



ZAMG

*Zentralanstalt für
Meteorologie und
Geodynamik*

LANGZEITKLIMA KÄRNTEN

Langjährige Zeitreihen und Zukunftsszenarien für das Bundesland Kärnten“

Abschlussbericht

der Abteilung Klimaforschung der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

vom 31.10.2010

Projektlaufzeit: 01.11.2009 bis 31.10.2010

Autoren und Projektdurchführung:

Ingeborg Auer, Reinhard Böhm, Michael Hofstätter, Konrad Türk

Projektleitung: Ingeborg Auer

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--------|---|
| 1 | EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG |
| 2 | KLIMAVERGANGENHEIT |
| 2.1. | Instrumentelle Messungen und Metadaten |
| 2.2. | Homogenisierung |
| 2.2.1. | Homogenisierung von täglichen Temperaturextremen |
| 2.3. | Die letzten 100-200 Jahre Klimageschichte Kärntens aus den Histaalp-Langzeitreihen |
| 2.3.1. | Klimaantriebe |
| 2.3.2. | Zeitreihendarstellung der Kärntner Landesreihen 1900-2010 |
| 2.3.3. | Trendanalysen 1900-2009/10 – Trendtabellen |
| 2.3.4. | Trendanalysen 1900-2009 – Änderung der Jahresgänge |
| 2.3.5. | Vergleichende Darstellung geglätteter Klimazeitreihen |
| 2.3.6. | Extremwerte – Klimaänderungsindizes aus täglichen Klimadaten |
| 3 | ZEITREIHEN VON TEMPERATUR UND NIEDERSCHLAG: KLIMASZENARIEN AUF MONATS- BASIS FÜR KÄRNTEN |
| 3.1. | Daten |
| 3.1.1. | Beobachtungsdaten: HISTALP & Tagesdatenreihen |
| 3.1.2. | Reanalysedaten: NCEP/NCAR 1 |
| 3.2. | Klimamodellsimulationen: ECHAM 5 / MPI-OM |
| 3.3. | Methode |
| 3.3.1. | Gebietsgewichtung für Q7/850 und T5/850 |
| 3.3.2. | Multivariate Regression |
| 3.3.3. | Empirische orthogonale Funktionen |
| 3.4. | Zeitreihen für die Klimazukunft |
| 4 | BESCHREIBUNG DER SZENARIEN |
| 4.1. | Klimaszenarien für Kärnten |
| 4.2. | Beschreibung der Änderungen |
| 4.3. | Unsicherheiten und Verwendbarkeit der Szenarien |
| 5 | LITERATURVERZEICHNIS |
| | Anhänge |
| | ANHANG A METADATEN |
| | ANHANG B ZEITREIHENDARSTELLUNG DER KÄRNTNER LANGZEITREIHEN 1900-2009/10 |
| | ANHANG C TRENDANALYSE 1900-2009 – TRENDTABELLEN |
| | ANHANG D ÄNDERUNG DER JAHRESGÄNGE 1900-2009/10 |
| | ANHANG E VERGLEICHENDE DARSTELLUNG GEGLÄTTETER KLIMAZEITREIHEN |
| | ANHANG F – ÄNDERUNG VON EXTREMWERTEN – AUSGEWÄHLTE STATIONEN |
| | ANHANG G – KLIMASZENARIEN FÜR KÄRNTEN - STATIONEN |

1 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Am 12. Oktober 2009 erging seitens des Amtes der Kärntner Landesregierung, Abteilung 15 – Umwelt, Kärntner Institut für Klimaschutz (KIKS) der Auftrag, das Langzeitklima in Kärnten – *100 Jahre Vergangenheit, 100 Jahre Zukunft*-, basierend auf Messungen und Modellrechnungen, darzustellen. Die Projektlaufzeit betrug elf Monate.

Projektziele:

- Bereitstellung monatlicher HISTALP Daten für Kärnten
- Modellierung von Klimazukünften für Kärntner Stationen
- Beschreibung ausgewählter Extremwertindices für Vergangenheit und Zukunft

2 KLIMAVERGANGENHEIT

2.1. Instrumentelle Messungen und Metadaten

Die ältesten meteorologischen Daten aus Kärnten, die bislang für die Klimaforschung nutzbar gemacht werden konnten, stammen aus Klagenfurt (ab 1913), Obir (ab 1851) und St. Paul i. L. ab (1852). Matthias Achazel begann 1806 – also noch vor 1848 dem offiziellen Gründungsjahr des österreichischen Messnetzes - regelmäßige Wetterbeobachtungen in Klagenfurt durchzuführen (Klemun, 1994). Heute umfasst das meteorologische Messnetz in Kärnten 32 Stationen, ergänzt durch Temperatur-, Niederschlags- und Schneemessstellen des Hydrographischen Dienstes des Amtes der Kärntner Landesregierung.

Noch sind nicht alle verfügbaren historischen Klimadaten von Kärnten entsprechend ausgewertet und für die Klimaforschung verfügbar gemacht. Derzeit sind 12 Kärntner Stationen in der HISTALP (**H**istorical **I**nstrumental **S**urface **T**ime **S**eries of the **G**reater **A**lpine **R**egion) Datenbank vorhanden, hinzu kommt die am Alpenhauptkamm gelegene Station Sonnblick (Auer et al., 2007). Einen Überblick über die klimatologischen Elemente und deren Verfügbarkeit gibt Tabelle 1. Alle HISTALP Daten Österreichs sind für wissenschaftliche Zwecke unter der web-Adresse <http://www.zamg.ac.at/histalp> downloadbar. Das Up-date der HISTALP Daten erfolgt kontinuierlich.

Tabelle 1. Übersicht über HISTALP Stationen in Kärnten: Name = derzeit gültiger Stationsname, g.L= geographische Länge, g.B= geographische Breite, Sh (Seehöhe)

| Name | g.L | g.B | Sh (m) | Temp | Nied | Sonne | Luftdruck |
|----------------------|--------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Bad Bleiberg | 13.689 | 46.625 | 907 | | 1874-2008 | | |
| Döllach | 12.904 | 46.959 | 1078 | | 1896-2008 | | |
| Eisenkappel | 14.594 | 46.491 | 623 | | 1886-2008 | | |
| Flattach-Kleindorf* | 13.106 | 46.935 | 735 | 1899-2006 | 1896-2006 | | |
| Heiligenblut** | 12.853 | 47.036 | 1315 | | 1896-1999 | | |
| Klagenfurt-Flughafen | 14.324 | 46.650 | 459 | 1813-2008 | 1813-2008 | 1884-2008 | |
| Kornat*** | 12.889 | 46.688 | 1047 | | 1871-2007 | | |
| Millstatt | 13.574 | 46.808 | 719 | 1891-2008 | 1896-2008 | | |
| Sonnblick | 12.958 | 47.054 | 3105 | 1887-2008 | | 1887-2008 | 1887- 2008 |
| St. Andrä | 14.829 | 46.764 | 402 | 1882-2008 | | | |

| | | | | | | | |
|----------------|--------|--------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Villach | 13.875 | 46.619 | 493 | | 1888-2008 | | |
| Villacher Alpe | 13.673 | 46.604 | 2160 | 1852-2008 | | 1884-2008 | 1880-2008 |

Anmerkungen: *) keine ZAMG Station, in HISTALP wird die Reihe Flattach durch Overvellaach ersetzt werden**) Station existiert nicht mehr, ***) Station existiert nicht mehr, wird als Kötschach-Mauthen/Kornat in Zukunft weitergeführt,

Metadaten beschreiben wo und unter welchen Bedingungen die Messungen und Beobachtungen gewonnen wurden. Es sind also Daten über die Daten. Metadaten umfassen Angaben über geographische Länge und Breite, Seehöhe, Instrumente und deren Messgenauigkeiten, Beobachter, etc. Daten ohne die entsprechenden Metadaten sind praktisch wertlos. Langzeitreihen müssen aus verschiedenen Stationen zusammengesetzt werden, da die Lebensdauer einer meteorologischen Station begrenzt ist. Anhang A gibt eine Aufstellung welche Stationen für die Zusammensetzung der HISTALP Reihen zur Verfügung standen.

Zu ordentlichen Metadaten gehört die Kennzeichnung, ob es sich um Originalwerte, korrigierte oder homogenisierte Messwerte handelt. Für Analysen der Klimaänderung dürfen nur Homogenitätsgeprüfte bzw. homogenisierte Daten verwendet werden (Abschnitt 2.2). Inhomogene Klimazeitreihen verfälschen die wahren Klimasignale. Dies kann bis zur Trendumkehrung führen.

2.2. Homogenisierung

Bevor Langzeitklimareihen für weitere Klimavariabilitätsanalysen verwendet werden dürfen, müssen sie auf ihre Homogenität geprüft werden und wenn nötig homogenisiert werden. Homogenisieren ist ein aufwändiges und notwendiges mathematisch-statistisches Verfahren, um lange Klimazeitreihen für die objektive Klimaforschung überhaupt erst nutzbar zu machen. Störende Inhomogenitäten in den Klimazeitreihen, würden die berechneten Trends stark verfälschen. Lange Klimazeitreihen enthalten unvermeidlich Brüche und Trends, die nicht auf die natürliche Klimavariabilität zurückzuführen sind. Es handelt sich dabei um Änderungen der Messbedingungen einerseits an der Messstelle selbst, andererseits in ihrer Umgebung. Zu den Ersteren zählen Standort-, Instrumenten- und Beobachterwechsel, Änderungen der Beobachtungszeiten und vieles mehr. Ein typisches Beispiel für Änderungen in der Umgebung ist die zunehmende Urbanisierung. Gute Metadaten, in denen die Umstände der Datengewinnung dokumentiert sind, sind unverzichtbar, um in Kombination mit mathematisch-statistischen Verfahren die Homogenität einer Messreihe bestimmen zu können.

Der Vorgang der Homogenisierung für die Langzeitstationen Kärntens bestand aus mehreren aufbauenden Schritten:

- Erfassung der Metadaten
- Testen der Homogenität einer Klimazeitreihe, Feststellen von Inhomogenitäten

- Anpassung der Klimazeitreihe, Entfernen von Inhomogenitäten

Die ersten Aktivitäten zur systematischen Homogenisierung österreichischer Klimamessreihen gehen auf Arbeiten des vorigen Jahrhunderts zurück (Böhm 1992, Auer 1993). Unter Verwendung des Craddock Verfahrens wurden homogenisierte Zeitreihen von Lufttemperatur (Heiligenblut, Klagenfurt, Oberdrauburg, Radenthein, St. Andrä im Lavanttal, Sonnblick und Villacher Alpe) und Niederschlagssumme (Bad Bleiberg, Döllach, Heiligenblut, Klagenfurt, Mallnitz, Millstatt und Villach) geschaffen. Für die ausgewählten Stationen Klagenfurt, Sonnblick und Villacher Alpe wurde 2001 ein multi-elementarer homogenisierter Datensatz geschaffen, der neben Lufttemperatur und Niederschlagssumme auch Luftdruck, mittlere Extremtemperaturen, Sonnenscheindauer, Bewölkung, relative Feuchte und Dampfdruck (Auer et al. 2001) umfasst.

Basierend auf Böhm et al., 2001, Auer et al., 2005 und Auer et al., 2007 steht heute der HISTALP Datensatz zur Verfügung. Im März 2009 ging HISTALP ans Netz. Damit sind die Resultate eines jahrelangen Arbeitsschwerpunktes der Klimaforschungsgruppe des österreichischen Wetterdienstes nun leicht und ohne Einschränkung für die Allgemeinheit zugänglich. HISTALP Daten erfordern eine ausreichende Länge und Messnetzdicke. Sie sind qualitätsgeprüft und auf den aktuellen Zustand homogenisiert.

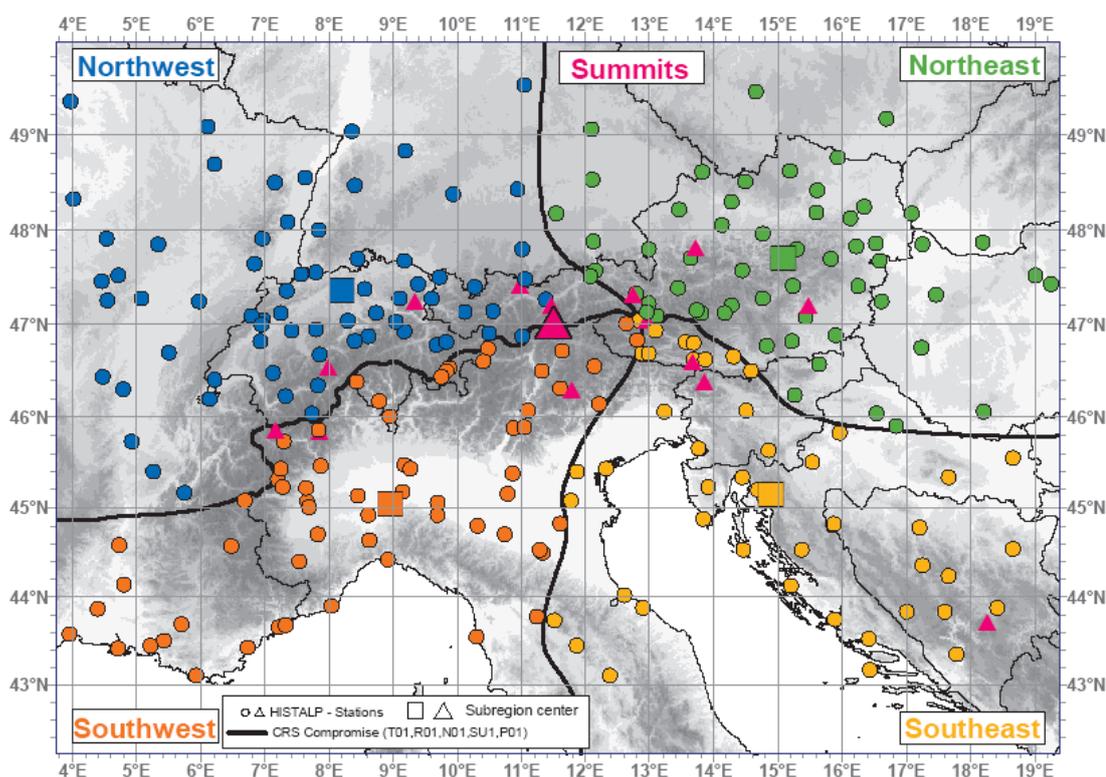


Abbildung 1. Das aktuelle HISTALP-Netzwerk für den Alpenraum und Umgebung von ca. 200 Standorten und mehr als 500 einzelnen Klimazeitreihen. Zusätzlich ist die objektiv analysierte Regionalisierung nach Auer et al., 2007 durch unterschiedliche Farbgebung und Klimagrenzlinien eingezeichnet.

HISTALP Zeitreihen haben monatliche Auflösung. Sie erlauben weitgehend eine ausreichend genaue Darstellung der mittleren Verhältnisse, deren Schwankungen von Jahr zu Jahr und Trends. Spezielle Phänomene, genauer gesagt Extremereignisse werden nur in seltenen Fällen (extreme Extreme, wie z.B. die Hochwässer in Kärnten 1965 und 1966) wiedergegeben. Zur Analyse von beispielsweise Heißen Tagen, tropischen Nächten oder Trockenperioden sind Zeitreihen von höherer zeitlicher Auflösung (zumindest täglicher) erforderlich. Die hierzu entwickelten Verfahren sind rechnerisch aufwändiger. Während bei der Verarbeitung von Monatsdaten nur die Änderung des Mittelwerts berücksichtigt werden muss, ist beispielsweise bei Extremtemperaturen des Öfteren die gesamte Häufigkeitsverteilung anzupassen. (Abb. 2).

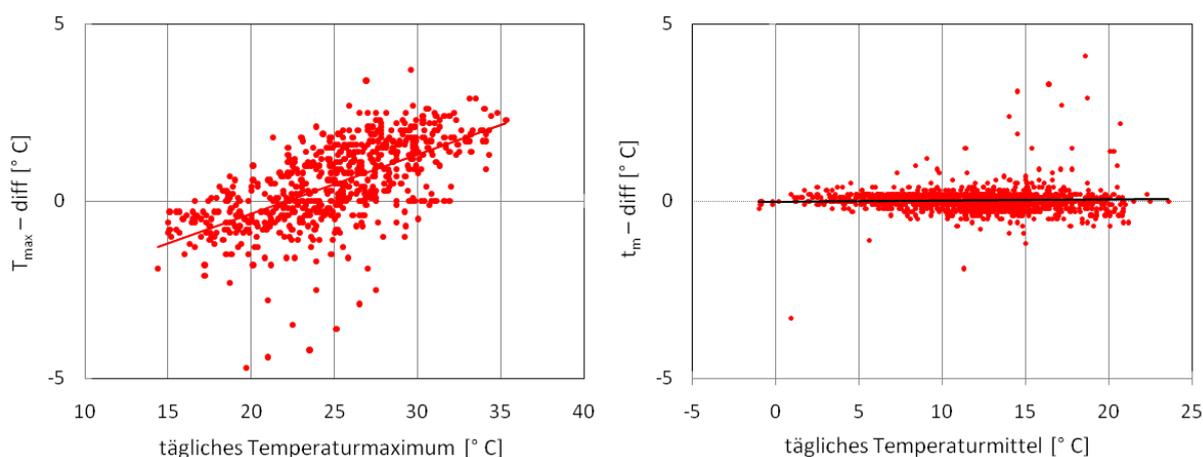


Abbildung 2. Beispiele zur Homogenisierung: Links: Tagesmaxima der Lufttemperatur. Die Inhomogenität zeigt eine Temperaturabhängigkeit, es muss die gesamte Häufigkeitsverteilung angepasst werden. Rechts: Tagesmitteltemperaturen. Die Inhomogenität zeigt keine Temperaturabhängigkeit, eine Anpassung des Mittels ist ausreichend.

Für die Homogenisierung der Kärntner Stationen auf Tagesbasis – zur weiteren Verwendung der Berechnung der „Climate Change Detection Indices“ fanden die Methoden PRODIGE (Cau), SPLIDHOM und INTERP Verwendung. PRODIGE ermöglicht die Bruchdetektion, SPLIDHOM und INTERP sind Korrekturalgorithmen. SPLIDHOM ermöglicht die Anpassung der gesamten Verteilung, allerdings nur wenn die Art der Inhomogenitäten es erfordert und Teststation und Referenzstation ausreichend hoch korreliert sind. Für den Niederschlag erbrachten die oben genannten Prozeduren keine brauchbaren Ergebnisse. Daher wurde auf das traditionelle Verfahren Anpassung aller Tageswerte an die homogenisierten Monatssummen (HISTALP) zurückgegriffen.

2.2.1 Homogenisierung von täglichen Temperaturextremen

Tabelle 2. Übersicht über delektierte Bruchstellen in den Zeitreihen von Tmax und Tmin

| Stat.Name | Ele. | Bruch | | | | | | |
|-----------------------|------|----------|----------|--|--|--|--|--|
| | | Datum | Qualität | Ursache | | | | |
| Klagenfurt | Tmin | 19820715 | ++ | Prodige | | | | |
| | | 19910715 | ++ | Einstellung herk, Taklis; | | | | |
| Kanzelhöhe | Tmin | 19500930 | ++ | Prodige | | | | |
| | | 19521231 | ++ | Beobachterwechsel | | | | |
| | | 20010809 | + | TAWES | | | | |
| | Tmax | 19500930 | + | Prodige | | | | |
| | | 19680215 | ++ | Beobachterwechsel | | | | |
| | | 20000715 | ++ | Prodige | | | | |
| | | 20060715 | ++ | Prodige | | | | |
| Kolbnitz | Tmin | 19880715 | ++ | Prodige | | | | |
| | Tmax | 19631215 | ++ | Hüttenanstrich erneuert | | | | |
| | | 19871215 | ++ | Prodige | | | | |
| | | 19900115 | ++ | Prodige | | | | |
| | | 19980715 | + | Prodige | | | | |
| Loibl | Tmin | 19750715 | ++ | Prodige | | | | |
| | | 19990715 | ++ | Prodige | | | | |
| | Tmax | 19710715 | + | Beobachterwechsel | | | | |
| | | 19940715 | + | Prodige | | | | |
| Millstatt | Tmin | 19820701 | ++ | Neuerrichtung TAKLIS | | | | |
| | | 19910601 | ++ | Wetterhüttentausch ab 1989; TAKLIS-Service 1992 | | | | |
| | Tmax | 19760101 | ++ | Beobachterwechsel, Meßgerätetausch | | | | |
| | | 19800215 | ++ | Meßgerätetausch | | | | |
| | | 19910601 | ++ | Meßgerä te-, Wetterhüttentausch ab 1989; TAKLIS-Service 1992 | | | | |
| Preitenegg | Tmin | 19710715 | ++ | Gerätetausch | | | | |
| | | 19750715 | ++ | Prodige | | | | |
| | | 19820215 | ++ | Prodige | | | | |
| | Tmax | 19930715 | ++ | TAWES Errichtung 19930525 | | | | |
| Reisach | Tmin | 19720405 | ++ | Hüttenanstrich | | | | |
| | | 19810915 | ++ | Beobachterwechsel | | | | |
| | | 19910215 | ++ | Prodige | | | | |
| | Tmax | 19720405 | ++ | Hüttenanstrich | | | | |
| | | 19980715 | ++ | Prodige | | | | |
| St.Andrä im Lavanttal | Tmin | 19750701 | ++ | Stationswechsel (18704->18810) | | | | |
| | Tmax | 19750215 | ++ | Beobachterwechsel; Datenqualität Station 18704 | | | | |
| | | 19890915 | ++ | Instrumentenwechsel | | | | |

Die Tabelle zeigt die an den Stationen durchgeführten Homogenisierungen, Stationen, die nicht angeführt wurden, wurden im Originalzustand (qualitätsgeprüft) belassen, da entweder keine Brüche detektiert wurden oder die Station nicht homogenisierbar (aus Mangel von geeigneten Vergleichstationen) war. Man sieht auch, dass nicht alle Brüche durch vorhandene Metadaten erklärt werden können. Die Entscheidung, ob es sich dabei um eine Schwäche der durchgeführten Tests handelt, oder ob die Metadaten unvollständig sind, kann derzeit noch nicht getroffen werden.

2.3. Die letzten 100-200 Jahre Klimageschichte Kärntens aus den Histalp-Langzeitreihen

2.3.1 Klimaantriebe

Die Veränderlichkeit des Klimas in Kärnten wird einerseits von globalen Klimaschwankungen geprägt, die auf einige von außen auf das Klimasystem der Erde einwirkende Faktoren (Klimaantriebe) zurückgehen - andererseits sind diesen globalen Effekten regionale Modifikationen aufgeprägt, die verstärkend oder abschwächend wirken. Kärnten erfährt regionale Einflüsse sowohl vom Atlantik und vom Kontinentalklima Europas als auch vom mediterranen Klima. Alle drei sind zusätzlich der Höhenschichtung des Klimas ausgesetzt.

In den letzten Jahrhunderten, zurzeit und auch in den kommenden Jahrzehnten sind vor allem zwei natürliche und zwei menschlich verursachte globale (anthropogene) Klimaantriebe wirksam:

Natürliche Klimaantriebe: Schwankungen der Sonnenaktivität und explosive Vulkanausbrüche. Beide beeinflussen die kurzwellige Energie-Einstrahlung ins Klimasystem der Erde – die vulkanischen Aerosole (feste und flüssige Teilchen) wirken in Summe abkühlend

Zusammen waren diese beiden natürlichen Klimaantriebe die wichtigsten für die globale Klimaentwicklung des letzten Millenniums bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts

Anthropogene Klimaantriebe: Zunahme der Treibhausgase, die die Wärmeabstrahlung der Erde vermindern und der Aerosole, die (wie die vulkanischen) in Summe die kurzwellige Einstrahlung abschirmen. Die Konzentration von CO₂ (Kohlendioxid) steigt durch die schnelle Verbrennung von fossilem Kohlenstoff (Kohle, Erdöl, Erdgas), CH₄ (Methan) durch intensive Rinderzucht, Nassfeldkulturen (Reis).

Die beiden anthropogenen Klimaantriebe wurden ab etwa 1950 zu den vorherrschenden – zunächst maskierte die Luftverschmutzung über den Aerosoleffekt vor allem in Europa und Nordamerika den im Hintergrund bereits wirksamen anthropogenen Treibhauseffekt. Ab etwa 1980 trat der Treibhauseffekt deutlich in den Vordergrund – und wird es unserer Einschätzung nach auch in den kommenden Jahrzehnten bleiben.

2.3.2 Zeitreihendarstellung der Kärntner Langzeitreihen 1900-2010

In Kärnten befinden sich von den in HISTALP (<http://www.zamg.ac.at/histalp>) enthaltenen qualitätsgeprüften und homogenisierten instrumentellen Langzeit-Klimareihen fünf Temperatur-, acht Niederschlags-, drei Sonnenschein- und drei Luftdruckreihen, die zumindest bis zum Jahr 1900 zurückgehen. Sie alle sind im Anhang B in vergleichbarer Weise dargestellt – und zwar jeweils die ungeglätteten Zeitreihen von Jahr zu Jahr und die 20-jährige geglätteten Verläufe. Erstere geben ein Bild der starken kurzfristigen Schwankungen des Klimas, letztere lassen die Langfristtrends hervortreten. Da es auch unterschiedliche saisonale Trends gibt, sind neben den Jahreskurven auch saisonale gezeigt.

Allen Reihen der vier Klimaparameter gemeinsam ist das deutliche Überwiegen der kurzfristigen Variabilität gegenüber den langfristigen Trends. Besonders deutlich ist das beim Niederschlag. Aus diesem Grund sind die in den geglätteten Kurven erkennbaren Trends nicht immer signifikant, bei den (hier nicht gezeigten) Monatstrends nur selten.

Ebenfalls allen Zeitreihen gemeinsam ist, dass sich der Schwankungsbereich der Kurzfristvariabilität – also das „Auf und Ab“ um die geglätteten Langfrist-Trendkurven seit dem Jahr 1900 nicht erhöht hat – das Klima ist in Kärnten, so wie im übrigen Großraum Alpen nicht wechselhafter geworden.

2.3.3 Trendanalyse 1900-2009/10 – Trendtabellen

Alle Kärntner Langzeitreihen wurden einer Trendanalyse unterzogen. Zu Vergleichszwecken wurden den Kärntner Klimatrends auch die anderer Regionen Österreichs gegenübergestellt – für die Lufttemperatur auch das globale Mittel.

Es wurden die linearen Trends der allen Reihen gemeinsamen Periode 1900-2009/10 berechnet und durch das Signifikanzmaß TNR (trend to noise ratio) auf statistische Signifikanz geprüft. Signifikant ist in dieser Definition ein linearer Trend dann, wenn die gesamte Änderung im betrachteten Zeitraum die Streuung (Standardabweichung) übertrifft.

Wie die Zeitreihen in den Diagrammen von Anhang B deutlich machen, sind die Klimatrends meist nicht linear. Daher wurden neben dem linearen Trend der 109-jährigen gesamten Zeitspanne Trends in drei Unterabschnitten berechnet. Da es keine allen Klimaparametern und allen Monaten, Jahreszeiten und Jahresreihen gemeinsamen deutlichen Unterabschnitte gibt, wurde zur Unterteilung folgender Kompromiss getroffen:

Die Unterteilung in Subperioden wurde analog zu dem in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Zusammenwirken von natürlichen und anthropogenen Klimaantrieben vorgenommen, der auch recht gut der Struktur der Reihen der Jahresmitteltemperatur folgt:

1900-1950: die letzte überwiegend natürlich geprägte Klimaperiode mit noch schwachem anthropogenen Einfluss und mit ansteigenden Temperaturen

1950-1980: die erste überwiegend anthropogen geprägte Periode, in der allerdings der abkühlende Aerosoleffekt noch den Treibhausgaseneffekt maskiert – die Temperaturen stagnieren bzw. gehen leicht (nicht signifikant) zurück

1980-2009/10: die zweite überwiegend anthropogen geprägte Periode mit kontinuierlich wachsendem Treibhauseffekt – so gut wie überall und meist signifikant steigende Temperaturen. Um 1980 in der Mehrzahl der Fälle auch eine Trendwende beim Niederschlag von vorher eher fallend auf nun eher wieder ansteigend.

In den Tabellen in Anhang 2 sind die signifikanten Trends fett gedruckt. Die folgende Tabelle gibt die Prozentanteile der signifikanten Trends an.

Trendcharakteristik Temperatur:

Im gesamten Land Kärnten beinahe identische Temperaturtrends, die auch den über ganz Österreich bzw. dem gesamten Großraum Alpen entsprechen. Seit 1900 ist in Kärnten die Temperatur um 1.4 bis 1.6°C gestiegen (lineare Analyse), gegenüber einem Anstieg im globalen Mittel von 0.8°C.

Die erste Erwärmungsstufe bis 1950 brachte in Kärnten eine Erwärmung von 0.4-1.0°C (global 0.5°C), zwischen 1950 und 1980 ging die Temperatur um bis zu 0.3° zurück, in den 29 Jahren seit 1980 stieg sie wieder um 1.0 (Sonnblick) bis 1.7°C (Klagenfurt) an, im globalen Mittel um 0.5°C.

Es gab saisonale Unterschiede in den Trends – am schwächsten ist die aktuelle Erwärmung im Herbst, auf den Bergen Kärntens gibt es in dieser Jahreszeit seit 1980 sogar eine leichte (nicht signifikante) Abkühlung.

Trendcharakteristik Niederschlag:

Wie schon den einzelnen Zeitreihendiagrammen zu entnehmen war, ist der Verlauf der Niederschlagsvariabilität nicht nur saisonal, sondern auch räumlich variabler als die der Temperatur. Trotzdem ist das Gebiet Kärntens doch durch eine insgesamt kohärente Langzeitcharakteristik der Niederschlagstrends gekennzeichnet – das im Unterschied zu Gesamtösterreich oder den Großraum Alpen, die z.T. gegensätzliche Langzeittrends des Niederschlages besitzen.

Insgesamt hat der Niederschlag in Kärnten an den HISTALP-Stationen seit 1900 um 13-22% abgenommen (alle Prozentangaben beziehen sich auf das Mittel des 20. Jahrhunderts als Grundwert). Die Abnahme war stärker im Winterhalbjahr (18-41%) und schwächer (nirgends signifikant) im Sommerhalbjahr (5-11%). Im Kernsommer (Juni-Juli-August) gab es an den meisten Langzeitstationen sogar eine schwache (0-9%) Niederschlagszunahme von 1900 bis 2010.

Damit entspricht Kärnten weitgehend den Langzeittrends im südöstlichen Teil des Großraums Alpen und ist gegenläufig zum Bereich nordwestlich des Alpenbogens, in dem insgesamt ansteigender Niederschlag vorherrschte

Die Charakteristik einer Niederschlagsabnahme war in Kärnten vor allem für die ersten 50 Jahre des 20. Jahrhunderts typisch – also in der noch weitgehend „natürlichen“ Klimaperiode. Von

1950-1980 wurden die Trends schwächer und uneinheitlicher – im Frühling (März-April-Mai) gab es nun durchwegs Niederschlagsanstieg, die Winter (Dezember-Jänner-Februar) wurden weiterhin trockener. In den „Treibhausgasdezennien“ von 1980-2010 war hingegen der starke Temperaturanstieg begleitet von einem an allen Kärntner Reihen messbaren Niederschlagsanstieg zwischen 7 und 24%, die sogar (eine Seltenheit bei Niederschlagstrends) z.T. signifikant sind. Die Trendwende ist in allen Jahreszeiten zu beobachten – Spitzenreiter sind die +59% in Kötschach-Mauthen im Winter.

Trendcharakteristik Sonnenscheindauer:

Für die Entwicklung der Sonnenscheindauer stehen in Kärnten zwar nur drei Langzeit-Messreihen zur Verfügung, die jedoch - wenn man die diesbezüglichen Ergebnisse von Analysen aus dem gesamten Großraum Alpen heranzieht – ausreichend sein dürften, die Verhältnisse im ganzen Land repräsentativ zu beschreiben. Beim Klimaparameter Sonnenscheindauer ist es nämlich vor allem die vertikale Schichtung, die zu unterschiedlichen Trends führen kann – und das ist mit den drei vorhandenen Reihen aus Klagenfurt, der Villacher Alpe (Zweitausenderregion) und des Sonnblicks (Dreitausenderregion) möglich.

An allen drei Standorten gab es über die gesamte Zeit von 1900 bis 2010 eine Zunahme der Sonnenscheindauer. Sie war signifikant in den Bergen (251-256 Stunden, das sind 13-15%), mit +84 Stunden (+5%) nicht signifikant in Klagenfurt. Der schwächere Trend in Klagenfurt war vor allem vom Sommerhalbjahr verursacht, während im Winter hier ähnliche Steigerungen wie auf den Bergen stattfanden.

Vor allem im Gebirge folgen die Sonnenscheintrends der Subperioden der dreistufigen Charakteristik, die wir von der Temperatur kennen: also Zunahme bis 1950 (+5 bis +16%), Abnahme in der „Aerosolperiode“ 1950-1980 (-2 bis -11%, letzteres in Klagenfurt) und schließlich ein markanter neuerlicher Anstieg der Sonnenscheindauer in den aktuellen drei Jahrzehnten, der nun in Klagenfurt +21% ausmachte und in den Bergen bei rund +12% lag.

Für die Ursachen der zunehmenden Sonnenscheindauer können zwei Argumente ins Treffen geführt werden:

Zunächst erfolgte im 20. Jahrhundert bis in die 1990er-Jahre eine nordwärts-Verlagerung des Subtropenhochs, was man auch den Tiefland-Luftdruckreihen des Großraums Alpen entnehmen kann (in Kärnten belegt durch die Langzeitreihe von Klagenfurt in Anhang B). Das verursacht vor allem an den Gebirgsreihen mehr Schönwetter und damit mehr Sonnenscheinstunden.

Dieses vermehrte Auftreten von Hochdrucklagen dürfte auch verantwortlich sein für die stärkere regionale Erwärmung im Großraum Alpen gegenüber dem globalen Mittel. Mehr Sonnenschein bedingt durch häufigeres Hochdruckwetter hat in den Alpen und damit auch in Kärnten den globalen Hintergrundtrend von treibhausgasbedingter Erwärmung beinahe verdoppelt (vergleiche dazu den obigen Abschnitt über die regionalen und globalen Temperaturtrends).

Dass gerade in Klagenfurt die Sonnenscheindauer in den „Aerosoljahren“ der 1950er bis 1970er die Sonnenscheindauer viel stärker zurückging als auf den Bergen und in der nun wieder saubereren Luft der letzten drei Jahrzehnte dort besonders stark zunahm, deutet auf einen zusätzliche Mechanismus hin, der auf den Einfluss der Luftverschmutzung deutet. Dieser wird in der Wissenschaft auch auf globaler Basis diskutiert und ist unter den Begriffen „global dimming“ und nun „global brightening“ bekannt.

2.3.4 Trendanalyse 1900-2009 – Änderung der Jahresgänge

Die Jahresgangs-Diagramme der monatlichen Mittelwerte bzw. Summen für die drei Unterabschnitte der Zeit seit 1900 erlauben eine weitere Verfeinerung des bisher Gesagten von Jahres- bis Jahreszeitentrends zu monatlichen.

Insgesamt verdeutlichen sie, dass die Trends des 20. und beginnenden 21. Jahrhunderts an der Jahresgang-Charakteristik kaum etwas geändert haben.

Bei der Temperatur dominiert durchgehend eine einfache und gegenüber der Einstrahlung verzögerte Jahreswelle mit einem Maximum im Juli und einem Minimum im Jänner, wobei mit zunehmender Seehöhe die auch aus anderen Bergen der Alpen bekannte Verzögerung zum August bzw. Februar stattfindet.

Beim Niederschlag gibt es nicht nur bei den Trends, sondern auch generell bei den Jahresgängen interessante und typische Unterschiede innerhalb Kärntens. Im Unterschied zu den anderen Regionen Österreichs wird hier, speziell im Gail- und Lesachtal, aber auch in anderen südlichen Landesteilen ein zweites herbstliches Niederschlagsmaximum deutlich, das in Kötschach-Mauthen sogar das sommerliche Hauptmaximum übertrifft, das für Restösterreich das vorherrschende Merkmal des Niederschlags-Jahresganges ist. Dieses Herbstmaximum ist ein typisch mediterran-adriatisches Klimamerkmal, das nur in Südkärnten bis nach Österreich hereinreicht.

2.3.5 Vergleichende Darstellung geglätteter Klimazeitreihen

Um den durchaus auch auftretenden Abweichungen der tatsächlichen Klimaentwicklung von der groben Einteilung in drei Subperioden gerecht zu werden, werden in Anhang E vergleichende Diagramme geglätteter jährlicher und halbjährlicher Zeitreihen gezeigt. Jedes Diagramm zeigt – getrennt für die drei Hauptklimaelemente – alle Kärntner Temperatur-, Niederschlags- und Sonnenscheinreihen.

Im Gegensatz zu den ersten drei Abschnitten werden hier die vollen Längen der Zeitreihen vorgeführt, die für den Sonnenschein bis in die 1880er Jahre zurückreichen, für Klagenfurt sowohl beim Niederschlag als auch bei der Temperatur bis 1813.

Da die Einzeljahre die Diagramme völlig unübersichtlich machen würden, sind nur die Tiefpassgefilterten Reihen gezeigt, in denen alle Variationen von weniger als 20 Jahren unterdrückt sind.

Bei der Temperatur und vor allem beim Sonnenschein entsprechen die tatsächlichen Verläufe der Zeitreihen gut der vorgeschlagenen Dreiteilung. Es zeigen sich durchwegs Wendepunkte nahe 1950 und 1980. Allerdings sieht man nun auch die den Langzeittrends überlagerten „dekadischen Variationen“. Diese sind auch jahreszeitlich unterschiedlich, wie zum Beispiel bei Gegensatz von kühlen Sommern und milden Wintern in den 1910er-Jahren oder bei den strengen Wintern um 1890, die in den Sommerkurven nicht sichtbar sind.

Beim Niederschlag wird deutlich, dass eine zusätzliche Unterteilung nahe 1920 günstig gewesen wäre, da hier überall das Hauptmaximum der Niederschläge aufgetreten ist – allerdings wird das relativiert durch die Tatsache, dass der Wendepunkt im Sommer und im Winterhalbjahr nicht gleichzeitig aufgetreten ist – im Winterhalbjahr bereits in den 1910ern und im Sommerhalbjahr erst in den 1920ern.

Günstig hingegen ist auch beim Niederschlag die Wahl des „Wendjahres 1980“. Dieser (Vor-)erst) endgültige Eintritt ins Treibhauszeitalter hat nicht nur bei Temperatur und Sonnenschein, sondern auch beim Niederschlag eine Veränderung von fallenden zu stagnierenden bis steigenden Trends gebracht. Bei fast allen Kärntner Niederschlagsreihen wurde das Hauptminimum seit 1900 (und auch davor) um 1980 erreicht – im Winterhalbjahr bereits etwas davor.

2.3.6 Extremwerte – Klimaänderungsindizes aus täglichen Klimadaten

Die Auswertung täglicher Klimazeitreihen erlaubt uns zusätzliche Aussagen über Klimaänderungen zu machen. Dies betrifft in erster Linie Änderungen von Extremwerten, die über berechnete Climate Change Detection Indices (Peterson, 2005) überblicksmäßige Aussagen erlauben. International wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl von Indices definiert, ein Softwarepaket RCLimDex (<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDI/software.shtml>) steht gratis zur Verfügung. Für die Bearbeitung der Kärntner Stationen wurde eine Reihe dieser Indices selektiert und deren Trends über die Periode 1980 – 2009 berechnet. Als der zur Berechnung benötigte Referenzzeitraum wurde 1971-2000 gewählt. Die Ergebnisse sind nachfolgend überblicksmäßig beschrieben. Zusätzlich wurden in Anhang F die Indices ausgewählter Stationen grafisch aufbereitet.

Kälteindizes

CSDI – Kälteperioden (Anzahl der Tage in Kälteperioden von mindestens 6 Tagen Andauer, definiert über das 10% Perzentil der täglichen Minimumtemperaturen) zeigen eine Abnahme, am stärksten an den Stationen Reisach und St. Michael ob Bleiburg, im Hochgebirge (Sonnblick, Villacher Alpe) zeigt sich kaum eine Änderung.

FD0 – In den letzten 30 Jahren hat die Zahl der Frosttage um etwa 20 bis 30 Tage abgenommen.

ID0 - In den letzten 30 Jahren hat die Zahl der Eistage um ca. 10 bis 20 Tage abgenommen.

Tn10P – Kalte Nächte definieren sich über das 10% Perzentil der Minimumtemperaturen der Periode 1971-2000. In den letzten 30 Jahren hat die Zahl der kalten Nächte um bis zu 10 abgenommen.

Tx10P – Kalte Tage definieren sich über das 10% Perzentil der Maximumtemperaturen der Periode 1971-2000. In den letzten 30 Jahren hat die Zahl der kalten Nächte in derselben Größenordnung abgenommen.

Vegetation

GSL – Dauer der Vegetationsperiode: generelle Verlängerung, der für die Vegetationsentwicklung zur Verfügung stehenden Zeit.

Hitze

SU25 – Anzahl der Sommertage ($T_{max} \geq 25 \text{ °C}$): generelle Zunahme, besonders in niedrigen Seehöhen (keine Änderung im Hochgebirge).

SU30 – Heiße Tage ($T_{max} \geq 30 \text{ °C}$): generelle Zunahme, besonders in niedrigen Seehöhen (keine Änderung im Hochgebirge).

TR20 – tropische Nächte ($T_{min} \geq 20 \text{ °C}$) – kommen in Kärnten sehr selten vor, an den Stationen St. Andrä und Klagenfurt ist ein minimaler Anstieg erkennbar.

TN90P – Warme Nächte definieren sich über das 90% Perzentil der Minimumtemperaturen der Periode 1971-2000. In den letzten 30 Jahren hat die Zahl der warmen Nächte im Durchschnitt um 10 zugenommen.

TX90P – Warme Tage definieren sich über das 90% Perzentil der Maximumtemperaturen der Periode 1971-2000. Um denselben Betrag hat in den letzten 30 Jahren hat die Zahl der warmen Tage im Durchschnitt zugenommen.

WSDI - Wärmeperioden (Anzahl der Tage in Wärmeperioden von mindestens 6 Tagen Andauer, definiert über das 90% Perzentil der täglichen Maximumtemperaturen) zeigen eine generelle Zunahme, am stärksten in St. Andrä und in Klagenfurt.

Niederschlag

RR20 – Die Anzahl der Niederschlagstage mit einer Gesamtsumme von mindestens 20 mm hat um ca. 1-3 Tage zugenommen.

R95p – ist die Niederschlagssumme an Tagen, an denen das 95% Perzentil der Periode 1971-2000 überschritten wurde. Diese Kenngröße hat an den meisten Stationen zugenommen.

Rx5day – beschreibt die größte fünftägige Niederschlagssumme eines Jahres. Der Trend an den einzelnen Stationen ist uneinheitlich, die positiven und negativen Abweichungen bewegen sich zwischen +/- 20mm.

SDII – einfaches Maß zur Bestimmung der täglichen Niederschlagsintensität. Auch für dieses Maß lässt sich kein einheitlicher Trend im Land Kärnten identifizieren.

3 ZEITREIHEN VON TEMPERATUR UND NIEDERSCHLAG: KLIMASZENARIEN AUF MONATSBASIS FÜR KÄRNTEN

3.1 Daten

Als Grundlage für die Berechnung der Zeitreihen für die Klimaszenarien der Zukunft werden Histalp Daten (Auer et.al, 2007) sowie Zeitreihen aus dem Stationsnetz der ZAMG verwendet. Die Szenarien basieren auf den Ergebnissen der Klimasimulationen mit dem Klimamodell Ecam5 (Röckner et.al., 2003). Um die Verbindung der Klimamodellrealisation mit der beobachteten Vergangenheit herstellen zu können, werden NCEP Reanalysefelder der NOAA „National Center of Environmental Prediction“ genutzt (Kalnay et.al., 1996). Diese drei Datensätze werden im Folgenden genauer beschrieben. “

3.1.1 Beobachtungsdaten: HISTALP & Tagesdatenreihen

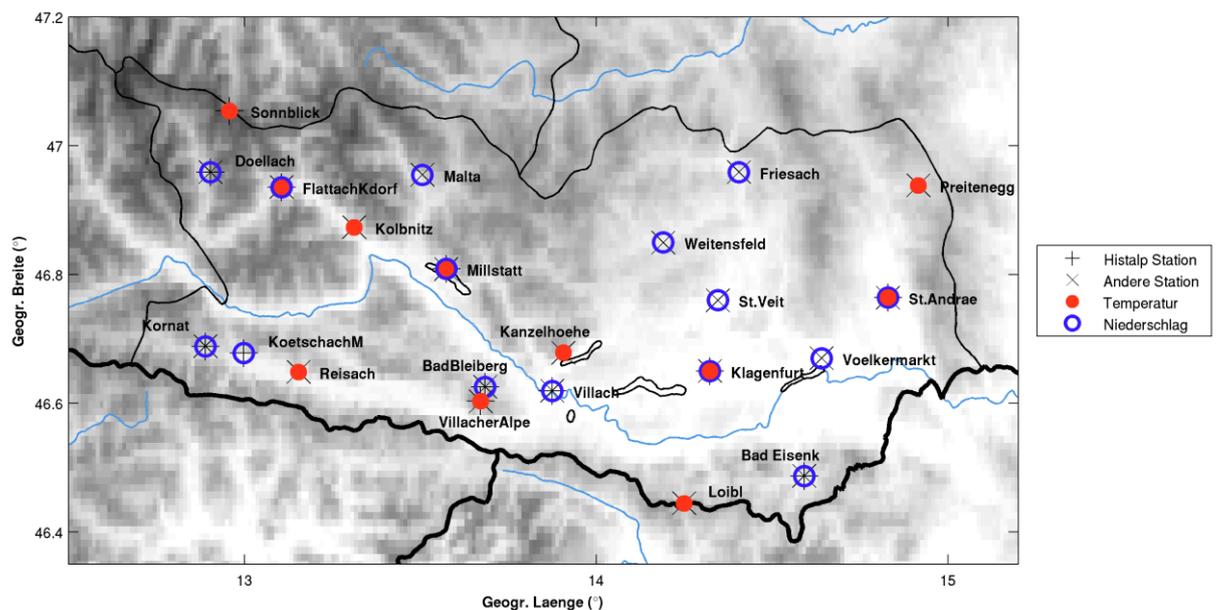


Abbildung 3. Topographische Karte Kärntens mit den Stationsstandorten. In rot bzw. blau sind Zeitreihen der Temperatur bzw. des Niederschlags gekennzeichnet.

3.1.2 Reanalysedaten : NCEP/NCAR 1

Zur Bestimmung des statistisch/physikalischen Zusammenhangs zwischen den lokalen Beobachtungszeitreihen und den großräumigen atmosphärischen Feldern, werden die Reanalysedaten NCEP/NCAR 1 von NOAA „National Center of Environmental Prediction“ genutzt (Kalnay et.al., 1996). Diese Daten liegen auf Gitterpunkten global, in 2.5° räumlicher Auflösung und monatlicher zeitlicher Auflösung für den Zeitraum 1948-2010 vor. Diese Daten sind unter der folgenden Internet-Adresse frei verfügbar:
<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>.

Reanalysedaten bestehen aus einer Vielzahl von Beobachtungsdaten, die zu einem bestimmten Beobachtungszeitpunkt auf ein definiertes Modellgitter gerechnet werden. Derartige Verfahren inter- oder extrapolieren die Beobachtungsdaten nicht nur auf das Modellgitter, sondern berücksichtigen auch die zeitliche und räumliche Konsistenz der Felder (4d-Var Assimilationsverfahren). Sie eignen sich hervorragend, um an Modelldaten aus den verschiedensten Klimasimulationen anzuknüpfen.

Aus diesem Datensatz verwenden wir den Bodenluftdruck reduziert auf Meeresniveau (SLP), die Geopotentielle Höhe (G500), sowie die zwischen 2 Druckflächen gemittelten Werte der spezifischen Feuchte (Q7/850: Druckfläche 700hPa und 850hPa). Weiters verwenden wir die Felder der geopotentiellen Höhe auf den Druckflächen 500hPa und 850hPa. Die Differenz dieser beiden geopotentiellen Höhen wird als Schichtdicke bezeichnet und entspricht - über einen fixen Skalierungsfaktor - der virtuellen Mitteltemperatur T5/850 dieser Schichte.

Sowohl für die NCEP- als auch für die ECHAM5 Daten (Beschreibung im folgenden Absatz), wurde das Gebiet über Europa zwischen 17.5°W und 40°O bzw. 35°S und 60°N festgelegt. Die Auswahl dieses Gebietes ist kritisch für die Güte der Ergebnisse. Es muss einerseits möglichst klein sein, um die für Kärnten relevanten, atmosphärischen Muster abzubilden, andererseits aber groß genug sein, um auch die langwelligen synoptischen Strömungsmuster über Kontinentaleuropa erfassen zu können. Solche langwellige Muster sind die Hauptträger der Varianz und damit unverzichtbarer Bestandteil für die Berechnung der lokalen Klimaszenario-Zeitreihen. In der Abbildung ist dieses ausgewählte Gebiet und die räumliche Auflösung der vorliegenden Reanalysedaten dargestellt.

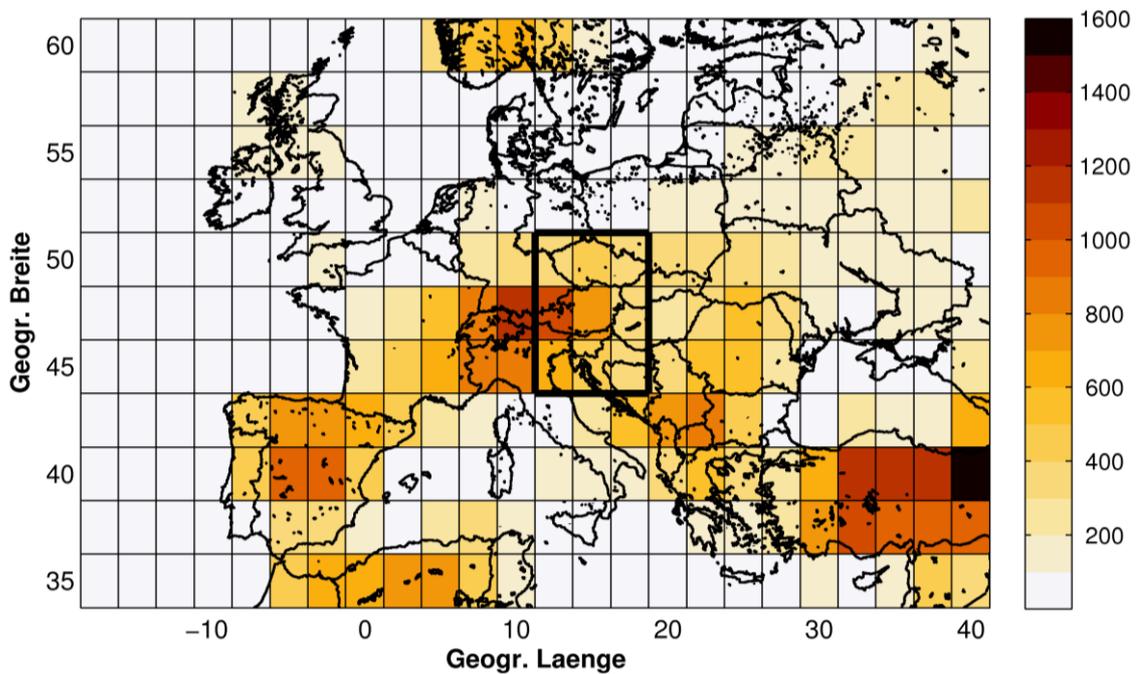


Abbildung 4: Gebietsauswahl, räumliche Auflösung und Seehöhe (m) der Modell- und Reanalysedaten. (schwarze Box: Gebiet zur Mittelung von Q7/850 und TH7/850, siehe Text)

In der Mitte der Abbildung 4 ist über Kärnten ein Gebiet mit 9 Gitterpunkten durch eine schwarze Box markiert. Innerhalb dieses Gebietes werden die Felder der spezifischen Feuchte und der Schichtdicke in Abhängigkeit der Entfernung vom Zentralpixel gewichtet und danach über das Gebiet gemittelt (Beschreibung folgt im Methodenteil).

3.2 Klimamodellsimulationen: ECHAM 5 / MPI-OM

Um lokale Klimaszenarien für die Zukunft in Kärnten ableiten zu können ist es erforderlich die gleichen atmosphärischen Felder aus einer Klimasimulation zu verwenden, die auch bereits in den Reanalysedaten ausgewählt wurden. Dazu benutzen wir die Ergebnisse aus den Klimasimulationen des gekoppelten Atmosphäre/Ozean Klimamodell ECHAM5/MPI-OM (Röckner et.al., 2003). Die Felder aus diesen Läufen (SLP, G500, Q7/850, TH7/850) liegen auf einem räumlichen Gitter von 1.875° in monatlicher Auflösung vor und wurden mit Hilfe der CDO's (Climate Data Operators) zuerst auf das vorliegende 2.5° NCEP-Gitter interpoliert. Wir verwenden die folgenden Läufe des Klimamodells: (1) den Kontrolllauf (CTR) sowie (2) jeweils 3 Realisationen (_1,_2 und _3) der Simulationen für die Zukunft, welche mit den Emissionsszenarien SRES A1b und B1 angetrieben wurden. Die Entscheidung aus der Fülle verfügbarer, globaler Klimamodelle, gerade das Modell des Max Planck Institutes zu wählen, wird mit der Fähigkeit des Modells begründet, die relevanten Zirkulationsmuster (Bodendruck, Geopotentialverteilung) der Atmosphäre sehr gut simulieren zu können (Ulden und Oldenborgh, 2006).

Unter einer Realisation ist ein bestimmter Lauf eines Modells zu verstehen. Bei gleichen Anfangsbedingungen kommt es durch die überlagerte interne Variabilität (Modell- und Klimavariabilität) zu leicht unterschiedlichen, zeitlichen Verläufen in den verschiedenen Modellsimulationen. Diese interne Variabilität ist in der Natur auch zu beobachten und bedeutet keine Unsicherheit des Modells. Auch wenn sich zu einem bestimmten Termin die Realisationen voneinander unterscheiden, so weisen diese über einen längeren Zeitraum hinweg betrachtet (>15 Jahren), die geforderten statistischen Eigenschaften auf. Da wir die Untersuchungsperiode aber willkürlich und unabhängig von den Verläufen selbst festlegen, werden 3 verschiedene Realisationen desselben Szenarios (A1B, B1) verwendet, um statistisch robuste Aussagen ableiten zu können.

Emissionsszenarien beschreiben den zukünftigen Verlauf der Treibhausgasemissionen durch den Menschen. Grundlage für die Einschätzung der zukünftigen Emissionen bilden verschiedene Wirtschafts- und Populationsmodelle, die Festlegung auf mögliche Szenarien wurde im Rahmen von IPCC im 4.Sachstandsbericht durch Expertengremien gemacht. Die Höhe der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre ist für die Klimawandelfrage von großer Bedeutung da sie langfristig den Hauptantrieb im Klimawandel darstellt. Wir haben uns für zwei der verfügbaren Emissionsszenarien entschieden. Eines bildet den wahrscheinlichsten Verlauf der künftigen Emissionen ab (A1B), das zweite (B1) soll hingegen einen abgeschwächte Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen abbilden. Der aktuelle Verlauf der beobachteten Treibhausgasemissionen entspricht sehr stark jenem der in A1B skizziert wird.

Die beiden verwendeten Emissionsszenarien A1B und B1 zeichnen sich durch folgende Eigenschaften aus (IPCC, 2007):

A1B: *Sehr rasches Wirtschaftswachstum, rückläufige Weltbevölkerung ab 2050, rasche Einführung neuer, effizienterer Technologien, ausgewogene Nutzung fossiler und nicht-fossiler Energiequellen, regionale Vernetzung und Interaktion, Verringerung regionaler Unterschiede des Pro-Kopf-Einkommens.*

B1: *Strukturwandel der Wirtschaft in eine Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft mit rückläufiger Bevölkerungsrückgang ab 2050, Annäherung auf globaler Ebene, Rückgang der materiellen Ressourcenaufwendung und Einführung sauberer, Ressourcen-effizienter Technologien, globale Lösungen für eine wirtschaftliche, soziale und umweltgerechte Nachhaltigkeit.*

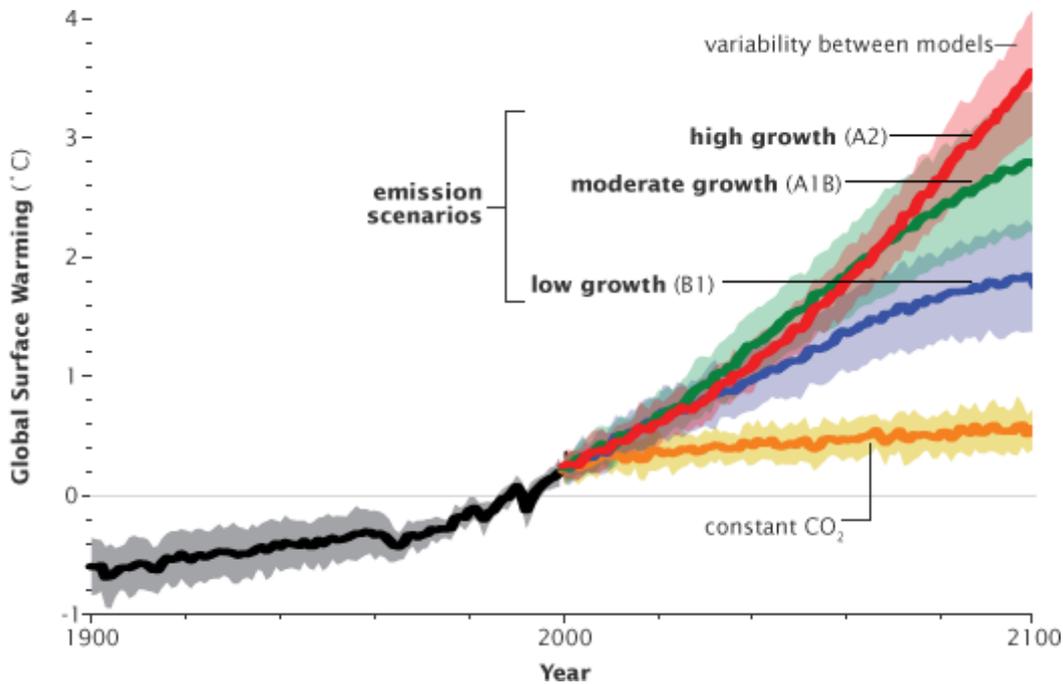


Abbildung 5: Vergleich der SRES Emissionsszenarien im Effekt auf die globale Mitteltemperatur aus den Ensembles globaler Klimamodellsimulationen. (©2007 IPCC WG1 AR-4)

3.3 Methode

Im Folgenden wird die Methodik vorgestellt, mit der aus den monatlichen Stationswerten der Temperatur und des Niederschlages, lokale Zeitreihen für die Zukunft erstellt werden. Der gewählte Ansatz wird ganz allgemein als statistisches Downscaling oder Regionalisierungsverfahren (Empirical Statistical Downscaling – ESD) bezeichnet und umfasst im wesentlichen die Ableitung regionaler Informationen aus gröber aufgelösten Klimamodellläufen (Zorita und Von Storch, 1997).

Hinter diesem Ansatz verbirgt sich die Tatsache dass die lokale Variable (PREDIKTAND) - wie die Temperatur oder der Niederschlag - von großräumigen, physikalischen Prozessen bzw. deren Feldverteilung (PREDIKTOR) gesteuert wird. Diese sind beispielsweise der Bodenluftdruck, die Geopotentialverteilung oder aber auch die großräumige Temperatur- und Feuchteverteilung. Sicherlich existiert darüber hinaus noch eine Vielzahl von verschiedenen anderen, großräumigen Prozessen oder Mustern die einen Einfluss auf die lokalen Zeitreihen haben. Allerdings limitieren die Klimamodelle selbst die Auswahl möglicher Felder. Denn es dürfen nur jene Größen aus den Klimasimulationen verwendet werden, die von den Modellen mit hoher Güte – d.h. geringem Bias - simuliert werden können. Dies garantiert die Verlässlichkeit der lokalen Klimaszenarien für die Zukunft, da in der Zukunftsperiode ausschliesslich die Felder der

Klimamodellsimulationen als Informationsquelle zur Verfügung stehen. Deshalb ist die Auswahl der relevanten Einflussgrößen entscheidend für die Güte im statistischen Downscaling.

Zusammenfassend können folgende Grundvoraussetzung für das ESD-Verfahren, und damit für die Auswahl der Prediktorfelder aus der Reanalyse bzw. den Klimamodellläufen genannt werden (von Storch et.al, 2000):

1. Die Prediktoren sind relevante Größen für den Prediktand (starker Zusammenhang) und werden möglichst realistisch/gut vom Klimamodell simuliert (Modellgüte).
2. Die Transferfunktion – d.h. der statistische Zusammenhang Prediktand und Prediktoren in der Vergangenheit – bleibt auch unter geänderten Klimabedingungen bestehen. (Stationarität)

Je länger die Zeitreihen der Beobachtung, desto stärker kann diese Bedingung erfüllt werden.

3. Die verwendeten Prediktoren enthalten das gesamte Klimaänderungssignal.

In dieser Arbeit werden folgende Kombinationen von Prediktoren und Prediktanden verwendet:

Tabelle 3: Wahl der großräumigen atmosphärischen Felder (Prediktoren) zur Berechnung der lokalen Zeitreihen (Prediktanden) im statistischen Downscaling Verfahren:

| | Geopotential 500hPa | Schichtdicke 500/850hPa | Bodenluftdruck | Spezifische Feuchte 700/850hPa |
|---------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------|---|
| Temperatur | | X | X | |
| Niederschlag | X | | | X |

Die Grundlage zum Bestimmen der zukünftigen Zeitreihen bildet - neben der Auswahl eines geeigneten Klimamodells - somit der physikalisch-meteorologische Zusammenhang der großräumigen atmosphärischen Felder (SLP, G500, Q7/850 und T5/850) mit den lokalen Niederschlags- und Temperaturreihen aus der Beobachtung in Kärnten. Unter der Annahme, dass dieser Zusammenhang auch in der nahen Zukunft bestehen bleibt können aus dem Vergleich

der synoptisch-skaligen Felder von Vergangenheit (NCEP) und Zukunft (ECHAM5 Klimasimulation) entsprechende Zeitreihen auf lokaler Ebene generiert werden.

Sämtliche Berechnungen werden getrennt für das Sommerhalbjahr (April-September) und Winterhalbjahr (Oktober-März) durchgeführt.

3.3.1 Gebietsgewichtung für Q7/850 und T5/850

Die Zeitreihen der spezifischen Feuchte und der Schichtdicke, werden nicht in ihrer Feldverteilung, sondern lediglich als Einzelwert über dem Untersuchungsgebiet verwendet. Um eine höhere Robustheit der Reihen zu gewährleisten verwenden wir jedoch nicht nur die Werte eines einzelnen Gitterpunktes sondern ein gewichtetes Mittel aus einem Gebiet über Kärnten mit 9 Gitterpunkten. Für jeden Zeitschritt wird die folgende Gewichtungsmatrix (%) verwendet:

Tabelle 4. Gewichtungssequenz (siehe Abbildung 4) zur Berechnung der täglichen Mittelwerte der Zeitreihen Q7/850 und T5/850:

| | | |
|----|----|----|
| 2 | 7 | 2 |
| 10 | 44 | 10 |
| 6 | 13 | 6 |

3.3.2 Multivariate Regression

Das statistische Modell, welches in dieser Arbeit verwendet wird, ist die sogenannte Multivariate Regression (MVR). Dieses Modell verwendet nicht wie andere Verfahren paarweise Muster höchster Korrelation zwischen Prädiktor und Prädiktand, sondern bestimmt lineare Zusammenhänge über die Minimierung des RMSE (root mean squared error). Dieser Zusammenhang wird durch die entsprechenden Regressionskoeffizienten beschrieben.

Um diese MVR durchführen zu können ist es zunächst notwendig die Prädiktor und Prädiktanden-Zeitreihen speziell auf zu bereiten, denn sämtliche Eingangsgrößen müssen folgende Bedingungen erfüllen:

1. Normalverteilung
2. Keine Korrelation zu sich selbst bzw. zwischen den Prediktorreihen (Kolinearität)
3. Anomalien auf Monatsbasis, aus diesen wurde der Jahresgang (Monatsmittelwerte und monatliche Standardabweichung) herausgerechnet (Normalisierung).
4. Keine Trends in den Zeitreihen, außer diese repräsentieren rein das Klimasignal.

Besonders wichtig ist Punkt 3, da in die Methode stets für das Winter- und Sommerhalbjahr separat durchgeführt wird. Da aber die Standardabweichung und der Mittelwert beider Variablen (Temperatur und Niederschlag) einen starken Jahresgang aufweist, muss dieser zunächst heraus gerechnet werden. Dadurch können Randeffekte innerhalb der beiden Saisonen vermieden und gleichzeitig die notwendigen Anomalie-Reihen errechnet werden.

Diese Temperatur-Anomalie-Reihen sind in sehr guter Näherung normalverteilt. Die Niederschlagsreihen erfüllen diese Bedingung hingegen nicht und müssen deshalb transformiert werden. Wir verwenden dazu die sogenannte Box-Cox Transformation. Diese gehört zur Familie der Potenzfunktionstransformationen und ähnelt für den Niederschlag sehr einer Log-Transformation, lässt sich jedoch besser an die jeweilige Verteilungs-Charakteristik anpassen. Die Transformation hat folgende Form:

$$R(\lambda) = \frac{R^\lambda - 1}{\lambda} \quad \text{mit } R(\lambda) = \log(\lambda) \text{ wenn } \lambda = 0 \text{ ist}$$

Die Prädiktandenreihen (SLP, G500, Q7/850, T5/850) werden zunächst auch auf Monatsbasis an jedem Gitterpunkt normalisiert. Diese Reihen sind ebenfalls in guter Näherung normalverteilt und müssen nicht transformiert werden.

Die Entfernung eines etwaigen Trends in den Eingangsdaten erfolgt in dieser Arbeit ausschließlich für die Feldwerte des Geopotentials 500hPa (G500). Beim Geopotential ist nicht der absolute Wert von Interesse, sondern die Abweichungen davon wie zb. ein Trog oder Keil sowie die großräumigen Muster dieser Anomalien. Aufgrund der Erwärmung der Luftschicht unterhalb dieses Niveaus dehnt sich aber die Luft nach dem hydrostatischen Gesetz aus und hebt dieses Niveau im Zuge des Klimawandels allmählich an. Da dieser Vorgang aber nichts mit den Geopotentialanomalien und deren relativen Änderungen an sich zu tun hat, muss der langfristige Trend im Geopotential auf 500hPa herausgerechnet werden.

Das Geopotential und der Bodenluftdruck gehen nicht direkt als Feldwerte in die MVR ein, sondern in Form von Zeitreihen der PC's (Principal Components). Diese PCs werden jeweils über die zugehörigen Eigenvektoren (EOF's) bestimmt. Die Prozedur dazu wird im Folgenden Abschnitt beschrieben.

3.3.3. Empirische orthogonale Funktionen

EOF's (empirisch orthogonale Funktionen) sind das Werkzeug im statistischen Downscaling. Mit Hilfe der EOFs kann ein großer Datensatz mit einer Vielzahl von Freiheitsgraden auf wenige neue Freiheitsgrade reduziert werden, sowie die vorhandene Kolinearität in den einzelnen Feldvariablen umgangen werden.

Zudem ist es durch die Berechnung der EOFs möglich, unerwünschte, hochfrequente Varianz aus den Daten zu filtern. Diese beinhaltet im Allgemeinen keine nutzbare Information.

Die Berechnung der EOFs für das Bodendruckfeld und das Geopotentialfeld erfolgt in den folgenden Schritten:

1. Berechnung des mittleren Bodendruckfeldes auf Monatsbasis
2. Bildung der Anomalien relativ zum mittleren Feld
3. Standardisierung der Anomalien durch Dividieren der Anomalien durch die Standardabweichung der Bodendruckfelder auf Monatsbasis
4. Gewichtung der standardisierten Anomalien mit $\text{SQRT}(\cos(\phi))$ wobei ϕ der geographische Breitengrad ist. Diese Gewichtung ist notwendig da die regelmäßigen Gitterpunktweite mit zunehmender geogr. Breite eine immer kleiner reale Fläche repräsentieren. (Überbewertung der nördl. Breiten)
5. Berechnung der Kovarianzmatrix der gewichteten standardisierten Anomalien.
6. Eigenwertzerlegung der Kovarianzmatrix und Reihung der so bestimmten Eigenvektoren nach der Größe der erklärten Varianz in abfallender Reihenfolge. Die erklärte Varianz lässt sich aus dem Betrag der Eigenwerte ablesen, wenn die Summe aller Eigenwerte auf 1 normiert wird.

Die so bestimmten Eigenvektoren sind bereits die gesuchten EOF's. Diese haben die Eigenschaft jeweils orthogonal aufeinander zu stehen (Skalarprodukt=0) und dadurch allesamt linear unabhängig zu sein. Für unseren Fall beträgt die räumliche Gitterpunktdimension (lat x lon) $24 \times 11 = 264$ und damit erhält man aus der Eigenwertzerlegung genau 264 Eigenvektoren sowie die dazugehörigen 264 Eigenwerte. Der erste Eigenvektor, jener mit dem größten Anteil an erklärter Varianz, weist typischerweise das größte räumliche Muster – mit der Wellenzahl 1 – auf. Je weiter man nun in Richtung der Eigenwerte mit niedriger erklärter Varianz geht, umso höher wird die Wellenzahl und umso verrauschter stellt sich das räumliche Muster der dazugehörigen EOF dar. Da wir aber nun an einer Reduktion der Freiheitsgrade, sowie an einer Filterung der hochfrequenten, nichtphysikalischen Informationen interessiert sind, haben wir uns entschieden nur die ersten 6 (SLP) bzw. 8 (G500) Eigenvektoren für die weitere Untersuchung zu verwenden, und verwerfen die restlichen.

Die so berechneten Eigenvektoren 1-8 sind jeweils für das Sommer- und Winterhalbjahr in der Abbildung bzw. Abbildung 7 dargestellt. In der Klammer steht jeweils der prozentuelle Anteil der erklärten Varianz. Diese Muster sind physikalisch nur bedingt interpretierbar, dennoch sind vor allem in den ersten 3 Winter-EOFs die typischen Strömungsmuster „East Atlantic/Western Russia“ (EOF1), „Scandinavian“ (EOF2) sowie „North Atlantic Oscillation“ (EOF3) zu erkennen.

Auch wenn in einigen Arbeiten alle Eigenwerte nach dem 3.ten oder 4.ten als Eingangsgrößen für die MVR erfolgt, verwenden wir in dieser Untersuchung für das Downscaling des Niederschlags 8 Eigenwerte des Geopotentials. Denn zur Abbildung der für den Alpenraum relevanten Strömungsmuster werden kleinräumigere Strukturen benötigt. Zwar erklären diese im klimatologischen Sinne nur wenig Varianz, diese Muster sind aber höchst relevant für intensive Niederschlagsereignisse in einzelnen Monaten. Ein solches Muster ist zum Beispiel ein abgetropftes Höhentiefs.

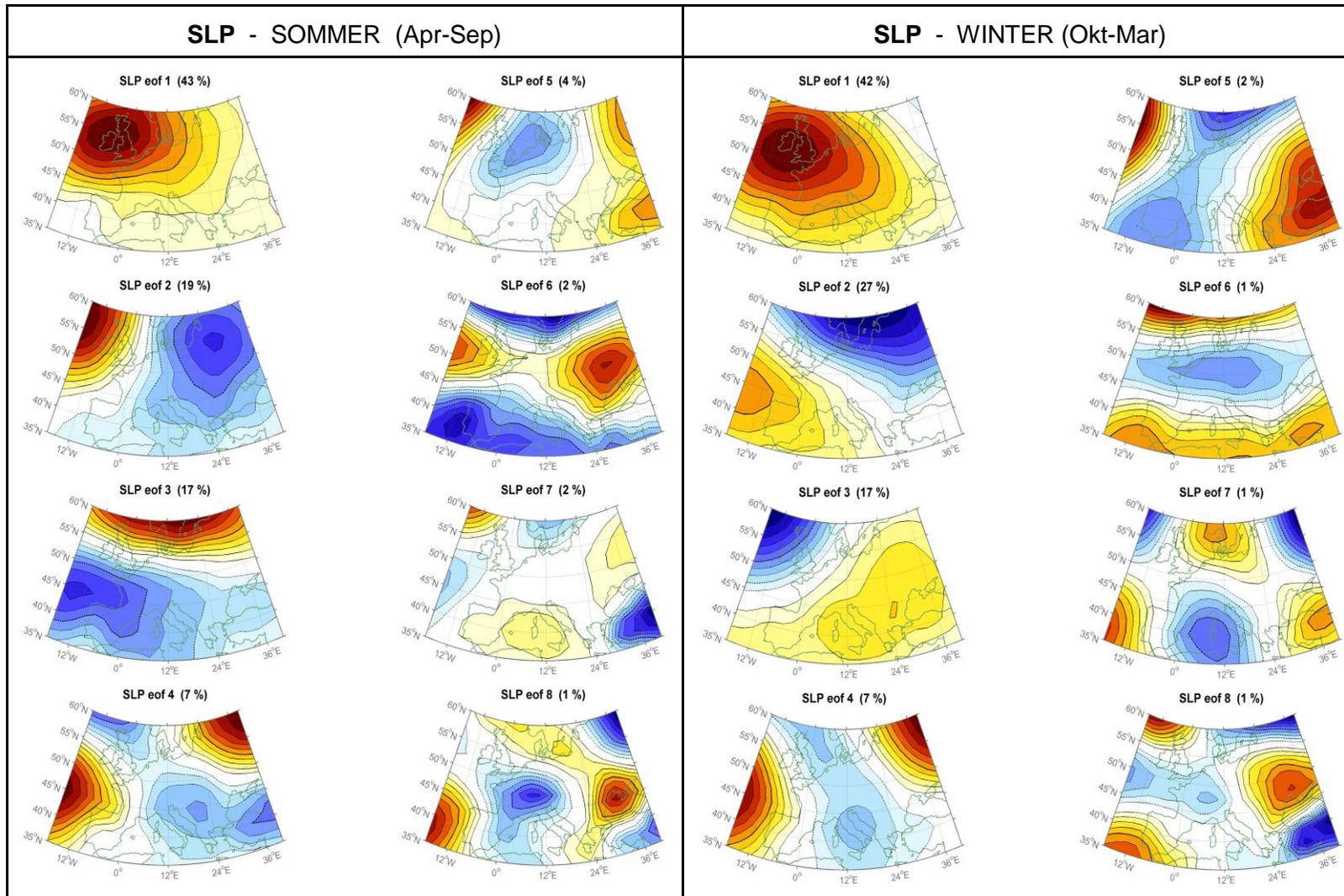
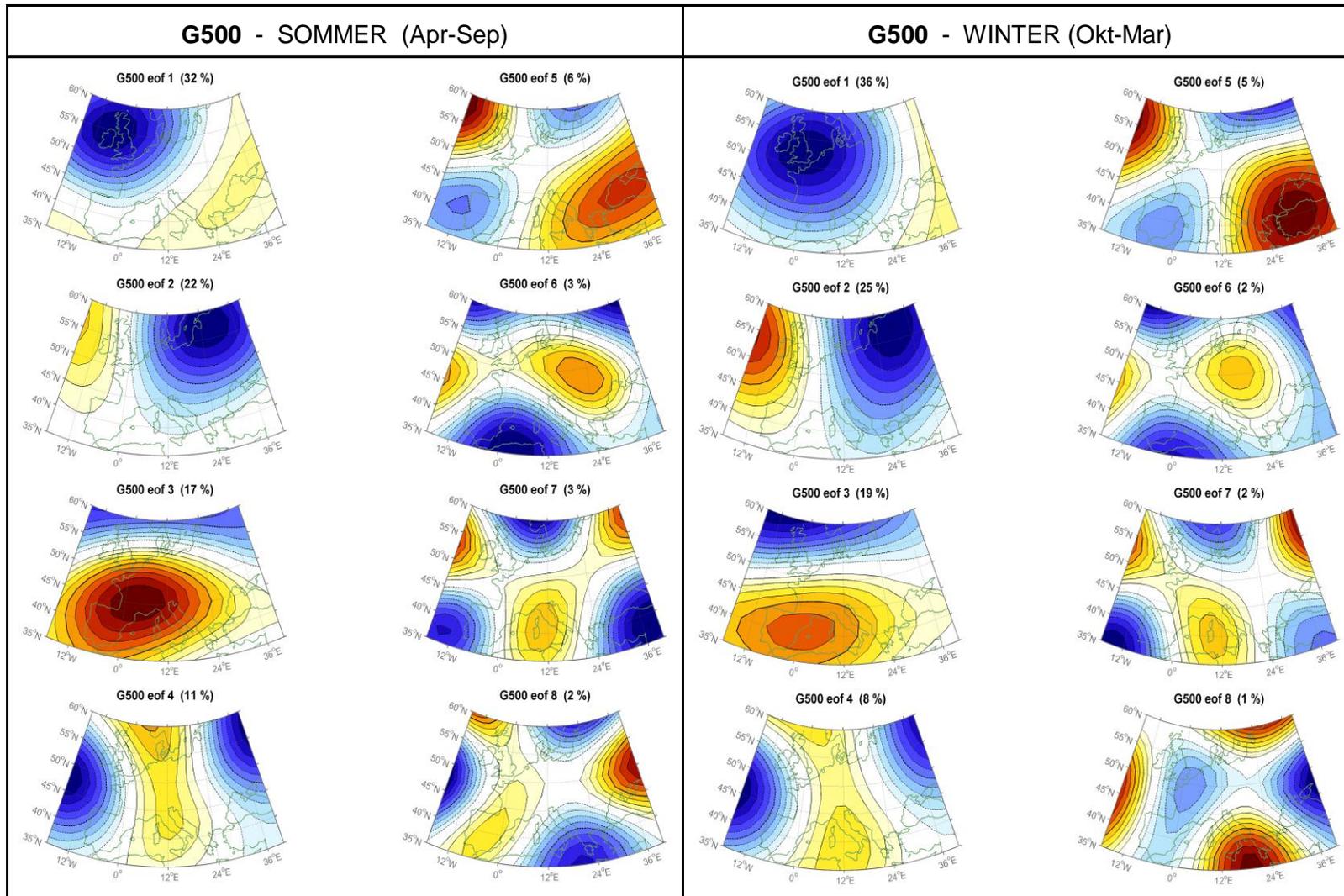


Abbildung 6: Eigenvektoren 1-8 des Bodenluftdrucks für das Sommer- (links) und Winterhalbjahr (rechts) aus NCEP.

Abbil-
Eigenvek-
des Geo-
500hPa
Sommer-
Winter-
(rechts)
NCEP.



dung 7:
toren 1-8
potential
für das
(links) und
halbjahr
aus

Als letzter Schritt wird nun das jeweilige SLP- bzw. G500 Feld auf diese 6 bzw. 8 EOF's projiziert. So erhält man für jedes Monat 6 bzw. 8 Skalare (Zahlenwerte), die den Anteil der jeweiligen Eigenvektoren zur Abbildung des projizierten Feldes enthalten, sie werden PCs (principal components) genannt. Die Zeitreihen der PC's gehen jetzt gemeinsam mit den Anomalie-Zeitreihen Q7/850 und T5/850 in die MVR ein um die Regressionskoeffizienten der Prediktanden (Temperatur und Niederschlag) zu bestimmen.

3.4. Zeitreihen für die Klimazukunft

Um schlussendlich die lokalen Niederschlags- und Temperatur Zeitreihen für Kärntens Klimazukunft berechnen zu können, werden aus den Ecam5 Klimaszenarien die Anomaliezeitreihen relativ zum Kontrolllauf bestimmt und darüber hinaus die Anomaliefelder G500 und SLP (Szenario-Kontrolllauf) auf die NCEP-EOFs projiziert um die PCs der Zukunft abzuleiten. Sämtliche Anomalie- und PC-Zeitreihen der Klimaszenarien gehen dann in die MVR ein, wobei diese mittels der zuvor bestimmten Regressionskoeffizienten invertiert wird um die entsprechenden Zeitreihen der Temperatur und des Niederschlags zu bestimmen.

Anschließend müssen beide Größen für jede Station über die zuvor abgeleiteten Standardabweichungen und Mittelwerte auf Monatsbasis rücktransformiert werden. Zusätzlich werden die Niederschlagsreihen mittels der Transformationsfaktoren aus den Box-Cox Gleichungen in eine log-Verteilung rückgerechnet.

Beim Anwenden der MVR als statistisches Downscaling zeigt sich, dass die Varianz je nach Variable reduziert wird (Zorita und Von Storch, 1997). Dies rührt daher, dass sich zwar der größte Anteil der Varianz aus den atmosphärischen Feldern bestimmen lässt, aber auch eine gewisse Restvarianz fehlt, die lokale und teils auch zufällige Ursachen hat. Dieser Anteil der Varianz fehlt am Ende und kann nicht physikalisch sinnvoll rekonstruiert werden. Von Storch (1999) warnt ebenso wie Benestad et.al (2008) davor, die fehlende Varianz anteilmäßig dazu zu addieren. Dadurch entsteht eine Inkonsistenz mit dem großskaligen Forcing aus den atmosphärischen Feldern (G500, SLP,...).

Diese Reduktion der Varianz muss bei der weiteren Verwendung der Daten beachtet werden. Diese Reduktion kann unberücksichtigt bleiben wenn die Klimaszenarioreihen immer als relative Änderungen zu den berechneten Kontrollzeitreihen verwendet werden. Direkt ausgewertet ergäben sich speziell Probleme bei der Auswertung von Extremereignissen und bei Fragen der Überschreitung von bestimmten Grenzwerten („exceedance over treshold“). Da es sich bei der gegebenen Fragestellung jedoch um Monatswerte handelt und diese eine solche Interpretation ohnehin nicht ermöglichen, wurde die ansonsten so hervorragende Methode der MVR benutzt um die Klimazeitreihen zu bestimmen. Die Verifikation zeigt, dass die rekonstruierten Zeitreihen in der Vergangenheit teils sogar höhere Korrelationen aufweisen als dies in anderen

Arbeiten der Fall war, obwohl Kärnten in eine sehr komplexe Topographie eingebettet ist und eine hohe räumliche Variabilität der Temperatur und des Niederschlages aufweist.

4 BESCHREIBUNG DER SZENARIEN

Szenarien über die Entwicklung des zukünftigen Klimas bilden die Grundlage zur Bewertung von Chancen und Risiken im Rahmen des Klimawandels sowie zum Ergreifen notwendiger Anpassungsmaßnahmen. Derartige Klimaszenarien wurden für Kärnten mit Hilfe statistischen Methoden, unter Verwendung von Simulationen aus globalen Klimamodellen, berechnet.

4.1. Klimaszenarien für Kärnten

Zur Abschätzung möglicher wirtschaftlicher Entwicklungen, die einen wesentlichen Einfluss auf die zukünftige Konzentration der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration haben, wurden die beiden Emissionsszenarien A1B und B1 aus IPCC-AR4 genutzt. Damit ist es möglich, zwei verschiedene Verläufe des Klimas, je nach Entwicklung der globalen Wirtschaft und Bevölkerung, abzubilden.

Für die Berechnung der Klimaszenarien an verschiedenen Standorten in Kärnten wurde, in Einklang mit den im Projektauftrag gegebenen Möglichkeiten, eine sogenannte Multivariate Regressionsmethode als Downscalingverfahren gewählt. Dieses Verfahren benutzt statistische Zusammenhänge zwischen meteorologischen Feldern aus den Simulationen globaler Zirkulationsmodelle und den lokalen Beobachtungsreihen. Die Veränderung dieser großräumigen Felder, wie sie vom Klimamodell simuliert wird, bildet die Grundlage zur Berechnung der Veränderungen der lokalen Größen Temperatur und Niederschlag. Diese Veränderung wird als Klimasignal bezeichnet, welches als relative Änderung (%) im Vergleich zur Beobachtungsperiode 1948-2009 dargestellt wird (zukünftige Trends, Abbildungen im Anhang G).

Für die Temperatur bilden räumliche Muster des Bodenluftdrucks über Europa zusammen mit der Schichtdicke der Atmosphäre über dem Gebiet Kärntens die treibende Größe. Sämtliche Änderungen in diesen Feldern schlagen sich als Änderung in den lokalen Zeitreihen für die Zukunft nieder. Im Fall des Niederschlags wurden räumliche Muster des Geopotentials über Europa, zusammen mit der mittleren spezifischen Luftfeuchte über dem Gebiet Kärntens, als Antrieb benutzt.

4.2. Beschreibung der Änderungen

Im Folgenden werden die für die Zukunft berechneten Temperatur- und Niederschlagszeitreihen hinsichtlich ihrer Änderungen bzw. Trends erläutert sowie eine Zusammenfassung zur Güte der Methode dargelegt.

Temperatur:

Die Methode zur Ableitung der lokalen Temperaturreihen (rekonstruierte Zeitreihen) zeigt an den höher gelegenen Stationen eine hervorragende Übereinstimmung mit den Beobachtungen. Das Bestimmtheitsmaß R^2 , welches die erklärte Varianz des linearen Zusammenhangs darstellt, beträgt je nach Station 0,80-0,95 im Winterhalbjahr bzw. 0,86-0,91 im Sommerhalbjahr. Diese Werte wurden aus den Zeitreihen (beobachtete und rekonstruierte Zeitreihen) abzüglich der Monatsmittel und abzüglich der Mittelwerte der monatlichen Standardabweichung berechnet. Für die vollständig rekonstruierten Reihen beträgt das Bestimmtheitsmaß R^2 sogar 0,95 (Winter) und 0,98 (Sommer). Diese - noch höhere - Korrelation entsteht zum größten Teil durch die Autokorrelation der Reihen aufgrund des inkludierten Jahresganges.

An den Stationen der Niederungen und der Täler können die Zeitreihen mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,57-0,62 (Winter) bzw. 0,76-0,85 (Sommer) rekonstruiert werden. Im Sommerhalbjahr zeigt sich somit auch an den Talstationen eine sehr hohe Güte der Methode. Im Winterhalbjahr ist der Zusammenhang als gut zu bezeichnen, kleine Schwierigkeiten in der Rekonstruktion der Temperaturreihen entstehen hier zum Teil in den Monaten Nov-Jan, wenn sich die bodennahe Luftschicht von der restlichen Troposphäre entkoppelt (Inversionswetterlagen).

Der mittlere Trend in den Jahren bis 2100 beträgt an den Stationen der Niederungen und Täler $+2,8^\circ$ im Szenario B1 und $+3,5^\circ$ im Szenario A1B. Es gibt keinen nennenswerten Unterschied im Temperaturanstieg zwischen dem Sommer- und Winterhalbjahr.

An den höher gelegenen Stationen beträgt der mittlere Trend bis 2100 im Szenario B1 $+3,3^\circ$ und in A1B $+4,4^\circ$. Hier gibt es einen klaren Unterschied zwischen den Jahreshälften: So ist der Temperaturanstieg im Winter stets um $0,5^\circ$ niedriger - bzw. im Sommer um $0,5^\circ$ höher - als im Jahresmittel. Zusammenfassend erwarten wir, dass sich der Klimawandel in Kärnten bei der Temperatur stärker auf den Bergen auswirken wird als in den Niederungen und Tälern. Zudem sind die erwarteten Änderungen auf den Bergen im Sommer am größten.

Generell entspricht der langfristige Temperaturanstieg in Kärnten bis zum Jahr 2100 ziemlich genau dem mittleren globalen Temperaturanstieg, abgesehen von der Differenzierung zwischen den Saisonen und Höhenlagen.

Niederschlag:

Die Methode zur Ableitung der lokalen Niederschlagsreihen (rekonstruierte Zeitreihen) zeigt - je nach Station - leicht unterschiedliche Übereinstimmungen mit den Beobachtungen. Sehr große Unterschiede in der Güte der Methode bestehen zwischen dem Winter- und Sommerhalbjahr. Im Sommerhalbjahr beträgt das Bestimmtheitsmaß R^2 für die rekonstruierten Zeitreihen (ohne Jahresgang der Mittelwerte und Standardabweichung) nur 0,19-0,39 und ist somit als gering bis mäßig einzustufen. Im Winterhalbjahr dagegen beträgt das R^2 zwischen 0,39 und 0,59 - ein mäßiger bis guter Zusammenhang.

Betrachtet man die vollständigen Zeitreihen, also jene, bei denen der Monatsmittelwert und die monatliche mittlere Standardabweichung berücksichtigt ist, so ergibt sich ein R^2 von 0,29-0,51 für das Sommer- bzw. ein R^2 von 0,39-0,62 für das Winterhalbjahr.

Im Winterhalbjahr ist der Niederschlag leichter aus den atmosphärischen Feldern der Klimamodelle zu bestimmen, da zu dieser Jahreszeit der skalige (nicht-konvektive) Niederschlagstyp dominiert. **Aufgrund der geringen bis mäßigen Güte der Methode beim Niederschlag im Sommerhalbjahr dürfen die Ergebnisse und Trends für die Zukunft in dieser Jahreszeit nur mit großer Zurückhaltung und Vorsicht verwendet und interpretiert werden!** Auf die generelle Vertrauenswürdigkeit und Zuverlässigkeit der Niederschlagszenarien aus der Klimamodellierung wird im folgenden Abschnitt noch gesondert eingegangen.

In der Zukunft in Kärnten zeigt sich, dass der Niederschlag sowohl im Sommer- als auch im Winterhalbjahr zunehmen wird. Die allgemeine Zunahme des Niederschlags im Winter entspricht den Ergebnissen und Erwartungen aus anderen Studien für Mitteleuropa oder den Alpenraum. Die Zunahme im Sommer ist dagegen ein relativ neues Ergebnis, das bis dato nur durch wenige andere Studien gestützt wird.

Die Zunahme der monatlichen Niederschlagssummen bis zum Jahr 2100 beträgt +25% bis +35% an den Stationen A, +45% bis +60% an den Stationen B und +70% bis +85% an den Stationen C.

A: Bad Bleiberg, Bad Eisenkappel, Klagenfurt, Kötschach-Mauthen, Villach

B: Döllach, Millstatt, Völkermarkt

C: Flattach-Kleindorf, Friesach, Malta, St. Andrä im Lavanttal, St. Veit an der Glan, Weitensfeld, Kornat

Bei Betrachtung der Halbjahre sind nur schwache Unterschiede auszumachen: An einer Hälfte der Stationen ist das Sommersignal gleich dem des Winters, an der anderen Hälfte der Stationen sind die Zunahmen im Sommerhalbjahr etwas stärker ausgeprägt als im Winterhalbjahr.

Das Szenario A1B liegt stets etwas über den projizierten Änderungen aus dem Szenario B1, allerdings ist zu sagen, dass speziell im Winterhalbjahr die Unterschiede zwischen den einzelnen Realisationen von A1B oder B1 größer sind als die Unterschiede zwischen den Szenarien selbst. Das bedeutet, dass die interne Variabilität im Niederschlagsklima größer ist als die Unterschiede, die durch die Emissionsszenarien bedingt werden.

Im globalen und europäischen Vergleich zeigt sich, dass die berechnete Zunahme des Winterniederschlags in Kärnten ähnlich hoch ist wie jene Änderungsraten, die für Mitteleuropa aus anderen Studien bekannt sind.

Ganz typisch sind auch die großen Unterschiede in den Klimaänderungen auf kleinstem Raum.

4.3. Unsicherheiten und Verwendbarkeit der Szenarien

Änderungen der Temperatur können sowohl von den globalen Zirkulationsmodellen als auch von statistischen Verfahren - wie der hier verwendeten multivariaten Regressionsmethode - gut erfasst werden. In den Abbildungen im Anhang G zeigt sich diese Güte in der hohen Korrelation zwischen den beobachteten und rekonstruierten Zeitreihen (links unten). Dies trifft sowohl für sämtliche Stationen als auch für beide Jahreszeiten zu. Zudem ist das berechnete Klimasignal stets größer als der Fehler der Methode. Dies verstärkt zusätzlich das Vertrauen in die Verlässlichkeit der Ergebnisse.

Prozesse, die durch das statistische Downscaling nicht explizit erfasst werden, betreffen die Bewölkung und damit die Sonnenscheindauer sowie die Schneebedeckung. Beide Größen haben je nach Jahreszeit einen gewissen Einfluss auf die lokale Temperatur. Die Stärke und Art dieses Einfluss kann zurzeit auch über andere Verfahren noch nicht verlässlich abgeschätzt werden. Es ist jedoch zu erwarten, dass diese Einflüsse nur geringe Auswirkungen auf Monatsbasis haben und damit die aufgezeigte Temperaturentwicklung eine zuverlässige Einschätzung für die langfristige Entwicklung des Klimas in Kärnten ist.

So groß auch das Vertrauen in die Berechenbarkeit der Temperatur ist, umso unzuverlässiger sind die Aussagen über eine mögliche **Entwicklung des Niederschlags** in Kärnten. Diese Aussage trifft im Übrigen nicht nur speziell auf Kärnten zu, sondern ist auch auf viele andere Regionen und Länder anzuwenden. Beim Niederschlag zeigen sich selbst zwischen den sehr aufwändigen Simulationen der unzähligen globalen und regionalen Klimamodelle eklatante Unterschiede in den räumlichen Mustern und Stärken der projizierten Änderungen. Bei der Anwendung statistischer Downscalingmethoden kommt es je nach verwendetem Globalmodell, Prediktorfeld und Verfahren zu unterschiedlichen simulierten Klimaänderungen in der Zukunft.

Obwohl das hier verwendete Downscalingverfahren in der wissenschaftlichen Gemeinschaft als „State of the Art“ gilt, zeigt sich auch hier in Kärnten erneut die Schwierigkeit in der Berechnung zukünftiger Niederschlagsszenarien.

So betragen die Änderungen im Niederschlag bis 2100 je nach Station, Saison und verwendetem Emissionsszenario ca. 35%-85% verglichen mit der Zeitperiode 1948-2009. Diese Änderungen erscheinen zunächst etwas hoch, bei genauerer Betrachtung aber zeigt sich, dass auch in manchen anderen Untersuchungen für Mittel- und Nordeuropa mit ähnlichen Zunahmen der Niederschlagssummen bis 2100 gerechnet wird.

Vergleicht man die berechneten Änderungen mit den letzten 30 Jahren aus der Beobachtung, so zeigt sich, dass in diesem Zeitraum an den meisten Stationen Kärntens eine kräftiger Anstieg in den Winterniederschlagssummen zu finden ist. In diesem 30-jährigen Zeitraum finden wir in

allen Jahreszeiten Trends zwischen +7 und +24% (Kötschach-Mauthen +59%). Auch diese Beobachtung stützt die Zuverlässigkeit unserer Berechnungen.

Relativ neu an dieser Untersuchung ist jedoch, dass sich auch in den Sommermonaten eine verbreitete und deutliche Zunahme des Niederschlages in Kärnten bis 2100 zeigt. Viele globale und regionale Klimamodelle zeigen diese Richtung nicht, sondern deuten im Sommer einen leichten Rückgang an. Nur wenige Regionalmodelle simulieren im Sommer keine Änderung oder schwach ausgeprägte Zunahmen. Es ist jedoch auch bekannt, dass viele regionale Klimamodelle einen Bias auf der Alpensüdseite aufweisen, der zu einer Unterschätzung der saisonalen Niederschlagssummen führt.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass Aussagen und Interpretationen über die mögliche Änderung des Niederschlags in der Klimazukunft Kärntens zur Zeit noch sehr kritisch getätigt werden müssen und noch kritischer verwendet werden sollten. Die Verbesserung der Berechenbarkeit des Niederschlags in den Klimaszenarien ist auf der ganzen Welt Gegenstand laufender wissenschaftlicher Untersuchungen und Bemühungen.

Datenerklärung:

Die NCEP1 Reanalyse Daten wurden freundlicherweise kostenlos bereitgestellt von NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder Colorado, USA. Downloadbar unter: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>

5 LITERATURVERZEICHNIS

- Aguilar E., Auer I., Brunet M., Peterson T.C., Wieringa J. 2003: Guidelines on climate metadata and homogenization. WMO-TD No. 1186, 51 Seiten. verfügbar unter http://www.wmo.ch/pages/prog/wcp/wcdmp/wcdmp_series/documents/WCDMP-53.pdf
- Auer I, 1993. Niederschlagschwankungen in Österreich. Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik 7: 1-73
- Auer I, Böhm R, and Schöner W, 2001. Austrian long-term climate 1767-2000 – Multiple instrumental climate time series from Central Europe. Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik, 25: 147 pages plus Data- and Metadata- CD
- Auer I, Böhm R, Scheifinger H, Ungersböck M, Orlik A, Jurkovic A, 2004. Metadata and their role in homogenising. Proceedings of the Fourth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases, Budapest, Hungary, 6-10 October 2003), WCDMP-No.56, WMO-TD No.1236: 17-23, WMO Geneva
- Auer I, Böhm R, Jurkovic A, Orlik A, Potzmann R, Schöner W, Ungersböck M, Brunetti M, Nanni T, Maugeri M, Briffa K, Jones P, Efthymiadis D, Mestre O, Moisselin JM, Begert M, Brazdil R, Bochnicek O, Cegnar T, Gajic-Capka M, Zaninovic K, Majstorovic Z, Szalai S, Szentimrey T, 2005. A new instrumental precipitation dataset in the greater alpine region for the period 1800-2002. International Journal of Climatology 25: 139-166
- Auer I, Böhm R, Jurkovic A, Lipa W, Orlik A, Potzmann R, Schöner W, Ungersböck M, Matulla C, Briffa K, Jones PD, Efthymiadis D, Brunetti M, Nanni T, Maugeri M, Mercalli L, Mestre O, Moisselin J-M, Begert M, Müller-Westermeier G, Kveton V, Bochnicek O, Stastny P, Lapin M, Szalai S, Szentimrey T, Cegnar T, Dolinar M, Gajic-Capka M, Zaninovic K, Majstorovic Z, Nieplova E, 2007. HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760-2003. International Journal of Climatology 27: 17-46
- Böhm R, 1992. Lufttemperaturschwankungen in Österreich seit 1775. Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik 5:1-96
- Caussinus H, Mestre O, 2004: Detection and correction of artificial shifts in climate series, Appl. Statist., 53, Part 3, 405-425.
- Déqué, M., (2004): Uncertainties in PRUDENCE simulations: Global high resolution models. [Available online <http://prudence.dmi.dk/>]
- Floodrisk II, Projektteam, Godina, R., Holzmann, H., Lehmann, T. Formayer, H., und H. Haas, (2008): Vertiefung und Vernetzung zukunftsweisender Umsetzungsstrategien zum integrierten Hochwasserschutz – Workpackage 1: Meteorologie / Hydrologie, TP1.2 Klimaänderung, Synthesebericht.
- Gruber C, Auer I, Jurković A, 2008: Auswahl eines Verfahrens zur Homogenisierung von täglichen Klimadaten als notwendige Grundvoraussetzung zur Analyse von täglichen Klimazeitreihen in Hinblick auf „Climate Change“. Endbericht HOMDAY, 24 pp.
- Haylock M, Cawley G, Harpham C, Wilby R, Goodess C (2006) Downscaling heavy precipitation over the united kingdom: a comparison of dynamical and statistical methods and their future scenarios. Int J Climatol 26:1397–1416
- IPCC Fourth Assessment Report (AR4), Climate Change 2007, WG I, (2007): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger • Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen (Seite 18); offizielle deutsche Übersetzung der Deutschen IPCC Koordinierungsstelle.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis Summary for Policymakers. A Report of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

- Jong, K, Marchiori, E, van der Vaart A, Ylstra B, Meijer G, Weiss M, 2003: Chromosomal breakpoint detection in human cancer. *LNCS*, 2611, Springer.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne, and D. Joseph, (1996): The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437–471
- Klemun M. 1994. Aufbau und Organisation des meteorologischen Meßnetzes in Kärnten (19. Jh.). *Carinthia II*, 184./104 Jg, S 97-114.
- Lebarbier, E, 2005: Detecting multiple change-points in the mean of Gaussian process by model selection, *Signal Process*, 85, 717-736.
- Matulla, C., P. Haas, S. Wagner, E. Zorita, H. Formayer, und H. Kromp-Kolb (2004): Anwendung der Analog-Methode in komplexem Terrain : Klimaänderungsszenarien auf Tagesbasis für Österreich. GKSS Report 2004/11, 74pp. [available from GKSS –Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Geesthacht, Germany]
- Mestre O, Gruber C, Prieur C, Caussinus H, Jourdain S, 2010: A method for homogenization of daily temperature observations, submitted to JAMC.
- Peterson, T.C., 2005: Climate Change Indices. *WMO Bulletin*, 54 (2), 83-86.
- Roeckner, E., G. Bäuml, L. Bonaventura, R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, I. Kirchner, L. Kornblüeh, E. Manzini, A. Rhodin, U. Schlese, U. Schulzweida, and A. Tompkins, (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: Model description. *Max Planck Institute for Meteorology Rep.* 349, 127 pp. [available from MPI for Meteorology, Bundesstr. 53, 20146 Hamburg, Germany]
- Roeckner, E., M. Lautenschlager, H. Schneider, (2006): IPCC-AR4 MPI-ECHAM5_T63L31 MPI-OM_GR1.5L40 SRESA1B run no.1-3: atmosphere 6 HOUR values MPImet/MaD Germany. World Data Center for Climate.
- Roeckner, E., M. Lautenschlager, H. Schneider, (2006): IPCC-AR4 MPI-ECHAM5_T63L31 MPI-OM_GR1.5L40 SRESB1 run no.1-3: atmosphere 6 HOUR values MPImet/MaD Germany. World Data Center for Climate.
- Roeckner, E., M. Lautenschlager, M. Esch, (2006): IPCC-AR4 MPI-ECHAM5_T63L31 MPI-OM_GR1.5L40 Plcntrl(pre-industrial control experiment): atmosphere 6 HOUR values MPImet/MaD Germany. World Data Center for Climate.
- Schmidli J., Goddess C.M., Frei C., Haylock M.R., Hündecha Y., Ribalaygua J. and Smith, T. (2007): Statistical and dynamical downscaling of precipitation: An evaluation and comparison of scenarios for the European Alps. *Journal of Geophysical Research*, 2007, vol. 112
- Schöner W., Auer I., Böhm R. und Thaler S. (2003): Qualitätskontrolle und statistische Eigenschaften ausgewählter Klimaparameter auf Tageswertebasis im Hinblick auf Extremwertanalysen. Endbericht von StartClim.1 in StartClim, Startprojekt Klimaschutz. Erste Analysen extremer Wetterereignisse und ihrer Auswirkungen in Österreich, Teilprojekte 1-6, 1-35.
- Ulden, A.P. van and G.J. van Oldenborgh, (2006): Large-scale atmospheric circulation biases and changes in global climate model simulations and their importance for climate change in Central Europe. *Atm. Chem. Phys.*, 2006/6, 863-881, sref:[1680-7324/acp/2006-6-863](https://doi.org/10.5194/acp-2006-6-863).
- van der Linden P., and J.F.B. Mitchell (eds.): ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160pp (2009)
- Vincent L A, Zhang X, Bonsal B R, Hogg W D, 2002 : Homogenisation of daily temperatures over Canada. *J. Climate*, 15, 1322-1334.
- Wilks D S, 1997: Resampling hypothesis tests for autocorrelated fields, *Journal of Climate* 10, 65–82.

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.

Zorita, E., V. Kharin and H.von Storch, (1992): "The atmospheric circulation and sea surface temperature in the North Atlantic area in winter: their interaction and relevance for Iberian precipitation". *Journal of Climate* 5, 1097-1108. Also available as Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No.54.

Zorita, E. and von Storch H (1997): A survey of statistical downscaling techniques. GKSS Report 97/E/20, Geesthacht