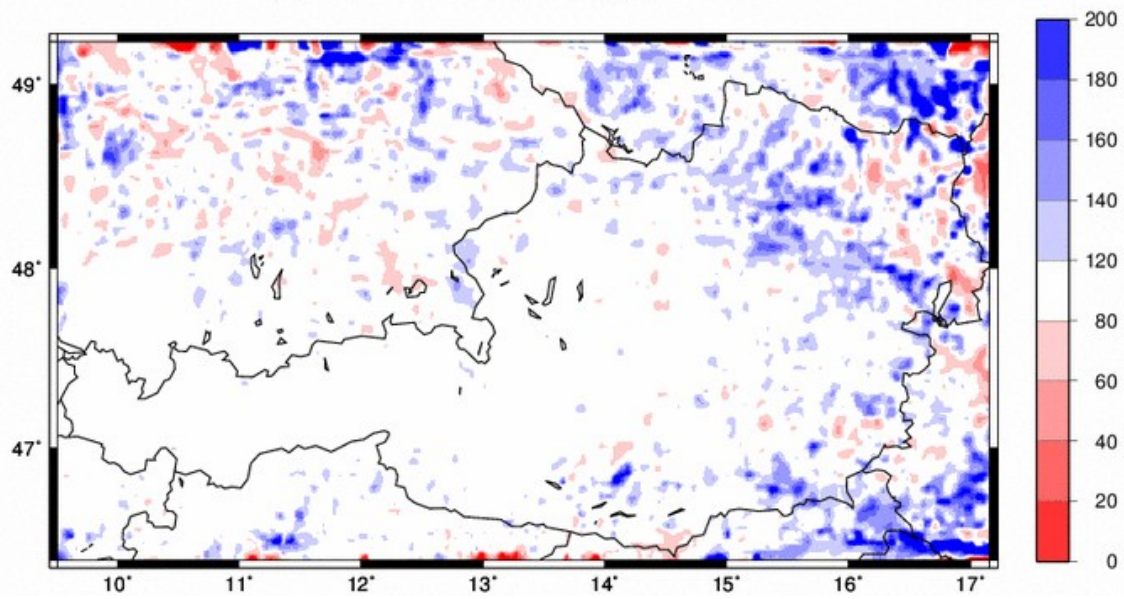


Abbildung 16: Wie Abb. 15, aber jeweils für die relative Änderung (Experiment dividiert durch Referenzlauf).

Es werden nun die wichtigsten Ergebnisse in Bezug auf das Verhalten von Konvektion zusammengefasst und interpretiert.

- Der Bodenzustand spielt eine erhebliche Rolle für das Konvektionspotenzial der Atmosphäre. Seine wichtigsten Auswirkungen sind die folgenden:

	trockener Boden	feuchter Boden
Tageserwärmung:	rascher	langsamer
Auslösung von Thermik:	früher	später
Vertikale Durchmischung:	verstärkt	unterdrückt
Aufbau von CAPE:	beschränkt	erhöht
Einsetzen konvektiver Niederschläge:	früher	später
Niederschlagsmengen:	tendenziell niedriger	tendenziell höher

- Im Vergleich zum Referenzlauf nimmt der vertikale Temperaturgradient im trockenen Experiment zu und im feuchten Experiment ab. Dem steht ein gegengleiches Verhalten der Grenzschichtfeuchte gegenüber. Insgesamt resultiert daraus im trockenen Experiment weniger, im feuchten Experiment mehr CAPE als im Referenzlauf.
- Die genannten Unterschiede treten im Flachland am stärksten hervor, da dort das „Gedächtnis“ des Bodens in Bezug auf eine trockene oder nasse Vorgeschichte am stärksten ausgeprägt ist. In den Zentralalpen gibt es dagegen kaum Unterschiede zwischen trockener und feuchter Ausgangslage.
- Die Unterschiede zwischen Referenzlauf und feuchtem Experiment sind geringer als zwischen Referenzlauf und trockenem Experiment. Die Referenz war also ziemlich feucht. Das dürfte in unserem Klima meistens so sein, war aber im besonders regenreichen Frühsommer 2016 sicherlich noch ausgeprägter als sonst. Es wäre interessant zu untersuchen, ob der Referenzlauf nach ausgesprochen trockener Vorgeschichte – wie z.B. im heißen und trockenen Sommer 2015 – näher an das trockene Experiment rückt.
- Tendenziell übersetzt sich mehr CAPE in den feuchten Experimenten auch zu mehr konvektiven Niederschlägen und weniger CAPE in den trockenen Experimenten zu weniger konvektiven Niederschlägen. Im Einzelfall kann das Verhalten allerdings auch deutlich von dieser Gesamtheit abweichen. Z.B. kann in einer bestimmten Situation im feuchten Experiment bei viel CAPE die Auslösungstemperatur für Konvektion nicht erreicht werden, hingegen im trockenen Experiment bei wenig CAPE schon; in diesem Fall wäre also ein trockener Boden ausnahmsweise begünstigend für Konvektion.
- Primäre Konvektion über orografischen Merkmalen verhält sich in allen Setups oft recht ähnlich, auch wenn sie im trockenen Experiment tendenziell früher startet und weniger intensiv ist als im feuchten Experiment. Insbesondere bei sekundärer Konvektion, die an den Böenfronten vorangegangener Gewitter ausgelöst wird, können in den Experimenten in Einzelfällen hingegen lokal oder regional sehr unterschiedliche Lösungen entstehen.
- Eine Rolle spielt auch die Großwetterlage. In manchen Situationen ist lokale Verdunstung fast egal und in anderen Situationen sehr wichtig. Die beschränkt große Stichprobe legt die – auch physikalisch begründete – Vermutung nahe, dass die Unterschiede der Grenzschichtfeuchte und der CAPE zwischen trockenem und feuchtem Experiment bei Kaltluftzufuhr und/oder Tiefdrucklagen tendenziell nur gering sind, da die Luft in diesen Situationen sowieso hochreichend durchmischt ist und jedwede Feuchtigkeit rasch in der Troposphäre verteilt wird. Dagegen sind die Unterschiede der Grenzschichtfeuchte und der CAPE bei Warmluftzufuhr und/oder Hochdrucklagen, wenn die vertikale

Durchmischung unterdrückt ist, am größten. Eine ähnliche Aussage in Bezug auf konvektive Niederschläge ist nicht möglich, da diese speziell in Hochdrucklagen auch bei viel CAPE weitgehend oder sogar vollständig durch Absinkprozesse unterdrückt werden.

- Während Konvektion in den Zentralalpen weitgehend insensitiv auf vorangegangene Niederschläge ist, legen die Resultate an den Alpenrändern und im Alpenvorland eine erhebliche Sensitivität im Sinne von „feed-forward“-Prozessen nahe: Sowohl trockene als auch feuchte Perioden neigen dazu, sich durch reduzierte beziehungsweise gesteigerte Konvektion selbst zu verstärken. Vermutlich ist dieses Muster bei gradientschwachen Wetterlagen besonders ausgeprägt und wird erst dann wieder gebrochen, wenn die Großwetterlage über längere Zeit Niederschläge aktiv fördert oder aktiv unterdrückt.
- Die absoluten Unterschiede der Niederschläge zwischen trockenem und feuchtem Experiment sind entlang des nördlichen und südlichen Alpenrandes sowie der benachbarten Vorländer am größten. Diese Regionen sind auch klimatologisch besonders feucht. Hier wären durch „feed-forward“-Prozesse in die feuchte Richtung also mehr negative Auswirkungen zu erwarten (z.B. Überflutungen und Muren) als in die trockene Richtung.
- Demgegenüber sind die relativen Unterschiede der Niederschläge im östlichen Flachland am größten. Diese Region ist auch klimatologisch besonders trocken. Hier dürften „feed-forward“-Prozesse in die trockene Richtung also mehr negative Auswirkungen haben (z.B. Wassermangel, landwirtschaftliche Dürre) als in die feuchte Richtung.
- Die Atmosphäre in größeren Alpentälern scheint sich bei einer feuchten Ausgangslage eher wie im Flachland, bei einer trockenen Ausgangslage hingegen eher wie im Gebirge zu verhalten. So sind etwa Zonen erhöhter CAPE in den größeren Alpentälern wie Inn-, Salzach-, Enns-, Drau-, Mur- und Mürtal im feuchten Experiment und im Referenzlauf deutlich, im trockenen Experiment hingegen fast gar nicht mehr abgebildet (Abbildung 13). Auch dies lässt sich schlüssig durch verstärkte vertikale Durchmischung bei trockener und reduzierte vertikale Durchmischung bei feuchter Vorgeschichte erklären.
- CAPE beschreibt nur das Potenzial der Atmosphäre für Konvektion, sagt aber noch nichts darüber aus, ob dieses Potenzial auch ausgelöst werden kann. Dafür sind Hebungsprozesse nötig. In gradientschwachen Situationen ist das Zusammenströmen von thermischen Windsystemen (Tal- und Hangwinden) über Bergen der wichtigste Hebungsprozess. Bei trockenem Boden werden die Unterschiede in Feuchtigkeit und (potenzieller) Temperatur zwischen Gebirge und Flachland geringer. Die wichtigste Hypothese besagt also, dass thermische Windsysteme bei trockener Vorgeschichte (1) schwächer werden und (2) auch weniger Feuchtigkeit zu den primären Entstehungsorten von Gewittern transportieren. Im Umkehrschluss würde eine feuchte Vorgeschichte die thermischen Windsysteme verstärken und den Feuchtigkeitstransport erhöhen. Ob und wie stark sich dieser Effekt tatsächlich in den Experimenten abbildet, muss allerdings erst untersucht werden.
- Die Bodenfeuchte-Experimente EXP4 („oben trocken, unten feucht“) und EXP5 („oben feucht, unten trocken“) liegen in ihrem Verhalten zwischen dem Referenzlauf und dem feuchten Experiment EXP3, oft jedoch näher an letzterem. Der Umstand, dass beide – insgesamt eher akademische – Bodenkonfigurationen das Konvektionspotenzial der Atmosphäre systematisch zu erhöhen scheinen, ist einigermäßen überraschend und auf die Schnelle noch nicht erklärbar.

Erkenntnisse

Anfängliche Änderungen der Bodenfeuchte beeinflussen das Ergebnis der AROME-Kurzfristprognosen an den untersuchten gradientschwachen Tagen. Ist der Boden bereits hinreichend angefeuchtet, so führt eine weitere Anfeuchtung zu keinen signifikanten Änderungen in der Prognose. Auch eine oberflächliche Abtrocknung wird durch den Wassertransport im Boden sehr rasch kompensiert. Wird der Boden zu Beginn des Modelllaufes hingegen radikal ausgetrocknet (bis in tiefe Schichten), so zeigt sich ein positiver Effekt für die Niederschlagsprognosegüte. Die Konvektion wird durch diesen Eingriff tendenziell leicht abgeschwächt, was sich positiv auf den Modellbias tagsüber auswirkt. Es ist jedoch kein einziger Fall aufgetreten, in dem die Konvektion durch diese Abtrocknung gänzlich unterbunden worden wäre.

Die Konvektionsparameter und auch die resultierenden konvektiven Niederschläge zeigen einen erheblichen Einfluss der Bodenfeuchte auf nachfolgende Konvektion im Flachland, während in den Zentralalpen kaum Unterschiede erkennbar sind. Daraus lässt sich eine Neigung der Atmosphäre herauslesen, dass sich im Flachland sowohl trockene als auch feuchte Perioden speziell während gradientschwacher Wetterlagen selbst verstärken und verlängern können, solange die Großwetterlage diesem Umstand nicht aktiv entgegentritt. Die hohe Sensitivität legt auch nahe, dass eine möglichst gute Kenntnis des Bodenfeuchtezustandes über den gesamten Bodenhorizont eine Schlüsselrolle für die Vorhersagbarkeit von Konvektion spielen könnte. Wie diese Kenntnis im Sweetspot Indikator berücksichtigt werden kann, ist jedoch noch nicht hinreichend geklärt, besonders in Hinblick auf Satellitenmessungen, die nur die oberflächennahe Bodenfeuchte messen können.

Ausblick auf PWS18

Der Versuchsaufbau beinhaltet einige diskussionswürdige Punkte, die im Rahmen von PWS18 beantwortet werden könnten:

- Die Bodenfeuchte wird geändert, die eng damit im Zusammenhang stehende Bodentemperatur wird jedoch nicht verändert, wodurch sich zu Beginn der Experimente ein Ungleichgewicht zwischen diesen beiden prognostischen Größen ergibt. Eine mögliche Lösung ist die Verwendung der Bodenassimilationssoftware, die eine physikalisch abgestimmte Änderung mehrerer Parameter erlaubt.
- Alle Experimente werden um 00UTC mit denselben Eingangsdaten initialisiert (abgesehen von der Bodenfeuchte). Die Unterschiede im Boden und der Atmosphäre am Ende des Vorhersagezeitraumes werden in der nachfolgenden Prognose also nicht berücksichtigt. Alternativ dazu könnte man die einzelnen Experimente cyclen und damit längerfristige Änderungen im Modell untersuchen. Das wäre speziell in Hinblick auf längere Trockenperioden und „feed-forward“-Prozesse von Interesse.
- In den Experimenten ist nur 1 Patch pro Gitterbox verwendet worden, wodurch der Effekt von Verdunstung vom Boden vs. Transpiration durch Pflanzen nur bedingt untersucht werden kann.

Theoretisch sind bis zu 19 verschiedene Patches möglich, dazu sind aber technische Verbesserungen nötig.

- Speziell für den Bodensee, aber auch für andere Seen, sollte die Oberflächentemperatur akkurater initialisiert werden.

Darüber hinaus bietet sich auch noch eine Vertiefung des Einflusses der Bodenfeuchte auf Konvektion auf inhaltlicher Ebene an:

- Einteilung der Domäne in Naturräume (z.B. nördliches Alpenvorland, Nordalpen, Zentralalpen, Südalpen, südliches Alpenvorland, östliches Flachland), Zusammenfassung der untersuchten Größen über die Fläche dieser Naturräume, Prüfung der Unterschiede auf statistische Signifikanz
- Untersuchung der Unterschiede der thermischen Windsysteme in den verschiedenen Experimenten und Erklärung ihres Einflusses auf die räumlichen und zeitlichen Unterschiede in der Auslösung von Konvektion (Beginn des Niederschlages)
- Spezieller Einblick in Tage mit besonders ausgeprägten oder von der Gesamtheit abweichenden Unterschieden zwischen trockenen und feuchten Experimenten (z.B. Plotten von Vertikalprofilen der Temperatur und Feuchte oder des Tagesganges von Konvektionsparametern)
- Einbettung der Resultate in einen wissenschaftlichen Zusammenhang, Publikation der wichtigsten Ergebnisse in einem Fachjournal