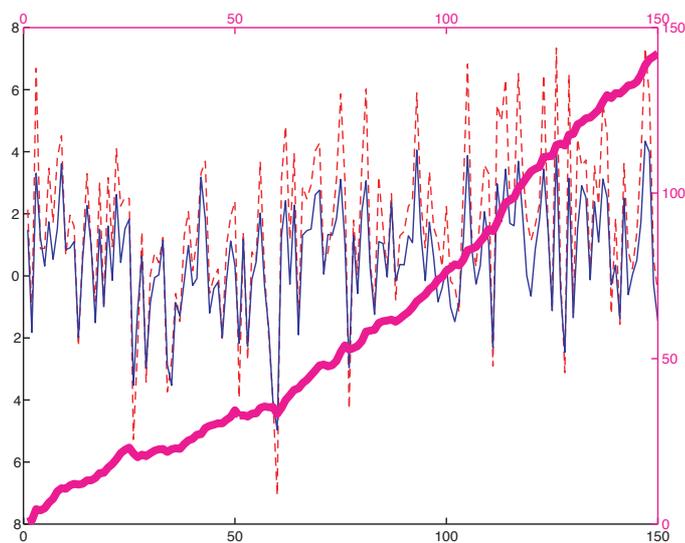


**Prädiktorsensitives Downscaling
gekoppelt mit Wettergeneratoren:
saisonale und tägliche CC-Szenarien
in komplex strukturiertem Gelände**



Autoren:
C. Matulla
P. Haas

**Prädiktorsensitives Downscaling
gekoppelt mit Wettergeneratoren:
saisonale und tägliche CC-Szenarien
in komplex strukturiertem Gelände**

Autoren:

C. Matulla

*(Institut für Meteorologie und
Physik, Universität für Boden-
kultur, Wien, Österreich, und
Institut für Küstenforschung,
GKSS, Geesthacht, Deutschland)*

P. Haas

*(Institut für Meteorologie und
Physik, Universität für Boden-
kultur, Wien, Österreich)*

Die Berichte der GKSS werden kostenlos abgegeben.
The delivery of the GKSS reports is free of charge.

Anforderungen/Requests:

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH
Bibliothek/Library
Postfach 11 60
D-21494 Geesthacht
Germany
Fax.: (49) 04152/871717

Als Manuskript vervielfältigt.
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor.

ISSN 0344-9629

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH · Telefon (04152)87-0
Max-Planck-Straße · D-21502 Geesthacht/Postfach 11 60 · D-21494 Geesthacht

Prädiktorsensitives Downscaling gekoppelt mit Wettergeneratoren: saisonale und tägliche CC-Szenarien in komplex strukturiertem Gelände

Christoph Matulla, Patrick Haas

63 Seiten mit 28 Abbildungen und 11 Tabellen

Zusammenfassung

Empirisches Downscaling basiert auf der Ableitung von statistischen Beziehungen zwischen Beobachtungen auf verschieden hoch aufgelösten Skalen. Es hat seine Wurzeln in der Synoptik, die aus dem großskaligen Zustand der Atmosphäre auf das regionale Wettergeschehen schließt.

Da in mittleren Breiten das Witterungsgeschehen stark von den Jahreszeiten abhängig ist, wird jede Saison gesondert betrachtet. In den letzten Jahren hat der Ansatz, auch räumlich zu unterscheiden, Verbreitung gefunden (Woth 2001). In dieser Studie wird sowohl saisonal als auch räumlich unterschieden.

Darüberhinaus werden verschiedene Prädiktorkombinationen, die in den Validierungsexperimenten eine befriedigende Leistung zeigen, gewählt, um für zwei mit ECHAM4/OPYC3 realisierte IPCC-Szenarien Ensembles von lokalen Szenarien zu erzeugen.

Diese Strategie wird am Beispiel zweier IS92a (IPCC 1996)-Szenarien demonstriert. Output dieser Studie sind besonders feuchte/trockene bzw. heisse/kühle lokale Realisierungen beider Szenarien auf Monats- und Tagesbasis.

Predictor-optimized downscaling combined with weather generators: seasonal and daily climate change scenarios for topographically complex regions

Abstract

Empirical downscaling is based on statistically derived relationships between observations on different scales. It has its roots in synoptic climatology, which relies on the relationships of local scale weather to large scale atmospheric processes.

Mid latitudes' weather depends on the seasons, hence, empirical downscaling has to be conducted for each season separately. In recent years spatial distinction was also introduced and discussed (Woth 2001). In this study we account for both.

Moreover we investigate the effect of different predictor combinations, performing equally well in the validation experiments. Thus, from each considered large scale scenario, we gain an ensemble of local scale scenarios.

This strategy is demonstrated for two IS92a (IPCC 1996) scenarios and results in eight local scale scenarios: for each of the large scale scenarios, realized by ECHAM4/OPYC3, we extract a wet/dry and hot/cold realization on the local scale. From the eight monthly local scenarios we produce four scenarios on a daily basis by means of weather generators.

Manuskripteingang in TDB: 15. September 2003

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einführung | 7 |
| 2 | Daten | 9 |
| 2.1 | Lokale Daten | 9 |
| 2.1.1 | Niederschlag | 9 |
| 2.1.2 | Temperatur | 12 |
| 2.2 | Großräumige Atmosphärendaten | 14 |
| 2.2.1 | Reanalysedaten | 14 |
| 2.2.2 | Szenariodaten | 14 |
| 3 | Methoden | 15 |
| 3.1 | Kanonische Korrelationsanalyse | 15 |
| 3.2 | Erzeugung von Tagesdaten mit LARS-WG | 16 |
| 4 | Strategie | 21 |
| 5 | Saisonale Niederschlagsszenarien | 23 |
| 5.1 | Einteilung in Niederschlagsregionen | 23 |
| 5.2 | Bewertung der Prädiktorfelder in der CCA | 24 |
| 5.3 | Bewertung der Leistungssteigerung durch die Regionalisierung | 27 |
| 5.4 | Generierung der lokalen, saisonalen IS92a GHG-Szenarien | 30 |
| 5.5 | Synopsis | 33 |
| 5.6 | Interpretation der CCA-Muster | 34 |
| 5.7 | Lokalskalige, saisonale IS92a GHG+ars-Szenarien | 39 |
| 6 | Saisonale Temperaturszenarien | 41 |
| 6.1 | Einteilung in Temperaturregionen | 41 |
| 6.2 | Bewertung der Prädiktorfelder in der CCA | 41 |
| 6.3 | Lokalskalige, saisonale IS92a GHG[+ars]-Szenarien | 42 |
| 7 | Tägliche Niederschlags- und Temperaturszenarien | 46 |
| 7.1 | Temperatur | 47 |
| 7.2 | Niederschlag | 50 |
| 8 | Diskussion und Ausblick | 54 |

1 Einführung

Globale Zirkulationsmodelle (GCMs) sind in der Klimaforschung zum wichtigsten Instrument geworden um mögliche Auswirkungen menschlichen Handelns (vor allem durch die Veränderung der Atmosphärenzusammensetzung) auf das Klimasystem realitätsnah abzuschätzen. Diese Modelle liefern Schätzungen, die auf kontinentaler Skala und für Zeitspannen von einigen Jahrzehnten interpretiert werden sollten. Bisher ist es nicht möglich für längere Perioden (einige Jahrzehnte) mit solchen Modellen direkt auf hochaufgelöste (regionale und lokale) Skalen zu schließen.

Der Begriff 'Downscaling' fasst Verfahren, die grobskalige GCM-Ergebnisse konsistent mit regionaler Information verbinden, zusammen. Dabei setzt man voraus, dass dieser Zusammenhang mit Hilfe von großskaligen Prädiktoren und regionalskaligen Prädiktanden formuliert werden kann.

Das bedeutet, dass der regionale Zustand der Atmosphäre von deren großräumiger Entwicklung gesteuert wird. Grob werden zwei Zugänge unterschieden:

Dynamisches Downscaling orientiert sich an den bekannten physikalischen Prozessen der Atmosphäre. Die Idee besteht darin, die GCM-Resultate dynamisch konsistent auf einer hoch aufgelösten Skala zu simulieren. Dies kann durch Weiterverarbeitung des GCM-Outputs mit einem 'Limited Area'-Modell (LAM) erreicht werden. Dabei fungiert der GCM-Output als zeitabhängiger Antrieb für das LAM. Mit einem LAM gelingt die Erfassung von kleineren, unter der GCM-Skala liegenden Prozessen (Giorgi 1990; Giorgi et al. 1994).

Empirisches/statistisches Downscaling bedient sich vorhandener Datenreihen auf der GCM-Skala und der Skala, die aufgelöst werden soll. Die Reihen werden zueinander in Beziehung gesetzt und mit statistischen Methoden wird entweder ein deterministischer oder ein stochastischer Zusammenhang zwischen ihnen abgeleitet. Dieser ermöglicht es, in Abhängigkeit von den großskaligen Variablen, den Zustand der lokalskaligen Variablen zu schätzen. Als Beispiel kann die Erfahrung eines Prognostikers dienen, die es ihm gestattet, aus dem großskaligen Zustand der Atmosphäre auf das regionale Wettergeschehen zu schließen.

Beide Formen des Downscaling hängen kritisch von der Fähigkeit der GCMs ab, das großskalige Klimageschehen richtig wiederzugeben. Statistische Verfahren sind, wie schon erwähnt, einfach, benötigen wenig Computerressourcen und kein detailliertes Wissen über die Beschaffenheit des Untergrunds. Einen Überblick über Downscaling findet man etwa in IPCC (2001) oder (Matulla et al. 2003).

Notwendige Voraussetzungen, auf denen das empirisch/statistische Downscaling beruht, sind:

1. Die gewählten Prädiktoren steuern die regionale Variabilität des Klimas und werden vom GCM realistisch beschrieben.
2. Die Klimaänderung wird im Wesentlichen von den Prädiktoren erfasst.
3. Der Zusammenhang zwischen den Skalen behält auch unter geänderten Klimabedingungen seine Gültigkeit.

In dieser Arbeit wird die kanonische Korrelationsanalyse (CCA) verwendet um aus den mit dem ECHAM4/OPYC3-Klimamodell (Roeckner et al. 1996) realisierten IS92a Szenarien auf Monatsbasis lokalskalige Temperatur- und Niederschlagsszenarien zu generieren. Diese werden dann mit Hilfe von Wettergeneratoren auf Tagesbasis gebracht.

Wettergeneratoren modellieren die statistischen Eigenschaften von Variablen, die die lokale Variabilität des Klimas widerspiegeln.

Der Nutzen von Wettergeneratoren begründet sich in der Tatsache, dass beliebig lange Zeitreihen erzeugt und Tagesdaten generiert werden können. Beide Punkte sind wichtig für Simulationen in der Hydrologie (Pickering et al. 1988) in der Ökologie (Kittel et al. 1995) in agrarwirtschaftlichen Anwendungen (Semenov and Porter (1999), Mearns et al. (1997)) und in der Klimafolgenforschung im Allgemeinen (Semenov and Barrow 1997). Hierbei sind vor allem in der Risikoabschätzung räumlich und zeitlich hochaufgelöste Daten notwendig. Dies kann mit einem Wettergenerator mit sehr einfachen Mitteln bewerkstelligt werden.

Es gibt zwei verschiedene Typen von Wettergeneratoren. Jene, die zur Simulation aufeinanderfolgender Zustände eine Markov-Kette verwenden (Richardson 1981; Hughes et al. 1999; Charles et al. 1999) und solche, welche die Verweilzeit verwenden (Racksko et al. 1991; Wilks 1999). Bei der Markov-Kette sind die Übergänge zwischen den Zuständen voneinander unabhängig. Die konstanten Übergangswahrscheinlichkeiten hängen nur vom aktuellen und dem folgenden Zustand ab. Vergleiche zwischen den Methoden findet man etwa in Semenov et al. (1998) oder Wilks and Wilby (1999). Eine Variante beim Einsatz von Wettergeneratoren zum statistischen Downscaling besteht darin, die Parameter der Wettergeneratoren vom großskaligen Zustand der Atmosphäre steuern zu lassen und derart den lokalskaligen Zustand zu beeinflussen (Wilby et al. 1998; Charles et al. 1999).

Wir unterscheiden bei unserem Zugang zwischen (i) verschiedenen homogenen Niederschlagsregionen in Österreich und (ii) den Saisonen innerhalb des Jahreszyklus. Darüberhinaus lassen wir eine große Zahl von Prädiktoren zur Konkurrenz zu, von denen wir einige zum Generieren der Szenarien verwenden. Daher können wir auf der lokalen Skala Ensembles von Szenarien erzeugen, aus denen wir besonders feuchte/trockene bzw. kühle/heiße Realisierungen auswählen und diskutieren. Insgesamt erzeugen wir somit acht extreme lokalskalige Szenarien (vier für jedes IS92a-Szenario) auf Monats- und auf Tagesbasis.

2 Daten

2.1 Lokale Daten

In dieser Studie werden auf der lokalen Skala sowohl Monats- wie Tagesdaten verwendet. Die monatlich vorliegenden Daten werden für die Kalibrierung der CCA, die täglichen zur Kalibrierung der Wettergeneratoren verwendet. Die CCA bewerkstelligt den Übergang zwischen den räumlichen Skalen (GCM→Stationen), die Wettergeneratoren den Übergang von Monatswerten auf Tageswerte.

Um Schätzungen der möglichen, lokalskaligen Veränderungen von Temperatur und Niederschlag zu erhalten, verwenden wir die CCA und Wettergeneratoren, die an den Beobachtungen kalibriert worden sind. Die CCA erzeugt aus den GCM-Realisierungen der IPCC-Szenarien verschiedene lokalskalige Szenarien auf Monatsbasis. Diese stehen einerseits für sich und können andererseits als Input für die Wettergeneratoren verwendet werden, die lokalskalige Schätzungen auf Tagesbasis liefern.

Dieses Konzept wird für jede Klimaregion und jede Saison separat durchgeführt und benötigt die folgenden Inputdaten:

2.1.1 Niederschlag

Monatsdaten

Für diese Studie haben wir Stationsdaten für die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts (1948–1998) aus dem auf Monatsbasis vorliegenden ALOCLIM-Datensatz (Auer et al. 2001; Böhm et al. 2001) der österreichischen Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) herausgegriffen. ALOCLIM ist ein homogenisierter Stationsdatensatz der eine lange Zeitspanne (z.T. 1767–2000) umfasst und bei dessen Erstellung auch Stationen aus den Nachbarländern verwendet wurden. Somit ist eine gleichbleibende Qualität der Daten, unabhängig vom Längen- und Breitengrad (also auch in Grenznähe), gewährleistet.

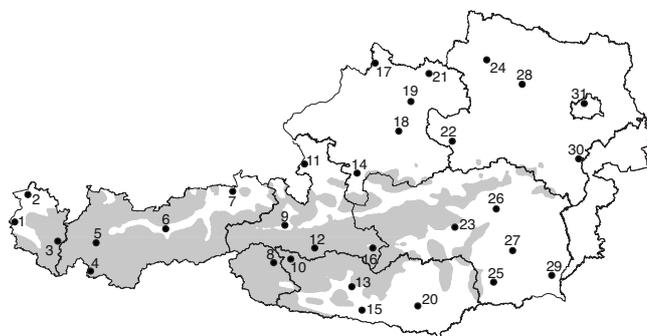


Abbildung 1: Stationen des ALOCLIM-Niederschlags-Datensatzes. Graue Flächen deuten Regionen über 1200 m an. (Die Auflösung ist 25km×25km.)

Tagesdaten

Auch die Tagesdaten sind uns von der ZAMG zur Verfügung gestellt worden. Sie umfassen 132 Stationen mit mehr oder weniger vollständigen Reihen von mittlerer, maximaler und minimaler Temperatur, Niederschlag und Strahlung sowie anderer hier nicht verwendeter Größen. Diese Daten sind nicht homogenisiert und wurden daher auf Monatsbasis eingehend mit den homogenisierten verglichen. Die Prozedur des Homogenisierens, die zur Erzeugung der Niederschlagssummen im ALOCLIM-Datensatz angewendet wurde (Böhm et al. 2001), führt oft auf kleine Unterschiede zu den aus den Tagesdaten gewonnenen Monatssummen für den Niederschlag. Treten aber zu große Abweichungen zwischen den Niederschlagssummen auf, dann betrachten wir die Tageswerte dieser Monate als ungeeignet, und sie finden in dieser Studie keine Verwendung.

Ein Beispiel für Abweichungen der aus Tagesdaten gewonnenen Monatssummen von den homogenisierten Monatssummen ist in Abbildung 2 zu sehen. In Landeck gibt es eine Periode schlechter Übereinstimmung (siehe Abbildung 2, rechts), während in Zell (links) nur einzelne Werte abweichen.

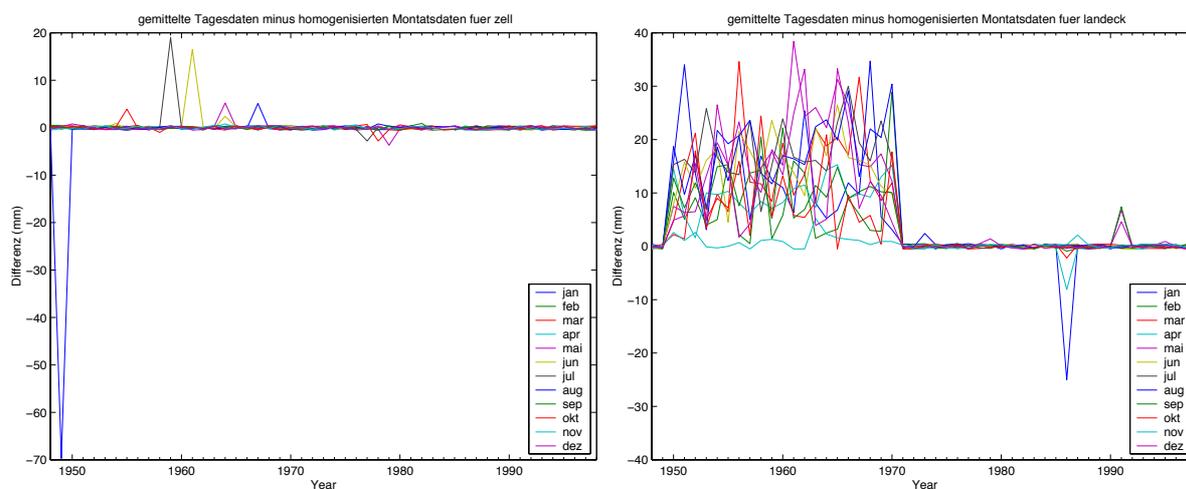


Abbildung 2: Differenz zwischen homogenisierten Niederschlagssummen und aus den Tagesdaten gewonnene Monatssummen für Zell am See (links) und Landeck (rechts). Jede Farbe steht für einen Monat.

Tabelle 2.1.1 listet die Stationen auf, an denen Niederschlagsdaten auf Monats- bzw. Tagesbasis vorliegen und die in diese Studie Eingang finden. Neben dem Stationsnamen ist die Länge und Breite sowie die Höhe über NN angegeben. Die letzten beiden Spalten geben Auskunft darüber, ob an der Station Monats- und/oder Tageswerte verwendet werden.

Tabelle 1: In dieser Arbeit verwendete Stationen, deren östl. Länge, nördl. Breite und Höhe über NN. Die Nummer in der ersten Spalte entspricht der Nummer in den folgenden Abbildungen.

| Nr. | Stationsname | lon. [°] | lat. [°] | alt. [m] | Monat | Tag |
|-----|----------------------|----------|----------|----------|-------|-----|
| 01. | FELDKIRCH | 9.60 | 47.27 | 439 | X | X |
| 02. | BREGENZ | 9.75 | 47.50 | 436 | X | X |
| 03. | LANGEN | 10.12 | 47.13 | 1270 | X | |
| 04. | NAUDERS | 10.50 | 46.90 | 1360 | X | |
| 05. | LANDECK | 10.57 | 47.13 | 818 | X | |
| 06. | INNSBRUCK-UNIVERSITY | 11.38 | 47.26 | 577 | X | X |
| 07. | KUFSTEIN | 12.16 | 47.57 | 492 | X | X |
| 08. | KALS | 12.65 | 47.00 | 1347 | X | |
| 09. | ZELL-AM-SEE | 12.78 | 47.30 | 753 | X | X |
| 10. | HEILIGENBLUT | 12.85 | 47.03 | 1242 | X | |
| 11. | SALZBURG-AIRPORT | 13.00 | 47.80 | 430 | X | X |
| 12. | BAD-GASTEIN | 13.13 | 47.12 | 1100 | X | X |
| 13. | MILLSTATT | 13.56 | 46.81 | 792 | X | |
| 14. | BAD-ISCHL | 13.63 | 47.72 | 469 | X | X |
| 15. | BAD-BLEIBERG | 13.68 | 46.62 | 904 | X | |
| 16. | TAMSWEG | 13.81 | 47.12 | 1012 | X | |
| 17. | KOLLERSCHLAG | 13.84 | 48.61 | 725 | X | |
| 18. | KREMSMUENSTER | 14.13 | 48.06 | 383 | X | X |
| 19. | LINZ | 14.19 | 48.24 | 298 | X | X |
| 20. | KLAGENFURT | 14.33 | 46.65 | 447 | X | X |
| 21. | FREISTADT | 14.50 | 48.52 | 548 | X | X |
| 22. | WAIDHOFEN/YBBS | 14.77 | 47.97 | 365 | X | X |
| 23. | SECKAU | 14.78 | 47.28 | 874 | X | |
| 24. | STIFT-ZWETTL | 15.20 | 48.62 | 506 | X | X |
| 25. | DEUTSCHLANDSBERG | 15.22 | 46.83 | 410 | X | |
| 26. | BRUCK-MUR | 15.27 | 47.42 | 489 | X | |
| 27. | GRAZ-UNIVERSITY | 15.45 | 47.08 | 366 | X | X |
| 28. | KREMS | 15.60 | 48.42 | 223 | X | |
| 29. | BAD-GLEICHENBERG | 15.90 | 46.87 | 303 | X | X |
| 30. | WIENER-NEUSTADT | 16.27 | 47.80 | 270 | X | |
| 31. | WIEN-HOHE-WARTE | 16.36 | 48.25 | 203 | X | X |

2.1.2 Temperatur

Monatsdaten

Auch für die Temperatur gibt es in ALOCLIM einen homogenen Datensatz. Dieser liegt zum Teil für andere Stationen vor als der Niederschlagsdatensatz. Dieser Umstand ist allerdings für diese Studie unbedeutend, da wir den Niederschlag unabhängig von der Temperatur downscalen. Wir betrachten aber natürlich dieselbe Periode (1948–1998).

Tagesdaten

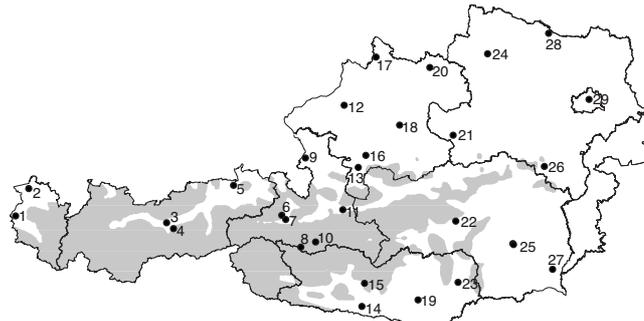


Abbildung 3: Stationen des ALOCLIM-Temperatur-Datensatzes. Graue Flächen deuten Regionen über 1200 m an. (Die Auflösung ist 25km×25km.)

Bei der Temperatur sind die Abweichungen zwischen den homogenisierten Monatsmitteln und den aus Tageswerten generierten Mittelwerten (siehe Abbildung 4) viel gleichmäßiger verteilt als beim Niederschlag. Dennoch sieht man in manchen Fällen deutlich eine Stufe (z.B. Patscherkofel 1967, Abbildung 4, rechts), die durch das Homogenisierungsverfahren verursacht wird. Da die Tagesdaten für die Kalibrierung der LARS-WG verwendet werden und dieser nur relativ kurze Perioden benötigt (Minimum ist ein Jahr, siehe Kap. 3.2), ist es möglich, Perioden größerer Differenzen wegzulassen.

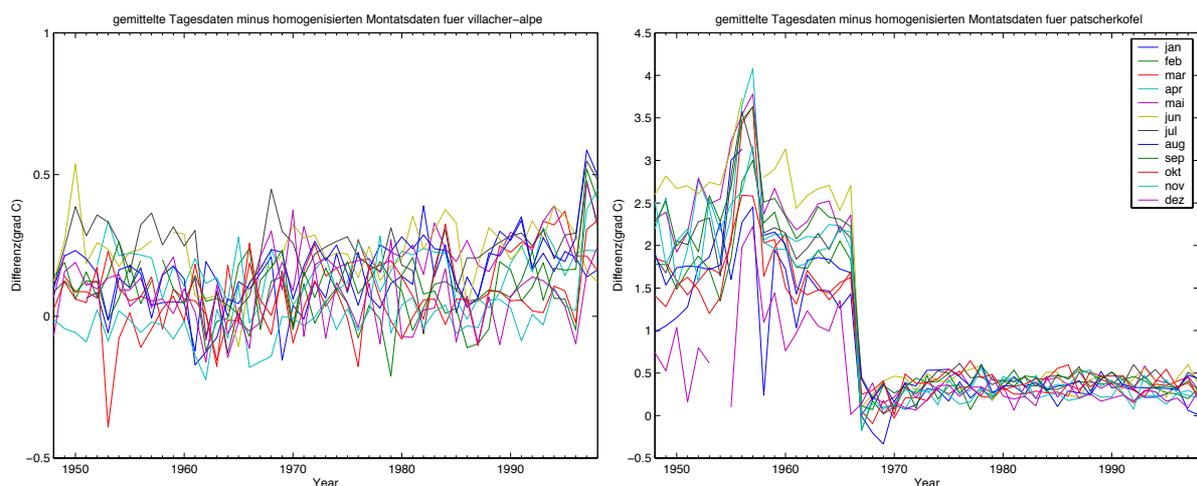


Abbildung 4: Differenz zwischen homogenisierten Temperatur–Monatsmitteln und Monatsmitteln, gewonnen aus den Tagesdaten für die Station Villacher-Alpe (links) und Patscherkofel (rechts). Jede Farbe steht für einen Monat. (Die Legende ist in der rechten Abbildung.)

Tabelle 2.1.2 listet die in dieser Studie verwendeten Stationen auf, für die Temperaturdaten vorliegen. Der Aufbau folgt Tabelle 2.1.1.

Tabelle 2: In dieser Arbeit verwendete Stationen für die Temperatur, deren östl. Längen, nördl. Breite, und Höhe über NN.

| Nr. | Stationsname | lon. [°] | lat. [°] | alt. [m] | Monat | Tag |
|-----|----------------------|----------|----------|----------|-------|-----|
| 01. | FELDKIRCH | 9.60 | 47.27 | 439 | X | X |
| 02. | BREGENZ | 9.75 | 47.50 | 436 | X | X |
| 03. | INNSBRUCK-UNIVERSITY | 11.38 | 47.26 | 577 | X | X |
| 04. | PATSCHERKOFEL | 11.46 | 47.21 | 2247 | X | |
| 05. | KUFSTEIN | 12.16 | 47.57 | 492 | X | X |
| 06. | SCHMITTENHÖHE | 12.73 | 47.33 | 1964 | X | |
| 07. | ZELL-AM-SEE | 12.78 | 47.30 | 753 | X | X |
| 08. | SONNBLICK | 12.96 | 47.06 | 3105 | X | |
| 09. | SALZBURG-AIRPORT | 13.00 | 47.80 | 430 | X | X |
| 10. | BAD-GASTEIN | 13.13 | 47.12 | 1100 | X | X |
| 11. | RADSTADT | 13.45 | 47.38 | 845 | X | |
| 12. | RIED | 13.48 | 48.22 | 435 | X | |
| 13. | BAD-ISCHL | 13.63 | 47.72 | 469 | X | X |
| 14. | VILLACHER-ALPE | 13.67 | 46.60 | 2140 | X | |
| 15. | RADENTHEIN | 13.70 | 46.78 | 685 | X | |
| 16. | FEUERKOGEL | 13.73 | 47.82 | 1618 | X | |
| 17. | KOLLERSCHLAG | 13.84 | 48.61 | 725 | X | X |
| 18. | KREMSMUENSTER | 14.13 | 48.06 | 383 | X | X |
| 19. | KLAGENFURT | 14.33 | 46.65 | 447 | X | X |
| 20. | FREISTADT | 14.50 | 48.52 | 548 | X | X |
| 21. | WAIDHOFEN/YBBS | 14.77 | 47.97 | 365 | X | X |
| 22. | SECKAU | 14.78 | 47.28 | 874 | X | |
| 23. | ST.ANDRAE | 14.80 | 46.78 | 468 | X | |
| 24. | STIFT-ZWETTL | 15.20 | 48.62 | 506 | X | X |
| 25. | GRAZ-UNIVERSITY | 15.45 | 47.08 | 366 | X | X |
| 26. | REICHENAU | 15.85 | 47.70 | 485 | X | |
| 27. | BAD-GLEICHENBERG | 15.90 | 46.87 | 303 | X | X |
| 28. | RETZ | 15.95 | 48.77 | 242 | X | |
| 29. | WIEN-HOHE-WARTE | 16.36 | 48.25 | 203 | X | X |

2.2 Großräumige Atmosphärendaten

2.2.1 Reanalysedaten

Zur Modellbildung werden auf der GCM-Skala Temperatur, relative und spezifische Feuchte, geopotentielle Höhe, meridionale und zonale Windkomponente, sowie daraus abgeleitet, Vorticity und Divergenz auf vier Druckflächen (200, 500, 700 und 850 hPa) herangezogen. Die Daten werden aus dem NCEP/NCAR-Reanalyse-Datensatz (Kalnay et al. 1996) extrahiert. Da das Klima des Alpenraumes stark von den Prozessen über dem nordatlantisch-europäischen Sektor bestimmt ist (Wanner et al. 1997), wird der geographische Ausschnitt von 50°W bis 30°E und von 35°N bis 65°N betrachtet. Die Untersuchungsperiode umfasst die Jahre 1948–1998.

2.2.2 Szenariodaten

IS92a GHG:

Von 1860 bis 1990 wird die Treibhausgaskonzentration (GHG-forcing) im Modell entsprechend den beobachteten Konzentrationszunahmen allmählich erhöht. Von 1990 bis 2100 werden dem Modell die Treibhausgaskonzentrationen nach dem IS92a-Emissionsszenario (IPCC 1992) vorgegeben. Bei den Fluorchlorkohlenwasserstoffen und einigen weiteren 'industrial gases' wurde ein update durchgeführt (IPCC 1996).

IS92a GHG+ars:

Es wird nicht nur die Treibhausgaskonzentration der Atmosphäre vorgegeben, sondern auch direkt der von den Sulphat-Aerosolen induzierte Effekt auf die Strahlung. Entsprechendes wurde von 1860–1990 nach den historischen Konzentrationen und von 1990 bis 2049 nach den Schwefelemissionen des IS92a-Szenarios durchgeführt.

Die Prädiktorfelder mit denen die kleinräumigen Szenarien geschätzt werden, stammen aus den IS92a-ECHAM4/-OPYC3 (Roeckner et al. 1996) Szenarioläufen des deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ). Sie liegen horizontal mit einer Auflösung von rund $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$ und vertikal auf 19 Schichten vor. Welche Prädiktoren für welche Saison und Region in Österreich betrachtet werden, hängt von der Leistung der entsprechenden (NCEP/NCAR-)Kombination in den Validierungsexperimenten ab.

Drei Modellläufe werden benutzt: der 300jährige Kontrolllauf, bei dem die Treibhausgaskonzentrationen auf dem Niveau von 1990 festgehalten werden, die beiden Experimente, die nach den oben beschriebenen IPCC-Szenarien vom DKRZ gerechnet wurden.

3 Methoden

3.1 Kanonische Korrelationsanalyse

Die kanonische Korrelationsanalyse (CCA) hat weite Verbreitung in der Meteorologie gefunden. Insbesondere in der Klimaforschung wird sie zum Downscaling von klassischen meteorologischen Größen wie Temperatur oder Niederschlag (von Storch et al. 1993; Gyalistras et al. 1994; Busuioc and von Storch 1996) verwendet, findet aber auch bei anderen Größen wie beispielsweise Phänologischen Phasen (Maak and von Storch 1997; Matulla et al. 2003) Anwendung.

Die kanonische Korrelationsanalyse wurde von Hotelling (1936) erstmals beschrieben und ist ein lineares Verfahren, das charakteristische Variabilitätsmuster zueinander in Beziehung setzt. Sie ist so konstruiert, dass sie sukzessive jene Muster auswählt, deren Zeitreihen maximal korreliert sind. In der vorliegenden Arbeit wird die CCA in den EOF-Räumen, der GCM-Skala und der lokalen Skala durchgeführt. Das Signal ist also bereits vom Rauschen getrennt ehe man mit der CCA beginnt. Damit schränkt man die CCA auf Prozesse ein, deren Amplitude vergleichsweise groß ist, und verhindert, dass sie Pärchen kanonischer Muster auszeichnet, die von kleiner Amplitude sind bzw. die das Rauschen beschreiben. Eine ausführliche Darstellung der Methode findet man etwa in von Storch and Zwiers (1999).

3.2 Erzeugung von Tagesdaten mit LARS–WG

LARS–WG (Long Ashton Research Station Weather Generator) ist ein weit verbreiteter stochastischer Wettergenerator zur Simulation von täglichen Wettergrößen. Der LARS-WG ist ein frei erhältliches Softwarepaket:

(<http://www.iacr.bbsrc.ac.uk/mas-models/larswg.html>)

Wir halten ihn für einfach zu bedienen und ausreichend dokumentiert. Zur Kalibration reicht bereits ein Jahr an Tagesdaten, es werden aber 20 bis 30 Jahre empfohlen. Der LARS-WG stellt synthetische Datenreihen für einzelne Stationen her, die nicht miteinander gekoppelt sind. LARS-WG kann an Zeitreihen verschiedenster Länge, die den gegenwärtigen Klimazustand beschreiben, gekoppelt werden. Es ist aber auch möglich, Zeitreihen von downgescalten Ergebnissen eines Klimamodells (in dieser Studie: ECHAM4/OPYC3) zu verwenden und so ein synthetisches Wetter, einem bestimmten Szenario (in dieser Studie: IS92A GHG[+ars]) entsprechend, zu generieren. Referenzen für Anwendungen und Beschreibungen des LARS-WG sind etwa Racksko et al. (1991), Semenov and Barrow (1997), Semenov et al. (1998) und Semenov and Porter (1999).

Das synthetische Wetter ist beim LARS–WG anhand folgender Parameter charakterisiert:

- Niederschlagsereignis (ja/nein),
- Niederschlagsmenge.
- Maximumtemperatur,
- Minimumtemperatur,
- Strahlung.

Der LARS-WG verbindet aufeinanderfolgende Tage an denen es jeweils regnet bzw. nicht regnet zu feuchten bzw. trockenen Serien. Diese Serien bilden zusammen mit ihren semi-empirischen Verteilungen, die aus Beobachtungsdaten bestimmt werden, die Grundlage. Zur Ermittlung der semi-empirischen Verteilung werden die Serien jeweils in 10 Intervalle eingeteilt und die Häufigkeit des Auftretens ermittelt. Aus den semi-empirischen Verteilungen werden die Längen der trockenen/feuchten Serien und die Strahlung ermittelt.

Ein Beispiel für eine solche, aus Beobachtungsdaten ermittelte semi-empirische Verteilung ist in Abbildung 5 dargestellt. Auf der Abszisse sind die Serien der feuchten Tage d.h. die Anzahl der aufeinander folgenden Regentage, aufgetragen. Da die Einteilung in 10 Intervalle erfolgt, sind die hinteren Intervalle etwas größer. Auf der Ordinate ist die Häufigkeit des

Auftretens dieser feuchten Serien in den Januar-Monaten des Zeitraums 1948–1998 zu sehen. Somit erkennt man, dass ein einzelner feuchter Tag ungefähr 200 mal in den Januar-Monaten des Zeitraumes 1948–1998 aufgetreten ist. Da insgesamt in der Periode 1581 Januar-Tage vorliegen, sieht man dass ungefähr jeder achte Tag zu einer Serie, wo es nur an einem Tag feucht war, gehört.

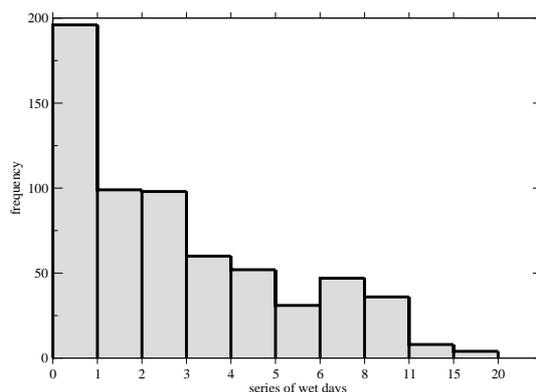


Abbildung 5: Beispiel einer semi-empirischen Verteilung generiert aus dem Beobachtungsdatensatz. Dargestellt ist die Verteilung der feuchten Serien für den Januar für die Station Wien.

Mit Hilfe dieser Verteilungen werden nun die Zufallszahlen für das synthetische Wetter generiert. Dazu werden Zufallszahlen entsprechend den Verteilungen gezogen. So wird garantiert, dass die gewonnenen Werte derselben Statistik gehorchen.

Die Minimum- und Maximumtemperaturen werden mit einem anderen Verfahren erzeugt, das über das bisher geschilderte hinausgeht. Je nachdem, ob ein feuchter oder trockener Tag vorliegt, werden Mittelwert und Standardabweichung der Temperatur durch eine unterschiedliche Verteilung bestimmt. Die saisonalen Zyklen von Mittelwert und Standardabweichung der Temperatur werden mit finiten Fourierreihen der Ordnung 3 und die Residuen der Temperatur werden dann durch eine Normalverteilung simuliert. Ein vereinfachtes Flussdiagramm von LARS-WG ist in Abb. 6 dargestellt. Hierbei ist anzumerken, dass sich der Tageszustand (ob trocken oder feucht) aus der Serie ergibt, die zu Beginn mittels der semi-empirischen Verteilungen bestimmt werden. Daher ergeben sich in weiterer Folge stets zwei Verteilungen für die weiteren Parameter: die t-Verteilung ist die, die bei trockenen Tagen verwendet wird und die f-Verteilung jene, die bei feuchten Tagen zur Bestimmung der weiteren Größen verwendet wird.

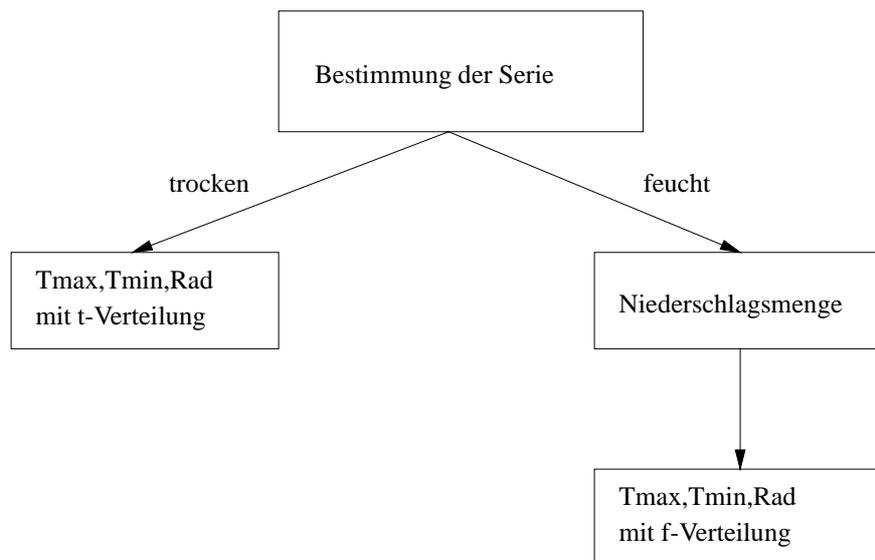


Abbildung 6: Flussdiagramm zur Erzeugung des synthetischen Wetters in LARS-WG.

Folgende Schritte können mit LARS-WG ausgeführt werden:

- Analyse der Daten,
- verschiedene statistische Tests,
- Generator – Erzeugung von synthetischem Wetter analog zum gegenwärtigen oder zu einem Szenario.

Abbildung 7 zeigt einen Überblick über LARS-WG und die Zusammenhänge von den Eingangsdaten bis hin zu den resultierenden Tagesdaten an synthetischem Wetter.

Im Folgenden wird nun dieser Vorgang vereinfacht dargestellt. Die Erzeugung von synthetischen Wetterdaten analog zu einem Beobachtungsdatensatz (linke Seite in Abbildung 7) geschieht in folgenden Schritten: Aus den Beobachtungsdaten werden monatliche Daten (Mittelwerte und Standardabweichungen) für alle Monate berechnet. Weiterhin werden die semi-empirischen Verteilungen für alle Monate ermittelt. Darauf wird nun der LARS-WG angewendet und man erhält als Resultat die synthetischen Zeitreihen. Tagesdaten von synthetischem Wetter analog zu einem Szenario entspricht die rechte Seite in der Abbildung 7. Hier werden die vorhandenen Parameter von LARS-WG abgeändert. Dazu werden die Mittelwerte und Standardabweichungen und die semi-empirischen Verteilungen mit Faktoren multipliziert, die sich aus dem Verhältnis von altem zu neuen Werten (Beobachtungsdaten zu Werten aus dem Szenario) ergeben. Somit hat man einen neuen Satz an Parametern und kann wieder den WG betreiben und erhält die synthetischen Daten mit einer dem Szenario entsprechenden Statistik. Der LARS-WG benötigt für die Generierung der Szenarien eigentlich auch Tagesdaten

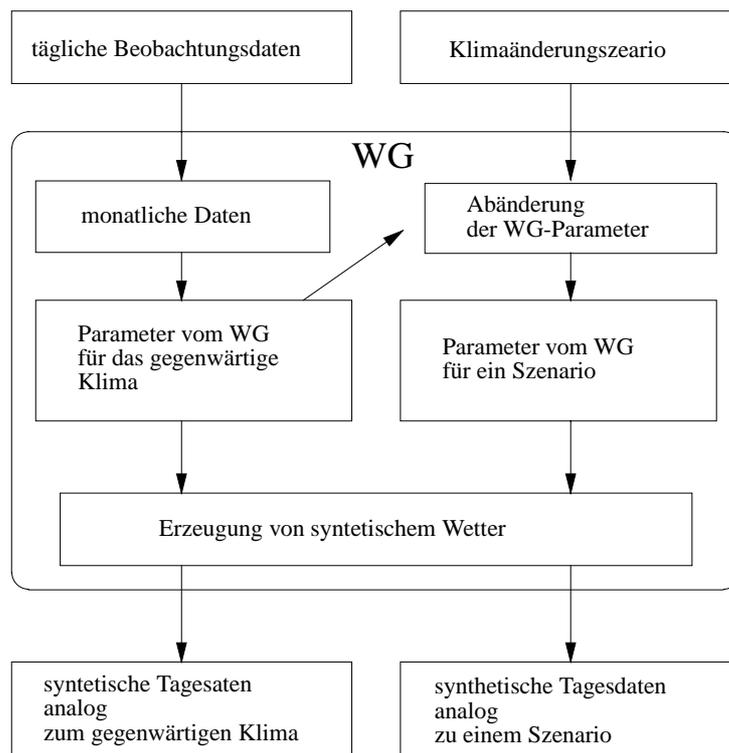


Abbildung 7: Übersicht über die Generierung von synthetischen Tagesdaten mit LARS-WG.

zur Kalibrierung. Wir haben unsere Arbeit aber auf Monatsdaten aufgebaut und wollen zur Erzeugung von Tagesdaten nicht wieder Tagesdaten verwenden. Daher war an dieser Stelle eine Änderung der Vorgehensweise erforderlich. Wir haben die von uns verwendeten Größen (Temperatur und Niederschlag) entsprechend den Szenarien, die in dieser Arbeit mit Hilfe von empirischem Downscaling erzeugt werden, verändert. Die restlichen Parameter – das sind die Länge der Serien und die Strahlung – haben wir belassen, wie sie aus der Eichung resultieren. Das ergibt natürlich eine Zusammensetzung von veränderten und belassenen Parametern und bedarf sicherlich noch weiterer Untersuchungen und Sensitivitätstests zur Beantwortung der Frage, wie sehr die Ergebnisse dadurch beeinflusst werden. Unter der Vorgabe, keine Szenarios auf Tagesbasis verwenden zu wollen, ist dies unserer Ansicht nach der einfachste Ansatz, um zu einer synthetischen Tages-Datenserie zu kommen. Die Ergebnisse, die später gezeigt werden, scheinen diesen Zugang zuzulassen.

Der LARS-WG benötigt, um seine Parameter bestimmen zu können, ganze Jahre. Die einzelnen Jahre müssen aber nicht zusammenhängen, weil der LARS-WG auch das jeweilige Datum zu den Daten erfasst und fehlende Daten geeignet behandelt. So ist es möglich, Jahre mit schlechter Datenqualität wegzulassen. Neben Daten geringer Qualität gibt es an einigen Stationen auch fehlende Daten. Tabelle 3.2 gibt eine Übersicht über die Tage, an denen kein Niederschlagswert vorliegt. Dabei ist zu beachten, dass der gesamte Zeitraum 18628 Tage

Tabelle 3: Stationen zusammen mit der Anzahl der Tage ohne Niederschlagswert. Insgesamt sind 18628 Tage in der Periode enthalten.

| Station | Anzahl | Station | Anzahl |
|--------------|--------|------------------|--------|
| Feldkirch | 0 | Kollerschlag | 0 |
| Bregenz | 0 | Kremsmuenster | 0 |
| Langen | 1888 | Linz | 14 |
| Nauders | 5845 | Klagenfurt | 0 |
| Landeck | 0 | Freistadt | 0 |
| Innsbruck | 0 | Waidhofen | 273 |
| Kufstein | 1 | Seckau | 3500 |
| Kals | 5085 | Zwettl | 79 |
| Zell | 193 | Deutschlandsberg | 4749 |
| Heiligenblut | 11502 | Bruck | 123 |
| Salzburg | 0 | Graz | 0 |
| Gastein | 212 | Krems | 30 |
| Millstadt | 9215 | Gleichenberg | 335 |
| Ischl | 305 | Wiener_Neustadt | 1736 |
| Bad_Bleiberg | 6210 | Wien | 0 |
| Tamsweg | 488 | | |

umfasst. Für Nauders, der Station mit den zweitmeisten fehlenden Daten, sind daher immer noch Daten für ungefähr 20 Jahre vorhanden, also genug für LARS-WG.

Wir haben für alle Stationen Ergebnisse produziert, zeigen aber, der Übersichtlichkeit wegen, in dieser Arbeit nur Stationen, an denen keine Fehlwerte auftreten.

4 Strategie

Bisher wurden 'empirisches Downscaling' und die in dieser Arbeit verwendeten Daten erläutert.

Der nun folgende Teil behandelt den Schwerpunkt unserer Arbeit: Die Saisonal- und Regional- und 'Prädiktor-sensitive' Erzeugung von Szenarien für Temperatur und Niederschlag auf Monats- und Tagesbasis.

Dazu stützen wir uns auf die Resultate von Matulla et al. (2003). In dieser Arbeit werden, auf Basis der hier verwendeten lokalen Daten, mit verschiedenen multivariaten Methoden homogene Niederschlagsregionen für Sommer und Winter in Österreich bestimmt.

Für jede dieser Regionen und jede Jahreszeit kalibrieren wir CCA-Modelle, die in Validierungsexperimenten bewertet werden. Dabei lassen wir eine große Zahl von Prädiktor-kombinationen (siehe atmosphärische Daten) zur Konkurrenz zu. Großskalige Felder, die eine ähnlich gute Leistung in den Experimenten aufweisen, werden herangezogen um lokalskalierte Reaktionen auf die großräumigen Szenarien zu schätzen. Wir erhalten so Ensembles von Schätzungen und Verteilungen, die den möglichen Temperatur- und Niederschlagswandel charakterisieren.

Die anschließenden Abschnitte sind wie folgt gegliedert: Der Niederschlag wird in Kapitel 5 behandelt. Dabei steht die Präsentation der verwendeten homogenen Regionen am Beginn. Dann wird die Strategie zur Bewertung der Prädiktoren vorgestellt und deren Ergebnisse ausführlich diskutiert. Abschnitt 5.3 befasst sich mit der Rechtfertigung für das Verwenden der Regionen. Sie erfolgt auf Grund des Nachweises einer Leistungssteigerung der CCA-Modelle. Auf diesen Resultaten aufbauend führen wir das Downscaling für das IS92a GHG-Szenario durch und schätzen die mögliche Bandbreite der Realisierungen ab. Wir greifen in Abhängigkeit von Saison und Region ein 'feuchtes' und ein 'trockenes' lokales Szenario heraus und stellen so zwei lokale IS92a GHG-Szenarien für Österreich in der ersten Hälfte des 21.Jh. her. Der Wandel wird durch den Vergleich mit der zweiten Hälfte des 20.Jh. in Abschnitt 5.4 veranschaulicht und diskutiert. Einige kanonische Muster, die im Zusammenhang mit dem Wandel stehen, werden mit ihren dazugehörigen lokalskaligen Mustern in Abschnitt 5.6 gezeigt und interpretiert. Dann erfolgt das Downscaling des IS92a GHG+arsSzenario.

Bei der Temperatur (Kapitel 6) halten wir uns an den obigen Ablauf. Zu Beginn stellen wir wieder die Regionen vor. Es wird aber nicht auf die Rechtfertigung der, hier heuristischen, Regionalisierung eingegangen. Wieder werden die Prädiktoren in Validierungsexperimenten beurteilt. Mit Prädiktoren, die zufriedenstellende Leistung zeigen, wird das Downscaling in

Abschnitt 6.3 durchgeführt und aus den Realisierungen ein 'heisses' und ein 'kaltes' Szenario herausgegriffen. Dies geschieht wieder für beide IS92a GHG[+ars]Szenarien. Insgesamt stehen am Ende acht extreme, lokalskalige IS92a GHG[+ars]Szenarien auf Monatsbasis für die Wettergeneratoren zur Verfügung.

In Kapitel 7 erfolgt die Erzeugung der Tagesdaten mit LARS-WG auf der Basis dieser acht IS92a GHG[+ars]Szenarien. Im Gegensatz zur CCA kann dabei die Temperatur und der Niederschlag nicht voneinander getrennt betrachtet werden, da diese beim Wettergenerator voneinander abhängen (siehe Kapitel 3.2). Somit werden aus den acht Szenarien vier Kombinationen gebildet. Es werden jeweils 'feuchte' mit 'kalten' und 'trockene' mit 'warmen' kombiniert.

Diese Zusammensetzung ist durch die Korrelation dieser Größen motiviert, die vor allem im Sommer stark ist. Prinzipiell könnte man natürlich auch andere Kombinationen bilden. Der LARS-WG wird nun verwendet, um für den Zeitraum 2000 bis 2050 für Temperatur und Niederschlag Tagesdaten zu generieren.

Tabelle 4: Die kombinierten Szenarien zur Generierung der Tagesdaten.

| | | | |
|------------|------|---------|---------------|
| Szenario 1 | kalt | feucht | IS92a GHG |
| Szenario 2 | warm | trocken | IS92a GHG |
| Szenario 3 | kalt | feucht | IS92a GHG+ars |
| Szenario 4 | warm | trocken | IS92a GHG+ars |

5 Saisonale Niederschlagszenarien

5.1 Einteilung in Niederschlagsregionen

Es gibt verschiedene Gründe, eine Regionalisierung von Niederschlagsdaten zu betreiben. Solche sind etwa: das Studium vergangener Klimaschwankungen, das Design von Stationsnetzen, das Testen von NWP- und Klimamodellen oder der Einsatz im Downscaling. Wir befassen uns mit der Leistung der Regionalisierung im Hinblick auf Downscaling und beurteilen sie in einer konkreten Anwendung. Ein wesentlicher Aspekt in der Klimaforschung besteht im Erfassen von klimarelevanten Phänomenen, die Veränderungen unterworfen sind, sowie deren Wechselspiel. Dabei muss zwischen dem *Signal*, in dem sich das interessierende Phänomen realisiert, und dem *Rauschen*, unterschieden werden. Ob dies möglich ist hängt in entscheidendem Maße vom Verhältnis zwischen Signal und Rauschen ab. Statistische Methoden verfolgen i.allg. das Ziel, das Signal vom Rauschen zu trennen. Dazu kann die Regionalisierung durch geschicktes Aufteilen des Datenmaterials beitragen.

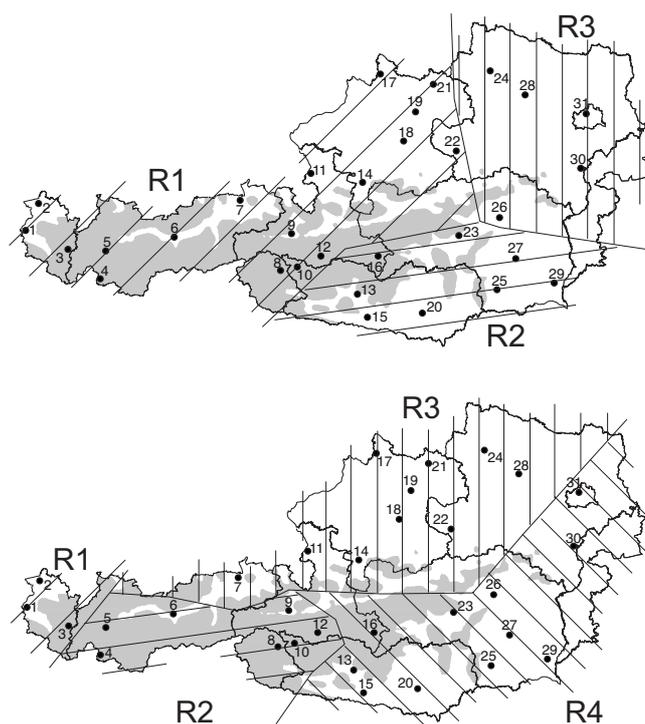


Abbildung 8: Regionen, die in dieser Studie (*oberes Bild*) im Winter (DJF) und in den Übergangssaisonen (MAM, SON) verwendet werden (*oberes Bild*). Das untere Bild zeigt die Regionen, die während der Sommermonate verwendet werden.

Bei der Definition der Niederschlagsregionen haben wir uns an Matulla, Penlap, Haas, and Formayer (2003) orientiert. Für den Winter (DJF) und die Übergangssaisonen (MAM, SON) werden stets die gleichen drei Regionen betrachtet, im Sommer (JJA) vier.

5.2 Bewertung der Prädiktorfelder in der CCA

In diesem Abschnitt wird das Verfahren zur Bestimmung der Prädiktorfelder, die den Niederschlag auf Monatsbasis forcieren, beschrieben. Lässt man alle Prädiktorfelder zu, ergeben sich einige hundert Kombinationen. Ziel ist, jene Kombinationen von Prädiktorfeldern zu finden, die besonders gut die beobachteten Zeitreihen der Niederschlagssummen an den Stationen wiedergeben.

Diese Fähigkeit wird mit drei 'split-sample tests' – siehe Tabelle 5 untersucht. Dabei wird die gesamte Periode, in der Beobachtungen auf beiden Skalen vorliegen, in zwei Teile geteilt. In einem Teil werden die Modellparameter an die Beobachtungen angepasst (Kalibrierung), im anderen Teil werden die großskaligen Beobachtungen als Prädiktoren ins 'gefittete' Modell gesteckt und mit ihnen die lokalen Beobachtungen geschätzt. Schließlich vergleichen wir die Schätzungen mit den tatsächlichen Beobachtungen (Validierung).

Die Güte der Schätzungen wird mit Hilfe der Korrelation r zwischen den beiden Reihen (der geschätzten und der beobachteten) auf dem 95 % Signifikanzniveau quantifiziert. Ist auf diesem Niveau Signifikanz gegeben, wird das Bestimmtheitsmaß r^2 berechnet. Weiterhin wird der relative und absolute Fehler evaluiert und geprüft, ob die Schätzungen die Beobachtung übertreffen oder darunterliegen. Diese Fehlermaße werden für jede Saison und Region bestimmt. Die Gewichtsfunktion mit der die Leistung der Prädiktorfelder bestimmt werden, lautet:

$$L = r^2(A) * sig(A) + 1.4 * r^2(B) * sig(B) + 1.4 * r^2(C) * sig(C) \quad (1)$$

A, B, C stehen für die verschiedenen 'split-sample-tests' (siehe Tabelle 5). sig ist der Prozentsatz an Stationen, an denen eine signifikante Korrelation erreicht wird. Die Experimente B und C sind mit 1.4 gewichtet, da sie gegenüber A die Leistung der Modelle in einer unabhängigen Periode zeigen.

Tabelle 5: Validierungsexperimente.

| exp | fit.-per. | val.-per. |
|-----|-----------|-----------|
| A | 1948–1998 | 1948–1998 |
| B | 1948–1978 | 1979–1998 |
| C | 1968–1998 | 1948–1967 |

Abbildung 9 zeigt in Diagrammen die Leistung aller CCA-Modelle für jede Saison und jede Region. Die Figuren in den vier Spalten repräsentieren die Saisonen (von links nach rechts: DJF, MAM, JJA, SON), die Zeilen die Experimente (erste: A, zweite: B, dritte: C). Im Sommer (JJA) wählen wir vier Regionen, sonst drei. Auf der x-Achse sind die Prädiktorkombinationen dargestellt, auf der y-Achse die Gewichtsfunktion (Formel 1).

exper.: 1

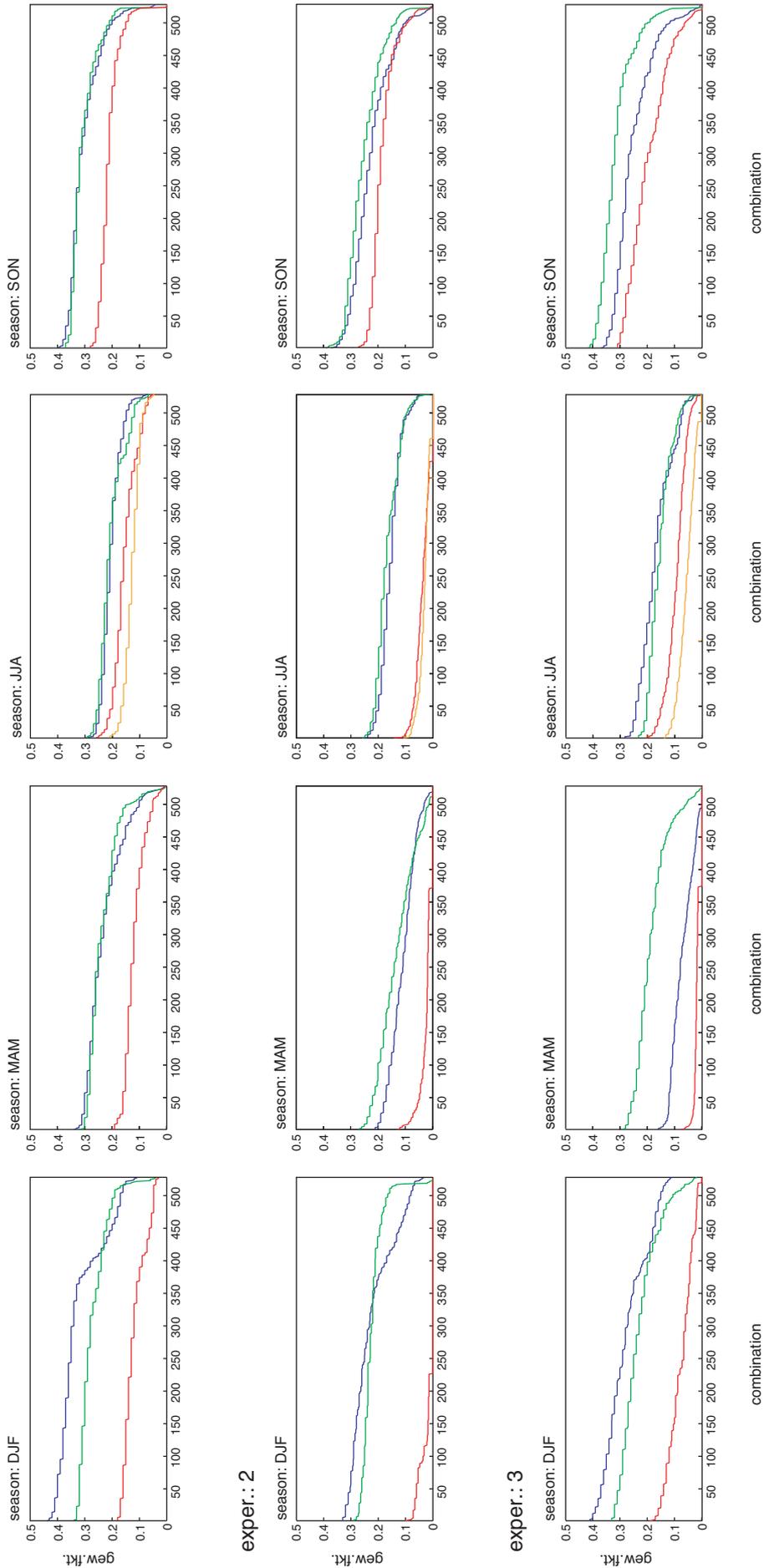


Abbildung 9: Leistung der CCA-Modelle in den Validierungsexperimenten (Tabelle 5) in Abhängigkeit von Jahreszeit und Region.

blue=R1, green=R2, red=R3, yellow=R4

Die auffälligsten Merkmale sind:

- (i) in den Saisonen DJF, MAM und SON zeigen die CCA-Modelle in den Regionen 1 und 2 eine ähnliche Leistung. Das ist auch im Sommer (JJA) so, allerdings beschreiben in dieser Saison die Regionen 1 und 2 ein etwas anderes Gebiet von Österreich;
- (ii) die Leistung fällt erst gegen Ende deutlich ab. Das könnte auf die physikalische Konsistenz des Assimilationsmodells zurückzuführen sein.
- (iii) Niederschlagsschätzungen in der Region im Osten sind von geringer Güte innerhalb der CCA – im Vergleich zur MLR sind sie aber gut;
- (iv) die Leistungen in den Saisonen DJF und SON sind höher als jene in MAM und JJA. Im Sommer rechtfertigt die Leistung zum Teil nicht die Berechnung von Szenarien. Dennoch werden wir der Vollständigkeit halber die Resultate zeigen.

In Matulla et al. (2002) haben wir die Multiple Lineare Regression (MLR) herangezogen, um an rund 11.000 Erhebungspunkten der österreichischen Waldinventur Szenarien für Niederschlag und Temperatur in der ersten Hälfte des 21. Jhd. zu erzeugen. Dabei wurden 'split-sample-tests' durchgeführt, die in etwa den hier durchgeführten entsprechen. Ein nicht systematischer Vergleich (Matulla 2003) der Leistung der MLR mit der CCA zeigt, dass die CCA der MLR in Matulla et al. (2002) überlegen ist. Auch bei Eintrittsterminen von Phänologiephasen und der Temperatur als lokalskalige Prädiktanden sind die Ergebnisse der CCA besser als die der MLR (Matulla et al. 2003). Ein detaillierter Vergleich der Methoden findet sich in Matulla (2003) wo sich auch die oben erwähnten Fehlermaße für die interessierenden Kombinationen finden lassen. Tabelle 6 enthält jene Prädiktorkombinationen, die für die weiteren Betrachtungen herangezogen werden. Bei der Auswahl wird darauf geachtet, dass die Kombinationen in den Experimenten eine gute Leistung erbringen und sowohl eine thermodynamische wie auch eine dynamische Komponente enthalten.

Tabelle 6: gewählte Prädiktorkombinationen. Die Abkürzungen sind in Tabelle 12 im Anhang erläutert.

| sea. | reg. | pred-com.1 | pred-com.2 | pred-com.3 | pred-com.4 |
|------|------|------------|------------|------------|------------|
| DJF | R1 | spch5wrot5 | spch7wrot5 | relh5wrot5 | relh5wrot2 |
| | R2 | spch5vwnd2 | spch8vwnd2 | spch7vwnd7 | spch5vwnd5 |
| | R3 | relh7wrot2 | relh7vwnd2 | relh5wrot2 | spch5vwnd2 |
| MAM | R1 | relh7uwnd8 | relh8gpht7 | spch5uwnd8 | spch5gpht7 |
| | R2 | relh8vwnd5 | relh8vwnd7 | spch7vwnd7 | spch7vwnd5 |
| | R2 | relh5vwnd5 | relh5vwnd2 | spch5vwnd5 | spch5vwnd8 |
| JJA | R1 | relh7wdiv2 | relh7vwnd5 | relh8wdiv2 | spch5gpht5 |
| | R2 | relh7wdiv2 | relh8wdiv2 | spch5wdiv2 | relh7wrot5 |
| | R3 | relh7wdiv2 | relh7wrot5 | relh7uwnd8 | spch8wrot8 |
| | R4 | relh8wdiv2 | relh8wdiv5 | relh8wdiv7 | spch5wdiv2 |
| SON | R1 | relh7gpht5 | relh5wrot5 | spch8uwnd5 | spch8gpht7 |
| | R2 | relh8wrot5 | relh8wdiv2 | spch8wrot5 | spch8wrot2 |
| | R3 | relh8vwnd5 | relh8wdiv2 | spch5vwnd2 | spch5wdiv8 |

5.3 Bewertung der Leistungssteigerung durch die Regionalisierung

Es scheint auf den ersten Blick recht einfach, den Nutzen der Regionalisierung zu quantifizieren. Die Idee beruht darauf, die Leistung in den Regionen zu betrachten. Einmal mit den auf diese Regionen gefitteten Modellen und einmal mit Modellen, die die homogenen Niederschlagsregionen nicht berücksichtigen. Ist die Leistung im ersten Fall besser, lohnt sich die Regionalisierung.

Kann es sein, dass sich die Regionalisierung nicht lohnt? Falls eine der CCA- vorge-schaltete EOF-Analyse den lokalen Raum ohnehin in geeigneter Weise zerlegt, rechtfertigt der Gewinn der Regionalisierung vermutlich ihren Aufwand nicht.

Bei der konkreten Umsetzung der Idee treten aber Fragestellungen auf, deren Beantwortung nicht trivial ist. Eine solche ist etwa die Frage nach der Dimension des Raumes, der das lokale Signal beschreibt. Wir haben stets folgendes Kriterium benutzt, um die Dimension des Raumes festzulegen: Es soll 85 % der Varianz erklärt werden – jedoch darf die Zahl der EOFs nicht 40 % der Mächtigkeit der vollen Basis übersteigen. Dieses Prinzip wird der Hauptkomponentenanalyse (PCA) gerecht, da sie a priori in der Beschreibung der beobachteten Feldvarianz optimal ist und eine effiziente Datenreduktion gestattet.

Die Regionalisierung teilt den Raum des lokalen Signals in Unterräume. Dabei wird die vorliegende Information in Teilmengen geteilt. Diese 'Faktorisierung' der Information führt auf Räume geringerer Dimension als der Raum des lokalen Signals. Innerhalb dieser kann u.U. das von uns aufgestellte Kriterium (s.o.) kontraproduktiv werden, d.h. es kann dazu führen, dass der CCA lokalskalig zu niedrigdimensionale Räume zur Verfügung stehen.

Für das folgende Experiment haben wir die maximale Zahl an Freiheitsgraden für die CCA-Modellbildung vom für die Regionalisierung gefitteten Modell bestimmen lassen. Extremstes Beispiel dazu ist die Region 1 im Sommer. Sie besteht aus 3 Stationen. Daher ist lokal nur ein EOF (33 % der Mächtigkeit der vollen Basis) wegen des oben erwähnten Kriteriums zugelassen. Mit anderen Worten, auf der lokalen Skala hat die CCA (egal ob nach vorheriger Regionalisierung oder nicht) nur einen Freiheitsgrad. Weiterhin haben wir aus Platzgründen nicht alle in Tabelle 6 angegebenen Kombinationen durchgespielt, sondern uns auf die folgenden, in Tabelle 7 aufgelisteten Kombinationen, beschränkt. Die Resultate des Experiments sind auf den folgenden Seiten in Abbildung 10 und in Tabelle 8 dargestellt. Die Tabelle beschreibt die Ergebnisse regionsweise, die Abbildung zeigt die Ergebnisse für jede Station.

Hätten wir stets (also für jede Saison und Region und für jeden 'split-sample'-test) die Prädiktorkombination herangezogen, die das beste Resultat liefert, sollte immer die CCA mit vorheriger Regionalisierung eine bessere Leistung zeigen.

Wir haben aber (i) bei der Wahl der Kombinationen darauf geachtet, sowohl eine dynamische wie eine thermodynamische Größe miteinander zu verbinden und (ii) die Leistung in den

Tabelle 7: Prädiktorkombinationen für das Experiment zur Untersuchung der verwendeten regionsabhängigen CCA-Modelle gegenüber einem CCA-Modell für ganz Österreich. TOT steht für ganz Österreich ohne Regionalisierung.

| Saison | R1 | R2 | R3 | R4 | TOT |
|--------|------------|------------|------------|------------|------------|
| DJF | spch5wrot5 | spch5vwnd2 | relh7vwnd2 | / | relh5wrot5 |
| MAM | relh7uwnd8 | spch7vwnd5 | relh5vwnd5 | / | relh5gpht7 |
| JJA | relh7wdiv2 | relh7wdiv2 | relh7wdiv2 | relh8wdiv2 | relh7wrot5 |
| SON | relh7gpht5 | spch8wrot5 | relh8vwnd5 | / | relh8gpht5 |

drei Setups (siehe Tabelle 5) nach Formel 1 bewertet. Daher kann es sein, dass in Einzelfällen die Leistung der CCA ohne vorhergehende Regionalisierung höher ist. In der Regel gewinnen aber die Modelle durch die Regionalisierung dennoch an Leistung.

Tabelle 8: Ein Beispiel für die Leistung von in dieser Studie verwendeten regionsabhängigen CCA-Modellen gegenüber einem CCA-Modell für ganz Österreich. linke/rechte Spalten unter den Regionen: mit/ohne Regionalisierung.

| Exp. | Saison | R1 | | R2 | | R3 | | R4 | |
|------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| A | DJF | 0.42 | 0.42 | 0.33 | 0.30 | 0.16 | 0.12 | / | / |
| | MAM | 0.31 | 0.32 | 0.30 | 0.23 | 0.14 | 0.10 | / | / |
| | JJA | 0.28 | 0.24 | 0.28 | 0.23 | 0.24 | 0.22 | 0.20 | 0.15 |
| | SON | 0.38 | 0.37 | 0.37 | 0.32 | 0.25 | 0.23 | / | / |
| B | DJF | 0.27 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.07 | 0.02 | / | / |
| | MAM | 0.21 | 0.14 | 0.21 | 0.13 | 0.13 | 0.05 | / | / |
| | JJA | 0.24 | 0.24 | 0.23 | 0.21 | 0.15 | 0.14 | 0.09 | 0.06 |
| | SON | 0.31 | 0.27 | 0.30 | 0.27 | 0.21 | 0.20 | / | / |
| C | DJF | 0.40 | 0.36 | 0.29 | 0.29 | 0.15 | 0.13 | / | / |
| | MAM | 0.12 | 0.15 | 0.20 | 0.17 | 0.02 | 0.05 | / | / |
| | JJA | 0.26 | 0.24 | 0.23 | 0.20 | 0.13 | 0.13 | 0.12 | 0.03 |
| | SON | 0.33 | 0.32 | 0.38 | 0.37 | 0.30 | 0.26 | / | / |

Abbildung 10: In der ersten Zeile ist Experiment A gezeigt. Die zweite enthält B, die dritte C. In den Spalten sind die Saisonen angeordnet (erste: DJF, ..., vierte: SON). Auf der x-Achse der Teilabbildungen sind die Stationen aufgelistet: 1 bezeichnet die westlichste, 31 die östlichste Station. Auf der Ordinate ist das Bestimmtheitsmaß aufgetragen. Auf dem 95 %-Niveau nicht-signifikante Korrelationen sind nicht dargestellt. Es kann daher an manchen Stationen nur ein, oder auch kein Symbol stehen. * steht für die Modelle ohne Regionalisierung, o für solche, die auf Regionalisierung basieren. Im Winter kann man keine eindeutige Dominanz der auf der Regionalisierung basierenden Modelle erkennen. Dieser Umstand könnte auf die 'geordneten' synoptik-skaligen Prozesse während dieser Jahreszeit hindeuten. In den anderen Saisonen scheint die Regionalisierung (zum Teil deutliche) Vorteile zu bringen und ihr Einsatz ist daher berechtigt.

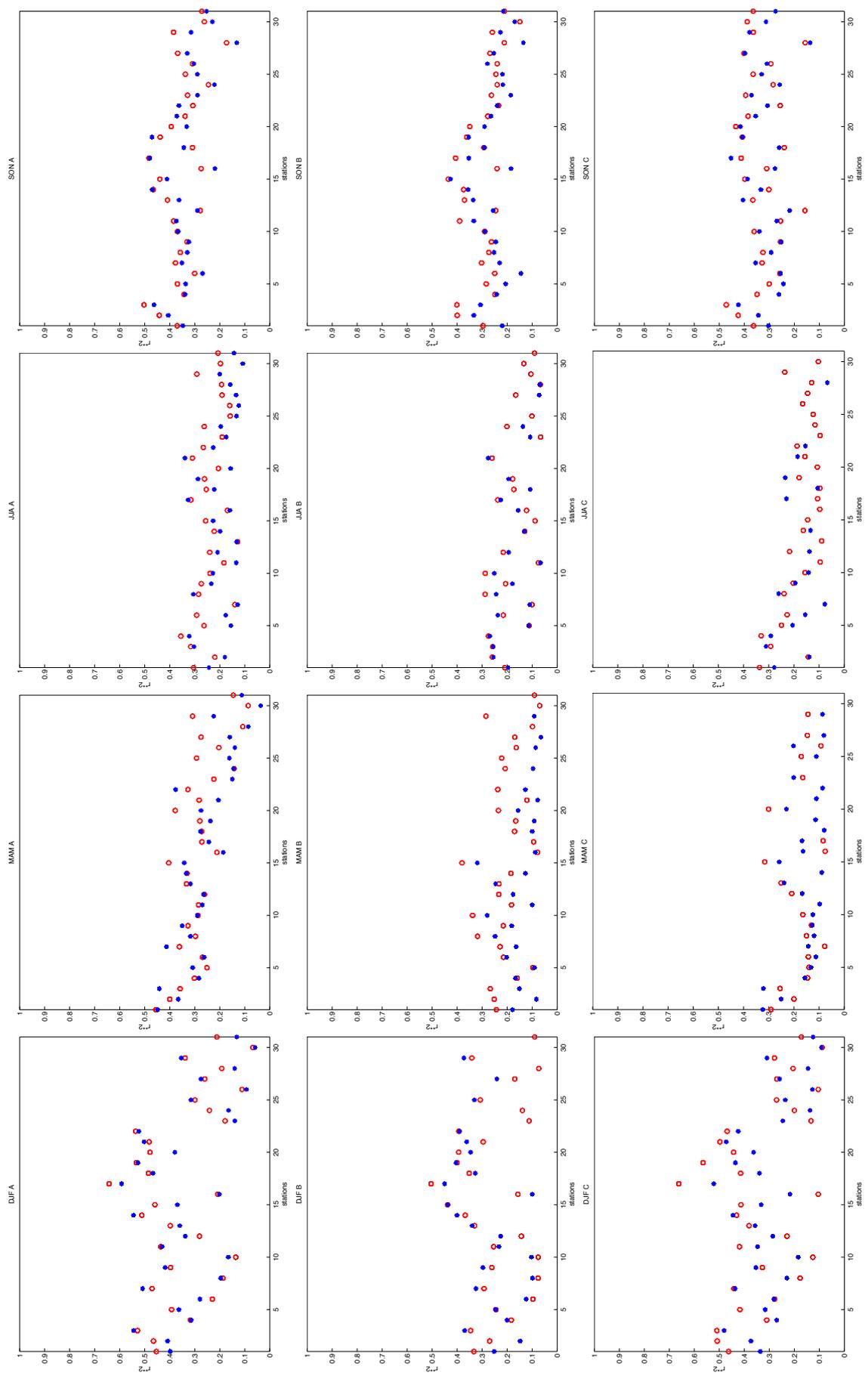


Abbildung 10: Leistungssteigerung durch Regionalisierung vor der CCA-Modellbildung. rot/Kreise: Modelle mit Regionalisierung, blau/Sterne: Modelle ohne Regionalisierung.

5.4 Generierung der lokalen, saisonalen IS92a GHG-Szenarien

Wir haben uns einerseits aufgrund der Leistung und andererseits, weil wir an Kombinationen, die eine thermodynamische wie auch eine dynamische Komponente enthalten, interessiert sind, für die in Tabelle 6 gezeigten Prädiktorkombinationen entschieden. Diese Prädiktorfelder werden nun aus den ECHAM4/OPYC3-Szenarioläufen und dem Kontrollexperiment extrahiert und dazu verwendet, die großskaligen Anomalien zu bilden. Die lokalskalige Reaktion auf das großskalige Szenario wird geschätzt, indem man die aus den Beobachtungen gewonnenen lokalskaligen CCA-Muster mit dem Anteil, mit dem das großskalige Pendant in den Szenarioanomalien repräsentiert ist und dem kanonischen Korrelationskoeffizienten wichtet und aufsummiert. Wegen der verschiedenen Prädiktorkombinationen in den Regionen (Tabelle 6) ergeben sich 4^{13} Möglichkeiten, *ein* Jahr aus vier Saisonen zusammenzustellen. Diese Zahl wächst weiter, wenn wir auf Monatsbasis arbeiten und noch weiter, wenn wir jedes Jahr z.B. von 2000 bis 2050 einzeln (unabhängig von den andern Jahren) zusammenbauen wollen. Wir wollen uns hier auf die Zusammenstellung eines Jahres auf saisonaler Basis beschränken.

Um der damit verbundenen Vielfalt gerecht werden zu können, haben wir alle, von der Wahl der Prädiktorkombination (siehe pred-com. – in der Tabelle 6) abhängigen, lokalen Reaktionen bestimmt. Als mögliche, lokale Reaktion betrachten wir die Differenz zwischen den mittleren saisonalen Niederschlagssummen der Perioden 1948–1998 und 2000–2050, d.h. wir stellen die Ergebnisse für jede Saison und innerhalb dieser für jede Region alle Realisierungen (hier 4 = Anzahl der pred-com.) dar. Der Kürze halber sind diese Abbildungen hier nicht gezeigt, können aber bei Interesse in Matulla (2003) nachgesehen werden. Um einen Eindruck von der Spannweite der möglichen lokalen Reaktionen innerhalb eines Szenarios zu bekommen, greifen wir für jede Region in jeder Saison eine möglichst 'feuchte' und eine möglichst 'trockene' Realisierung heraus.

Damit haben wir für jede Saison und innerhalb dieser, für jede Region, eine Prädiktorkombination die auf eine 'feuchte' und eine 'trockene' Realisierung führt. Mit dieser einmal getroffenen Prädiktorwahl bauen wir dann die gesamte Periode auf. So werden für jedes globale, grobskalige IPCC-Szenario zwei Realisierungen konstruiert, die eine Abschätzung der Schwankungsbreite der lokalskaligen Realisierungen der ECHAM4/OPYC3-IS92a-Szenarien darstellen.

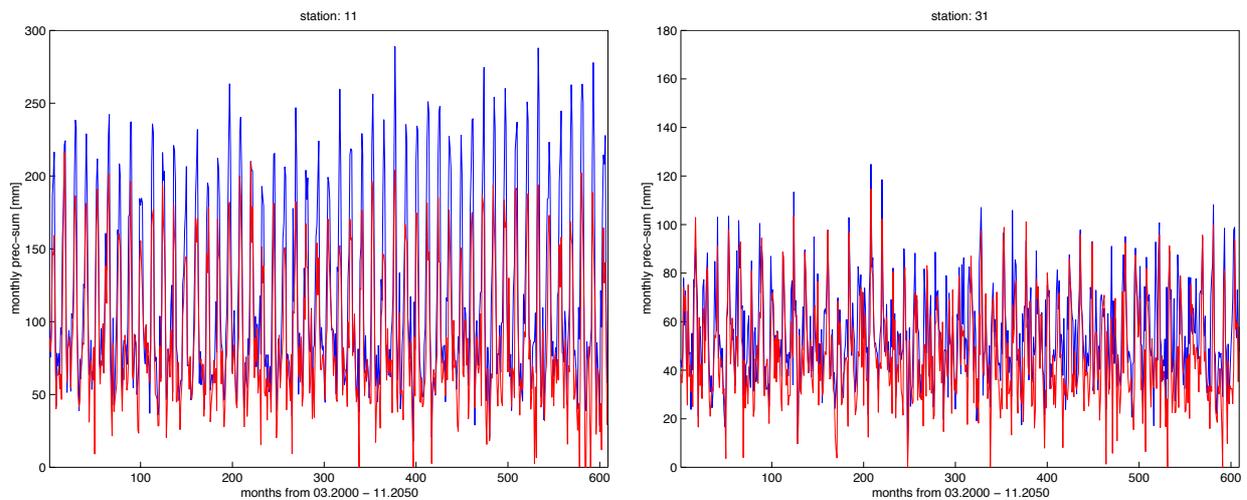


Abbildung 11: Beispiele für die oben erläuterte Vorgehensweise; blau/rot: Realisierungen die an zwei Stationen mehr/weniger Niederschlag bringen.

Abbildung 11 zeigt die Vorgangsweise exemplarisch an zwei Stationen (11 und 31). Die Reihen, die aus feuchten Realisierungen folgen sind blau, jene aus den trockenen rot. Es kann natürlich sein, dass *beide* Reihen auf weniger oder mehr Niederschlag als in der Periode 1948–1998 führen. Abbildungen, die den Unterschied zwischen den Perioden und den Realisierungen (feucht/trocken) zeigen, sind auf der nächsten Seite (Abbildung 12) zu sehen. Eine große Schwankungsbreite zwischen den lokalen Szenarien könnte folgende Ursachen haben: (i) die verschiedenen Prädiktorkombinationen (für 'feucht' bzw. 'trocken') beschreiben verschiedene, niederschlagsbestimmende Phänomene, die sich im IS92a GHG[+ars]-Szenario verschieden entwickeln. Mit anderen Worten: die unterschiedlichen Kombinationen repräsentieren verschiedene physikalische Prozesse, die das zeitliche Verhalten der monatlichen Niederschlagssummen bestimmen. So könnte das zeitliche Verhalten niederschlagsarmer Monate von der einen Kombination gut simuliert werden während jenes niederschlagsreicher Monate von der anderen gewählten Kombination gut getroffen wird. (ii) Probleme der Klimamodelle bei der Simulation der großskaligen, atmosphärischen Prädiktorfelder.

IS92a GHG

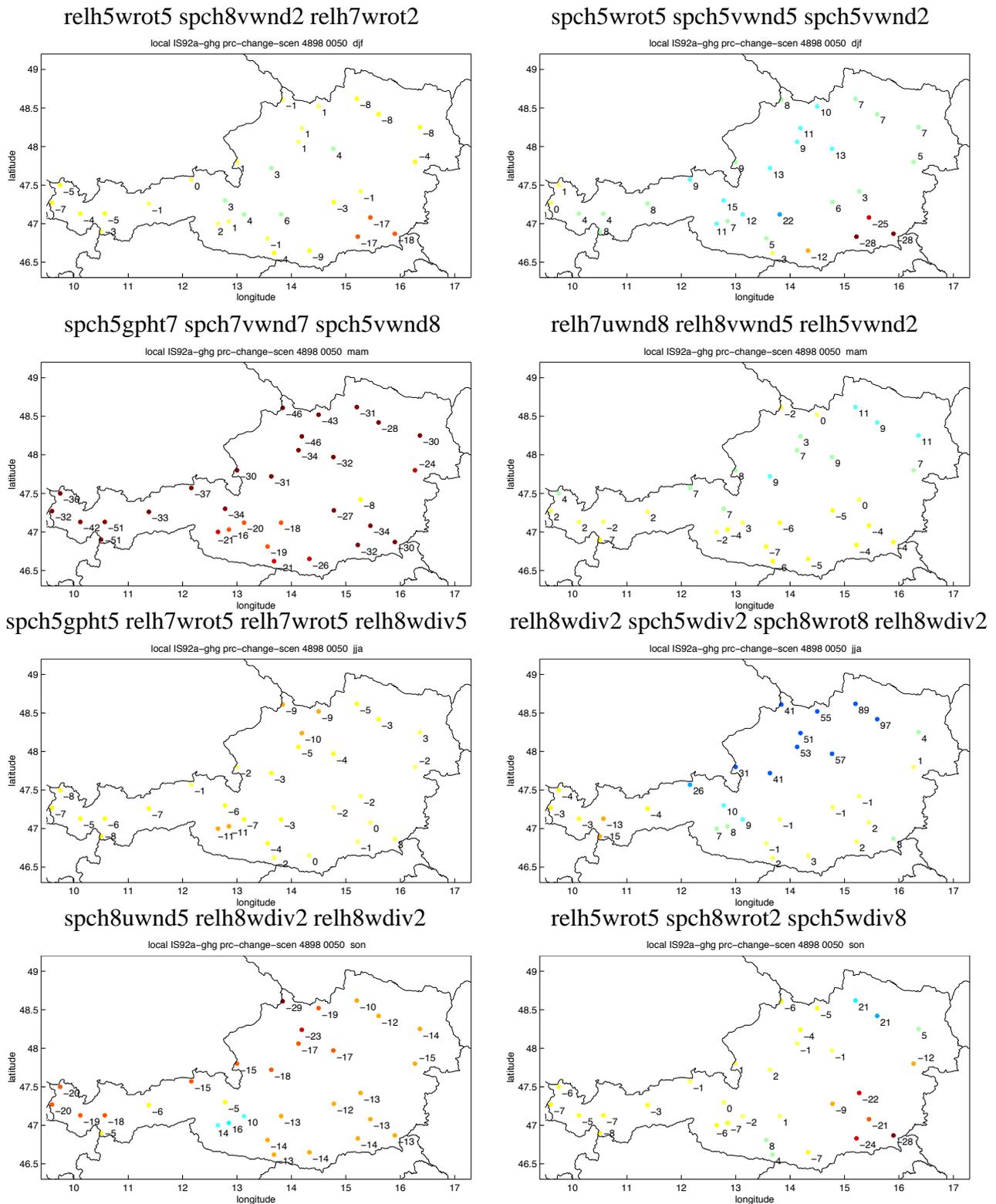


Abbildung 12: Vergleich der Perioden 2000-2050 und 1948-1998. Dargestellt sind die Differenzen der mittleren saisonalen Niederschlagssummen bezogen auf die Periode 1948-1998. Positive Werte stellen Zu-, negative Abnahmen dar. In den *Zeilen* sind die Saisonen (erste: DJF, zweite: MAM, dritte: JJA, vierte: SON). In der *linken Spalte* haben wir Prädiktorkombinationen gewählt, die zu trockenen Saisonen, in der *rechten Spalte* solche, die zu feuchten Saisonen führen. Über den Abbildungen stehen die dazugehörigen Prädiktorkombinationen. (Abkürzungen sind im Anhang erläutert.)

5.5 Synopsis

- Winter: Deutliche Unterschiede treten in den Regionen 1 und 3 auf. Bei der trockenen-feuchten Realisierung ist die relative/spezifische Feuchte ein Prädiktor. Der zweite Prädiktor ist eine Windinformation auf jeweils derselben Druckfläche.
- Frühling: In allen drei Regionen sind die Unterschiede deutlich. Hier ist es aber gerade umgekehrt wie im Winter. Die trockenen Realisierungen enthalten stets die spezifische Feuchte und die feuchten Realisierungen die relative Feuchte. Allerdings liegen die zweiten Prädiktoren (Windinformation) nicht auf derselben Druckfläche vor.
- Sommer: Die größten Differenzen dieser Saison sind in Region 2 und 3. In diese gehen im Falle der trockenen/feuchten Realisierung die relative/spezifische Feuchte ein.
- Herbst: Region 1 und 3 zeigen die größten Unterschiede. Hier ist die Situation 'gemischt'. In Region 1 ist bei der trockenen Realisierung der thermodynamische Prädiktor die spezifische Feuchte, während in Region 3 die relative Feuchte der Prädiktor der trockenen Realisierung ist.

Im Winter, der Saison in der überwiegend großräumige atmosphärische Prozesse den Niederschlag steuern, scheint ein direkter Vergleich der Feuchtemaße möglich, weil auch die korrespondierenden Windinformationen (der zweite großskalige Prädiktor) auf derselben Druckfläche vorliegen. Hier ist es die spezifische Feuchte, die zu mehr Niederschlag führt. Das scheint meteorologisch sinnvoll. Mehr Wasser in einer wärmeren Atmosphäre kann durchaus zu mehr Niederschlag führen (siehe den Teil des Berichtes, der die Temperatur behandelt).

Im Sommer ist Niederschlag zum beträchtlichen Teil von konvektiven Prozessen verursacht. Auch hier ist die spezifische Feuchte stets bei den besonders feuchten Realisierungen zu finden.

In den Übergangssaisonen dominiert die relative Feuchte als Prädiktor. Hier scheint keine einfache Interpretation möglich. Das könnte den uneinheitlichen Charakter dieser Saisonen in der Reaktion auf die großskalige atmosphärische Situation widerspiegeln.

Die Hoffnung auf simple Erklärungen sollte aber nicht zu hoch angesetzt sein.

5.6 Interpretation der CCA-Muster

In diesem Abschnitt präsentieren wir CCA-Pärchen, die zu Prädiktorkombinationen gehören, die auf deutliche Unterschiede in den lokalskaligen Szenarien führen. In Abbildung 12 sieht man beispielsweise in der ersten Zeile den Winter (DJF). Hier treten die Unterschiede zwischen der trockenen Realisierung (links) und der feuchten Realisierung (rechts) am deutlichsten in Region 1 auf. Das CCA-Pärchen, welches zu der Prädiktorkombination gehört, das die trockene Realisierung zur Folge hat, soll nun ebenso wie jenes CCA-Pärchen, das zur feuchten Realisierung gehört, interpretiert werden.

Auf der nächsten Seite (Abbildung 13) sind CCA-Muster für DJF und JJA dargestellt, auf der übernächsten (Abbildung 14) jene für MAM und SON. Um die lokalen Muster übersichtlich darstellen zu können, haben wir sie mit 10^2 multipliziert und dann auf ganze Zahlen gerundet. Damit ersparen wir uns (wir arbeiten mit standardisierten Anomalien) in der Abbildung die führende '0' und das Komma. Das hilft bei eng beieinanderliegenden Stationen. Die erste/zweite Zeile von Abbildung 13 enthält das erste CCA-Pärchen für eine trockene/feuchte DJF-Realisierung, die dritte und vierte Zeile zeigt das entsprechende CCA-Pärchen für den Sommer. Die beiden linken Spalten enthalten das großskalige Muster, die rechte das lokalskalige. Die Räume, die der CCA zur Verfügung gestellt werden, sind auf der groben Skala je nach Saison und Prädiktorkombination zwischen 4- und 16-dimensional und auf der lokalen Skala 2- bis 5-dimensional. Sie erklären stets über 75 % der Varianz. Innerhalb der lokalskaligen Räume erklärt das erste lokale CCA Muster im Winter über 77 % der Varianz und im Sommer über 57 %. Die Zeitkoeffizienten des ersten DJF-CCA-Pärchens der trockenen/feuchten Realisierung haben einen Korrelationskoeffizienten von 0.78/0.84. Die entsprechenden Korrelationen liegen im Sommer niedriger: 0.67/0.61. In den Übergangssaisonen (Abbildung 14) erklären die ersten CCA-Muster über 85 % an Varianz. Die Korrelation der Zeitkoeffizienten liegt zwischen 0.53 und 0.68. Die Muster scheinen folgende Prozesse der Atmosphäre abzubilden:

DJF: In Abbildung 13, zweite Zeile, erkennt man: Positive Vorticity mit Zentrum über Fe-noskandien und negative mit Minimum westlich der Iberischen Halbinsel gepaart mit einem überdurchschnittlichen Feuchteangebot zwischen 40 und 60 Grad Nord können zu positiven Niederschlags-Anomalien in Region 1 führen. Das lokalskalige Muster zeigt dies. Erste Zeile: Das lokalskalige Muster der feuchten Realisierung (zweite Zeile) ist im wesentlichen invers zum trockenen (erste Zeile). Dies deutet an, dass die Muster entgegengesetzte Prozesse beschreiben, die feuchte bzw. trockene Ereignisse steuern.

Im Sommer (dritte Zeile) sieht man positive Vorticity mit Maximum über England und negative westlich von Portugal. Das Feuchteangebot ist überdurchschnittlich und das lokal-

skalige Muster zeigt positive Werte, also mehr Niederschlag als im Durchschnitt. Jetzt ist das lokale Muster, das zu einer feuchten Realisierung (vierte Zeile) führt. nicht invers zu dem der trockenen Realisierung. Das die Vorticity beschreibende Muster könnte eine klassische Vb-Wetterlage sein, die feuchte Luft über der Adria in den böhmischen Raum und nach Ostdeutschland führt und dort zeitlich relativ stabil bleibt (z.B. Hochwasser in Österreich und Deutschland 2002).

MAM: Abbildung 14, erste Zeile: Mehr Niederschlag als im Mittel bringt die Struktur, die negatives Geopotential mit Minimum über dem Nordmeer zeigt zusammen mit einer erhöhten spezifischen Feuchte von 20° West bis nach Europa. Man könnte im Geopotential-Muster einen Tiefdrucktrog, der bis in den Mittelmeerraum reicht, sehen – ein Einbruch polarer Luftmasse, die im Frühling wegen der niedrigen Temperaturen noch vergleichsweise wenig Niederschlag bringt.

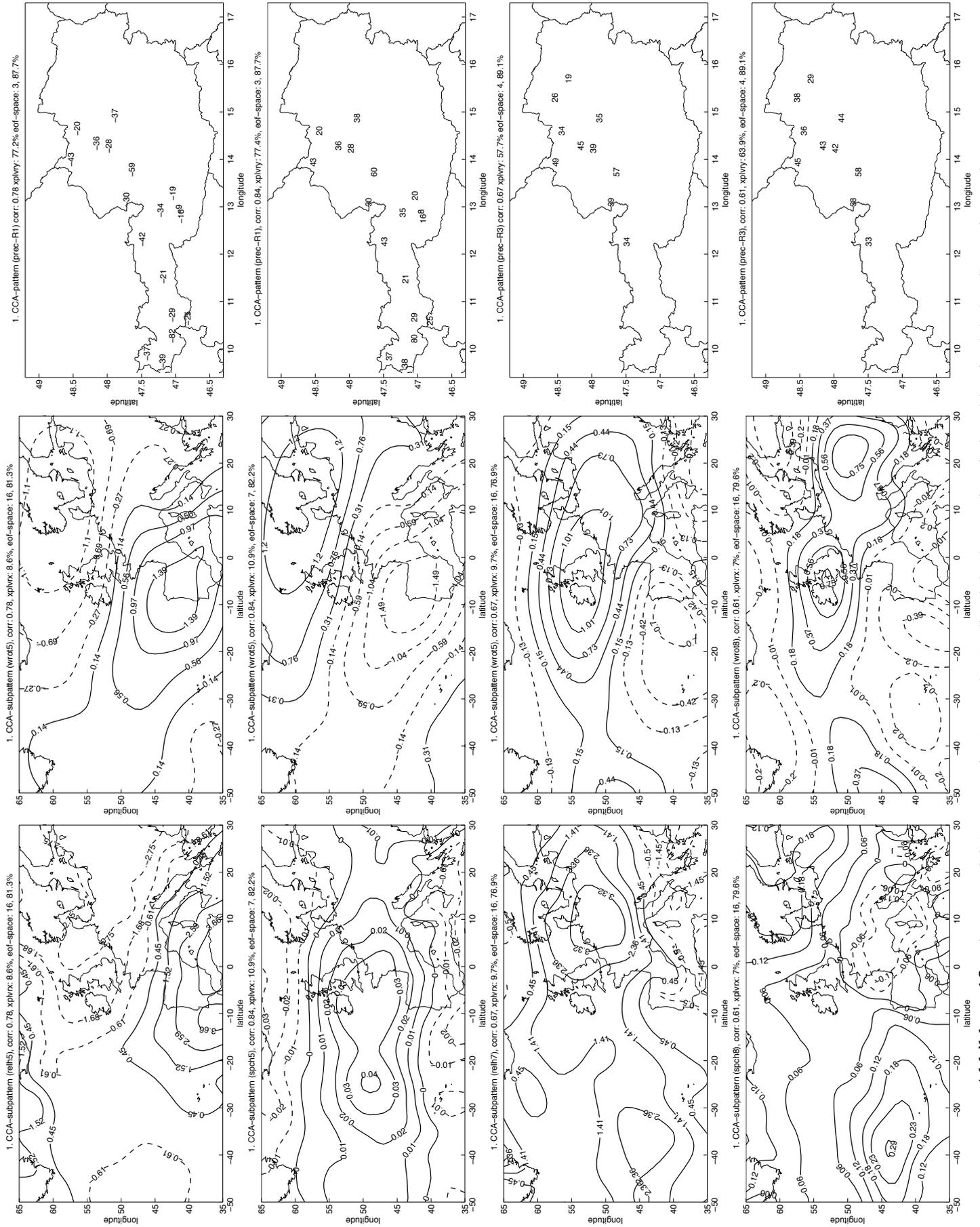


Abbildung 13: Die ersten CCA-Muster in DJF und JJA, die viel oder wenig Niederschlag im lokalen-Szenario ergeben.

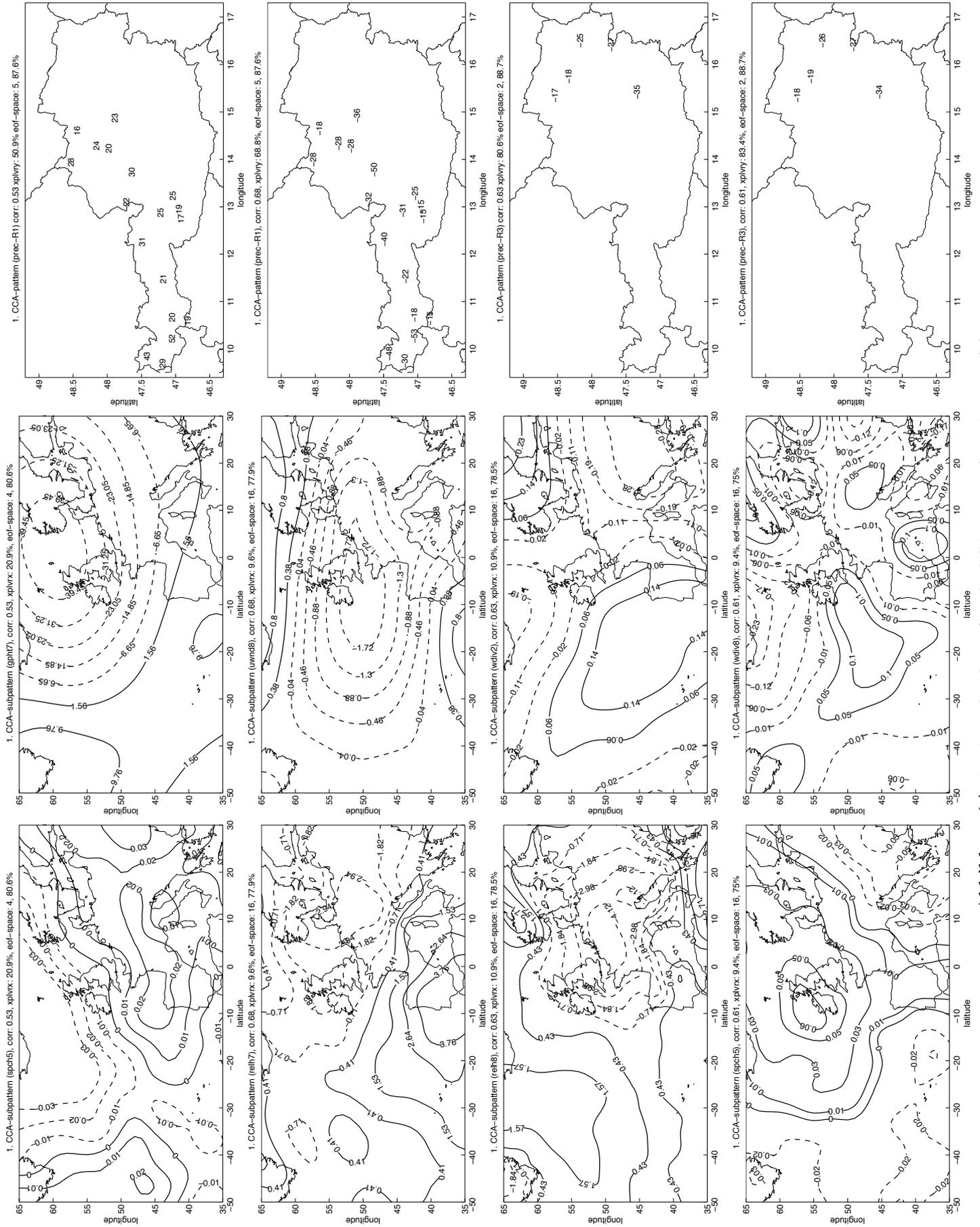


Abbildung 14: Analog wie 13 nur für die CCA-Muster in MAM uns SON.

Für weniger Niederschlag in Region 1 steht die zweite Zeile: ein deutliches Minimum der zonalen Windkomponente über dem Nordatlantik, das mit einer 'blocking'-Situation in Zusammenhang stehen könnte. Darauf deutet auch die relativ stark ausgeprägte negative relative Feuchteanomalie mit Zentrum in Mitteleuropa hin.

Im Herbst (dritte Zeile) erkennt man wenig Niederschlag in Verbindung mit einer trockenen bodennahen Atmosphäre in ganz Europa gepaart mit negativer Divergenz in der oberen Troposphäre, die Absinkprozesse andeuten könnte ('Altweibersommer'). Das großskalige Windmuster bei der feuchten Realisierung (vierte Zeile) zeigt positive Divergenz in Bodennähe über Teilen Österreichs bei durchschnittlichem Feuchteangebot. Auch das könnte ein Hoch andeuten.

Bemerkung: Es ist *nicht wichtig*, ob die lokalskaligen Muster bei der feuchten/trockenen Realisierung positives/negatives Vorzeichen haben. D.h. es ist z.B. kein Widerspruch bei der feuchten Realisierung im lokalskaligen Muster negative Anomalien zu haben. (Wer sich daran stößt, multipliziere *beide* Muster $lasc+losc$ mit -1 .) *Wichtig* ist, wie die korrespondierenden großskaligen Muster in der Szenario-Zukunft vorkommen.

5.7 Lokalskalige, saisonale IS92a GHG+ars-Szenarien

Der zweite ECHAM4/OPYC3-Lauf, den wir dem Downscaling unterwerfen, ist entsprechend dem IS92a GHG+ars-Szenario gerechnet. Hier interessiert uns vor allem, welche Auswirkungen die Berücksichtigung der Strahlungseigenschaften des Sulphataerosols auf den lokalen Niederschlag hat. Bei der Generierung der Szenarien gehen wir genauso vor wie beim GHG-only. Dazu verwenden wir für die CCA wiederum Tabelle 6. Die lokalskaligen Szenarien, die als Grundlage für die Wahl der Prädiktoren für die 'feuchte' bzw. die 'trockene' Realisierung stehen, sind in Matulla (2003) explizit gezeigt.

In Abbildung 16 sind die Resultate dargestellt. Wiederum wird die zweite Hälfte des 20. Jh. mit der ersten des 21. Jh. verglichen. Die Szenarien zeigen generell ein viel geringeres Maß an Veränderung als die aus dem IS92a GHG abgeleiteten. Einerseits ist die Veränderung weg vom Klima der letzten 50 Jahre nicht so deutlich wie beim lokalskalig realisierten IS92a-GHG, andererseits ist auch der Unterschied zwischen den beiden Realisierungen ('feucht' und 'trocken') kleiner. Jedoch bleibt die Entscheidung, welche Prädiktorkombination in welcher Saison als 'feucht' und welche als 'trocken' gewählt wird, gleich. Mit dieser Wahl werden die möglichen Veränderungen abgeschätzt. Diese sind in Abbildung 16 gezeigt. In den Zeilen laufen die Saisonen. Die linke Spalte zeigt das trockenere Szenario, die rechte das feuchtere.

Die wesentlichen Eigenschaften der downgescalten IS92a GHG+ars-Szenarien im Vergleich zu den IS92a GHG-Szenarien (Abbildung 12) sind: (i) die räumliche Struktur bleibt im wesentlichen erhalten, jedoch sind sie (ii) weit weniger extrem und (iii) zu etwas weniger Niederschlag verschoben. Davon können aber im einzelnen Abweichungen festgestellt werden. Dies gilt etwa für die 'feuchte' JJA-Realisierung sowie beide SON-Realisierungen.

Abbildung 15 zeigt zum Vergleich mit Abbildung 11 die Zeitreihen an den Stationen 11 und 31. Im Gegensatz zu Abbildung 11 driften die Reihen hier nicht stark auseinander.

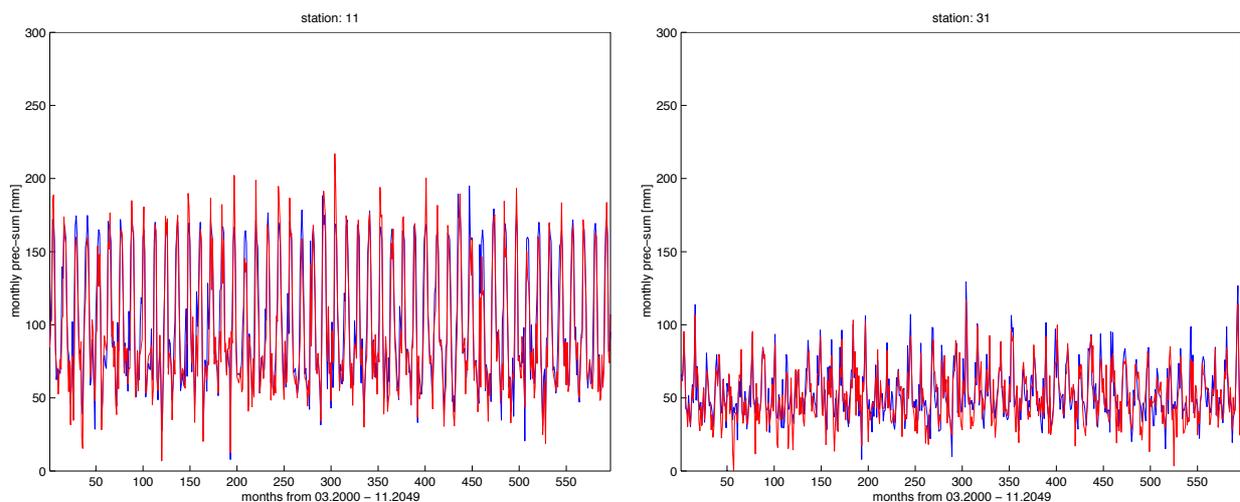


Abbildung 15: Die Abbildung 11 (GHG) entsprechende GHG+ars-Gegenstück; blau/rot: Realisierungen die bei GHG möglichst starke Zu-/Abnahmen bringen.

IS92a GHG+aerosol

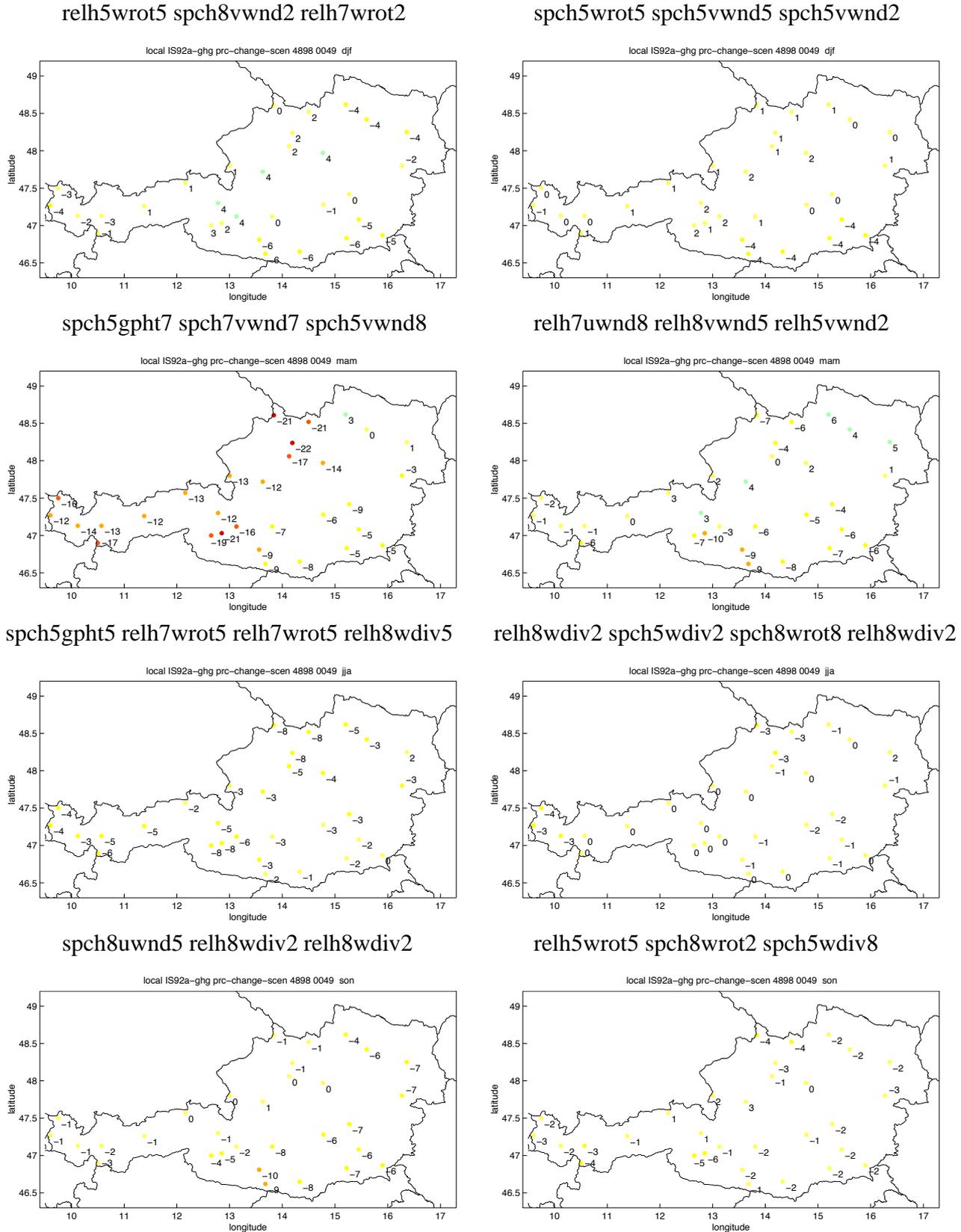


Abbildung 16: Analog zu Abbildung 12 die zukünftige Periode erstreckt sich aber von 2000 bis 2049.

6 Saisonale Temperaturszenarien

Nicht nur der Prädiktand ist gegenüber der bisherigen Situation ein anderer (die Temperatur und nicht mehr der Niederschlag), sondern auch die lokalen Messorte zeigen eine veränderte Situation (siehe Abbildung 17). Die Stationen an denen homogene, monatliche Temperaturzeitreihen vorliegen, sind im allgemeinen andere als jene, an denen homogenisierte Niederschlagssummen existieren. Das spielt aber im Vergleich zur Unterschiedlichkeit von Temperatur und Niederschlagsfeld eine völlig untergeordnete Rolle.

6.1 Einteilung in Temperaturregionen

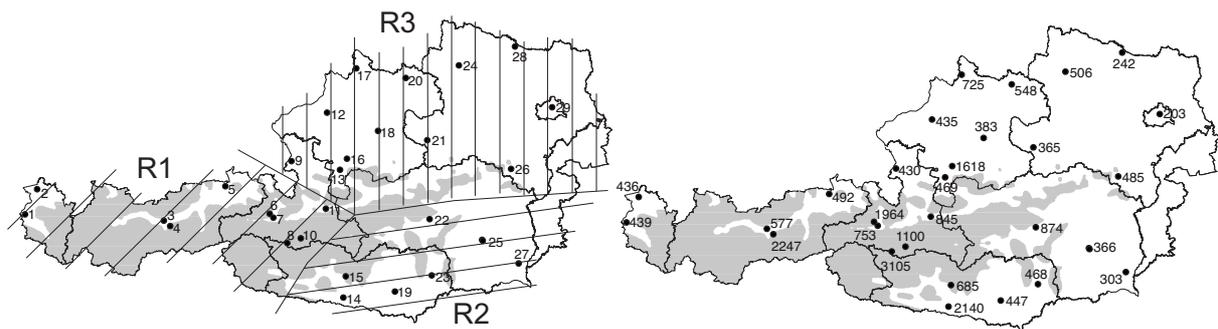


Abbildung 17: ALOCLIM-Stationen, an denen homogenisierte Temperaturdaten vorliegen.

Bei der Definition der Temperaturregionen haben wir uns von heuristischen Überlegungen leiten lassen und daher nicht eine weitergehende Unterscheidung in Saisonen vorgenommen. Wir betrachten also stets drei Regionen. Darüberhinaus haben wir wegen der Höhenabhängigkeit der monatlichen Temperaturverteilung im rechten Teilbild der obigen Abbildung die Stationshöhe eingetragen.

6.2 Bewertung der Prädiktorfelder in der CCA

Die Validierungsexperimente und die Bewertung der Prädiktorkombinationen erfolgt in völliger Analogie zum Niederschlag. Eine für jede Saison und Region detaillierte Aufstellung der Leistung der jeweils 10 am besten geeigneten Kombinationen findet sich in Matulla (2003). Mit diesen Tabellen als Grundlage werden die folgenden Kombinationen als Prädiktoren für das Temperatur-Downscaling gewählt:

Tabelle 9: gewählte Prädiktorkombinationen. Die Abkürzungen sind in Tabelle 12 im Anhang erläutert.

| sea. | reg. | pred-com.1 | pred-com.2 | pred-com.3 | pred-com.4 |
|------|------|------------|------------|------------|------------|
| DJF | R1 | temp8spch8 | temp8relh8 | temp8wrot8 | temp8wdiv8 |
| | R2 | temp8spch8 | temp8spch7 | temp8relh8 | temp8wrot8 |
| | R3 | temp8wrot8 | temp8wrot7 | temp8relh7 | temp8relh8 |
| | TOT | temp8wdiv8 | temp8spch8 | temp8relh7 | temp8relh8 |
| MAM | R1 | temp8uwnd8 | temp8relh7 | temp8relh5 | temp8wrot7 |
| | R2 | temp8wrot5 | temp8wrot7 | temp8relh5 | temp8relh7 |
| | R3 | temp8wrot5 | temp8relh5 | temp8relh7 | temp8wrot8 |
| | TOT | temp8wrot5 | temp8relh5 | temp8wrot7 | temp8wrot2 |
| JJA | R1 | temp8relh5 | temp8wrot5 | temp8wrot8 | temp8relh8 |
| | R2 | temp8relh5 | temp8relh7 | temp8wrot5 | temp8wrot8 |
| | R3 | temp8wrot5 | temp8relh7 | temp8wrot7 | temp8relh8 |
| | TOT | temp8wrot5 | temp8relh5 | temp8wrot7 | temp8wrot2 |
| SON | R1 | temp8relh5 | temp8wdiv2 | temp8spch8 | temp8temp5 |
| | R2 | temp8spch8 | temp8relh5 | temp8temp7 | temp8temp5 |
| | R3 | temp8spch8 | temp7spch8 | temp8relh5 | temp8spch7 |
| | TOT | temp8spch8 | temp7spch8 | temp8relh5 | temp8temp5 |

6.3 Lokalskalige, saisonale IS92a GHG[+ars]-Szenarien

Der Verlauf der Temperatur ist für beide Szenarien in Region 3 während der Wintersaison in Abbildung 18 anhand von zwei Realisierungen dargestellt. Die 'wärmere' in rot und die 'kühlere' in blau. Darüberhinaus ist auch die Summe der Differenzen (kummulative Anomalie) zwischen ihnen eingezeichnet. Die Steigung dieser Kurve zeigt, in welchen Zeitintervallen die 'wärmere' Realisierung höhere Temperaturen hat (positive Steigung) und in welchen die 'kühlere' (negative Steigung). Bei der Entscheidung nämlich, welches lokale Szenario wir als 'wärmer' bzw. 'kühler' wählen, hatten wir nicht vom zeitlichen Verlauf der Realisierungen Gebrauch gemacht. In Region 3 bringt die 'wärmere' Realisierung fast immer die höheren Temperaturen. Das gilt für beide IS92a-Szenarien. Die Ableitung der Kurve zu einem bestimmten Zeitpunkt kann als Maß für die momentane Ähnlichkeit der beiden Realisierungen interpretiert werden (keine Steigung bedeutet identischen Verlauf). Der Wert der Kurve zu einem bestimmten Zeitpunkt zeigt die bis dahin akkumulierte (Temperatur-)Differenz zwischen den Realisierungen.

Weiterhin sind die, aus den Szenarien folgenden Temperaturzunahmen (siehe Abbildung 19), für einen mittleren Monat der ersten Hälfte des 21. Jh. gegenüber der zweiten des 20. Jh. abgebildet. Abbildungen, die die saisonale wie räumlich unterschiedliche Ausprägung der Temperaturzunahme zeigen, finden sich in Matulla (2003). Beim GHG-only und auch beim GHG+ars-Szenario ist der Winter die Jahreszeit, der die größte Erwärmung erfährt.

Bemerkenswert ist der in allen betrachteten Kombinationen auftretende 'Dipolcharakter' der Erwärmung von nahe beieinanderliegenden Stationen unterschiedlicher Höhe über NN (3–4, 6–7, 8–10). Stets ist die Temperaturzunahme an der höher gelegenen Station größer.

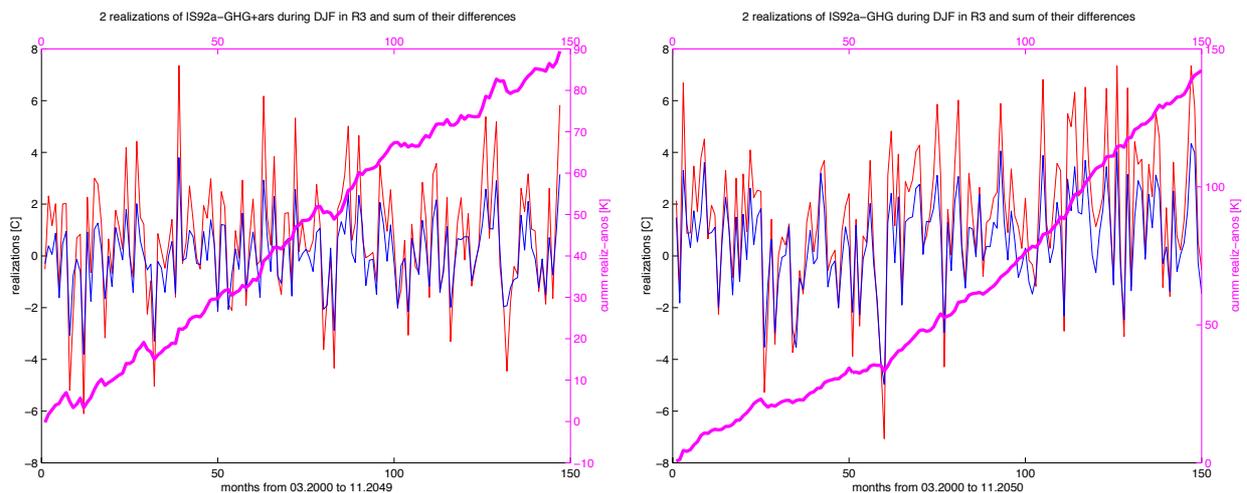


Abbildung 18: Mögliche Temperaturveränderungen während des Winters (DJF) in Region 3 nach IS92a GHG+ars (links) und IS92a GHG (rechts). rot/blau: warme/kühle Realisierungen; magenta: Summe der Differenzen der beiden Realisierungen. Die Achsen auf denen die kumulativen Anomalien aufgetragen sind haben je nach Szenario einen verschiedenen Wertebereich.

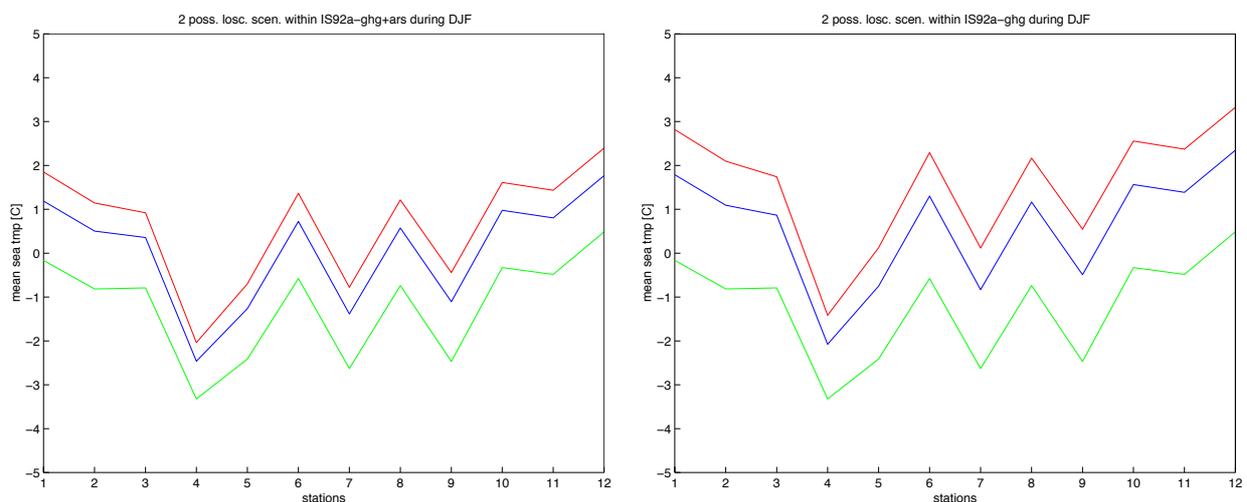


Abbildung 19: Temperaturveränderung eines mittleren Monats zwischen den untersuchten Perioden. grün: zweite Hälfte 20., rot (blau) stärkere (schwächere) Realisierung (siehe Text). links: IS92a-GHG+ars, rechts: IS92a GHG.

IS92a GHG

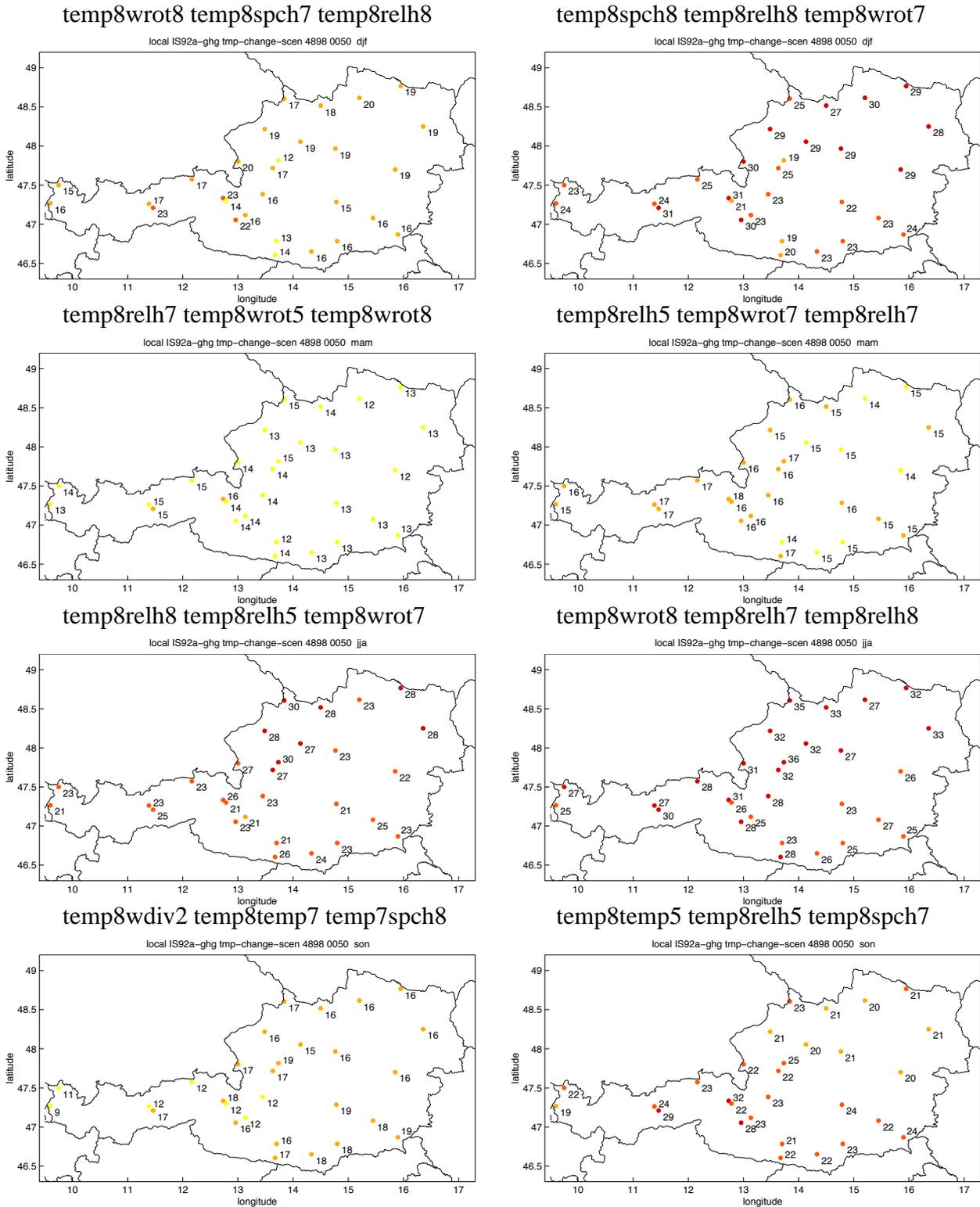
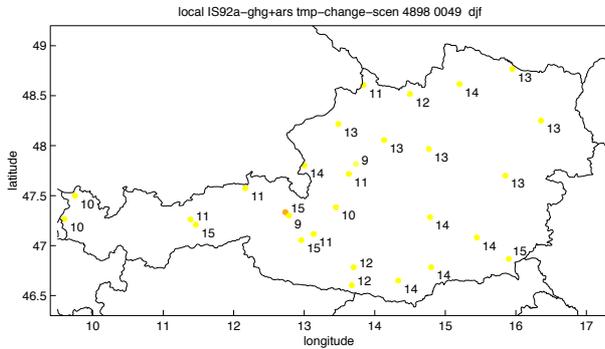


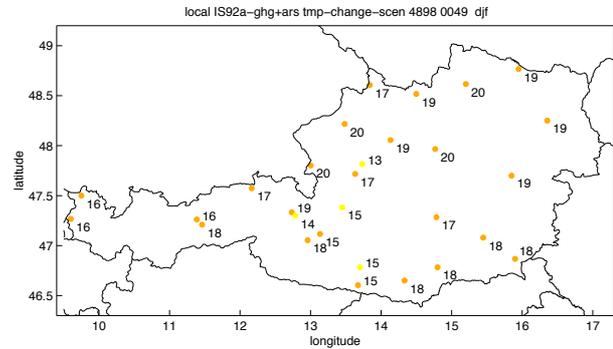
Abbildung 20: Vergleich der Perioden 2000–2050 und 1948–1998. Dargestellt sind die Differenzen der mittleren saisonalen Temperaturen in 0.1K gegenüber der Periode 1948–1998. Positive Werte stellen Zu- negative Abnahmen dar. In den *Zeilen* sind die Saisonen (erste: DJF, zweite: MAM, dritte: JJA, vierte: SON). In der *linken Spalte* haben wir Prädiktorkombinationen gewählt, die zu kühleren Saisonen, in der *rechten Spalte* solche, die zu wärmeren Saisonen führen. Über den Abbildungen stehen die dazugehörigen Prädiktorkombinationen (Abkürzungen sind im Anhang erklärt).

IS92a GHG+ars

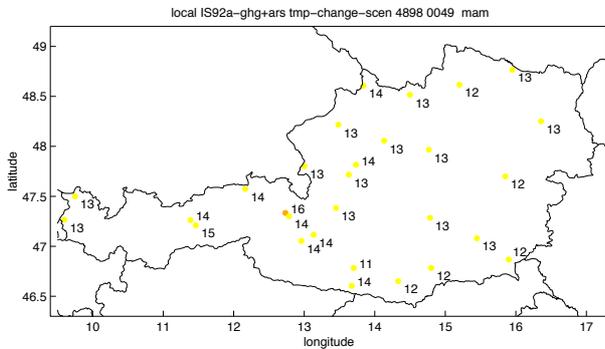
temp8spch8 temp8spch8 temp8wrot8



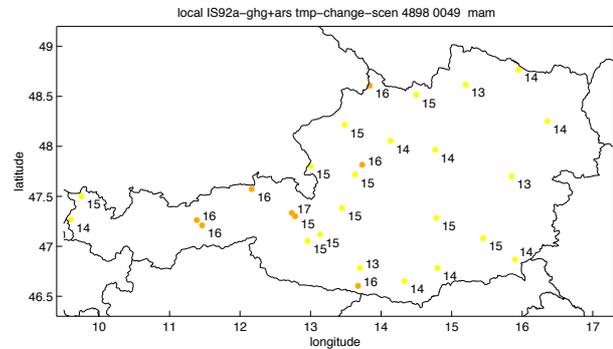
temp8relh8 temp8relh8 temp8relh7



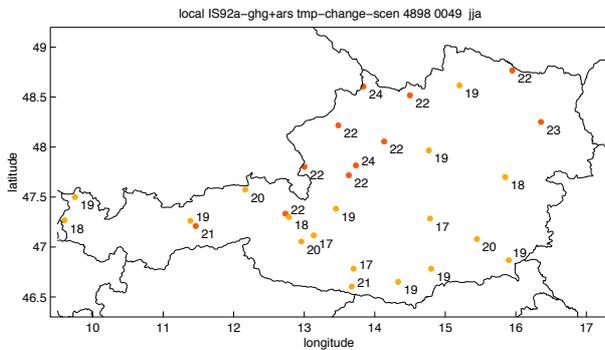
temp8wrot7 temp8wrot5 temp8wrot5



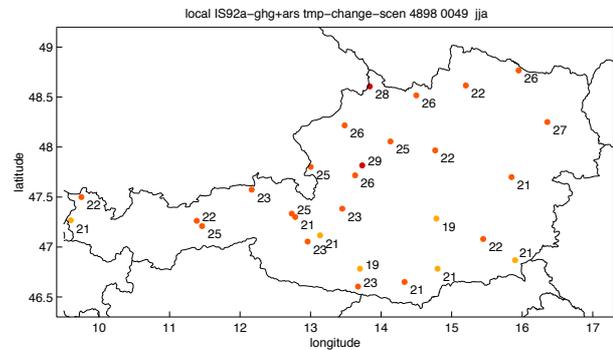
temp8relh5 temp8wrot7 temp8relh7



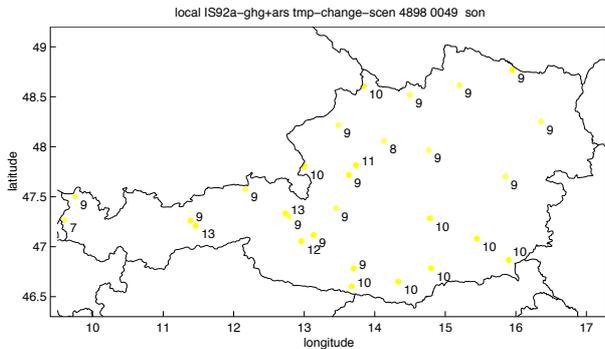
temp8wrot5 temp8relh5 temp8wrot7



temp8wrot8 temp8relh7 temp8relh8



temp8wdiv2 temp8spch8 temp8spch8



temp8temp5 temp8temp7 temp8spch7

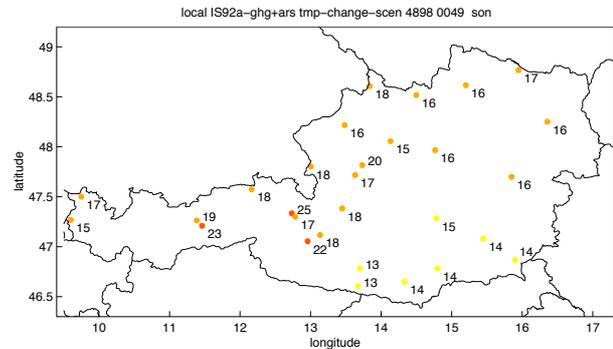


Abbildung 21: Analog zu Abbildung 20 die zukünftige Periode erstreckt sich aber von 2000 bis 2049.

7 Tägliche Niederschlags- und Temperaturszenarien

In diesem Kapitel werden Reihen synthetischen Wetters gezeigt, die mit Hilfe des LARS-WG erzeugt wurden. Diese Reihen von Temperatur und Niederschlagswerten basieren auf den mit CCA-Modellen downgescalten IS92a GHG- und IS92a GHG+ars-Szenarien, die auf Monatsbasis vorliegen.

Beim LARS-WG sind zwei Szenarien, eines für die Temperatur und eines für den Niederschlag, auf Monatsbasis erforderlich, um ein Szenario auf Tagesbasis zu erzeugen.

Daher haben wir die mit der CCA generierten Szenarien gekoppelt. Innerhalb eines IPCC-Szenarios haben wir auf Monatsbasis das 'warme' mit dem 'trockenen' und das 'feuchte' mit dem 'kalten' kombiniert. Diese Wahl entspricht vor allem während der warmen Jahreszeit den Beobachtungen. Daher haben wir für jedes IPCC-Szenario ein 'feucht-kaltes' und ein 'trocken-warmes'. In den Tabellen und Abbildungen dieses Kapitels werden wir das 'feucht-kalte' IS92a GHG als Szen.1, das 'trocken-warme' IS92a GHG als Szen.2 bezeichnen und entsprechend das 'feucht-kalte' IS92a GHG+ars als Szen.3 sowie das 'trocken-warme' IS92a GHG+ars als Szen.4 (siehe auch die Tabelle auf Seite 22).

Die Bezeichnungen 'feucht', 'kalt', etc. gehen auf das Erzeugen der extremen Szenarien zurück und sind auf Grundlage von saisonalen Datensätzen entstanden, die räumlich über die Regionen und zeitlich über die erste Hälfte des 21. Jh. gemittelt wurden. Das sollte man bei der Interpretation der Ergebnisse in diesem Kapitel, die auf Stationsebene und Tages- bzw. Monatsbasis gelten, nicht außer acht lassen (d.h. es kann durchaus sein, dass an einer Station ein 'feucht-kaltes' Szenario wärmere und trockenere Werte liefert als ein 'trocken-warmes').

Um bei der Fülle an Ergebnissen (Temperatur und Niederschlag auf Tagesbasis an 29 Stationen für vier Szenarien) nicht den Überblick zu verlieren, gehen wir für Niederschlag und Temperatur wie folgt vor: Zuerst zeigen wir an einer repräsentativen Station das Verhalten der Tageswerte für ein Jahr der Beobachtungsperiode und ein mit LARS-WG erzeugtes Szenario-Jahr. Dann greifen wir zufällig einige Stationen für ein paar ausgewählte Monate heraus und stellen den Einfluss der oben beschriebenen Szenarien auf den Niederschlag bzw. die Temperatur während der ersten Hälfte des 21. Jh. dar. Das geschieht durch die Angabe einiger statistischer Lagemaße. Zuletzt stellen wir an einer repräsentativ gewählten Station alle Szenarien für alle Monate des Jahres dar.

7.1 Temperatur

Abbildung 7.1 zeigt die täglichen Mittelwerte der Temperatur zweier Jahre an der Station Feldkirch. Auf der Abszisse ist der julische Tag, auf der Ordinate die Temperatur in Grad Celsius aufgetragen. Die blaue Kurve stellt die Werte des Jahres 1948, die grüne die des Jahres 2050 dar.

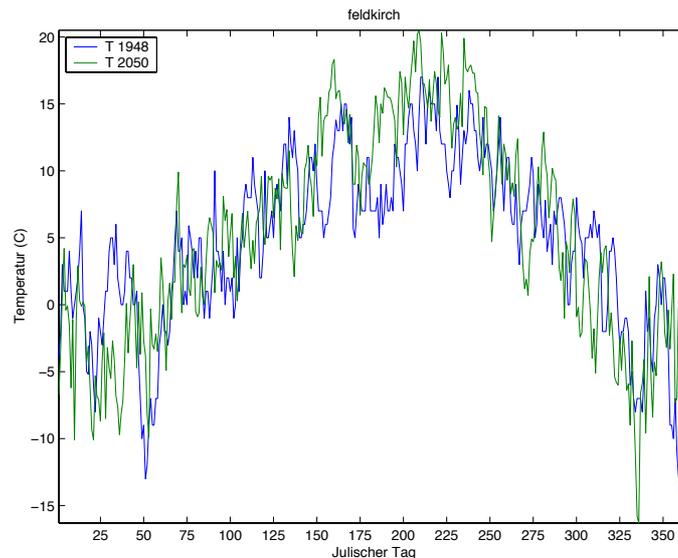


Abbildung 22: Vergleich von täglichen Temperaturdaten für jeweils ein Jahr. Die blaue Kurve zeigt das Jahr 1948 und die grüne Kurve 2050, erzeugt mit LARS-WG.

Dieses Beispiel, in dem Feldkirch als Repräsentant für die anderen Stationen und die Jahre 1948 und 2050 als Repräsentanten für die anderen Jahre gewählt wurde, zeigt, dass der LARS-WG mit den von uns getroffenen Annahmen (siehe Kapitel 3.2) in der Lage ist, plausible Tagesreihen synthetischer Temperaturen zu erzeugen.

Um diese synthetischen Werte zu quantifizieren greifen wir einige Monate an zufälligen Stationen heraus und betrachten deren statistische Lagemaße bezogen auf die Szenarioperiode. Tabelle 7.1 enthält Minimal-, Maximal- und Mitteltemperatur sowie die Standardabweichung der synthetischen Verteilung innerhalb der betreffenden Monate an den gewählten Stationen. Diese Größen werden den entsprechenden aus der Beobachtungsperiode gegenübergestellt. In der ersten Spalte sind die Lagemaße für den Beobachtungszeitraum, in den darauf folgenden die der Szenarien.

An allen Stationen findet man einen Anstieg der Monatsmittel, der generell bei den IS92a GHG-Szenarien größer ist als bei den IS92a GHG+ars. Die Unterschiede zwischen den Szenarien und die Spanne innerhalb der Szenarien werden aber geringer. Das könnte auf eine ausgleichende Wirkung der von uns gewählten Kombinationen (z.B. 'feucht-kalt') hindeuten.

Tabelle 10: Maximal-, Minimal-, Mitteltemperatur und Standardabweichung für die Beobachtungen und die synthetischen, mit LARS-WG generierten Reihen. Die Erklärung der einzelnen Szenarien ist auf Seite 22 zu finden.

| | Beob. | Szen. 1 | Szen. 2 | Szen. 3 | Szen. 4 |
|--------------------------|-------|---------|---------|---------|---------|
| Feldkirch März | | | | | |
| Max. | 25.0 | 31.7 | 31.8 | 31.5 | 31.8 |
| Min. | -8.8 | -6.5 | -6.3 | -6.7 | -6.4 |
| Mean | 10.3 | 11.4 | 11.6 | 11.3 | 11.6 |
| Std. | 5.62 | 6.2 | 6.2 | 6.2 | 6.1 |
| Klagenfurt -- August | | | | | |
| Max. | 35.5 | 38.8 | 39.1 | 38.0 | 38.4 |
| Min. | 12.2 | 13.6 | 13.9 | 12.8 | 13.2 |
| Mean | 24.6 | 27.0 | 27.3 | 26.2 | 26.6 |
| Std. | 4.07 | 3.99 | 3.99 | 3.99 | 3.99 |
| Kremsmuenster -- Oktober | | | | | |
| Max. | 21.8 | 19.6 | 19.8 | 18.7 | 19.4 |
| Min. | -4.8 | -3.2 | -2.9 | -4.0 | -3.4 |
| Mean | 6.0 | 8.2 | 8.5 | 7.3 | 8.0 |
| Std. | 4.1 | 3.7 | 3.7 | 3.7 | 3.67 |
| Zwettl -- Januar | | | | | |
| Max. | 16.6 | 24.0 | 25.1 | 23.2 | 23.8 |
| Min. | -16.5 | -16.7 | -15.6 | -17.5 | -17.0 |
| Mean | 0.7 | 2.4 | 3.5 | 1.6 | 2.1 |
| Std. | 5.04 | 5.15 | 5.15 | 5.15 | 5.15 |

Die Maximal- und Minimaltemperaturen steigen in drei von vier Fällen an. Die Varianzen zeigen ein uneinheitliches Verhalten.

Abbildung 26 zeigt Dichten der Normalverteilungen für den März, die mit dem Mittelwert und der Varianz der Beobachtungsdaten bzw. des Szen.2 an der Station Feldkirch erstellt wurden.

Abbildung 24 stellt den aus synthetischen Tageswerten bestimmten Jahreszyklus aller vier Szenarien an der Station Kremsmünster und stellt sie dem beobachteten Jahresgang gegenüber. Wieder wird bei den Beobachtungen über die zweite Hälfte des 20 Jh. gemittelt und bei den Szenarien über die erste Hälfte des 21 Jh. Dieses Bild manifestiert sich das oben beschriebene Verhalten der Szenarien für alle Monate des Jahres.

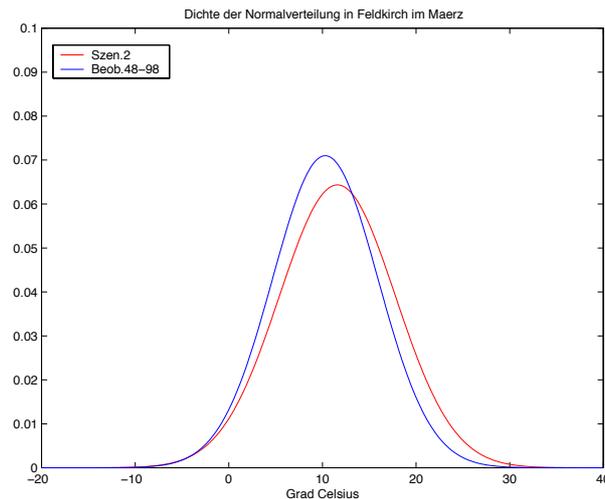


Abbildung 23: Dichte der Normalverteilungen aus Mittelwerten und Varianzen auf Monatsbasis, aggregiert aus den auf Tagesbasis vorliegenden Beobachtungen und Szen.2 in Feldkirch im März.

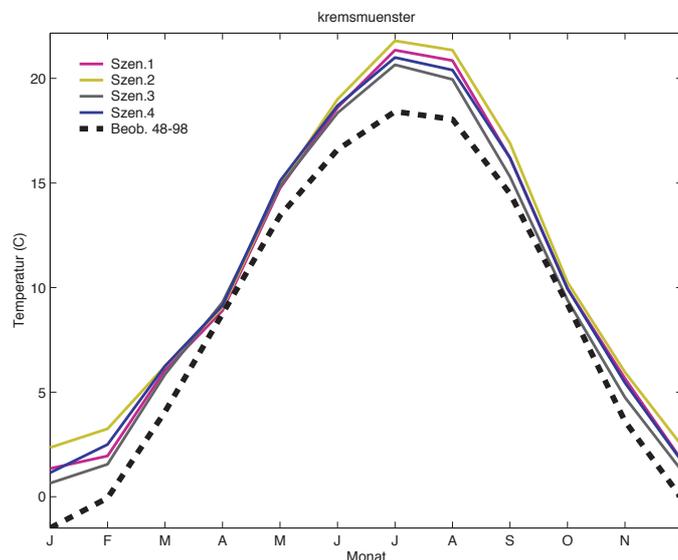


Abbildung 24: Monatliche Temperaturmittel für Kremsmünster. Gemittelt wurden die Beobachtungsdaten (Beob. 48–98) von 1948–1998, alle anderen von 2000–2050. Die farbigen Kurven sind aus den Szenarien auf Tagesbasis errechnet.

Es manifestiert sich, unabhängig von Monat und Szenario, eine Temperaturzunahme. Man kann erkennen, dass Szenario 2 über Szenario 1 und Szenario 4 über Szenario 3 liegt. Damit bleibt die saisonale, räumlich gemittelte, Vorgabe aus den CCA-Szenarien an dieser Station erhalten. Das 'kalt-feuchte' IS92a GHG liegt im Sommer über dem 'warm-trockenen' des IS92a GHG+ars. Das ist plausibel, da das kühle IS92a GHG zum Teil noch immer wärmer ist als das warme IS92a GHG+ars. Der LARS-WG streut die Szenarien im Winter (DJF) und im Sommer (JJA) stärker als in den Übergangssaisonen. Auch dieses Verhalten steht im Einklang mit den saisonalen Szenarien.

7.2 Niederschlag

Abbildung 25 zeigt die täglichen Niederschlagssummen zweier Jahre an der Station Feldkirch. Auf der Abszisse ist der julische Tag, auf der Ordinate die Niederschlagssumme in mm aufgetragen. Die blaue Kurve stellt die Werte des Jahres 1948, die grüne die des Jahres 2050 dar.

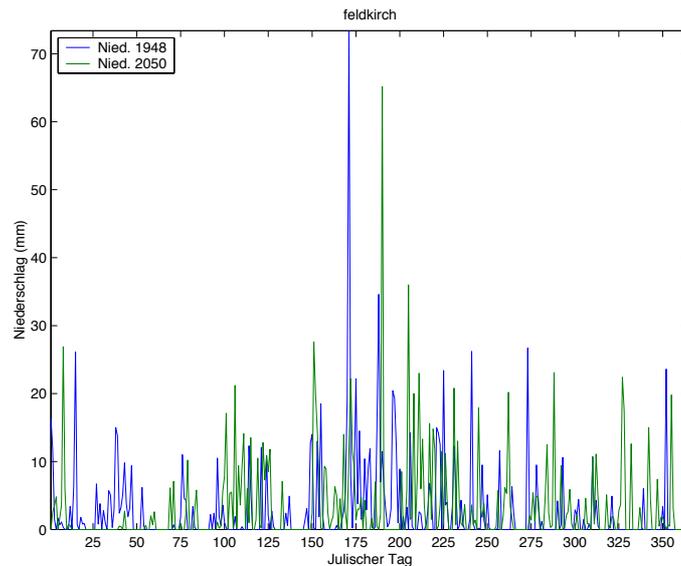


Abbildung 25: Vergleich von täglichen Niederschlagswerten. Die blaue Kurve zeigt den Jahresverlauf für 1948, die grüne Kurve für 2050 (erzeugt mit LARS-WG).

Auch hier zeigt sich, dass der LARS-WG in der Lage ist, mit den von uns getroffenen Annahmen (siehe Kapitel 3.2) plausible Tagesreihen synthetischer Niederschlagssummen zu erzeugen. Feldkirch ist Repräsentant für die Stationen und die gewählten Jahre für die restlichen Jahre.

Wir greifen einige Monate an zufälligen Stationen heraus und betrachten die statistischen Lagemaße auf Monatsbasis der synthetischen Niederschlagssummen, bezogen auf die Szenarioperiode. Tabelle 7.2 enthält minimale, maximale und mittlere monatliche Niederschlagssummen und die Standardabweichung der synthetischen Verteilung an den gewählten Stationen. Diese Größen werden denen der Beobachtungsperiode gegenübergestellt. In der ersten Spalte sind die Lagemaße für den Beobachtungszeitraum, in den darauf folgenden die der Szenarien. Die Erklärung der einzelnen Szenarien ist auf Seite 22 zu finden.

Die mittleren Monatssummen zeigen keinen einheitlichen Trend in dieser Stichprobe. In zwei Fällen nimmt sie ab, in zwei bleibt sie gleich oder nimmt leicht zu. Die Minima und Maxima sowie die Varianzen nehmen tendentiell etwas ab.

Man erkennt in Feldkirch und Kremsmünster einen relativ großen Unterschied zwischen

Tabelle 11: Maximaler und minimaler Niederschlag sowie auch Mittelwert und Standardabweichung für die synthetischen Reihen generiert mit LARS-WG. Gezeigt sind einzelne Monate und ausgewählte Stationen.

| | Beob. | Szen. 1 | Szen. 2 | Szen. 3 | Szen. 4 |
|--------------------------|-------|---------|---------|---------|---------|
| Feldkirch – März | | | | | |
| Max. | 191.5 | 134.3 | 88.2 | 132.7 | 120.6 |
| Min. | 15.2 | 17.0 | 11.4 | 16.8 | 15.3 |
| Mean | 66.4 | 62.5 | 41.1 | 61.9 | 56.2 |
| Std. | 33.2 | 24.6 | 16.2 | 24.4 | 22.2 |
| Klagenfurt – August | | | | | |
| Max. | 191.7 | 189.0 | 189.0 | 179.3 | 183.3 |
| Min. | 20.9 | 3.2 | 3.2 | 3.1 | 3.2 |
| Mean | 103.8 | 95.0 | 95.0 | 90.3 | 92.2 |
| Std. | 41.0 | 42.2 | 42.2 | 40.11 | 41.0 |
| Kremsmuenster – November | | | | | |
| Max. | 153.2 | 157.4 | 134.7 | 155.5 | 155.5 |
| Min. | 16.9 | 8.3 | 7.0 | 8.0 | 8.0 |
| Mean | 67.0 | 67.7 | 57.9 | 67.0 | 67.0 |
| Std. | 31.2 | 34.1 | 29.18 | 33.74 | 33.74 |
| Zwettl – Januar | | | | | |
| Max. | 78.2 | 81.1 | 70.2 | 77.6 | 73.1 |
| Min. | 4.3 | 12.2 | 10.7 | 11.7 | 11.1 |
| Mean | 31.4 | 37.1 | 32.2 | 35.4 | 33.5 |
| Std. | 17.84 | 16.43 | 14.24 | 15.71 | 14.81 |

den beiden IS92a GHG-Szenarien. An allen anderen Stationen und Szenarien sind die Unterschiede deutlich geringer. Das ist in Übereinstimmung mit den saisonalen Szenarien. Hier ist beim Niederschlag zwischen 'feucht' und 'trocken' beim IS92a GHG mehr Spielraum als beim IS92a GHG+ars. Es führt auch in der Regel das 'feuchte' Szenario zu mehr Niederschlag als das 'trockene'. Nur im August ist das an der Station Klagenfurt bei den IS92a GHG+ars-Szenarien nicht so. Das kann ebenso daran liegen, dass die beiden IS92a GHG+ars-Niederschlagsszenarien auf saisonaler Basis nahe beieinander liegen.

Abbildung 26 zeigt Dichten der Normalverteilungen für den Januar, die mit dem Mittelwert und der Varianz der Beobachtungsdaten (blau) bzw. des Szen.1 (rot) an der Station Zwettl erstellt wurden.

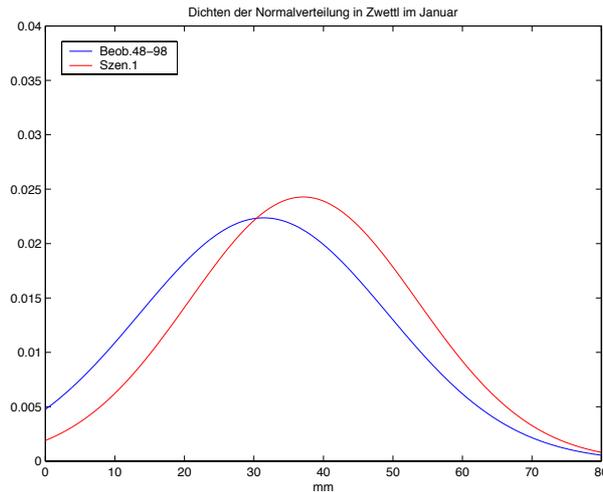


Abbildung 26: Dichte der Normalverteilungen aus Mittelwerten und Varianzen auf Monatsbasis, aggregiert aus den auf Tagesbasis vorliegenden Beobachtungen und Szen.1 in Zwetl im Januar.

Schließlich zeigt Abbildung 27 noch den aus synthetischen Tageswerten bestimmten Jahreszyklus aller vier Szenarien an der Station Zell und vergleicht sie mit dem beobachteten Jahresgang.

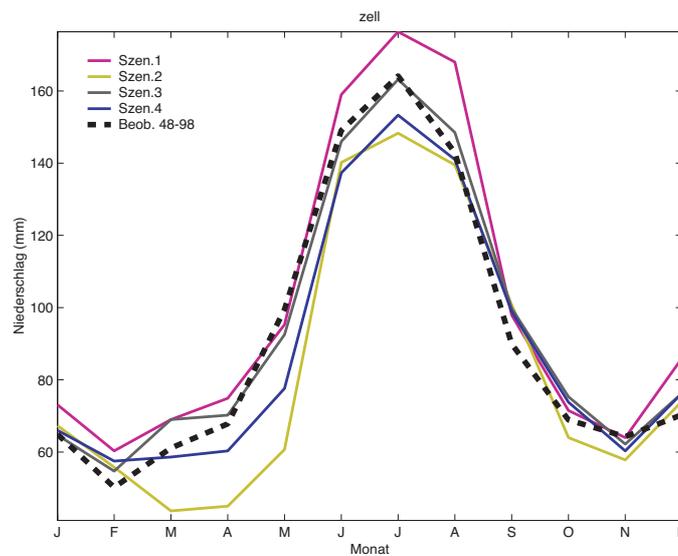


Abbildung 27: Monatliche Mittel der Niederschlagssummen für Kremsmünster. Gemittelt wurden die Beobachtungsdaten (Beb 48–98) von 1948–1998 und alle anderen von 2000–2050. Die farbigen Kurven sind aus den Szenarien auf Tagesbasis (LARS-WG) errechnet.

Man kann erkennen, dass die 'feuchten' Szenarien auf Tagesbasis für IS92a GHG und IS92a GHG+ars über beiden trockenen liegen, wobei das 'feuchte' IS92a GHG+ars nahe an den Beobachtungsdaten ist. In den Wintermonaten liegen alle Szenarien über oder nahe bei den Beobachtungen. Im Sommer, der Jahreszeit, die die größten Niederschlagssummen aufweist, liegen die 'trockenen' Tageszenarien unter den Beobachtungen. Die Streuung zwischen den

Szenarien ist im Frühjahr und Sommer verhältnismäßig groß (bis etwa 40 % im Frühjahr und rund 25 % im Sommer). Im Herbst und Winter ist diese Streuung z.T. deutlich geringer.

Dieser Abschnitt hat gezeigt, dass

- die mit LARS-WG erzeugten lokalen Szenarien von Temperatur und Niederschlag auf Tagesbasis plausibel sind;
- der LARS-WG in der Lage ist, tägliche Szenarien zu erzeugen, die zwischen den verschiedenen Szenarien auf Monatsbasis, die als Eingangsdaten dienen, differenzieren;
- die täglichen Temperaturszenarien einheitlich eine Temperaturzunahme simulieren, während bei den Niederschlagsszenarien kein einheitliches Bild entsteht.

8 Diskussion und Ausblick

In dieser Studie wurde einerseits Regional-, Saisonal- und Prädiktor-sensitives Downscaling durchgeführt und damit lokale Klimaänderungsszenarien auf saisonaler Basis erzeugt. Andererseits wurden mit Hilfe von Wettergeneratoren (LARS-WG) diese lokalen, saisonalen Szenarien auf Tagesbasis gebracht. Dabei haben wir uns auf Resultate von Matulla, Penlap, Haas, and Formayer (2003) gestützt, um Österreich in verschiedene, von der Saison abhängige Niederschlagsregionen zu unterteilen. Bei der Einteilung von Österreich in Temperaturregionen haben wir uns subjektiv nach meteorologischen Gesichtspunkten entschieden.

Für jede dieser Regionen und jede Jahreszeit wurden CCA-Modelle herangezogen, um großskalige, atmosphärische Klimaänderungsszenarien nach dem IPCC auf Stationen in Österreich zu projizieren.

Dabei haben wir uns beim Niederschlag als Kriterium vorgegeben, jene atmosphärischen Felder als Prädiktorkombinationen zu wählen, die (i) in den Validierungsexperimenten gut bewertet worden sind und (ii) in die jedenfalls ein atmosphärisches Feuchtefeld eingeht. Beim Niederschlag verwenden wir ausschließlich Kombinationen von thermodynamischen und dynamischen Feldern, bei der Temperatur verwenden wir solche Kombinationen oft.

Die resultierenden Szenarien auf saisonaler Basis sind unter dem Aspekt der Extremität gewählt, d.h. es wurde für jedes IPCC-Szenario (IS92a GHG und IS92a GHG+ars) in jeder Region und Jahreszeit eine besonders feuchte/trockene bzw. heisse/kalte Realisierung gewählt. Als Input für Impactmodelle sind sie daher a priori nicht geeignet. Solche Szenarien sollten etwa starke 'Brüche' zwischen den Regionen vermeiden.

Einige Ergebnisse der Validierungsexperimente beim Niederschlag sind:

1. In den Saisonen DJF, MAM und SON zeigen die CCA-Modelle in den Regionen 1 (von Vorarlberg über Tirol und Salzburg bis an den westlichen Rand des Waldviertels) und 2 (entlang des Alpenhauptkammes und südlich davon) eine ähnliche Leistung. Region 3 (im Nord-Osten) bleibt deutlich dahinter zurück.

Ähnliche Resultate ergeben sich im Sommer. Auch hier gibt es ein West-Ost-Gefälle in der Leistung der CCA-Modelle. Allerdings ist die Westregion kleiner als während der anderen Saisonen (siehe Abbildung 8).

2. Die Leistungen in den Saisonen DJF und SON sind höher als jene in MAM und JJA, die z.T. als nicht ausreichend eingestuft werden, um darauf Aussagen zu stützen.

3. Die Leistung der Modelle fällt erst gegen Ende der möglichen Kombinationen deutlich ab (siehe Abbildung 9), d.h. viele Prädiktorkombinationen zeigen ein ähnliches Vermögen, den Zusammenhang zwischen den Skalen zu beschreiben. Das könnte auf die physikalische Konsistenz des NCEP/NCAR-Assimilationsmodells zurückzuführen sein, mit dem die atmosphärischen Datensätze erzeugt worden sind.
4. CCA-Niederschlagsschätzungen sind, soweit ein Vergleich möglich ist, etwas besser als MLR-Schätzungen (Matulla et al. 2002). Vor allem ist die Leistung nicht so stark vom Setup des Validierungsexperiments abhängig.

Die Verwendung mehrerer Prädiktorkombinationen, Regionen und Jahreszeiten gestattet es, Ensembles von Schätzungen zu erzeugen, die den möglichen künftigen Temperatur- und Niederschlagszyklus auf Monatsbasis charakterisieren. Einige Resultate der von uns in dieser Studie erzeugten Niederschlagsschätzungen sind:

- IS92a GHG:** (i) Winter: Unterschiede (um 10 %) zwischen der feuchten und der trockenen Realisierung treten in den Regionen 1 und 3 auf, d.h. verschiedene Prädiktorkombinationen führen nördlich des Alpenhauptkammes zu deutlich unterschiedlichen Schätzungen. Während der Wintersaison steuern vorwiegend großräumige atmosphärische Prozesse Niederschlagsereignisse. Bemerkenswert ist, dass bei den Prädiktorkombinationen, die zu mehr Niederschlag (feuchte Realisierung) führen, stets die spezifische Feuchte als thermodynamische Größe eingeht, während es bei der trockenen Realisierung in jeder Region die relative Feuchte ist. Dieses Resultat könnte in Übereinstimmung mit Semenov and Bengtsson (2002) stehen, die für den Nordatlantisch-Europäischen Raum in ECHAM4 eine Abnahme der relativen Feuchte und eine Zunahme der absoluten Feuchte finden. Mehr Wasser in einer wärmeren Atmosphäre kann durchaus zu mehr Niederschlag führen.
- (ii) Frühling: In allen drei Regionen sind die Unterschiede erheblich und die Spannweite mit mehr als 30 % größer als im Winter. Allerdings ist die Leistung der CCA-Modelle in dieser Saison vergleichsweise gering.
- (iii) Sommer: Der Sommer ist jene Jahreszeit, in der das statistische Downscaling die größten Probleme hat, das lokale Witterungsgeschehen mit den großskaligen Prozessen der Atmosphäre zu verbinden. Das entspricht der Erwartung, sind doch die Niederschlagsprozesse vorwiegend lokal. Eigentlich rechtfertigt die Leistung der Modelle nicht die Darstellung der Resultate, der Vollständigkeit halber aber wird sie dennoch vorgenommen. Die größten Differenzen zwischen feuchter/trockener Realisierung sind in Region 3 zu finden (mehr als 50 %). An einzelnen Stationen ist nahezu eine Verdoppelung der Niederschlagssummen zu sehen. Gerade in dieser Region (R3) ist aber die Leistung

der Modelle am schlechtesten und die Aussage daher als sehr unsicher einzustufen.

(iv) Herbst: Region 1 und 3, also nördlich des Alpenhauptkammes, zeigen die größten Unterschiede (grob 20 % und 30 %).

IS92a GHG+ars: Bei diesem Szenario sind die Unterschiede zwischen den feuchten und trockenen Realisierungen deutlich geringer als beim 'GHG-only'. Die geschätzten Veränderungen sind gering und deuten in der Regel Niederschlagsabnahmen an. Dieser Umstand, gegenüber dem IS92a GHG gesehen, könnte die dämpfende Wirkung der Aerosole auf den hydrologischen Kreislauf sein. Die geringeren Temperaturzunahmen in den IS92a GHG+ars-Szenarien (siehe unten), sind auf die Wirkung der Aerosole zurückzuführen. Eine kühlere Atmosphäre kann aber weniger Wasser transportieren und damit zu geringeren Niederschlagssummen führen.

Ergebnisse der Temperaturschätzungen sind:

IS92a GHG: Die Schätzungen für die diesem Szenario entsprechenden Veränderungen sind einheitlich Temperaturzunahmen, die im Bereich von etwa 1.5 Grad bis etwa 3 Grad liegen. Die Temperaturzunahmen im Winter und Sommer sind stärker ausgeprägt als in den Übergangssaisonen. Man kann an nahe beieinanderliegenden Stationen unterschiedlicher Höhe über NN, wie z.B. Innsbruck (577 m) und Patscherkofel (2247 m), Schmitenhöhe (1964 m) und Zell am See (753 m) sowie Sonnblick (3105 m) und Bad Gastein (1100 m) eine starke Höhenabhängigkeit der Temperaturzunahme erkennen. Die Temperaturzunahme nimmt mit der Höhe zu. Interessant ist, dass die Temperaturzunahme im Sommer etwa gleich groß ist wie im Winter. Das ist anders als wir es in Matulla et al. (2002) erhalten haben. Hier lag die Erwärmung im Sommer unter der im Winter.

IS92a GHG+ars: Die lokalskaligen Temperaturzunahmen dieser Szenarien liegen etwa 0.8 Grad unter denen des IS92a GHG. Die Spannweite zwischen den kühlen und heißen Realisierungen ist in der Regel geringer als jene der IS92a GHGSzenarien. Die Höhenabhängigkeit der Erwärmung bleibt erhalten, wie auch der Umstand, dass im Winter und Sommer die Temperaturzunahmen im gleichen Wertebereich vorliegen.

Die Unterschiede, die auf die Verwendung verschiedener Prädiktoren zurückgehen, sind im Falle des IS92a GHGSzenarios zum Teil erheblich. Einerseits war es bezweckt, einfach die extremsten, also besonders feuchte und besonders trockene Realisierungen zu betrachten.

Andererseits könnte es andeuten, dass die Niederschlagsentwicklung in manchen Saisonen und Regionen mit statistischen Methoden (genauer: mit der CCA) nicht schätzbar ist.

Ist das so? Unsere Erfahrung spricht gegen diese Annahme.

Ein Grund für die starke Streuung der lokalen IS92A GHG-Realisierungen kann die Verwendung von Prädiktorkombinationen sein. Unsere Forderung nach zwei Prädiktorfeldern, von denen eines ein Feuchtemaß sein soll, ist zwar physikalisch sinnvoll, kann aber auf ein statistisch instabiles Modell führen. Wenn beispielsweise die Vorticity in 500 hPa ein guter Prädiktor ist und die Hinzunahme von relativer Feuchte keinen wesentlichen Informationsgewinn bringt, sind die Koeffizienten der relativen Feuchte beliebig schlecht bestimmt. Das kann bei gleichbleibenden Klimabedingungen ohne Effekt bleiben. Bei veränderten Bedingungen aber kann es dazu führen, dass in den lokalen Szenarien nahezu alles passieren kann (drastische Veränderungen in jede Richtung).

Eine weitere Möglichkeit ist, dass die atmosphärischen Felder, die bei NCEP/NCAR – ALOCLIM als Prädiktoren eine gute Leistung zeigen, bei ECHAM4/OPYC3 als Prädiktoren nicht entsprechend zufriedenstellend funktionieren. Busuioc and von Storch (1996) haben empirisches Downscaling als diagnostisches Werkzeug zur Modellvalidierung verwendet. Dieser Ansatz kann verwendet werden, bestimmte atmosphärische Felder zu erkennen, die im Referenzklima eines Klimamodells nicht realistisch genug abgebildet werden. Solche Felder sollte man dann nicht zum Schätzen von lokalen Szenarien verwenden.

Die Verwendung von LARS-WG in dieser Studie war bewusst so angelegt, dass mit möglichst einfachen Mitteln plausible Ergebnisse erzielt werden konnten. Zum einen sind in der Erzeugung der Daten für die Periode 2000–2050 nur Niederschlag und Temperatur angepasst worden. Andererseits haben wir die Wettergeneratoren räumlich nicht gekoppelt. Die täglichen Reihen von Temperatur und Niederschlagswerten basieren auf den mit CCA-Modellen downgescalten IS92a GHG- und IS92a GHG+ars-Szenarien, die auf Monatsbasis vorliegen. Der LARS-WG benötigt ein Temperatur- und ein Niederschlagsszenario auf monatlicher Basis, um ein Szenario auf Tagesbasis zu erzeugen. Daher haben wir für jedes IPCC-Szenario ein 'feucht-kaltes' und ein 'trocken-warmes' lokalskaliges Szenario auf Tagesbasis erhalten.

Die erzielten Ergebnisse deuten an, dass LARS-WG mit den getroffenen Annahmen plausible Szenarien von Temperatur und Niederschlag auf Tagesbasis produzieren kann. Mehr noch, LARS-WG scheint den Charakter der Szenarien, den sie auf saisonaler Basis hatten ('warm', 'kalt', 'feucht', 'trocken'), auch auf die Tagesszenarien übertragen zu können. Die täglichen Temperaturszenarien zeigen einheitlich eine Temperaturzunahme. Bei den Niederschlagsszenarien entsteht kein einheitliches Bild.

Eine sinnvolle Weiterentwicklung der Resultate dieser Arbeit scheint die Entwicklung eines Kriteriums zu sein, das die physikalisch sinnvolle Forderung, sowohl ein thermodyna-

misches als auch dynamisches Prädiktorfeld in den Downscalingmodellen zu verwenden, mit statistisch stabilen Beziehungen zwischen den Skalen vereinbart und sicherstellt, dass die Felder auch im Klimamodell ausreichend realistisch abgebildet werden. Einen möglichen Weg dorthin scheint die Idee von Busuioc and von Storch (1996) aufzuzeigen, nämlich das Referenzklima des GCM ebenso wie die Beobachtungen (NCEP/NCAR) zum Downscaling zu verwenden und mit den lokalen Beobachtungen zu vergleichen. Auf dieser Grundlage kann über die Verwendung eines bestimmten atmosphärischen Feldes als Prädiktor entschieden werden. Eine andere Möglichkeit Szenarien auf Tagesbasis zu erhalten, ist die Verwendung der Analogmethode (Zorita and von Storch 1999), die allerdings nicht von vornherein zur Untersuchung der Extremwertverteilungen geeignet ist.

Bei den Wettergeneratoren bieten sich zwei Richtungen der Weiterentwicklung an: (i) Anpassen des vollen LARS-WG-Parametersatzes – also auch Strahlung und Serien von feuchten und trockenen Tagen. Dafür würden entweder Tagesdaten von einem GCM-Szenario nötig sein, oder eingehende Untersuchungen, wie sich diese Serien in einem Szenario ändern. (ii) Ein zweiter offener Punkt ist die räumliche Kopplung von mehreren Wettergeneratoren. Ein schwieriges Unterfangen, das teilweise schon realisiert wurde (Semenov and Porter 1999).

Anhang

Tabelle 12: Liste verwendter Abkürzungen

| | |
|--|----------------------------|
| lasc | großskalig |
| losc | lokalskalig |
| spch | spezifische Feuchte |
| wrot | Vorticity |
| relh | relative Feuchte |
| vwnd | meridionale Windkomponente |
| uwnd | zonale Windkomponente |
| wdiv | Winddivergenz |
| gpht | Geopotential |
| 2, 5, 7, 8 <small>(hinter den Prediktoren)</small> | 200, 500, 700, 850 hPa |
| pred-com. | Prediktorkombination |

Dank

Diese Studie wurde vom österreichischen Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur im Rahmen des Forschungsprojektes: 'Einsatzmöglichkeiten verschiedener statistischer Downscalingmethoden für Klimaänderungsszenarien in topographisch stark gegliedertem Terrain und explizite Anwendung auf Österreich für Niederschlag und Temperatur' gefördert.

Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Österreich, stellte den ALOCLIM-Datensatz und tägliche Stationsdaten zur Verfügung, die Reanalysen stammen vom National Center for Atmospheric Research, USA, und die Szenariodaten vom Deutschen Klimarechenzentrum.

Wir möchten Herrn Dr. H. Kuhn herzlich danken. Er ist uns stets mit Rat und Tat in Soft- wie Hardwarefragen zur Seite gestanden und hat die reibungslose Prozessierung unserer Daten ermöglicht. Michael Scheck sei für die Betreuung des Wiener Rechners gedankt. Frau Gardeike hat uns geholfen Abbildungen zu verbessern und H. Matulla, S. Wagner, B. Hünicke und E. Zorita haben mit vielen Diskussionen und Tipps die Lesbarkeit des Manuskripts erhöht. Professor Hans von Storch hat diese Arbeit und vieles darüber hinaus ermöglicht. Meiner lieben Frau Ewa möchte ich für ihren geduldigen Verzicht auf mich während der Zeit intensiver Arbeit und für Johannes (siehe Abbildung 28) danken.



Abbildung 28: Johannes Kilian Matulla

Literatur

- Auer, I., R. Böhm, and W. Schöner, 2001: Austrian long-term climate 1767–2000. *Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik*, **25**.
- Böhm, R., I. Auer, M. Brunetti, M. Maugeri, T. Nanni, and W. Schöner, 2001: Regional temperature variability in the European Alps: 1760–1998 from homogenized instrumental time series. *Int. J. Climatol*, **21**, 1779–1801.
- Busuioc, A., and H. von Storch, 1996: Changes in the winter precipitation in Romania and its relation to the large-scale circulation. *Tellus*, **48A**, 538–552.
- Charles, S., B. Bates, and J. Hughes, 1999: A spatio-temporal model for downscaling precipitation occurrence and amounts. *J. Geophys. Res.*, **104**, 31657–31669.
- Giorgi, F., 1990: Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J. Climate*, **3**, 941–963.
- Giorgi, F., C. Shields Brodeur, and G.T. Bates, 1994: Regional climate-change scenarios over the United-States produced with a nested regional climate model. *J. Climate*, **7**, 375–399.
- Gyalistras, D., H. von Storch, A. Fischlin, and M. Beniston, 1994: Linking GCM-simulated climatic changes to ecosystem models: case studies of statistical downscaling in the Alps. *Clim. Res.*, **4**, 167–189.
- Hotelling, H., 1936: Relations between two sets of variants. *Biometrika*, **28**, 321–377.
- Hughes, J., P. Guttorp, and S. Charles, 1999: A non-homogeneous hidden Markov model for precipitation occurrence. *Appl. Stat.*, **48**, 15–30.
- IPCC, 1992: *Climate Change 1992 - The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, 200 pp.
- IPCC, 1996: *Climate Change 1995 - The Science of Climate Change; Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 572 pp.
- IPCC, 2001: *Climate Change 2001 - The Scientific Basis*, Chapter 10. Cambridge University Press.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C.

- Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, and D. Joseph, 1996: The NCEP/NCAR reanalysis project. *Bull.Amer.Meteor.Soc*, **77**, 437–471.
- Kittel, T., N. Rosenbloom, T. Painter, and S.D.V.M. Participants, 1995: The VEMAP integrated database for modeling united ecosystem/vegetation sensitivity to climate change. *J. Biogeog.*, **22**, 857–862.
- Maak, K., and H. von Storch, 1997: Statistical downscaling of monthly mean air temperature to the beginning of flowering of *Galanthus nivalis* L. in Northern Germany. *Int. J. Biometeorol.*, **41**, 5–12.
- Matulla, C., 2003: Erstellung lokalskaliger IS92aGHG[+ars] szenarien. COSREM 15, Institute of Meteorology and Physics, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Türkenschanzstr. 18, A-1180 Vienna, Austria. not peer-reviewed.
- Matulla, C., N. Groll, H. Kromp-Kolb, H. Scheifinger, M.J. Lexer, and M. Widmann, 2002: Climate change scenarios at Austrian National Forest Inventory sites. *Clim. Res.*, **22**, 161–173.
- Matulla, C., E.K. Penlap, P. Haas, and H. Formayer, 2003: Multivariate techniques to analyse precipitation in Austria during the 20th century. *Int. J. Climatol.* accepted.
- Matulla, C., E.K. Penlap, and H. von Storch, 2003: *Empirisches Downscaling – Überblick und zwei Beispiele*, pp. 20–31. Klimastatusbericht. D-63004 Offenbach: Deutscher Wetterdienst. not peer-reviewed, Available via www.dwd.de.
- Matulla, C., H. Scheifinger, A. Menzel, and E. Koch, 2003: Exploring two methods for statistical downscaling of Central European phenological time series. *Int. J. Biometeorol.* in press.
- Mearns, L., C. Rosenzweig, and R. Goldberg, 1997: Mean and variance change in climate scenarios: Methods, agricultural applications, and measurement of uncertainty. *Climatic Change*, **35**, 367–396.
- Pickering, N., J. Stedinger, and D. Haith, 1988: Weather input for nonpoint source pollution models. *Journal of Irrigation and Drainage*, **114**, 674–690.
- Racksko, P., L. Szeidl, and M. Semenov, 1991: A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological modelling*, **57**, 27–41.
- Richardson, C., 1981: Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation. *Water Resources Research*, **17**, 182–190.

- Roeckner, E., J. Oberhuber, A. Bacher, M. Christoph, and I. Kirchner, 1996: ENSO variability and atmospheric response in a global coupled atmosphere-ocean GCM. *Climate Dyn.*, **12**, 737–745.
- Semenov, M., and E. Barrow, 1997: Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change*, **35**, 397–414.
- Semenov, M., R. Brooks, E. Barrow, and C. Richardson, 1998: Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in diverse climates. *Clim. Res.*, **10**, 95–107.
- Semenov, M., and J. Porter, 1999: Climatic variability and the modelling of crop yields. *Agric. Forest. Meteorol.*, **73**, 265–283.
- Semenov, V., and L. Bengtsson, 2002: Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM. *Climate Dyn.*, **19**, 123–140.
- von Storch, H., E. Zorita, and U. Cubasch, 1993: Downscaling of global climate change estimates to regional scales: An application to Iberian rainfall in wintertime. *J. Climate*, **6**, 1161–1171.
- von Storch, H., and F. Zwiers, 1999: *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press, 528 pp.
- Wanner, H., R. Rickli, E. Salvisberg, C. Schmutz, and M. Schüepp, 1997: Global climate change and variability and its influence on Alpine climate - concepts and observations. *Theor. Appl. Climatol.*, **58**, 221–243.
- Wilby, R., T. Wigley, D. Conway, P. Jones, B. Hewitson, J. Main, and D. Wilks, 1998: Statistical downscaling of general circulation model output: a comparison of methods. *Water Resources Research*, **34**, 2995–3008.
- Wilks, D., 1999: Interannual variability and extreme-value characteristics of several stochastic daily precipitation models. *Agricultural and Forest Meteorology*, **93**, 153–169.
- Wilks, D.S., and R.L. Wilby, 1999: The weather generator game: A review of stochastic weather models. *Progress in Physical Geography*, **23**, 39–357.
- Woth, K., 2001: Abschätzung einer zukünftigen Niederschlagsentwicklung mit statistischen Methoden unter Einbezug räumlicher Differenzierungsverfahren am Beispiel des südwesteuropäischen Raums. Diplomarbeit, Universität Trier. 101 Seiten. GKSS-Bericht 2001/28.

Zorita, E., and H. von Storch, 1999: The analog method - a simple statistical downscaling technique: comparison with more complicated methods. *J. Climate*, **12**, 2474–2489.