



MINISTERIUM
FÜR EIN
LEBENSWEERTES
ÖSTERREICH

HBLFA RAUMBERG - GUMPENSTEIN
LANDWIRTSCHAFT

Abschlussbericht AgroMet-Monitor

Projekt Nr. 101019

**Raumzeitliches Monitoring
agrometeorologischer Parameter
für Österreich**

**Spatiotemporal Monitoring of
Agrometeorological Parameters for Austria**

Projektleitung:

Mag. Dr. Andreas Schaumberger, MSc
HBLFA Raumberg-Gumpenstein

Projektmitarbeiter:

Mag. Vojko Daneu
Universität für Bodenkultur

Projektlaufzeit:

2014 – 2017

raumberg-gumpenstein.at



Impressum

Herausgeber

Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft
Raumberg-Gumpenstein, A-8952 Irdning
des Bundesministeriums für Land- und
Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

Direktion:

Dir. Dr. Anton Hausleitner
LFI Dr. Johann Gasteiner

Für den Inhalt verantwortlich

Andreas Schaumberger

Druck, Verlag und © 2017

Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft
Raumberg-Gumpenstein, A-8952 Irdning

Dieses Forschungsprojekt wird vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft finanziert und ist Teil der vom Klima- und Energiefonds geförderten Forschungsprojekte AgroDroughtAustria (KR12AC5K01071) und ADAPT-CATMILK (KR13AC6K11112).

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	5
Summary	6
Projektüberblick	7
1 Projekt ADAPT-CATMILK: Erträge und Ertragsrisiken im Grünland unter veränderten Klimabedingungen	9
1.1 Einleitung.....	9
1.2 Datenaufbereitung	9
1.2.1 Klimadaten.....	9
1.2.2 Digitales Höhenmodell	10
1.3 Räumliche Übersicht der Grünlandnutzung in Österreich	11
1.4 Berechnung von Vegetationsperiode, Schnittfrequenz und Grünlandertrag	12
1.4.1 Beginn der Vegetationsperiode	12
1.4.2 Schnittfrequenz und Schnittzeitpunkte	13
1.4.3 Erträge und deren Veränderungen.....	18
1.5 Literatur.....	33
2 Projekt BEAT: Veränderung von Grünlanderträgen in zwei unterschiedlichen Klimaszenarien.....	35
2.1 Einleitung.....	35
2.2 Datenaufbereitung	35
2.2.1 Klimadaten.....	35
2.2.2 Bodendaten	36
2.3 Berechnung von Vegetationsperiode, Schnittnutzung und Grünlandertrag.....	37
2.3.1 Beginn der Vegetationsperiode	37
2.3.2 Schnittfrequenz und Schnittzeitpunkte	37
2.3.3 Erträge und deren Veränderungen aufgrund klimatischer Bedingungen	37
2.3.4 Schätzung der Grünlanderträge auf Basis der BEAT-Klimamodelldaten	38
2.4 Auswertung von Grünlandqualitätserträgen für Kleinproduktionsgebiete	45
2.5 Schlussfolgerungen	47
2.6 Literatur.....	48
3 Projekt zur Neuabgrenzung des Sonstig Benachteiligten Gebietes: Prüfung biophysikalischer Klimakriterien	51
3.1 Einleitung.....	51
3.2 Definition des JRC für bio-physikalischen Klimakriterien	51
3.2.1 Low Temperature	51

3.2.2	Dryness – Too dry conditions	54
3.3	Basisdaten für die Berechnung der Klimakriterien.....	56
3.3.1	Wetterdaten	56
3.3.2	Untersuchungszeitraum	57
3.3.3	Topografische Information	57
3.4	Biophysikalisches Kriterium „Low Temperature“	57
3.4.1	Temperaturkarten als Basisdatensatz	57
3.4.2	Berechnung von Vegetationsdauer und Temperatursummen.....	58
3.4.3	Zusammenfassung.....	88
3.5	Biophysikalisches Kriterium „Dryness“	88
3.5.1	Interpolation des Niederschlags	88
3.5.2	Berechnung und Interpolation der Referenz-Evapotranspiration.....	88
3.5.3	Aridity Index und Auswertung	89
3.5.4	Zusammenfassung.....	105
3.6	Literatur.....	106
4	Project AgroDroughtAustria: Development of a Spatial System for Monitoring and Forecasting Crop Specific Drought and Heat Stress Parameters.....	107
4.1	Abstract	107
4.2	Introduction.....	107
4.3	Scope of <i>ADA-MFS (ADIS)</i> and system development overview.....	108
4.4	<i>ADIS</i> system overview	110
4.5	Methodology of <i>ADIS</i> data input.....	114
4.6	Methodology of <i>ADIS</i> reference evapotranspiration <i>ET0</i> monitoring.....	116
4.7	Methodology of <i>ADIS</i> soil water balance and yield reduction monitoring	117
4.8	Methodology of <i>ADIS</i> drought intensity monitoring.....	125
4.9	Results	126
5	Gesamte Literaturübersicht.....	131

Zusammenfassung

Agrarmeteorologische Parameter beschreiben die Wirkung der Witterung und des Klimas auf die Landwirtschaft, insbesondere auf den Pflanzenbau. Ausreichende Wasserversorgung und die für die unterschiedlichen Kulturen erforderlichen Temperaturen sind für die erfolgreiche Bewirtschaftung ebenso wichtig wie Bodenqualität und landwirtschaftliches Management. Der Einfluss des Wetters in einer Vegetationsperiode entscheidet somit maßgeblich über Erfolg und Misserfolg aller Aktivitäten des Landwirts rund um Anbau, Pflege und Ernte seiner Kulturen. Langfristige Veränderungen des Klimas und eine Zunahme von Extremereignissen wie Trockenheit, Hitze, Starkniederschläge, Hagel und Überflutungen stellen ein zunehmend größeres Risiko für die Landwirtschaft dar. Klimaszenarien gehen davon aus, dass es in den nächsten Jahrzehnten zu einer deutlichen Erhöhung der mittleren Temperaturen kommt. Zudem zeichnet sich in den Modellrechnungen ab, dass die regelmäßige Verteilung der Niederschläge innerhalb der Vegetationsperiode abnimmt. All dies führt in vielen Produktionsgebieten zu einer Verminderung der Wasserversorgung und damit zu witterungsbedingten Ertragseinbußen.

Das Projekt AgroMet-Monitor fasst verschiedene Forschungsansätze zum Themenbereich Klima und Klimaveränderung und deren Relevanz für die Landwirtschaft zusammen. In vier Teilbereichen wurden auf Basis von langjährigen Wetterdaten und Klimaszenarien Veränderungen von Erträgen, insbesondere jene im Grünland, der Vegetationsdauer und der Wasserversorgung für landwirtschaftliche Nutzflächen berechnet. Jeder dieser Teilbereiche in AgroMet-Monitor umfasst die Beteiligung der HBLFA Raumberg-Gumpenstein an Forschungsprojekten mit unterschiedlichen Kooperationspartnern. Es handelt sich dabei um Projekte des Austrian Climate Research Program (ACRP) und des BMLFUW.

In aufwendigen Rechenprozessen wurden verschiedene agrarmeteorologische Parameter für lange Zeitreihen in der Vergangenheit auf Basis von Wetterbeobachtungen sowie für zukünftige Perioden auf Basis von verschiedenen Klimaszenarien berechnet. Es handelt sich dabei um räumliche Datensätze, die in hoher Auflösung (500 Meter bzw. 1 Kilometer) für das gesamte Bundesgebiet und auf Tagesbasis erstellt wurden. Zur Bewältigung der großen Datenmenge bei den mehrere Jahrzehnte umfassenden Berechnungen auf Tagesbasis brauchte es effiziente und ressourcenschonende Algorithmen, die über mehrere Jahre hinweg entwickelt wurden.

Als Ergebnisse stehen lange Zeitreihen zur Beschreibung der Vegetationsperiode (Beginn, Ende und Dauer), der Bodenwasserverhältnisse, dem Auftreten von Trockenperioden und von Grünlanderträgen zur Verfügung. Die bereitgestellten Karten zeigen Risikoregionen für künftige negative Entwicklungen der klimatischen Standortvoraussetzungen und können für strategische Entscheidungen bzw. für die Entwicklung von regionalen Anpassungsstrategien in der Landwirtschaft genutzt werden. Für die Abschätzung von Dauer, Intensität und räumliche Ausbreitung aktueller Trockenperioden wurde ein operationell einsetzbares und über Internet abrufbares Trockenmonitoring entwickelt, mit dem auch eine kurzfristige Vorhersage möglich ist. Grundlage dafür bildet ein langjähriger räumlicher Datensatz, mit welchem die Regionen hinsichtlich ihrer Vulnerabilität gegenüber Trockenheit in Abhängigkeit der Kulturart statistisch beurteilt und mit der aktuellen Wettersituation verglichen werden. Für Grünland, Winterweizen, Mais und Zuckerrübe können Karten tagesaktuell abgefragt werden, welche agrarmeteorologische Kennwerte sowie die nach Klassen gruppierte Intensität von Trockenheit und deren regionale Ausdehnung aufzeigen.

Summary

Agrometeorological parameters describe the effects of weather and climate on agriculture and plant production respectively. Sufficient water availability and necessary temperature for different cultures are the key factors for successful cultivation beside soil quality and management. The impact of weather during the growing season is most crucial for all activities around planting, maintaining and harvesting. Climate change and an increasing number of extreme weather events like drought periods, heat waves, heavy rainfall events, hail and flooding become a more and more important risk factor for agriculture. Climate change scenarios assume rising mean temperature and changes in precipitation patterns. These effects cause reductions in water supply and therefore weather dependent yield losses in many production areas.

The project AgroMet-Monitor summarizes different research activities in the field of climate and climate change related to agriculture. In four parts, the changes of grassland yields, growing season and water supply were calculated on the basis of long-term weather data and climate change scenarios. Each part covers the research input of AREC Raumberg-Gumpenstein in scientific projects of the Austrian Climate Research Program (ACRP) and the Austrian Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management (BMLFUW) with different project partners.

We calculated long time series of agrometeorological parameters for the past on the basis of observed weather data and for the future on the base of climate models. The results are spatial data sets in high resolution (1 kilometer and 500 meter) for the entire are of Austria on a daily basis. Complex algorithms, which we have developed for years have to manage a huge amount of data that covers many decades in daily time steps.

As results, we provide long-term spatial data to describe the growing season (start, end and duration), soil water availability, drought periods and grassland yields. The maps show regions at risk of negative climate impact on agriculture to consider those in strategical decisions and in development of regional adjusted adaption strategies.

A drought monitoring tool was developed to estimate duration, intensity and spatial distribution of drought periods including the forecast for a few days. The tool can be used via Internet. Long-term spatial data of soil water balance, phenological stages and weather provide the background basis for a statistical analysis of drought vulnerability compared to the current weather situation in different regions. For some important cultures (grassland, winter wheat, maize, sugar beat) daily maps with specific agrometeorological values and classified drought intensity values can be requested.

Projektüberblick

Im Projekt AgroMet-Monitor (Raumzeitliches Monitoring agrarmeteorologischer Parameter für Österreich) wurden für verschiedene Anwendungen umfangreiche räumliche Datensätze und Werkzeuge erstellt. Die Mitarbeit in mehreren Projekten zu ähnlichen Themen und Fragestellungen erforderte die Entwicklung einer Software, die je nach Anwendung und Projektbeteiligung adaptiert wurde. Unter dem „Sammelprojekt“ AgroMet-Monitor wurde die gesamte Entwicklungsarbeit zusammengefasst und gebündelt. Dennoch gab es in den einzelnen Projekten Abweichungen hinsichtlich Vergleichsperioden, verwendeter Klimaszenarien und unterschiedlicher räumliche Auflösungen, sodass die aufwendigen Rechenprozesse für jedes Projekt separat durchgeführt werden mussten. Aufbereitung und Interpretation der Ergebnisse finden sich in der Dokumentation der jeweiligen Projektteile, welche hier zusammenfassend angeführt werden:

Teil 1: Erträge und Ertragsrisiken im Grünland unter veränderten Klimabedingungen

ACRP-Antrag Nr. KR13AC6K11112 (2014-2016): Adaptation in Austrian cattle and milk production (ADAPT-CATMILK)

Im ersten Arbeitspaket zum Projekt AgroMet-Monitor wurde ein Beitrag zum Projekt ADAPT-CATMILK erarbeitet, bei dem es um eine räumliche Analyse von Grünlanderträgen und deren klimabedingte Veränderungen bzw. Risiken mit Hilfe des Modells „SpatialGRAM“ geht. Dieses Modell wurde im DaFNE-Projekt Nr. 100082 „Räumliche Modellierung von Grünlanderträgen unter Berücksichtigung von Witterungseinflüssen (GT Hartberg)“ entwickelt und in Schaumberger (2011) umfassend dokumentiert. SpatialGRAM ist in der Lage, Erträge des Wirtschaftsgrünlandes mit Hilfe von Klimadaten und Klimaszenarien, insbesondere Trockenheit, räumlich abzubilden, kann jedoch nur beschränkt Informationen zur Bewirtschaftung liefern. Neben einer Vergleichsperiode in der Vergangenheit mit beobachteten Wetterdaten (1975-2008) wurden zwei unterschiedliche Szenarien für den Zeitraum 2008-2040 zur Berechnung von Grünlanderträgen und deren relative Veränderungen verwendet.

Teil 2: Veränderungen von Grünlanderträgen in zwei unterschiedlichen Klimaszenarien

DaFNE-Antrag Nr. 100975/2 (2014-2016): Bodenbedarf für die Ernährungssicherung in Österreich (BEAT)

Für diesen Teilbereich in AgroMet-Monitor wurde ebenfalls das Grünlandmodell SpatialGRAM herangezogen, wobei die hier verglichenen Klimaperioden die Zeiträume 1981 bis 2010 und 2036 bis 2065 umfassten. Die klimatisch bedingten Veränderungen der Grünlanderträge wurde auf Basis der Kleinproduktionsgebiete aggregiert und visualisiert. Die agrarmeteorologischen Parameter der Periode 1981 bis 2010 wurden zudem sowohl auf Basis von Beobachtungsdaten als auch auf Basis der verwendeten Klimamodelle berechnet, um anschließend eine Fehlerkorrektur durchführen zu können. Insgesamt mussten drei 30-jährige Klimaperioden in der Vergangenheit (Beobachtung und Szenarien) sowie zwei für die zukünftige Periode (ALADIN und CMIP5) berechnet werden. Da für die Anwendung von SpatialGRAM tägliche Daten notwendig sind und für BEAT in Summe 150 Jahre (5 Perioden á 30 Jahre) zu rechnen waren, bestand die Herausforderung in der Optimierung von Rechenprozessen.

Teil 3: Prüfung biophysikalischer Klimakriterien

BMLFUW, Abt. II/3 (2015-2016): Neuabgrenzung des Sonstig Benachteiligten Gebietes

In diesem Projekt wurden im Auftrag der Abteilung II/3 (Agrarumwelt, Bergbauern und Benachteiligte Gebiete, Biologische Landwirtschaft) methodische Vorgaben des Joint Research Center (JRC) zur Abgrenzung des Sonstig Benachteiligten Gebietes in Österreich anhand von biophysikalischen Klimakriterien implementiert. Die Umsetzung der Kriterien „Low Temperature“ und „Dryness – too dry conditions“ erfolgte mit geostatistisch interpolierten Wetterdaten als Rasterdatensätze in einer Auflösung von 250 Metern in einem Geographischen Informationssystem (GIS). Dabei wurden die vorgeschriebenen Ergebnisse für zwei Perioden gebildet: 1981 bis 2010 als aktuelle Klimanormalperiode sowie 1986 bis 2015 als der aktuellste 30-Jahre-Zeitraum. Ergebnisse sind Zeitreihen von Vegetationsperiodenparametern, Niederschlagskarten, Degree-Day-Aggregationen, jährliche Evapotranspirationskarten und schließlich die Klassifikationsergebnisse der vorgegebenen Kriterien.

Teil 4: Development of a spatial system for monitoring and forecasting crop specific drought and heat stress parameters

ACRP-Antrag Nr. KR12AC5K01071 (2013-2016): Drought monitoring system for Austrian agriculture (AgroDroughtAustria – ADA)

Ziel von AgroDroughtAustria war die Entwicklung eines operationell einsetzbaren Monitoringsystems für Trockenheit in Österreich. Die Methodik für die Berechnung der kulturabhängigen Bodenwasserbilanz und der daraus gebildeten Kennwerte für Trockenheit basiert auf dem Modell SpatialGRAM (Schaumberger, 2011). Der in SpatialGRAM erarbeitete Ansatz für Grünland wurde durch Anpassung der Kc-Faktoren (Allen *et al.*, 1999) gemäß dem Verlauf der phänologischen Phasen für bestimmte Kulturen erweitert.

Bei der Projekteinreichung war auf Grund entsprechender Vorgespräche geplant, mit dem damals vom BMLFUW betriebenen GIS-Portal „Agrar-GIS“, eine operationelle Umsetzung verwirklichen zu können. Leider wurde der Betrieb dieses Portals während des letzten Projektjahres eingestellt, worauf ein eigenständiger Prototyp mit Hilfe des MapServers programmiert werden musste, um die im Projektantrag zugesagte Fertigstellung einer operationellen Ausbaustufe des Monitoring-Systems einhalten zu können. Diese unvorhersehbare Entwicklung führte zu einer sehr intensiven Programmierarbeit an einem Prototyp und damit zu einer nicht geplanten Schwerpunktsetzung bei der Arbeit im letzten Projektjahr.

Da vom BMLFUW das Agrar-GIS-Portal nicht mehr zur Verfügung stand, war eine operationelle Umsetzung über den Status eines Prototyps hinaus nicht gesichert. Zwischenzeitlich wurde dieser Prototyp erweitert und das in AgroDroughtAustria entwickelte Trockenheitsmonitoring vom Warndienst der Landwirtschaftskammer Österreich auf dessen Internetseite (<https://warndienst.lko.at/>) übernommen. Für die Kulturarten Sommergerste, Grünland, Mais, Winterweizen und Zuckerrübe sind die Parameter Pflanzenverfügbares Bodenwasser, Trockenheitsintensität und Stressbelastung verfügbar. Die aktuellen Berechnungsergebnisse werden dabei langjährigen Mittelwerten gegenübergestellt und Abweichungen entsprechend klassifiziert dargestellt.

1 Projekt ADAPT-CATMILK: Erträge und Ertragsrisiken im Grünland unter veränderten Klimabedingungen

1.1 Einleitung

Der Beitrag der HBLFA Raumberg-Gumpenstein zum Projekt ADAPT-CATMILK umfasst gemäß der Beschreibung in Work Package 2 dieses Projektes eine räumliche Analyse von Grünlanderträgen und deren klimabedingte Veränderungen bzw. Risiken mit Hilfe des Modells „SpatialGRAM“. In Abstimmung mit den Projektpartnern (WIFO und INWBOKU) wurde dieses statistische Modell für Grünlanderträge, entwickelt auf Basis langjähriger, über ganz Österreich verteilter Grünlandversuche (Schaumberger, 2011), für ADAPT-CATMILK adaptiert. SpatialGRAM ist in der Lage, Erträge des Wirtschaftsgrünlandes (2-, 3- und 4-Schnitt-Systeme) mit Hilfe von Klimadaten und Klimaszenarien, insbesondere Trockenheit, räumlich abzubilden, kann jedoch nur beschränkt Informationen zur Bewirtschaftung liefern.

Wie in Schaumberger (2011, 18ff) dargestellt, ist SpatialGRAM nicht dafür geeignet, Parameter wie die Düngung oder die Zusammensetzung des Pflanzenbestandes sowie Pflegemaßnahmen zu beschreiben. Die Bewirtschaftung hängt in erster Linie vom Landwirt und dessen individueller Wirtschaftsweise ab und kann deshalb weder mittels verallgemeinernder GIS-Algorithmen noch mit prozessorientierten physikalischen Modellen flächendeckend modelliert werden. Bestenfalls können Zusammenhänge zu anderen (flächendeckend) verfügbaren Informationen, wie zum Beispiel der Witterung, hergestellt werden. In SpatialGRAM wird dies bei der Ermittlung der Zahl von Schnittnutzungen und von Schnittzeitpunkten realisiert, indem ein räumliches Temperatursummenmodell angewendet wird. Für die Schätzung der Grünlanderträge werden Witterungsdaten in täglicher Auflösung benötigt.

Bei der Interpretation der Ergebnisse aus SpatialGRAM müssen sowohl der Modellfehler als auch die speziellen Eigenschaften des Modells, wie sie in Schaumberger (2011, 224ff) beschrieben sind, berücksichtigt werden. Zusätzlich ist zu beachten, dass in SpatialGRAM nur der Ertrag hinsichtlich seiner Quantität und nicht in der für die Fütterung entscheidenden Qualität ausgewertet werden kann.

Bei der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Bewirtschaftung (Nutzungsfrequenz und Düngung) und Ertrag darf dieser Aspekt auf keinen Fall vernachlässigt werden. Eine standortangepasste Bewirtschaftung führt durch ein ausgewogenes Verhältnis von Düngung und Nutzungsfrequenz zu einer nachhaltigen Optimierung des Qualitätsertrages, weist jedoch nicht zwangsläufig einen gleichgearteten funktionalen Zusammenhang mit dem Biomasseertrag auf.

1.2 Datenaufbereitung

1.2.1 Klimadaten

Die im Rahmen dieses Projektes verwendeten Klimadaten beschreiben eine vergangene Periode (1975 bis 2008) sowie zwei Klimaszenarien für die Periode 2008 bis 2040

(Strauss, 2012, Strauss *et al.*, 2013). Beide Szenarien nehmen eine Temperaturerhöhung von + 1.5 °C bis zum Jahr 2040 an und unterscheiden sich lediglich in der Projektion des Niederschlags. Das Szenario SC5 rechnet mit einer Zunahme um 20 % bis 2040, Szenario SC9 geht von einer Abnahme des Niederschlags um 20 % aus.

Die Klimadaten wurden in ASCII-Text-Dateien auf Tagesbasis für die Parameter Temperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte, Wind und Globalstrahlung zur Verfügung gestellt. Die räumliche Zuordnung erfolgt über eine ArcGIS-Shape-Datei mit Zellpolygonen in 1 x 1 km Auflösung. Mittels der Verbindung zwischen räumlichem Polygonraster und Textdaten wurde für jeden Tag und jeden Wetterparameter flächendeckende Raster erzeugt, welche die Voraussetzung für eine Weiterverarbeitung in GIS bilden.

Aus den Wetterdaten eines jeweiligen Tages wurde zusätzlich noch eine Rasterkarte der potenziellen Evapotranspiration nach Allen *et al.* (1998) berechnet. Mit diesen flächendeckenden Informationen können in weiterer Folge die Berechnungen der Vegetationsperiode, der Schnittzeitpunkte und der Bodenwasserbilanz vorgenommen werden.

1.2.2 Digitales Höhenmodell

Um den Grünlandflächen eine Seehöheninformation zuordnen zu können, wurden Daten des aktuellen Digitalen Geländemodells aus Airborne Laserscans in einer räumlichen Auflösung von 10 Metern (data.gv.at – Geoland.at) verwendet. Mittels bilinearer Resampling-Technik wurde der 10-Meter-Raster in die Zielauflösung von 1 km überführt. Durch das Resampling wird das Gelände geglättet, bietet jedoch für die Anwendung der Zuordnung von Grünlandflächen zu Höhenlagen eine ausreichende Genauigkeit.

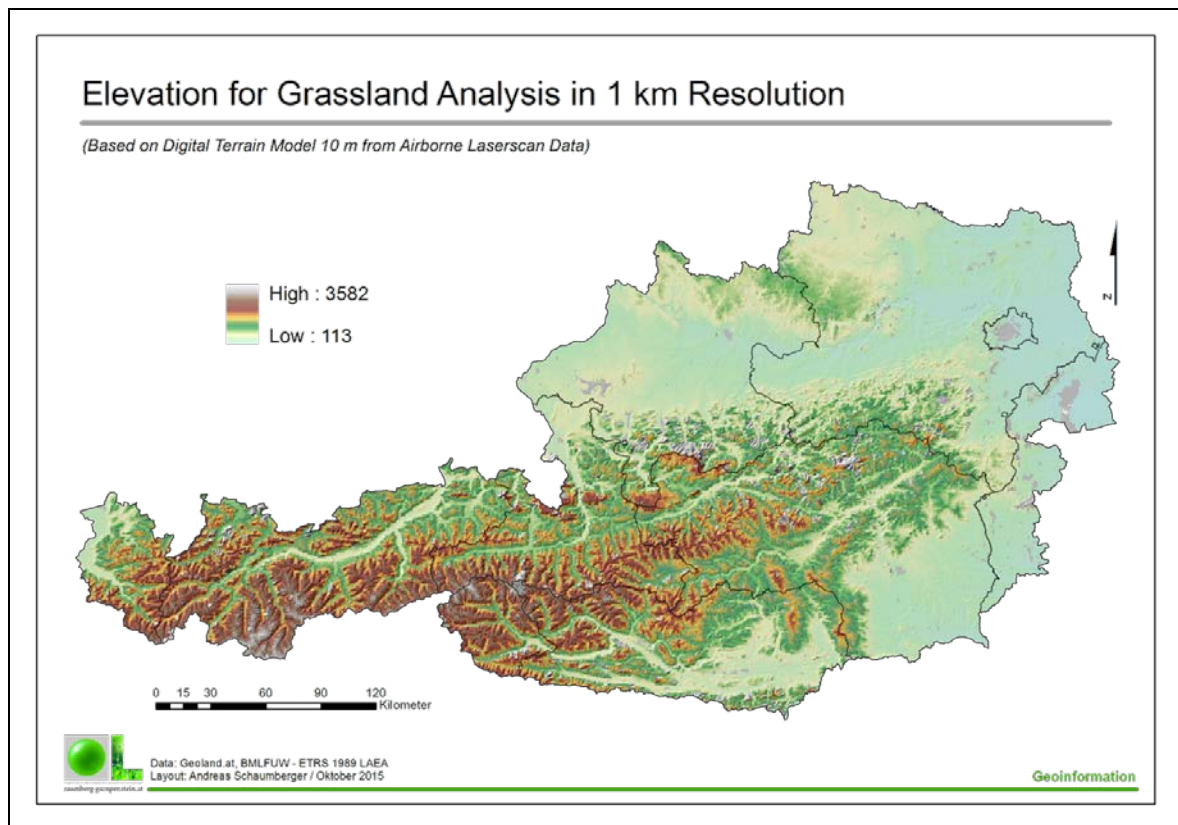


Abbildung 1: DGM Österreich in 1 km Auflösung

1.3 Räumliche Übersicht der Grünlandnutzung in Österreich

Datengrundlage für die räumliche Zuordnung von Grünlandnutzungstypen ist INVEKOS 2009. Guggenberger *et al.* (2012)) haben die Fläche Österreichs in 1-Kilometer-Zellen unterteilt und in ETRS 1989 LAEA projiziert.

Jede dieser Zellen enthält zu den drei hier verwendeten Grünlandtypen eine Flächenangabe in ha. Das erste Bild in Abbildung 2 zeigt alle Zellen in Grün, welche Grünland beliebigen Typs enthalten. Die drei folgenden Bilder beschreiben die räumliche Dichte der drei verschiedenen Typen. Je mehr ha in einer 1 x 1 km Zelle als Grünland bewirtschaftet werden, desto grüner die Farbgebung.

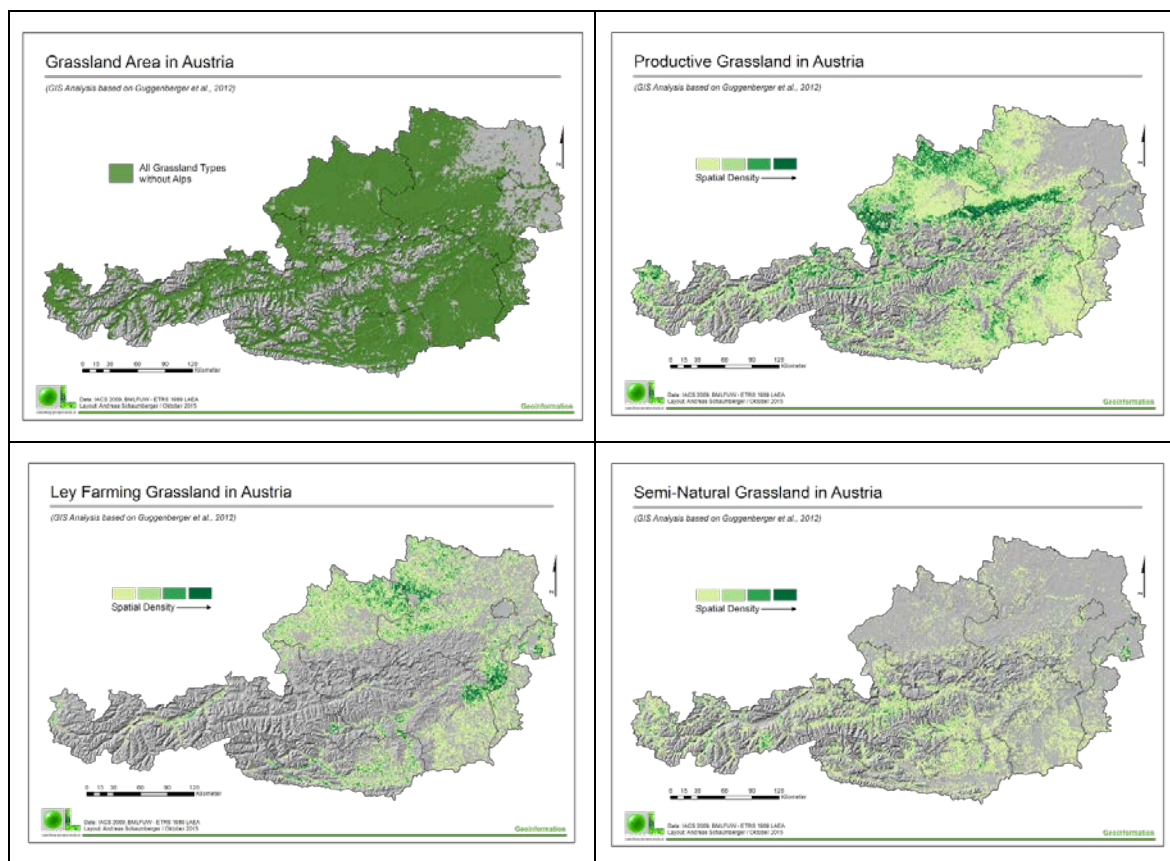


Abbildung 2: Räumliche Verteilung des Grünlandes in Österreich

Für die Bildung der Grünlandtypen wurden die INVEKOS-Schlagnutzungsarten nach Guggenberger *et al.* (2012)) wie folgt zusammengefasst:

- *Wirtschaftsgrünland (G13) - Productive Grassland*: Dauerweide, Kulturweide, Mähwiese/-weide drei und mehr Nutzungen, Nähwiese/-weide zwei Nutzungen, Mehrmähdige Wiese, Rollrasen
- *Extensivgrünland (G14) - Semi-Natural Grassland*: Einmähdige Wiese, GLÖZ G, Hutweide, Landschaftselement G, Sonstige Grünlandflächen, Streuwiese
- *Feldfutterbau (G6) - Ley Farming Grassland*: Futtergräser, Grünschnittroggen, Klee, Klee gras, Luzerne, Sonstiges Feldfutter, Sudangras, Wechselwiese (EGART, Ackerweide), Wicken-Getreide-Gemenge

Die Grünlandflächenausmaße, aufgeteilt nach den drei Typen, werden zusätzlich zur kartografischen Darstellung in sämtlichen beigelegten Tabellen numerisch angeführt.

1.4 Berechnung von Vegetationsperiode, Schnittfrequenz und Grünlandertrag

1.4.1 Beginn der Vegetationsperiode

Für die Schätzung des Grünlandertrages ist eine möglichst genaue Erfassung der Dauer des ersten Aufwuchses notwendig. Der Aufwuchs beginnt mit dem Start der Vegetationsperiode im Frühjahr und damit wird die eng mit dem Ertrag zusammenhängende Aufwuchsdauer wesentlich von diesem Termin bestimmt.

Die Vegetationsperiode wird in der Literatur vielfach mit einem Temperaturkriterium definiert, das in den meisten Fällen eine Überschreitung der Tagesmitteltemperatur von 5 °C auf fünf aufeinanderfolgenden Tagen fordert. In extremen Jahren mit sehr frühem oder spätem Beginn sind jedoch teilweise unrealistische Ergebnisse infolge besonderer Witterungsbedingungen zu beobachten. Vor allem in einem Wertebereich mit unmittelbarer Nähe zur Temperaturschwelle treten oft fehlerhafte Zuordnungen auf. Schon geringe Unterschiede im engeren Bereich zwischen Erfüllung und Nichterfüllung des 5°C-Kriteriums können damit zu einer signifikanten Verschiebung des errechneten Beginns der Vegetationsperiode führen. Um diese unerwünschten Effekte beim Auftreten von Ausnahmesituationen abzuschwächen, wird eine Methode mit zusätzlichen Kriterien verwendet, hier bezeichnet als *Multicriterial Thermal Definition* (MTD).

Ausgehend von der Grundüberlegung, dass bei einem durchgehenden Zeitraum von einigen Tagen mit ausreichend hohen Temperaturen das Pflanzenwachstum einsetzt, wird bei MTD das Zeitfenster auf 10 Tage erweitert und hinsichtlich des Auftretens von Frostereignissen untersucht. Innerhalb dieses Zeitraums muss das einfache 5°C-Kriterium erfüllt werden. Darüber hinaus muss die Durchschnittstemperatur des 10-tägigen Zeitraums 6 °C überschreiten. In *Abbildung 3* ist das Schema der Kombination verschiedener Schwellenwerte grafisch dargestellt.

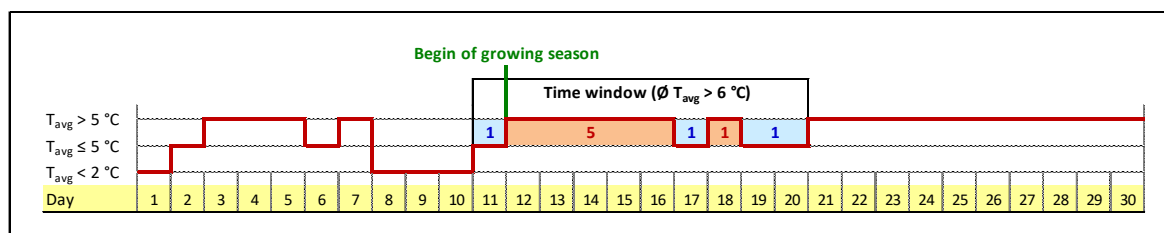


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Vegetationsbeginns nach MTD

Ein Frostereignis wird mit dem Unterschreiten der Tagesmitteltemperatur von 2 °C identifiziert. Die Festlegung des Schwellenwertes von 6 °C für die Durchschnittstemperatur des gesamten Zeitfensters begründet sich in einer Auswertung der Temperaturdaten für den Zeitraum 1971 bis 2010 in den Monaten März bis Mai. In der Literatur findet sich zum überwiegenden Teil eine Temperaturschwelle von 5 °C. Davon wird abgegangen, da die Temperaturbeobachtungen zeigen, dass bei Tagesmitteltemperaturen zwischen 2 und 5 °C eine mittlere Tagesminimumtemperatur von -0,6 °C erreicht wird. Ein gewisses Risiko, den Vegetationsbeginn trotz Frostperiode festzusetzen, ist somit gegeben. Die Erhöhung der Schwelle um 1 °C reduziert die mittlere Tagesminimumtemperatur in den untersuchten Monaten auf -0,2 °C.

Eine detaillierte Beschreibung der Berechnungsmethode ist in Schaumberger (2011, 87ff) nachzulesen. In der vorliegenden Arbeit wurde der Vegetationsbeginn nach MTD für die Perioden 1975 bis 2007 und für 2008 bis 2040 jährlich berechnet und dann über die beiden Perioden gemittelt (arithmetisches Mittel und Median) sowie die Standardabweichung. Zusätzlich wurde für den Szenariozeitraum 2008 bis 2040 Mittelwert, Median und Standardabweichung pro Dekade berechnet, kartografisch dargestellt und auch tabellarisch den Grünlandflächen zugeordnet.

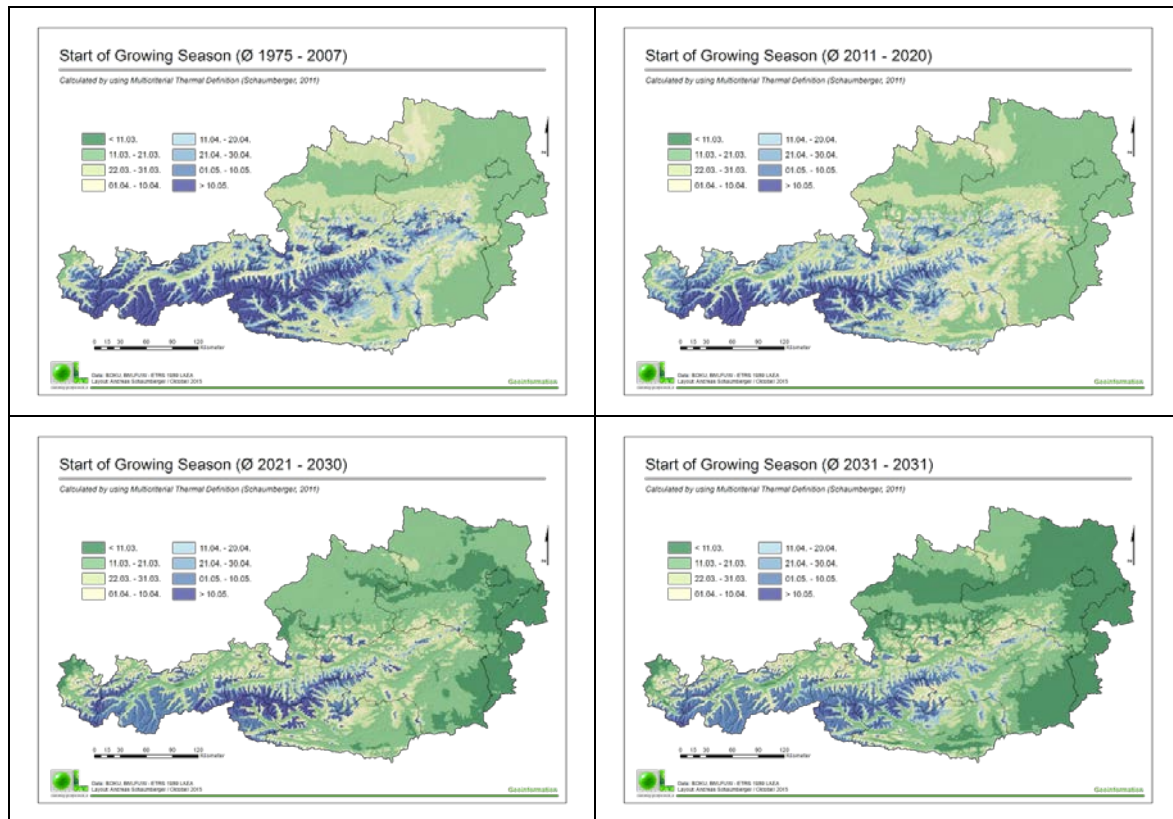


Abbildung 4: Veränderung des Vegetationsbeginns bis zum Jahr 2040 nach MTD

1.4.2 Schnittfrequenz und Schnittzeitpunkte

Die mehrmalige Schnittnutzung innerhalb einer Vegetationsperiode ist ein charakteristisches Merkmal des Wirtschaftsgrünlandes. Die Erträge der einzelnen Aufwüchse hängen unter den gegebenen Standort- und Bewirtschaftungsbedingungen in hohem Maß von der Aufwuchsdauer ab. Klimatische Gunstlagen sowie eine intensive Bewirtschaftungsform ermöglichen in der Regel eine viermalige Nutzung, in Ausnahmefällen auch darüber hinaus. Das Wirtschaftsgrünland in den benachteiligten Berglagen wird überwiegend zwei bzw. dreimal geschnitten (Buchgraber *et al.*, 2011). Die Summe der Einzelerträge ergibt je nach Bewirtschaftungsform den Jahresertrag mit einer entsprechenden Streuung von Quantität und Qualität. Für die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Modellierung der Ertragsdynamik ist somit die Definition der Nutzungszeitpunkte und die davon abgeleitete Dauer der einzelnen Aufwüchse eine Schlüsselkomponente. Da die Ernte von vielen Faktoren beeinflusst wird, welche neben objektiven standort- und bewirtschaftungsabhängigen Variablen auch individuelle Möglichkeiten und Präferenzen des einzelnen Landwirtes betreffen, bleibt die Berechnung des Nutzungszeitpunktes stets eine Näherung, bei der ein gewisser Fehlerbereich unvermeidlich ist.

Die räumliche Modellierung erfordert eine zusätzliche Einschränkung auf erklärende Variablen, welche als kontinuierliche Oberflächen verfügbar gemacht werden können. Die Berechnung einer flächendeckenden Information von Nutzungszeitpunkten macht deshalb eine weitere Vereinfachung notwendig. Dies bedingt wiederum die Akzeptanz einer größeren Streuung der Schätzwerte um den realen Nutzungstermin. Die Schnittreife entspricht im Wesentlichen dem Erreichen einer phänologischen Phase, deren jährliche Variabilität in Zusammenhang mit der Witterung, insbesondere mit dem Temperaturverlauf, steht (Ansquer *et al.*, 2009).

Um eine allgemeine Beziehung zwischen Nutzungsterminen und Temperatursummen herstellen zu können, werden langjährige Beobachtungen ausgewertet. Dazu stehen Temperaturdaten an ZAMG-Messstationen und die Erntezeitpunkte zahlreicher Versuche des LFZ Raumberg-Gumpenstein im Zeitraum von 1990 bis 2009, verteilt über ganz Österreich, zur Verfügung. Insgesamt handelt es sich um einen Datenbestand mit Beobachtungen der Nutzungszeitpunkte von Zwei-, Drei- und Vierschnittsystemen. Für jeden Aufwuchs muss die dem Beobachtungsstandort nächstliegende ZAMG-Messstation eine durchgehende Temperaturzeitreihe aufweisen, um eine gültige Summe bilden zu können.

Die Ergebnisse sind in *Abbildung 5* dargestellt und mit dem Median für alle Stationen eines bestimmten Aufwuchses ergänzt. Die auf diese Weise ermittelten neun Nutzungszeitpunkte stellen die statistischen Zentralwerte jeden Aufwuchses über alle Jahre und Stationen dar, welche für die Modellierung herangezogen werden. Die Trendkurven in der *Abbildung* zeigen keinen funktionalen Zusammenhang zwischen Tag des Jahres und Temperatursumme, sondern lediglich den Verlauf der Steigung zwischen den aufwuchsbezogenen Summen. Je geringer die Nutzungsfrequenz ist, desto deutlicher unterscheidet sich das Niveau der Temperatursummen zwischen den Aufwüchsen eines Nutzungssystems.

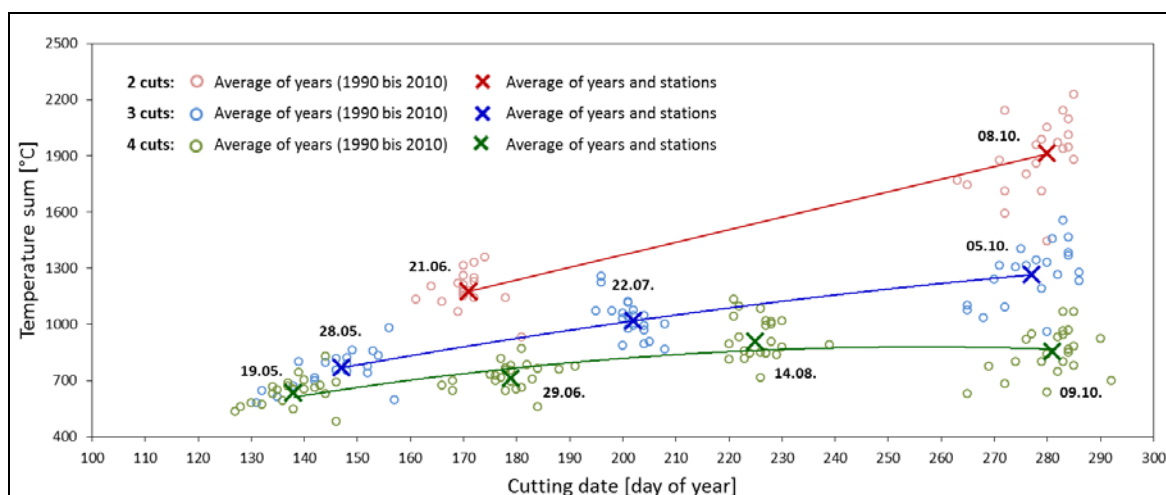


Abbildung 5: Beziehung zwischen aufwuchsbezogenen Temperatursummen und Ernteterminen unterschiedlicher Schnittsysteme auf Basis langjähriger Mittelwerte

Neben dem Temperaturverlauf wird der Nutzungszeitpunkt von Faktoren beeinflusst, welche im Rahmen einer räumlichen Implementierung nicht berücksichtigt werden können. Mit der Temperatursumme als einzige Erklärungsvariable ist somit keine ausreichend genaue Schätzung möglich. Außerdem sind die jährlichen Schwankungen der Temperatursummen zu groß, um daraus eine realistische Verschiebung des Schnitttermins ableiten zu können. In der landwirtschaftlichen Praxis ist es üblich, innerhalb gewisser Zeitfenster zu ernten, welche auf jahrelange Beobachtungen der regionalen klimatischen Verhältnisse und ihrer Auswirkungen auf den Pflanzenbestand zurückgehen. Die Bewirtschaftungsmaßnah-

men, insbesondere die Mahd, richten sich zwar primär nach der phänologischen Entwicklung des Grünlandbestandes und dessen Erntereife, bewegen sich jedoch nicht immer in einer der Witterung entsprechenden Variabilität.

Das hier entwickelte Modell berücksichtigt zudem nur die Temperatur und vernachlässigt beispielsweise die Wasserverfügbarkeit, welche nach Smit *et al.* (2008) einen entscheidenden Einfluss auf die Produktivität des Grünlandes hat. Dennoch ist die Temperatur besonders dazu geeignet, zeitliche Veränderungen im landwirtschaftlichen Management als Reaktion auf phänologische Entwicklungen zu beschreiben (Sparks *et al.*, 2005). Sie ist deshalb in der vorliegenden Arbeit die Grundlage für eine räumliche Modellierung der Nutzungszeitpunkte. Dabei wird jedoch nicht der funktionale Zusammenhang zwischen Temperatursumme und Erntetermin ausgewertet, da dies extreme Verschiebungen ergeben würde, welche nicht der landwirtschaftlichen Praxis entsprechen. Es werden hingegen die relativen Änderungen der jährlichen Temperatursummen für die Berechnung von Abweichungen der in *Abbildung 5* dargestellten Zentralwerte verwendet.

Damit wird erreicht, dass Verschiebungen des Erntezeitpunktes weniger sensibel auf Schwankungen der Temperatursumme reagieren und den beträchtlichen Einfluss vieler unbekannter Faktoren nicht verzerren. In *Abbildung 6* wird die Übertragung der jährlichen Temperatursummenanomalien auf die Schwankungsbreite der Erntezeitpunkte in einem vereinfachten Schema dargestellt.

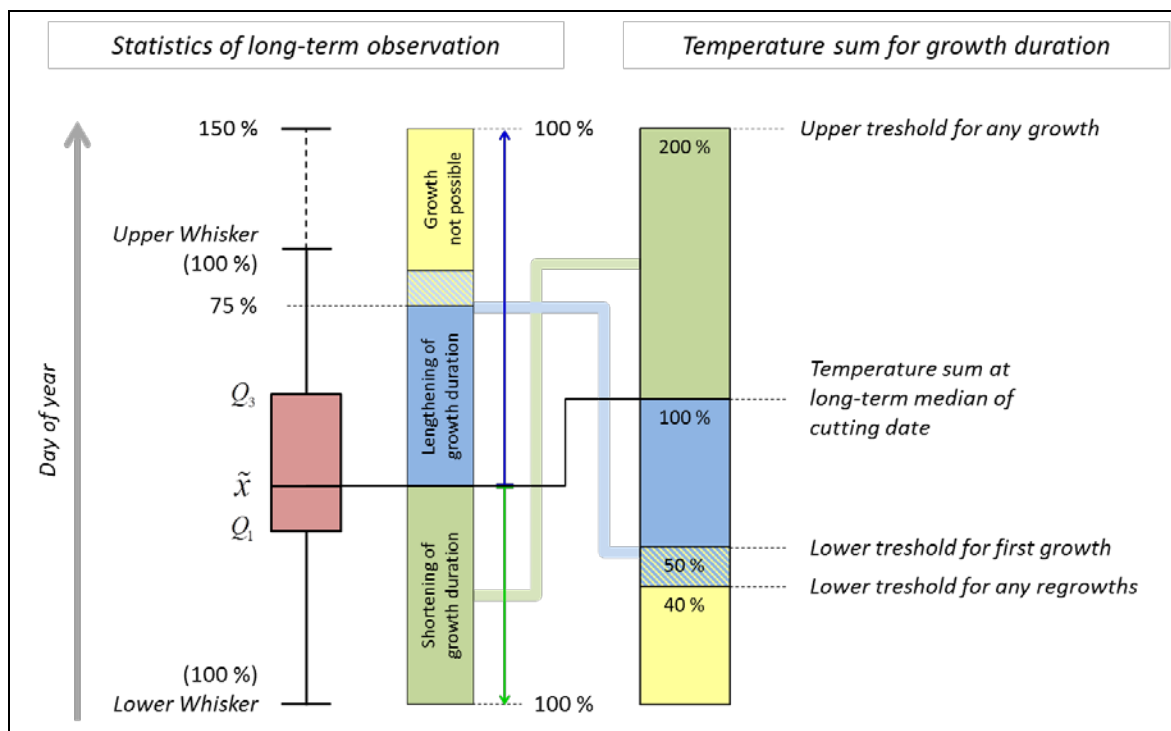


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Ermittlung des Erntezeitpunktes aus Temperatursummen

Die Variabilität der Temperatursumme wird mithilfe dieses Ansatzes als relative Änderung der Nutzungszeitpunkte auf der Grundlage von langjährigen Grünlandexperimenten (vgl. *Abbildung 5*) abgebildet. Die rechte Säule in *Abbildung 6* stellt die Akkumulation der Temperatur für einen Aufwuchs eines bestimmten Schnittsystems dar. Der Median der Temperatursumme zum Nutzungszeitpunkt bezieht sich auf die Auswertung sämtlicher Experimente im Zeitraum 1990 bis 2009 und bildet die Basis (100 %). In *Abbildung 5* ist diese Basis für jeden Aufwuchs der verschiedenen Nutzungssysteme abgebildet. Die für

den mittleren Erntezeitpunkt berechnete Temperatursumme des aktuellen Jahres wird dem Basiswert gegenübergestellt und als relative Abweichung festgehalten.

Als obere Grenze ist eine Verdoppelung der Temperatursumme (200 %) vorgesehen. Darüberhinausgehende Werte bleiben unberücksichtigt, da angenommen werden muss, dass für derartige Situationen ein Schnittsystem mit höherer Frequenz und damit kürzer Aufwuchsdauer besser geeignet ist und der realen Situation eher entspricht. Der untere Schwellenwert begrenzt das temperatursummenabhängige Potenzial eines Schnittsystems. Wird beim ersten Aufwuchs nur die Hälfte der Temperatursumme erreicht, ist der entsprechende Standort für das jeweilige Schnittsystem ungeeignet. Aufgrund des starken Zusammenhangs der Temperatur mit der Seehöhe wird mithilfe dieser Restriktion die Ausweisung eines Schnittsystems in einer dafür nicht geeigneten Höhenlage vermieden. Da bei den Folgeaufwüchsen die Variabilität der Nutzungszeitpunkte zunimmt (vgl. *Abbildung 5*), wird der untere Schwellenwert etwas herabgesetzt und mit 40 % angenommen.

Im linken Bereich der *Abbildung 6* sind die statistischen Parameter des aufwuchsbezogenen Nutzungszeitpunktes auf Basis der langjährigen Beobachtungen schematisch dargestellt. In Form einer *Boxplot*-Grafik werden Median, erstes und drittes Quartil sowie der untere und obere *Whisker* mit dem maximal 1,5-fachen Interquartilsabstand angegeben. Diese Kennwerte bilden die Grundlage für die Übertragung der relativen Temperatursummenabweichungen. Betragen diese mehr als 100 %, führen sie zu einer Verkürzung der Aufwuchsdauer im aktuellen Jahr, da das Temperatursummenverhältnis auf den Abstand zwischen Median des Nutzungszeitpunktes und dem unteren *Whisker* zur Anwendung kommt. So führen überdurchschnittliche Temperaturverhältnisse, beispielsweise mit 120 % des langjährigen Medians der Temperatursumme, zu einem früheren Schnitt.

Mit dem 150. Tag des Jahres als Median des Erntezeitpunktes und einem unteren *Whisker* am 125. Tag ergibt sich eine um fünf Tage bzw. 20 % frühere Ernte (25 Tage = 100 %). Wird die Temperatursumme am Tag des langjährigen Medians nicht erreicht, führt dies zu einer Verlängerung der Aufwuchsdauer und damit zu einem späteren Erntetermin. Dies ist vor allem im Berggebiet relativ häufig der Fall, da mit zunehmender Höhe die Temperatursumme geringer wird und sich die Ernte auf einen zunehmend späteren Zeitpunkt verschiebt. Die unteren Schwellenwerte für den ersten Aufwuchs (50 %) und die Folgeaufwüchse (40 %) verhindern eine nicht plausible Unterschreitung von Mindestanforderungen an die Temperatur. Die Übertragung der relativen Temperatursummen wird auf einen größeren Wertebereich der Schnittzeitpunkte vorgenommen. Der Abstand zwischen Median und oberem *Whisker* wird um 50 % erweitert. Damit beträgt die größtmögliche positive Abweichung des Nutzungszeitpunktes für den ersten Aufwuchs 75 % des Abstandes zwischen Median und oberem *Whisker* sowie 90 % für die Folgeaufwüchse.

Wenn in einem Jahr beispielsweise nur 80 % der langjährigen mittleren Temperatursumme erreicht werden, bedeutet dies eine Verlängerung der Aufwuchsdauer. Bei einem mittleren Schnitttermin am 150. Tag des Jahres und einem oberem *Whisker* am 180. Tag ergibt dies einen um 9 Tage späteren Erntezeitpunkt (30 Tage = 100 %; 45 Tage = 150 %); das sind 20 % des erweiterten Wertebereichs (150 %) oder 30 % des Abstandes zwischen Median und oberem *Whisker*. Die Erweiterung des Wertebereiches auf 150 % erhöht die Streubreite bei der Berechnung einer Verlängerung der Vegetationsdauer für den ohnehin durch die unteren Schwellenwerte begrenzten Bereich der relativen Temperatursummen. Unter diesen Schwellenwerten liegende Temperatursummen werden nicht berücksichtigt und davon betroffene Standorte weisen daher keine Ergebnisse für das jeweilige Schnittsystem aus.

Die Festlegung der Schwellenwertprozente (200 und 50 bzw. 40 %) sowie die Übertragung auf einen erweiterten Bereich (150 %) für positive Abweichungen der Schnitttermine erfolgte aufgrund umfangreicher Testläufe für die Untersuchungsjahre.

Für jede Zelle der Rasteroberfläche wird die Temperatur akkumuliert und bei Erreichen des langjährigen Medians des Nutzungszeitpunktes gemäß den oben angeführten methodischen Vorgaben auf den Wertebereich der langjährigen Erntebeobachtungen übertragen. Die so berechneten Abweichungen eines bestimmten Jahres zum langjährigen, zentralen Erntezeitpunkt werden in Ergebniskarten gespeichert und für weitere Analysen bereitgestellt. Eine detaillierte Beschreibung für die Erstellung von Schnitthäufigkeitskarten findet sich in Schaumberger (2011, 205ff).

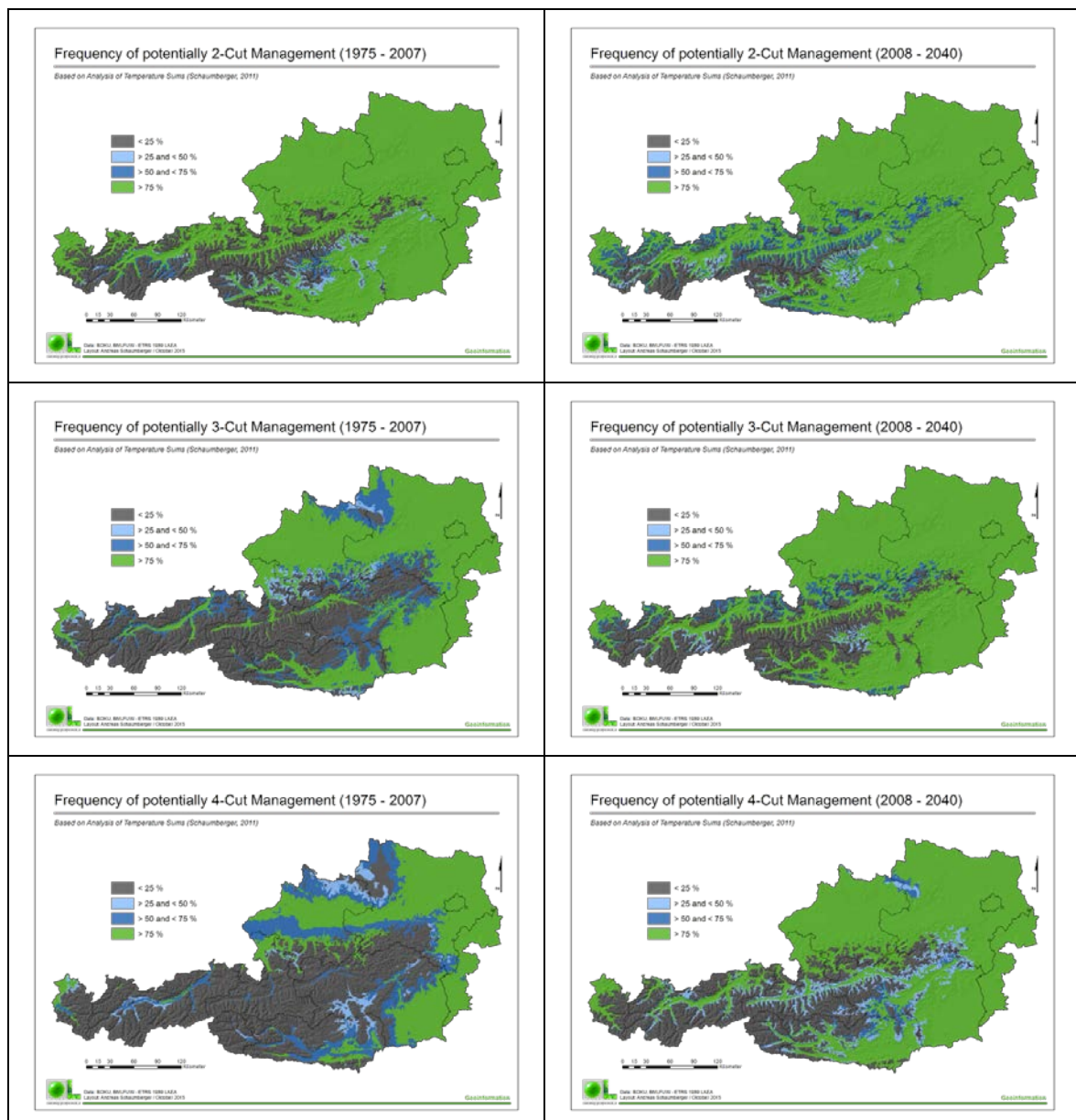


Abbildung 7: Relative Häufigkeit der Schnittnutzungen für die Perioden 1975 - 2007 und 2008 - 2040

In *Abbildung 7* werden die Ergebnisse der jährlich bestimmten Schnittfrequenzen über die beiden Untersuchungszeiträume 1975 bis 2007 und 2008 bis 2040 aggregiert. Die dargestellten Karten beschreiben die relative Häufigkeit der Jahre, an denen ein bestimmtes

Schnittsystem aufgrund klimatischer Bedingungen erfolgt. In den Veränderungen zwischen vergangener und zukünftiger Periode kommt die Wirkung der im Szenario verwendeten Temperaturerhöhung von + 1,5 °C auf die räumliche Verteilung der Schnittfrequenz deutlich zum Ausdruck. In allen drei Fällen (2-, 3- und 4-Schnittsystem) werden die Gebiete des jeweiligen Systems größer, insbesondere betrifft dies die Alpentäler.

Mit höheren Temperaturen wird die Vegetationsperiode länger (vgl. *Abbildung 4*) und damit der für ein Schnittsystem verfügbare Zeitraum. Höhere Temperaturen ermöglichen in diesen Regionen auch eine kürzere Aufwuchsdauer und damit ergibt sich häufig auch die Möglichkeit einer zusätzlichen Schnittnutzung. Diese Berechnungen entsprechen vielfach den in der Realität zu beobachtenden Entwicklungen. Beispielsweise erfolgen im Mittleren Ennstal mittlerweile auf der überwiegenden Zahl von Grünlandflächen vier Nutzungen, die in den vergangenen Jahrzehnten kaum öfter als dreimal geschnitten wurden.

1.4.3 Erträge und deren Veränderungen

Die Methodik der Ertragsschätzung sowie die Evaluierung des Schätzmodells wird ausführlich in Schaumberger (2011) diskutiert. In der vorliegenden Beschreibung werden lediglich zusammenfassende Erklärungen angeführt, welche eine inhaltliche Einordnung der hier gezeigten Ergebnisse erleichtern, nicht jedoch die Lektüre von Schaumberger (2011) ersetzen können.

Die Bodenwasserbilanz und eine damit mögliche Beurteilung der Wasserverfügbarkeit ist die Voraussetzung für eine Auswertung der Beziehung von Wetter und Ertrag. Ein negativer Bodenwasserhaushalt führt bei anhaltend trockenen Bedingungen zu Wasserstress und damit zu Ertragsminderungen. Ausgehend von den Oberflächen des Niederschlags und der Referenz-Evapotranspiration wurde ein einfaches Modell der FAO (Allen *et al.*, 1998) implementiert. Zunächst erfolgte eine Anpassung der Referenz-Evapotranspiration an das Wirtschaftsgrünland, indem ein Pflanzenfaktor die Änderung zur Referenzgrasoberfläche bewirkt. Auf Grundlage der Aufwuchsdauer wurde dafür ein räumliches Modell entwickelt, welches eine lineare Zunahme des Pflanzenbestandes zwischen den einzelnen Erntezeitpunkten annimmt. Die Oberfläche der Nutzbaren Feldkapazität ergab in Kombination mit angepasster Grünland-Evapotranspiration, Niederschlag, Tiefenversickerung und Bodenwasserabsenkung die aktuelle Evapotranspiration als Resultat der Bilanz. Die räumliche Implementierung erfordert einige Vereinfachungen. So basiert beispielsweise die Interzeptionsverdunstung auf einer einfachen linearen Beziehung zum Pflanzenfaktor. Der Kapillarhub aus dem Grundwasser sowie der Oberflächenabfluss konnten aufgrund fehlender Basisdaten bzw. Modelle nicht berücksichtigt werden.

Die Wasserverfügbarkeit als Resultat der Bodenwasserbilanzierung wurde aus der Relation von aktueller zu Grünland-Evapotranspiration abgeleitet. Mit der Akkumulation des Verhältniswertes über unterschiedlich lange Zeiträume und der Anwendung empirischer Koeffizienten ergab sich daraus ein Wasserverfügbarkeitsfaktor. Um aus der Wasserverfügbarkeit eine Information der Wachstumsbedingungen zu erhalten, wurde ein empirischer Wachstumsfaktor angewendet. Die funktionale Beziehung zwischen Wasserverfügbarkeit und diesem Faktor bestimmt die Größe des Einflusses einer unzureichenden Wasserversorgung auf die Ertragsminderung. Unter der Annahme, dass Globalstrahlung und Temperatur die entscheidenden Parameter des Wachstums darstellen, wurde der täglich generierte räumliche Wachstumsfaktor auf die Oberflächen der beiden Wetterinformationen angebracht. Ist die Wasserversorgung beeinträchtigt, reduzieren sich damit Strahlung und Temperatur. Mit der Akkumulation der beiden Parameter als effektive Globalstrahlung und effektive Temperatur über die Dauer eines Aufwuchses ergeben sich die Modellprä-

diktoren für die Ertragsschätzung. Eine Prüfung und Anpassung des Zusammenhangs von Wasserverfügbarkeit und Wachstumsfaktor wurde über aufwendige Testläufe vorgenommen, in denen seine Auswirkung auf die Qualität der Ertragsschätzung bewertet wurde.

Die Entwicklung eines empirischen Modells zur Schätzung von Grünlanderträgen wurde auf die Verfügbarkeit von Geodaten abgestimmt. Als hoch signifikante Parameter gehen die oben beschriebene effektive Globalstrahlung und Temperatur in die Modellierung ein. Sie beschreiben näherungsweise die unter mangelnder Wasserversorgung beeinträchtigte Effizienz von Globalstrahlung und Temperatur bei der Entwicklung von Biomasse. Zusätzlich wurde eine vom Wachstumsfaktor unbeeinflusste Summe beider Parameter in Relation zu den Effektiv-Varianten sowie die Aufwuchsdauer als Erklärung des Ertrages aufgenommen. Nutzungssystem sowie Aufwuchs fanden als kategoriale Variablen Berücksichtigung. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,63 und einen RMSE von 6,69 dt TM ha⁻¹ Aufwuchs⁻¹ ergab sich daraus die Grundlage für eine räumliche Anwendung der Schätzung. Die daraus generierten Oberflächen bilden den Ertrag eines jeweiligen Aufwuchses der verschiedenen Nutzungssysteme im Untersuchungsgebiet ab.

Die räumliche Implementierung der Ertragsschätzung erfordert eine Reihe von Vereinfachungen und Restriktionen. So kann beispielsweise die Düngung aufgrund eines fehlenden räumlichen Modells nicht als Erklärung herangezogen werden, hier wird lediglich eine ausreichende Nährstoffversorgung angenommen. Bei der Zusammenführung der Aufwucherträge zu einem Jahresertrag kumulieren sich auch die Fehler. Während es bei den Einzelerträgen nur zu einer leichten Unterschätzung kommt, wird im Jahresertrag diese deutlich und spiegelt sich in den Ergebnisoberflächen wieder. Das Modell verhält sich allerdings sehr robust und unterschätzt über den gesamten Wertebereich gleichmäßig. Am aussagekräftigsten sind die witterungsbedingten jährlichen Schwankungen.

Die Ergebnisse eignen sich aus diesem Grund bestens für die Auswertung der relativen Änderung, allerdings muss dabei die modellbedingte Unterschätzung beachtet werden. Eine Verwendung der Absoluterträge für Auswertungen darf nur unter Berücksichtigung des Modellfehlers erfolgen.

Auf den folgenden Seiten werden die Ergebnisse der Ertragsrechnung für unterschiedliche Zeiträume und Klimaszenarien dargestellt. In *Abbildung 8* werden die Erträge für 2-, 3- und 4-Schnitt-Systeme in der Referenzperiode 1975 bis 2007 dargestellt. Die vierte Abbildung besteht aus einer Aggregation aller drei Schnittsysteme, wobei die Allokation der schnittbezogenen Erträge nur auf den nicht berechneten Flächen des nächsthöheren Schnittsystems erfolgt. Eine Überschneidung der Ergebnisse wird damit vermieden.

Alle Ertragsergebnisse der unterschiedlichen Schnittsysteme sind in ihrer maximalen räumlichen Ausdehnung dargestellt und nicht nur auf die tatsächlich mit Grünland bewirtschaftete Fläche eingeschränkt. Dabei wird auch nicht berücksichtigt, ob sich Flächen in bestimmten Regionen überhaupt für ein bestimmtes Schnittsystem eignen bzw. die entsprechende Nutzung sinnvoll ist. Einzig die klimatischen Rahmbedingungen (insbesondere die Temperatur) begrenzen die räumliche Ausdehnung.

Für eine Zuordnung der Erträge auf tatsächliche Grünlandflächen ist eine nachträgliche Maskierung notwendig. Da sämtliche Ergebnisse aus den Karten auch numerisch ausgelesen und den jeweiligen Grünlandflächen tabellarisch zugeordnet wurden, erfolgt hier keine weitere kartografische Auswertung.

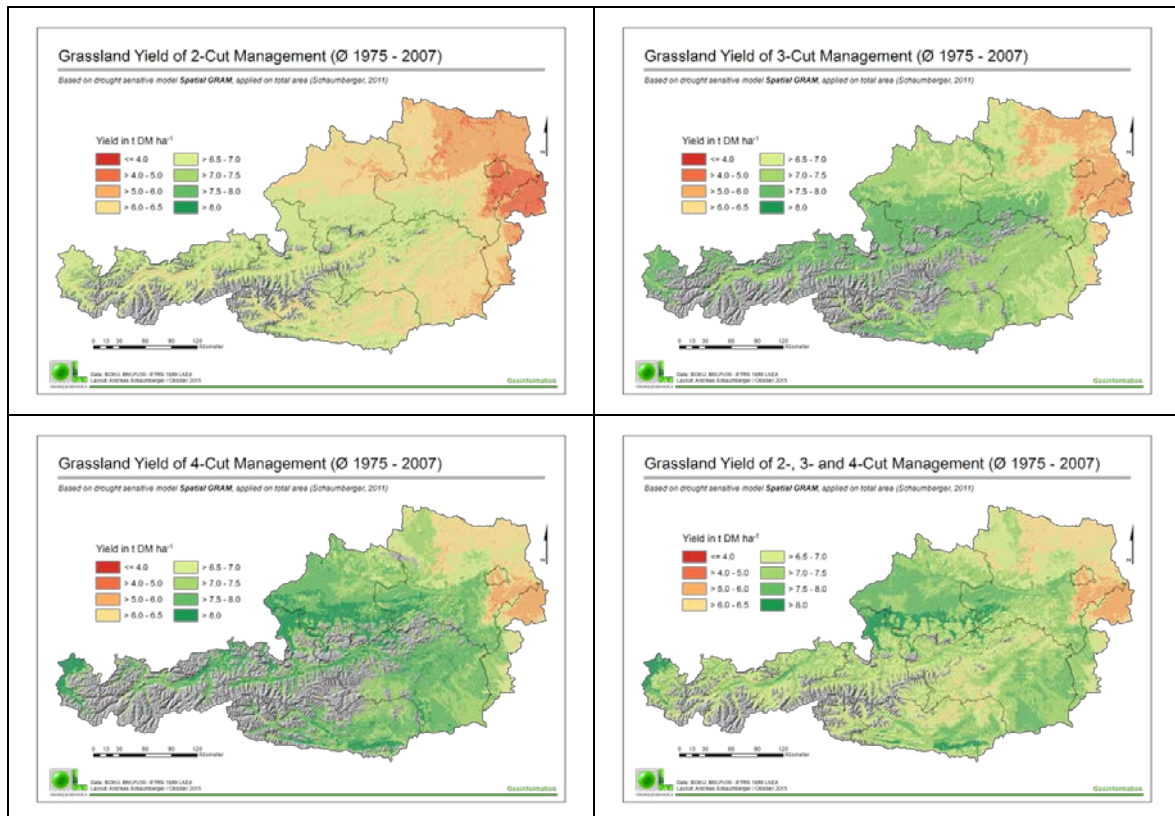


Abbildung 8: Grünlanderträge unterschiedlicher Schnittsysteme im Mittel der Periode 1975 bis 2007

In *Abbildung 9* bis *Abbildung 20* werden die Ergebnisse aus den Ertragsschätzungen für die beiden Klimaszenarien und für unterschiedliche Zeiträume (2008 bis 2040 sowie für die einzelnen Dekaden) in Absolutwerten, in relativen Änderungen zur Referenzperiode 1975 bis 2007 (vgl. *Abbildung 8*) sowie als Standardabweichungen für die einzelnen Perioden dargestellt. Die Karten zeigen trotz der bei der Klimadatengenerierung vorgenommenen Vereinfachungen (vgl. *Strauss et al., 2013*) plausible und nachvollziehbare Ergebnisse.

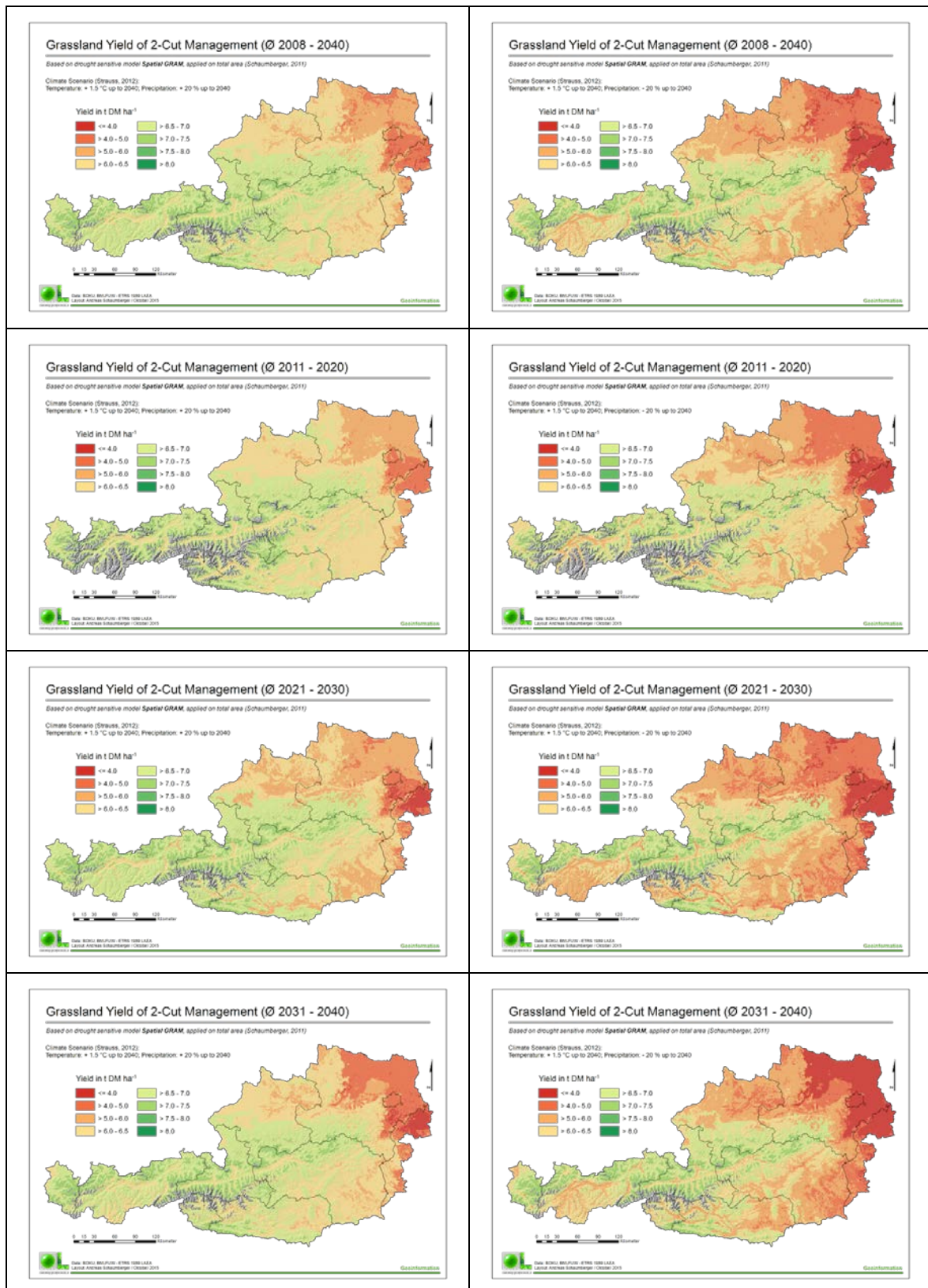


Abbildung 9: Mittlere Grünlanderträge eines 2-Schnitt-Systems für zwei Klimaszenarien

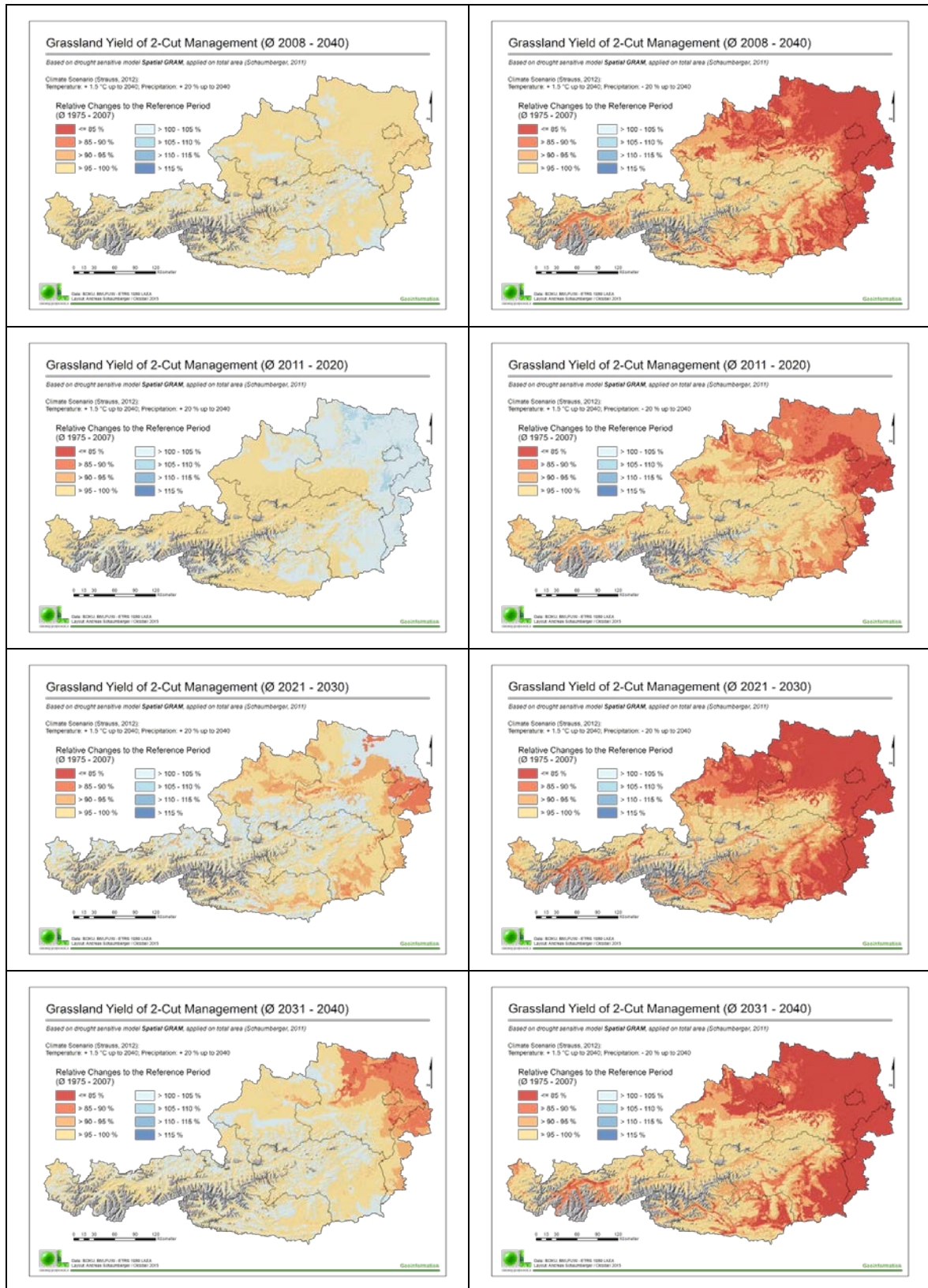


Abbildung 10: Relative Änderungen von Grünlanderträgen eines 2-Schnitt-Systems für zwei Klimaszenarien

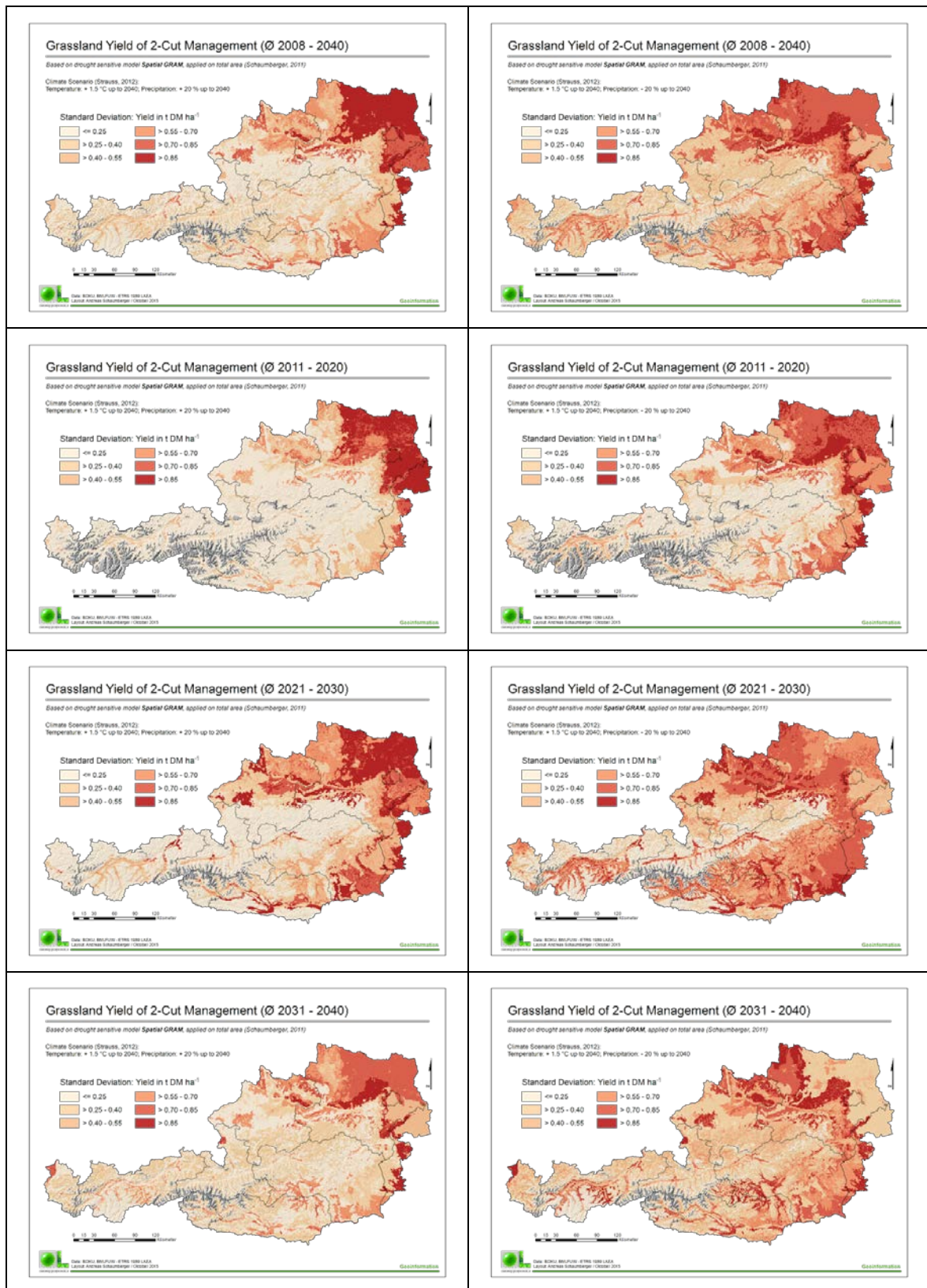


Abbildung 11: Standardabweichungen der Grünlanderträge (2-Schnitt-System) für zwei Klimaszenarien

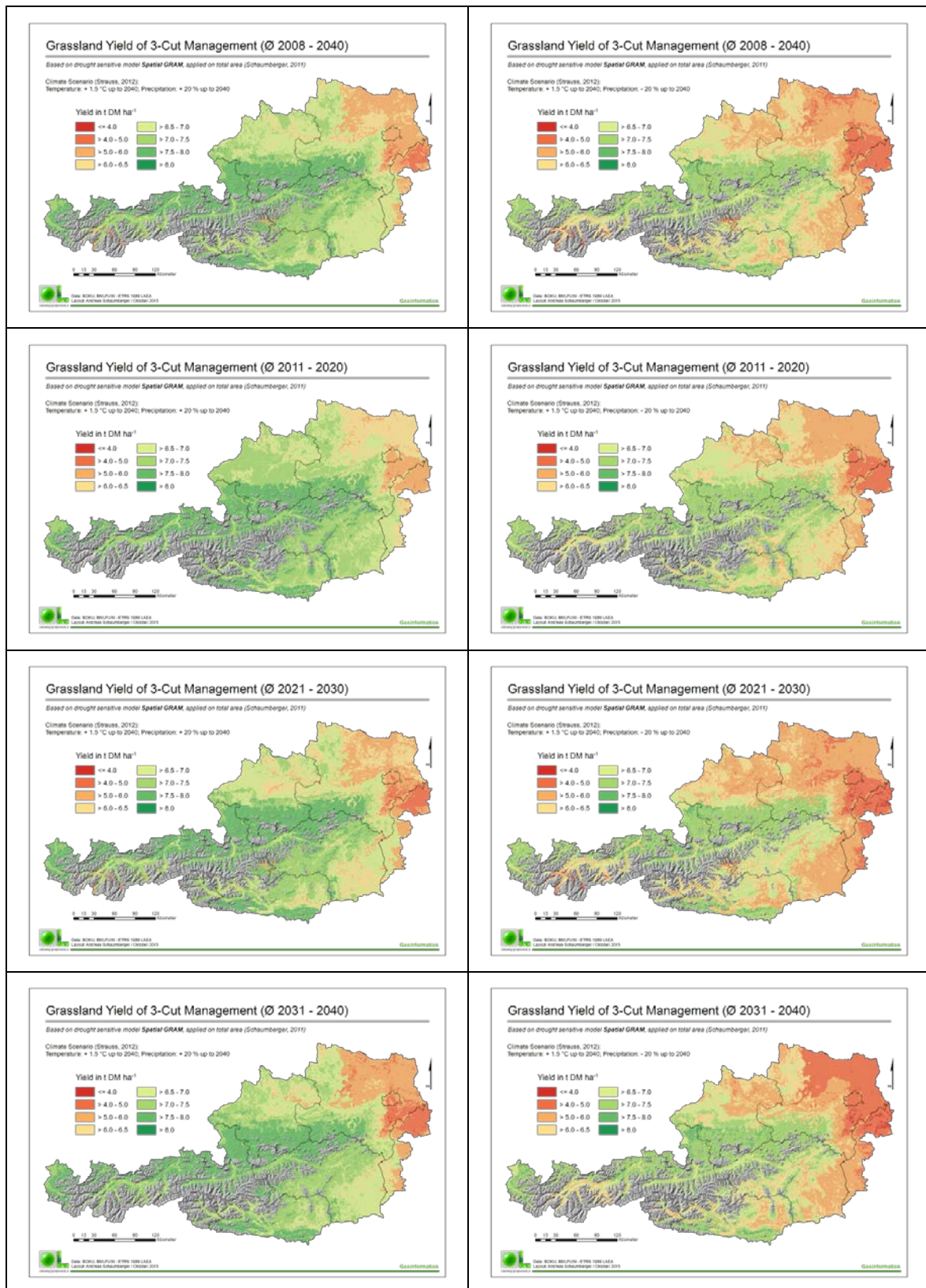


Abbildung 12: Mittlere Grünlanderträge eines 3-Schnitt-Systems für zwei Klimaszenarien

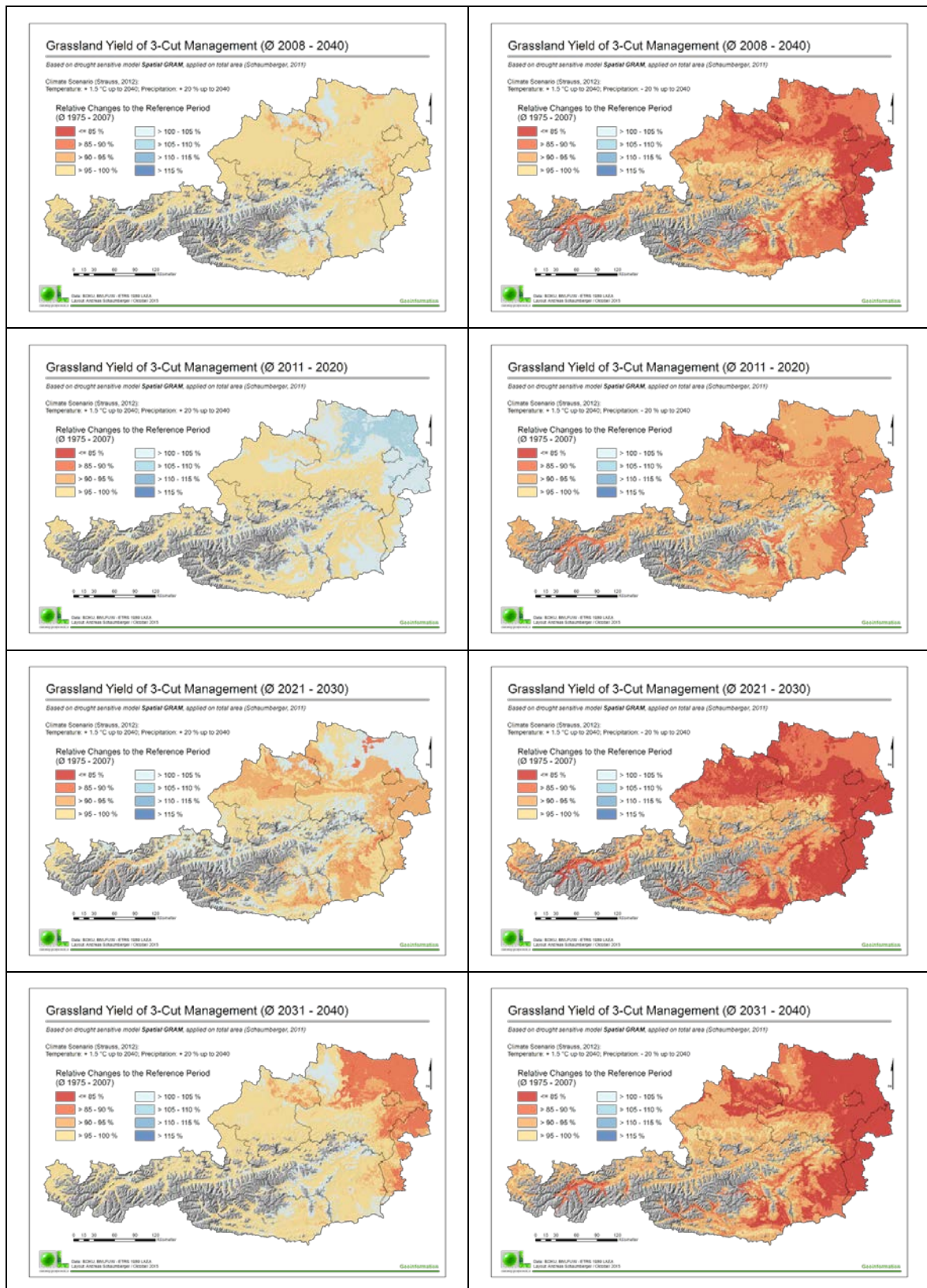


Abbildung 13: Relative Änderungen von Grünlanderträgen (3-Schnitt-System) für zwei Klimaszenarien

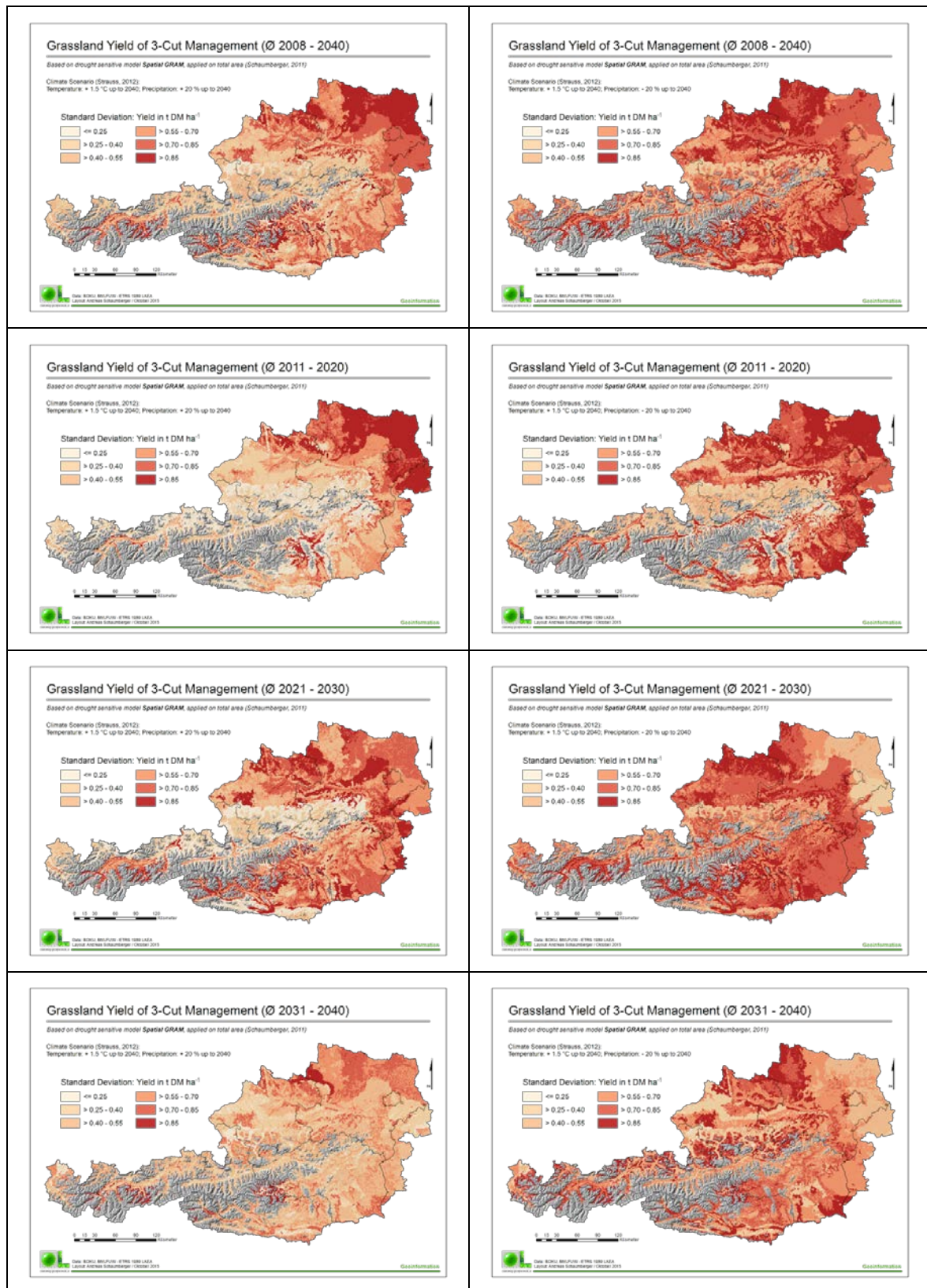


Abbildung 14: Standardabweichungen der Grünlanderträge (3-Schnitt-System) für zwei Klimaszenarien

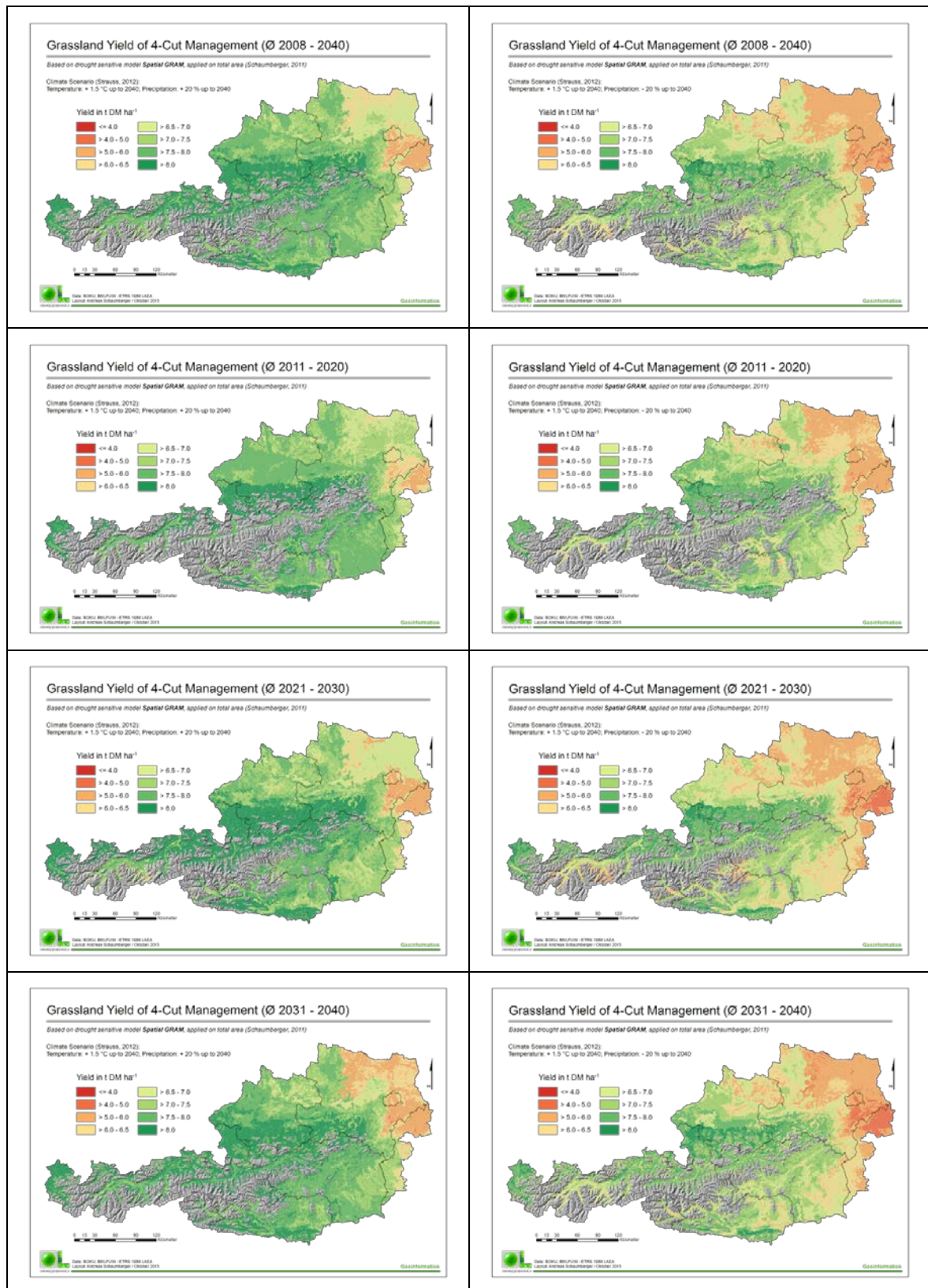


Abbildung 15: Mittlere Grünlanderträge eines 4-Schnitt-Systems für zwei Klimaszenarien

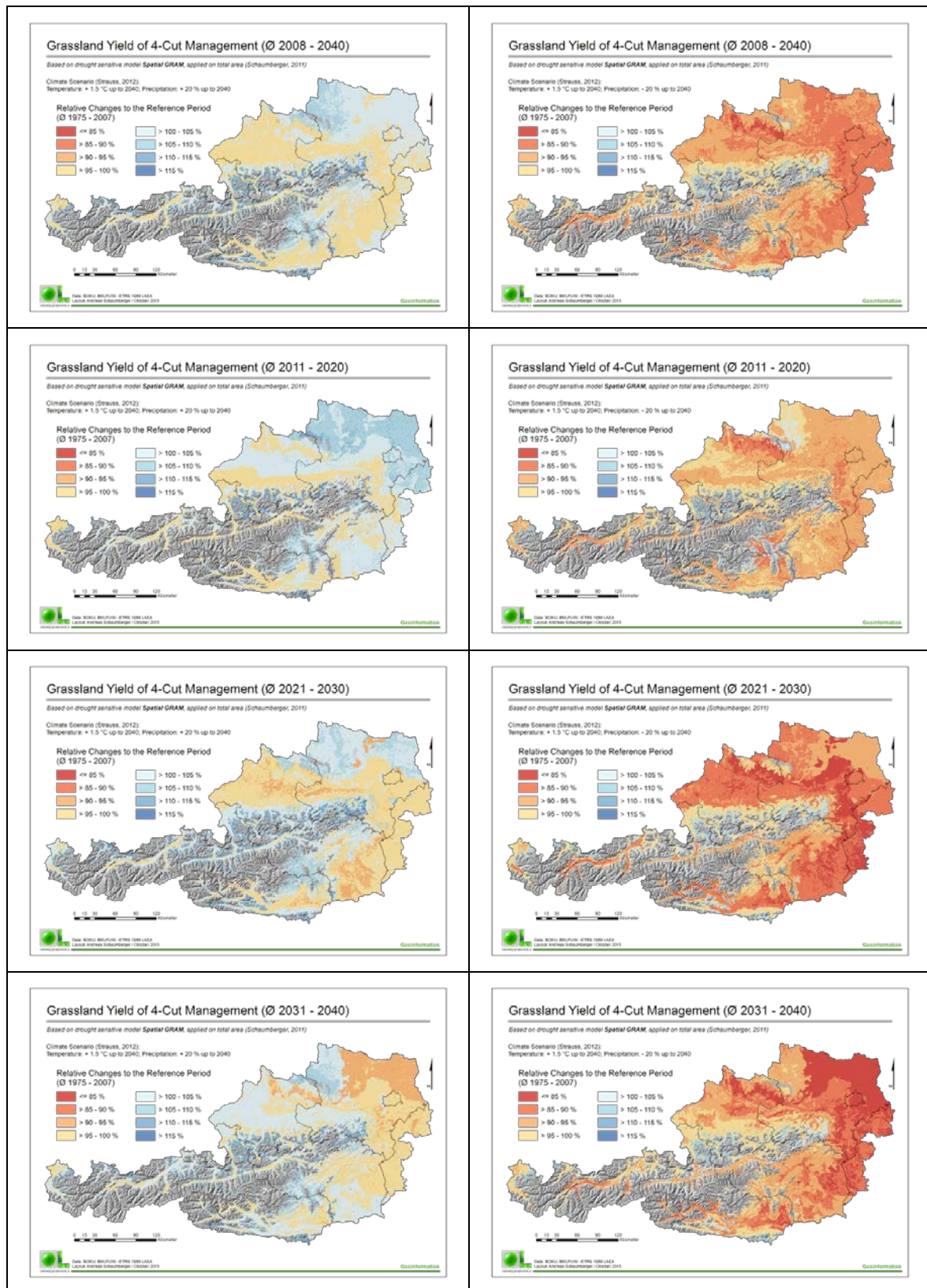


Abbildung 16: Relative Änderungen von Grünlanderträgen (4-Schnitt-System) für zwei Klimaszenarien

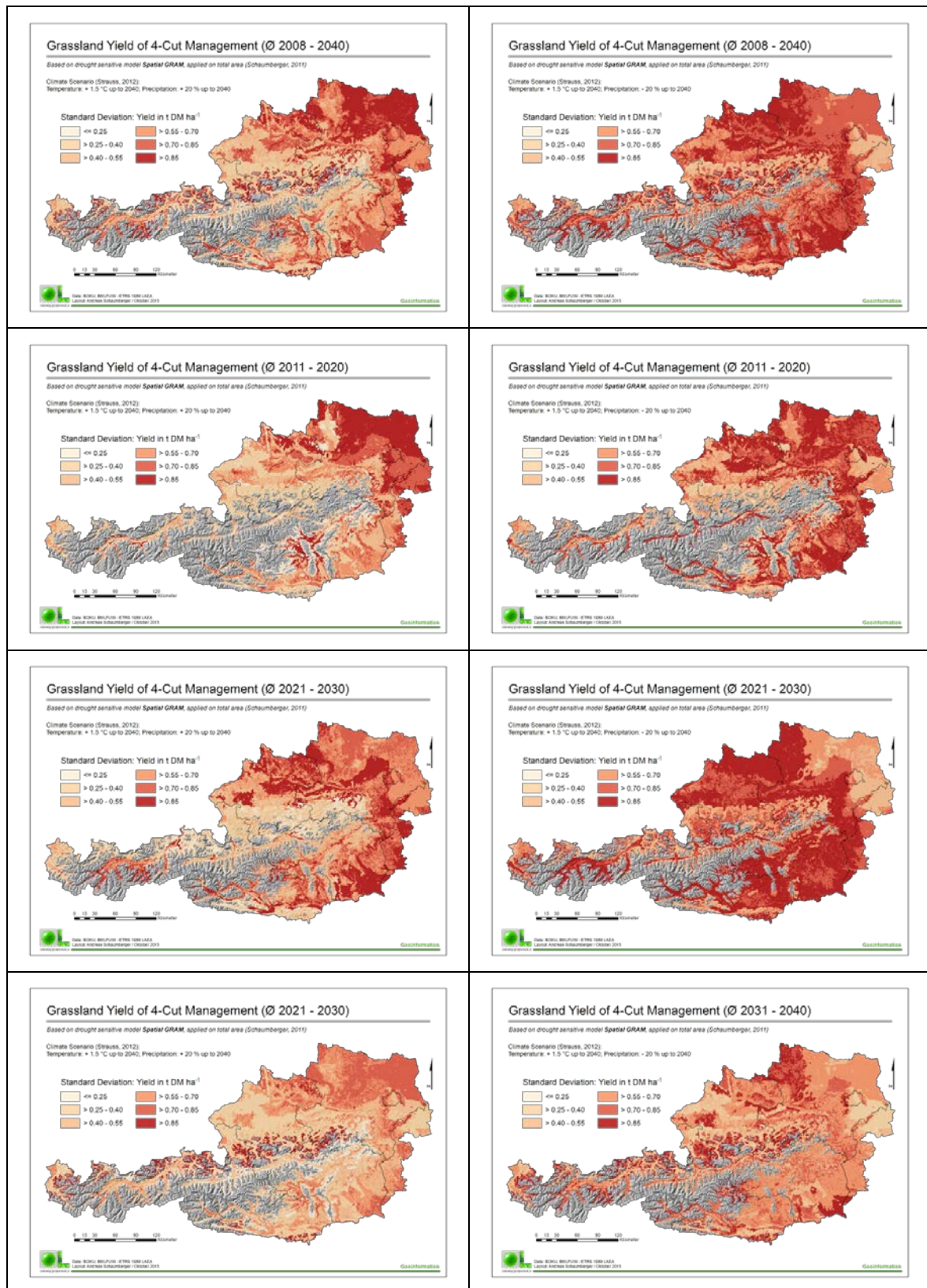


Abbildung 17: Standardabweichungen der Grünlanderträge (4-Schnitt-System) für zwei Klimaszenarien

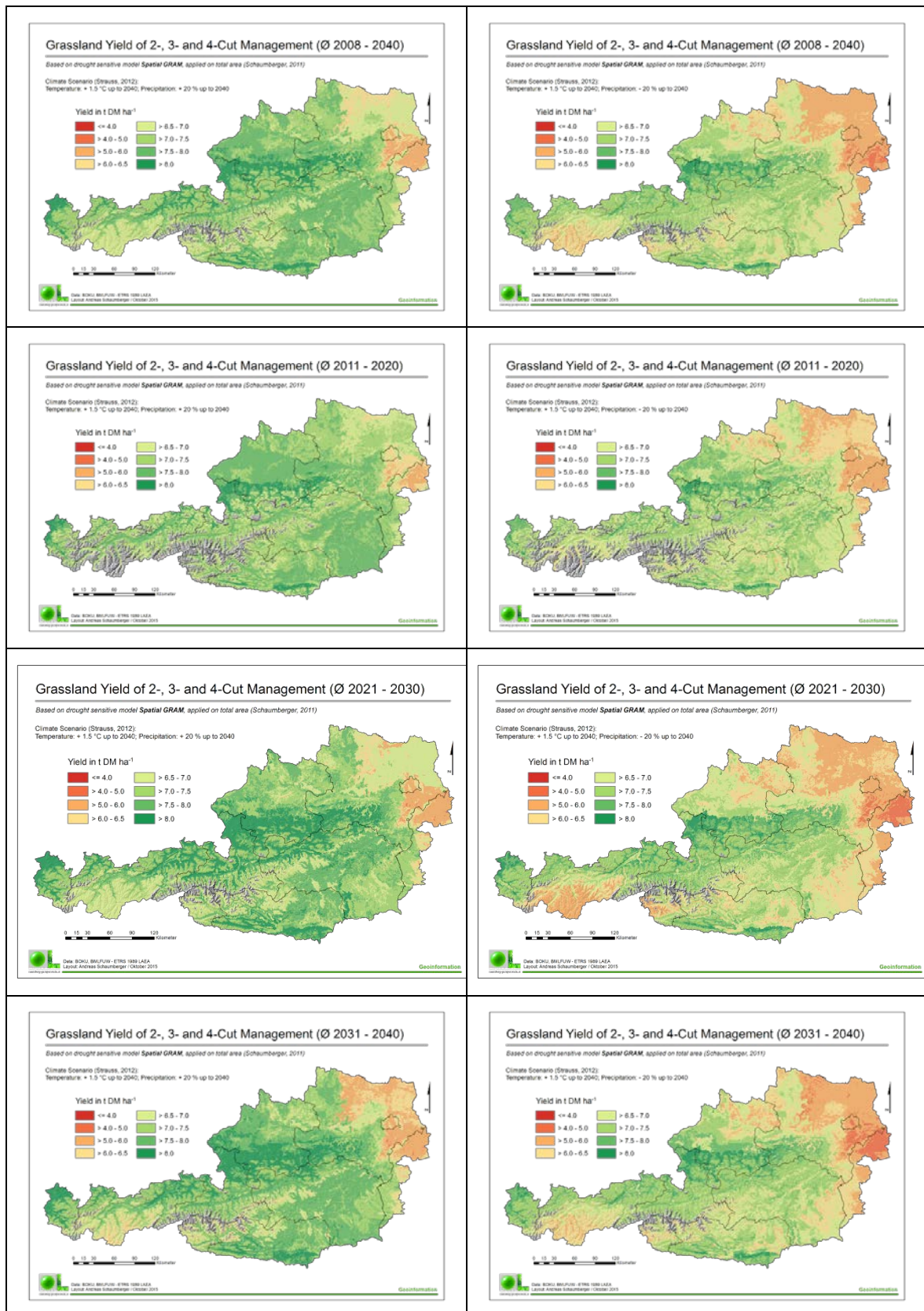


Abbildung 18: Mittlere Grünlanderträge eines 2-, 3- und 4-Schnitt-Systems für zwei Klimaszenarien

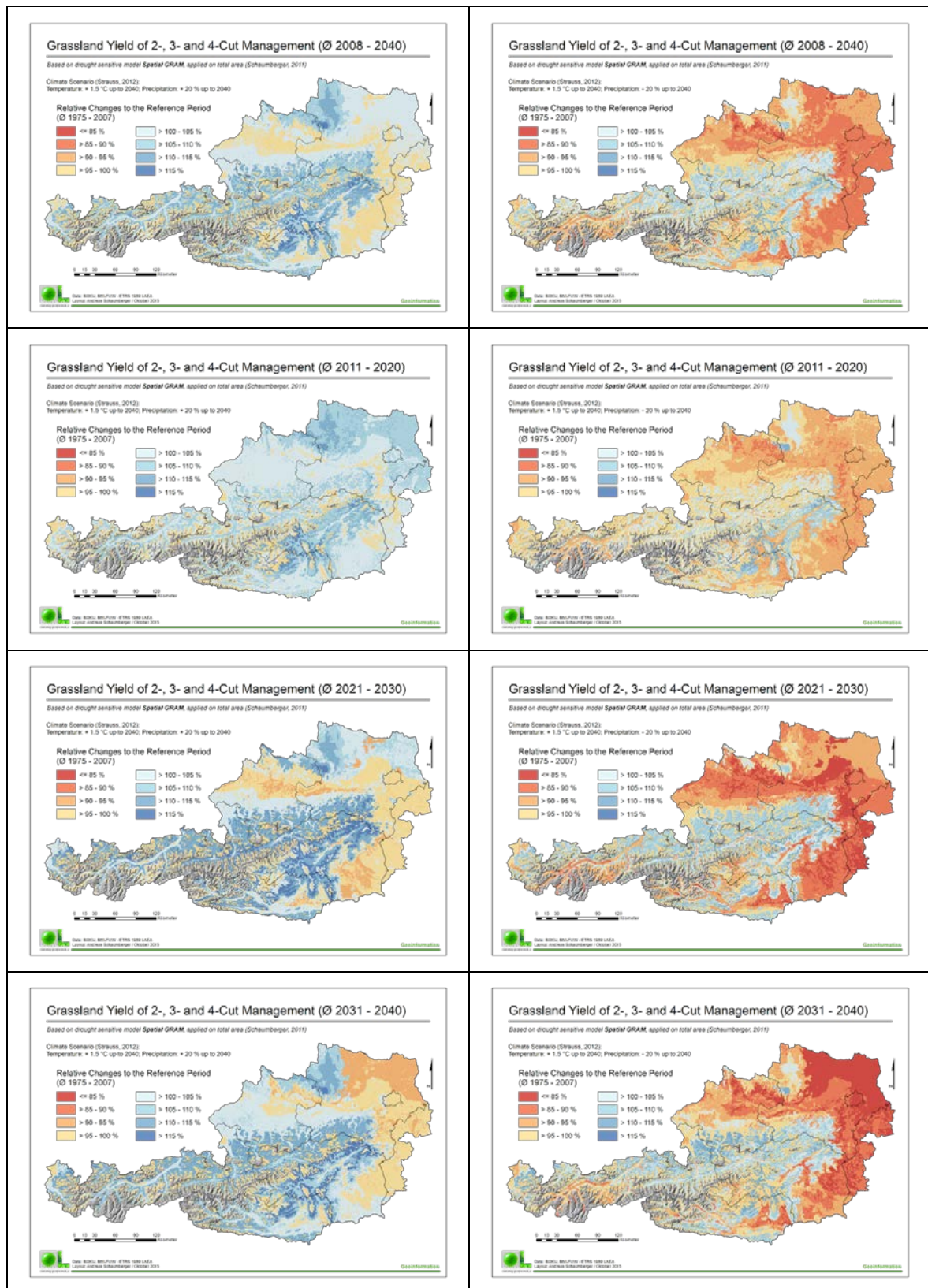


Abbildung 19: Relative Änderungen von Erträgen (2-, 3- und 4-Schnitt-System) für zwei Klimaszenarien

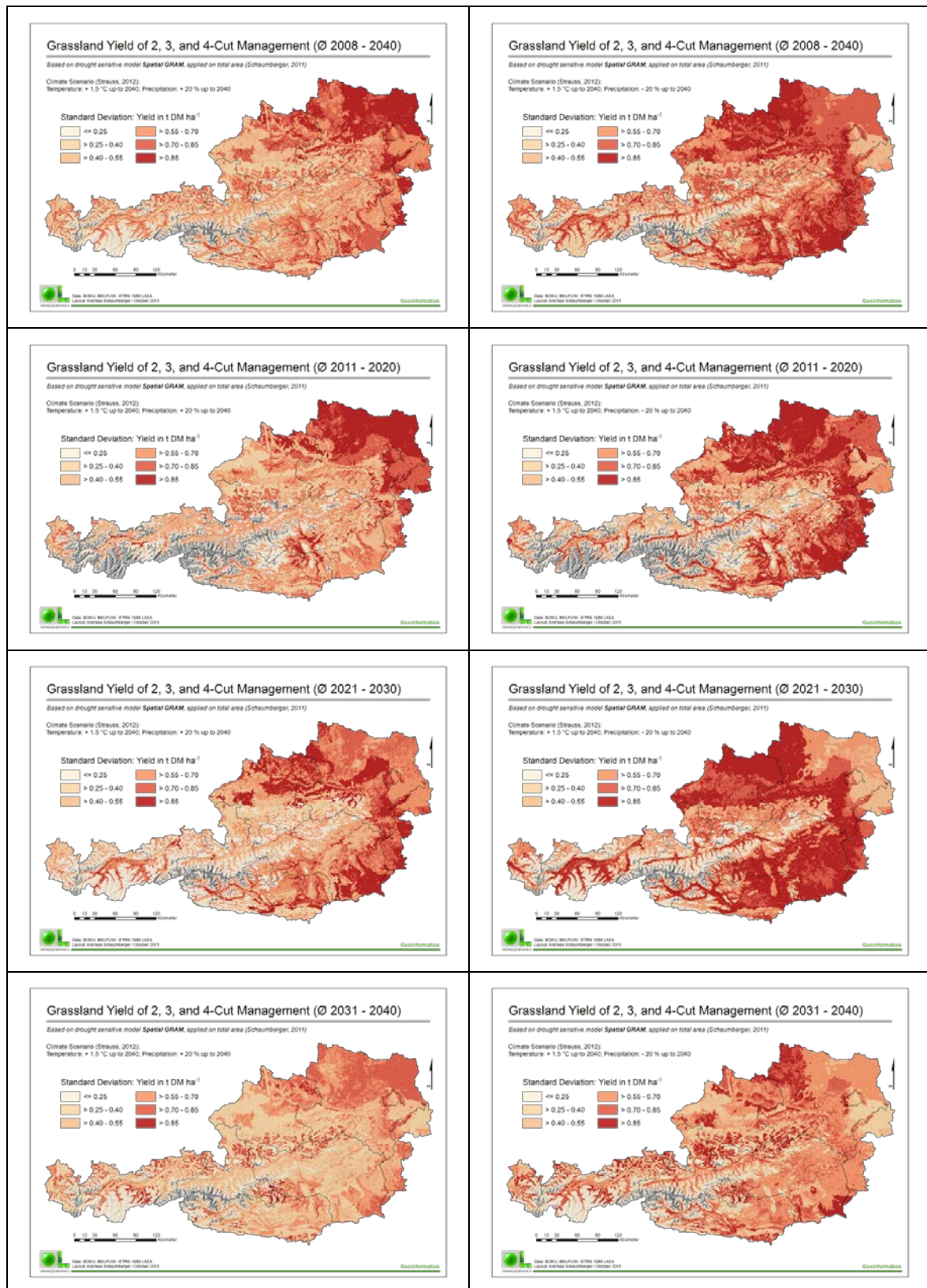


Abbildung 20: Standardabweichungen der Erträge (2-, 3- und 4-Schnitt-System) für zwei Klimaszenarien

Ohne eine detaillierte Interpretation von Einzelergebnissen vorzunehmen, kann generell gesagt werden, dass die höheren Temperaturen nur dann ertragssteigernd wirken, wenn ausreichend Niederschläge vorhanden sind. Beim Szenario SC5 (Niederschlagsplus von 20 %) ist über sämtliche Auswertungen hinweg eine Ertragszunahme im Berggebiet zu erkennen. Ertragsminderungen ergeben sich bei diesem Szenario hauptsächlich in jenen Gebieten des Flachlandes, die auch heute bereits häufig von Trockenheit bedroht werden. Anders sieht die Entwicklung beim Szenario SC9 aus, wo zur Temperaturerhöhung auch eine Niederschlagsminderung von 20 % angenommen wird. Die Temperaturzunahme wirkt sich im Flachland besonders negativ aus, andererseits sind auch hier leichte Ertragszunahmen im Berggebiet feststellbar. Die Standardabweichungen sind in den flachen und eher trockenen Gebieten tendenziell höher.

Bei der Erstellung der Karten wurde besonders darauf geachtet, dass für alle Auswertungen dieselbe Klassenbildung mit entsprechender Farbgebung erfolgte. Nur dadurch ist ein Vergleich über alle Karten möglich, wirkt sich jedoch auch nachteilig aus, wenn Einzelergebnisse einer genaueren Betrachtung unterzogen werden. Die Interpretation einzelner Karten macht demnach noch eine ergänzende kartografische Darstellung notwendig. Aus diesem Grund sind sämtliche Daten zur Kartenerstellung in einem ArcMap-Dokument verfügbar; Zusammenstellungen sowie auf Raster-Algebra basierte Berechnungen können somit jederzeit durchgeführt werden.

1.5 Literatur

- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. und Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Papers. Paper No 56, FAO, Rome, 326 S.
- Ansquer, P.; Al Haj Khaled, R.; Cruz, P.; Theau, J.-P.; Therond, O. und Duru, M. (2009): Characterizing and predicting plant phenology in species-rich grasslands. *Grass and Forage Science* **64** (1), 57-70.
- Buchgraber, K.; Schaumberger, A. und Pötsch, E.M. (2011): Grassland Farming in Austria - status quo and future prospective. 16th Symposium of the European Grassland Federation "Grassland Farming and Land Management Systems in Mountainous Regions", Gumpenstein, Austria, Grassland Science in Europe, 16, August 29-31, 2011, 13-24.
- Guggenberger, T.; Hofer, O.; Fahrner, W.; Sucher, B.; Wiedner, G. und Bader, R. (2012): Fachatlas Landwirtschaft - Entwicklung landwirtschaftlicher Geodaten im Geographical Grid System Austria. Raumberg-Gumpenstein, Forschungsbericht, Band 49, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irdning, 508 S.
- Pötsch, E.M. und Resch, R. (2005): Einfluss unterschiedlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Nährstoffgehalt von Grünlandfutter. 32. Viehwirtschaftliche Fachtagung, Irdning, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 13.-14. April 2005, 1-14.
- Schaumberger, A. (2011): Räumliche Modelle zur Vegetations- und Ertragsdynamik im Wirtschaftsgrünland. Dissertation, Technische Universität Graz, Institut für Geoinformation, 264 S.
- Smit, H.J.; Metzger, M.J. und Ewert, F. (2008): Spatial distribution of grassland productivity and land use in Europe. *Agricultural Systems* **98** (3), 208-219.
- Sparks, T.H.; Croxton, P.J.; Collinson, N. und Taylor, P.W. (2005): Examples of phenological change, past and present, in UK farming. *Annals of Applied Biology* **146** (4), 531-537.
- Strauss, F. (2012): Modeling climate change and impacts on crop production in Austria. Dissertation, University of Natural Resources and Life Sciences, Institute for Sustainable Economic Development, Vienna, 147 S.
- Strauss, F.; Formayer, H. und Schmid, E. (2013): High resolution climate data for Austria in the period 2008–2040 from a statistical climate change model. *International Journal of Climatology* **33** (2), 430-443.

2 Projekt BEAT: Veränderung von Grünlanderträgen in zwei unterschiedlichen Klimaszenarien

2.1 Einleitung

Die HBLFA Raumberg-Gumpenstein war im Rahmen des Projektes BEAT mit der Schätzung von Grünlanderträgen und deren Entwicklung unter der Annahme von künftigen Veränderungen des Klimas beauftragt. Dazu wurde das im Projekt GT Hartberg (Projekt Nr. 100082) entwickelte Grünlandertragsmodell SpatialGRAM an die Anforderung von BEAT angepasst und mit Klimamodelldaten ausgeführt. Die beiden verwendeten Klimamodelle beschreiben eine moderate (ALADIN) und eine extreme Veränderung (CMIP5) des Klimas für die Periode 2036 bis 2065 und wurden vom Projektpartner BOKU zur Verfügung gestellt. Mit Hilfe der beiden Klimamodelle wurde jeweils eine 30jährige Referenzperiode von 1981 bis 2010 sowie zusätzlich eine weitere Referenzperiode desselben Zeitraums auf Basis gemessener Wetterdaten (ZAMG-Stationen) berechnet. Damit können die relativen Veränderungen zwischen den beiden Zeiträumen zusammen mit einer Fehlerkorrektur der Modelldaten auf der Grundlage von Messdaten ermittelt werden. Die Ergebnisse liegen im Rasterdatenformat mit einer räumlichen Auflösung von einem Kilometer vor, die auch auf Kleinproduktionsgebietsebene aggregiert wurden.

Im vorliegenden Bericht werden die wichtigsten methodischen Ansätze von SpatialGRAM mit den dafür notwendigen Datenaufbereitungsschritten beschrieben. Eine detaillierte Darstellung der Methodik mit einer entsprechenden wissenschaftlichen Auswertung und Evaluierung findet sich in Schaumberger (2011).

2.2 Datenaufbereitung

2.2.1 Klimadaten

Vom Projektpartner BOKU wurden zwei Klimaszenarien für die Berechnung der Grünlanderträge bereitgestellt. Es handelt sich dabei um das moderate Szenario ALADIN sowie das Extremszenario CMIP5 für die Perioden 1981 bis 2010 sowie für 2036 bis 2065 in Form von Textdateien. Als räumlicher Bezug dient ein Zellraster in einer Auflösung von 1 x 1 km. Die Dateien enthalten die täglichen Wetterparameter Globalstrahlung, Minimum und Maximum der Lufttemperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte sowie Wind. Daraus wurde nach Allen *et al.* (1998) die Referenz-Evapotranspiration nach Penman-Monteith berechnet und zusammen mit der ebenfalls errechneten Tagesmitteltemperatur, der Tagesminimumtemperatur, der Globalstrahlung sowie dem Niederschlag in eine ArcGIS-Datentabelle innerhalb einer File Geodatabase gespeichert.

Diese Tabellen wurden mit den räumlichen Bezugsrasterzellen verbunden und in ArcGIS Rasterdaten umgewandelt. Auf diese Weise entstanden für jeden Parameter und jeden Tag Österreichkarten in 1-Kilometer-Auflösung. Diese Wetterrasteroberflächen bildeten zusammen mit den Bodendaten die Basis für die Verwendung in SpatialGRAM.

2.2.2 Bodendaten

Neben den Klimadaten wurde ein weiterer Geofachdatenbestand verwendet, welcher für die Modellierung der Bodenwasserbilanz unabdingbar ist. Es handelt sich um Informationen zur Wasserspeicherfähigkeit des Bodens. Vom Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt wurde der für die vorliegende Modellierung benötigte Parameter aus der Digitalen Bodenkarte des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald (BFW) abgeleitet (Murer, 2009, Murer *et al.*, 2004). Es handelt sich dabei um die nutzbare Feldkapazität, welche mithilfe von Pedotransferfunktionen aus Bodenkennwerten (Korngrößenverteilung, Humus- und Kalkgehalt) berechnet wird.

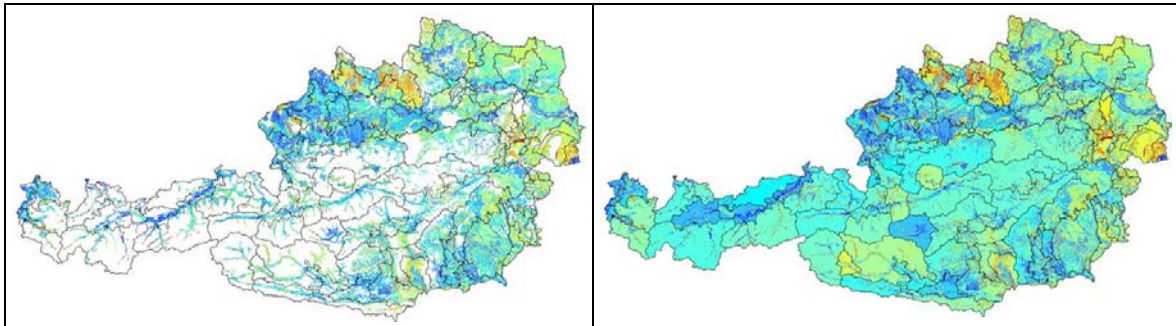


Abbildung 21: Nutzbare Feldkapazität der landwirtschaftlichen Nutzfläche (links) und flächendeckende Information der nutzbaren Feldkapazität auf Basis einer räumlichen Schätzung (rechts)

Die nutzbare Feldkapazität ist ausschließlich für die landwirtschaftliche Nutzfläche Österreichs verfügbar. In *Abbildung 21* (links) ist die räumliche Verteilung dieses Parameters am Beispiel des Bodenhorizontes 0-20 dargestellt. Die eingezeichneten Grenzen entsprechen den Kleinproduktionsgebieten (Wagner, 1990a, 1990b). Die weißen Flächen in *Abbildung 21* (links) sind „null“-Werte, d.h. sämtliche Operationen mit diesen Rasterzellen führen zu keiner vollständigen Aussage. Das Ergebnis der Ertragsrechnung ist somit sehr „lückig“. Um flächendeckende Ergebnisse generieren zu können, wurde folgende Ergänzung vorgenommen: Der Durchschnitt der nutzbaren Feldkapazität aller besetzten Rasterzellen innerhalb eines Kleinproduktionsgebietes wurde berechnet und mit den tatsächlich verfügbaren Daten kombiniert (siehe *Abbildung 21* - rechts).

Im Zuge eines Resamplings (Median) der ursprünglichen 250-Meter-Auflösung auf die Zielauflösung von einem Kilometer erfuhr der Datensatz eine Glättung der Grenzen zwischen den ursprünglich besetzten Rasterzellen und den Kleinproduktionsdurchschnittszellen.

Diese Daten konnten nun zusammen mit den Klimadaten als Grundlage für die Berechnung der Bodenwasserbilanz verwendet werden und dienten somit zur Ermittlung von Wasserstress und in weiterer Folge des Grünlandertrages und seiner klimabedingten Variabilität. Der Vorteil besteht darin, dass mit diesen modifizierten Bodendaten flächendeckende Ergebnisse gerechnet werden können, die sonst nur auf die aus der ursprünglichen Karte besetzten Zellen beschränkt bleiben würden. Möchte man diese geschätzten Flächen in einer Ergebnisanalyse ausklammern, könnte im Nachhinein noch immer mit den originalbesetzten Zellen maskiert werden.

2.3 Berechnung von Vegetationsperiode, Schnittnutzung und Grünlandertrag

2.3.1 Beginn der Vegetationsperiode

Für die Schätzung des Grünlandertrages ist eine möglichst genaue Erfassung der Dauer des ersten Aufwuchses notwendig. Der Aufwuchs beginnt mit dem Start der Vegetationsperiode im Frühjahr. Damit wird die eng mit dem Ertrag zusammenhängende Aufwuchsdauer wesentlich von diesem Termin bestimmt.

Die methodischen Details für die Berechnung der Vegetationsperiode mit Hilfe einer Kombination mehrerer Temperaturschwellenwerte (Multicriterial Thermal Definition (MTD)) werden in Kapitel 1.4.1 beschrieben.

2.3.2 Schnittfrequenz und Schnittzeitpunkte

Die mehrmalige Schnittnutzung innerhalb einer Vegetationsperiode ist ein charakteristisches Merkmal des Wirtschaftsgrünlandes. Die Erträge der einzelnen Aufwüchse hängen unter den gegebenen Standort- und Bewirtschaftungsbedingungen in hohem Maß von der Aufwuchsdauer und dem Pflanzenbestand ab. Für die im vorliegenden Projekt angewandte Modellierung der Ertragsdynamik ist somit die Definition der Nutzungszeitpunkte und die davon abgeleitete Dauer der einzelnen Aufwüchse eine Schlüsselkomponente. Die Methode der Berechnung wird in Kapitel 1.4.2 beschrieben.

2.3.3 Erträge und deren Veränderungen aufgrund klimatischer Bedingungen

Die Methodik der Ertragsschätzung sowie die Evaluierung des Schätzmodells wird ausführlich in Schaumberger (2011) diskutiert. In der vorliegenden Beschreibung werden lediglich zusammenfassende Erklärungen angeführt, welche eine inhaltliche Einordnung der hier gezeigten Ergebnisse erleichtern, nicht jedoch die Lektüre von Schaumberger (2011) ersetzen können.

Die Bodenwasserbilanz und eine damit mögliche Beurteilung der Wasserverfügbarkeit ist die Voraussetzung für eine Auswertung der Beziehung von Wetter und Ertrag. Ein negativer Bodenwasserhaushalt führt bei anhaltend trockenen Bedingungen zu Wasserstress und damit zu Ertragsminderungen. Ausgehend von den Oberflächen des Niederschlags und der Referenz-Evapotranspiration wurde ein einfaches Modell der FAO (Allen *et al.*, 1998) implementiert. Zunächst erfolgte eine Anpassung der Referenz-Evapotranspiration an das Wirtschaftsgrünland, indem ein Pflanzenfaktor die Änderung zur Referenzgrasoberfläche bewirkt. Auf Grundlage der Aufwuchsdauer wurde dafür ein räumliches Modell entwickelt, welches eine lineare Zunahme des Pflanzenbestandes zwischen den einzelnen Erntezeitpunkten annimmt.

Die Oberfläche der nutzbaren Feldkapazität ergab in Kombination mit angepasster Grünland-Evapotranspiration, Niederschlag, Tiefenversickerung und Bodenwasserabsenkung die aktuelle Evapotranspiration als Resultat der Bilanz. Die räumliche Implementierung erfordert einige Vereinfachungen. So basiert beispielsweise die Interzeptionsverdunstung auf einer einfachen linearen Beziehung zum Pflanzenfaktor. Der Kapillarhub aus dem Grundwasser sowie der Oberflächenabfluss konnten aufgrund fehlender Basisdaten bzw. Modelle nicht berücksichtigt werden.

Die Wasserverfügbarkeit als Resultat der Bodenwasserbilanzierung wurde aus der Relation von aktueller zu Grünland-Evapotranspiration abgeleitet. Mit der Akkumulation des Verhältniswertes über unterschiedlich lange Zeiträume und der Anwendung empirischer Koeffizienten ergab sich daraus ein Wasserverfügbarkeitsfaktor. Um aus der Wasserverfügbarkeit eine Information der Wachstumsbedingungen zu erhalten, wurde ein empirischer Wachstumsfaktor angewendet. Die funktionale Beziehung zwischen Wasserverfügbarkeit und diesem Faktor bestimmt die Größe des Einflusses einer unzureichenden Wasserversorgung auf die Ertragsminderung. Unter der Annahme, dass Globalstrahlung und Temperatur die entscheidenden Parameter des Wachstums darstellen, wurde der täglich generierte räumliche Wachstumsfaktor auf die Oberflächen der beiden Wetterinformationen angebracht. Ist die Wasserversorgung beeinträchtigt, reduzieren sich damit Strahlung und Temperatur. Mit der Akkumulation der beiden Parameter als effektive Globalstrahlung und effektive Temperatur über die Dauer eines Aufwuchses ergeben sich die Modellprädiktoren für die Ertragsschätzung. Eine Prüfung und Anpassung des Zusammenhangs von Wasserverfügbarkeit und Wachstumsfaktor wurde über aufwendige Testläufe vorgenommen, in denen dessen Auswirkung auf die Qualität der Ertragsschätzung bewertet wurde.

Die Entwicklung eines empirischen Modells zur Schätzung von Grünlanderträgen wurde auf die Verfügbarkeit von Geodaten abgestimmt. Als hoch signifikante Parameter gehen die oben beschriebene effektive Globalstrahlung und effektive Temperatur in die Modellierung ein. Sie beschreiben näherungsweise die unter mangelnder Wasserversorgung beeinträchtigte Effizienz von Globalstrahlung und Temperatur bei der Entwicklung von Biomasse. Zusätzlich wurde eine vom Wachstumsfaktor unbeeinflusste Summe beider Parameter in Relation zu den Effektiv-Varianten sowie die Aufwuchsdauer als Erklärung des Ertrages aufgenommen. Nutzungssystem sowie Aufwuchs fanden als kategoriale Variablen Berücksichtigung. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,63 und einen RMSE von 6,69 dt TM ha⁻¹ Aufwuchs⁻¹ ergab sich daraus die Grundlage für eine räumliche Anwendung der Schätzung. Die daraus generierten Oberflächen bilden den Ertrag eines jeweiligen Aufwuchses der verschiedenen Nutzungssysteme im Untersuchungsgebiet ab.

Die räumliche Implementierung der Ertragsschätzung erfordert eine Reihe von Vereinfachungen und Restriktionen. So kann beispielsweise die Düngung aufgrund eines fehlenden räumlichen Modells nicht als Erklärung herangezogen werden, hier wird lediglich eine ausreichende Nährstoffversorgung angenommen. Bei der Zusammenführung der Aufwuchserträge zu einem Jahresertrag kumulieren sich auch die Fehler. Während es bei den Einzelerträgen nur zu einer leichten Unterschätzung kommt, wird im Jahresertrag diese deutlich und spiegelt sich in den Ergebnisoberflächen wider. Das Modell verhält sich allerdings sehr robust und unterschätzt über den gesamten Wertebereich gleichmäßig. Am aussagekräftigsten sind die witterungsbedingten jährlichen Schwankungen. Die Ergebnisse eignen sich aus diesem Grund bestens für die Auswertung der relativen Änderung, allerdings muss dabei die modellbedingte Unterschätzung beachtet werden. Eine Verwendung der Absoluterträge für Auswertungen darf nur unter Berücksichtigung des Modellfehlers erfolgen.

2.3.4 Schätzung der Grünlanderträge auf Basis der BEAT-Klimamodelldaten

Grundlage für die Schätzung der Grünlanderträge sind zahlreiche Österreichkarten mit räumlich aufbereiteten Wetterdaten, daraus berechnete Parameter wie Referenzverdunstung, Bodenwasserbilanz oder Vegetationsbeginn. Aufgrund der Berechnung für Klimaperioden, die mindestens 30 Jahre umfassen müssen, ergibt sich ein erhebliches Datenvolumen, da die Berechnungen auf Tagesbasis durchgeführt und für jeden Tag der Perioden

1981 bis 2010 sowie 2036 bis 2065 zahlreiche Zwischenergebnisse produziert werden müssen. Der Vergleich zwischen zwei verschiedenen Modellen sowie die Einbeziehung einer Referenzperiode mit historischen Wetterdaten verdreifacht den Rechenaufwand und die dabei anfallende Datenmenge. Zur Berechnung der Grünlandjahreserträge wurden die aufwuchsbezogenen Erträge für drei unterschiedliche Bewirtschaftungssysteme (Zwei-, Drei- und Vierschnittregime) flächendeckend gerechnet und dann gemäß den Ausführungen in Schaumberger (2011, 198ff) zu einer einzigen Ertragsoberfläche zusammengefasst. Die Berücksichtigung dreier unterschiedlicher Bewirtschaftungssysteme erfordert deshalb zusätzlich nochmal eine Verdreifachung von Rechenaufwand und Datenspeicher.

In den folgenden Abbildungen werden die Ergebnisse der Berechnungen ausschließlich als arithmetische Mittelwerte über die jeweilige 30jährige Periode dargestellt. Damit ergibt sich ein Ertragsmittelwert, der den Einfluss der jährlich wechselnden Wetterverhältnisse aus den verwendeten Klimaszenarien auf die Grünlandbewirtschaftung repräsentiert. Jede Abbildung zeigt die Ergebnisse aus den beiden Klimamodellen ALADIN und CMIP5 im direkten Vergleich. Der Aufwuchsdauer kommt bei der Berechnung der Grünlanderträge eine herausragende Rolle zu. Ertragsentscheidend ist vor allem der erste Aufwuchs, und hier ist die möglichst realistische Festlegung des Vegetationsbeginns eine wichtige Voraussetzung – dieser wurde für alle Szenarien nach der oben beschriebenen Methode MTD berechnet und zur Schätzung der Grünlanderträge in allen Perioden verwendet.

Abbildung 22 zeigt die mittleren Erträge in der Periode 1981 bis 2010 für das moderate Szenario ALADIN und das extreme Szenario CMIP5. Die räumliche Verteilung der Ertragsunterschiede zwischen den beiden Szenarien ist sehr ähnlich, allerdings unterscheidet sich das Ertragsniveau vor allem im Berggebiet deutlich. CMIP5 weist im Berggebiet tendenziell geringere Erträge auf, wobei allerdings die Fläche der berechneten Grünlanderträge deutlich größer ist – Erträge werden im Vergleich zu ALADIN auch in höheren Lagen ausgewiesen. Dies liegt daran, dass für die Referenzperiode mit CMIP5 höhere Temperaturen berücksichtigt werden.

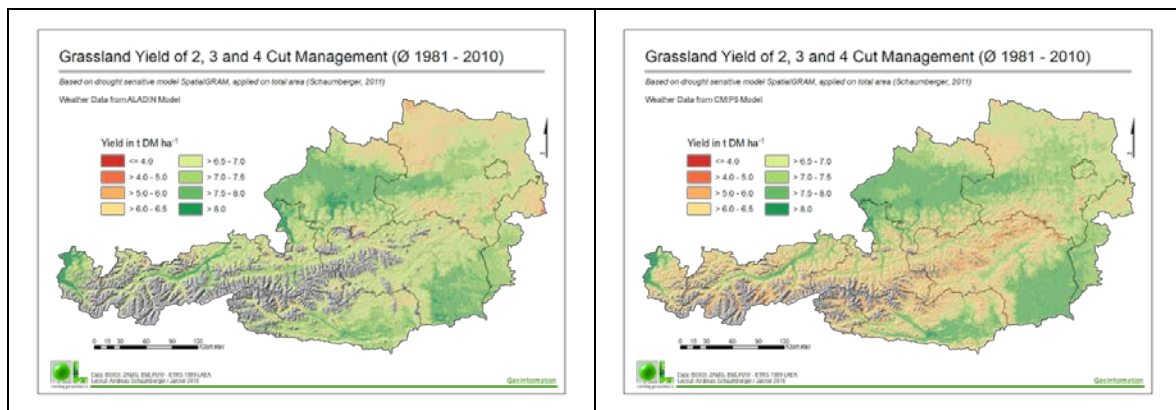


Abbildung 22: Ergebnisse der Ertragsschätzung mittels SpatialGRAM im Mittel für die Klimaperiode 1981 bis 2010 für die Klimamodelle ALADIN und CMIP5

Betrachtet man in *Abbildung 25* die Variabilität der einzelnen Jahre innerhalb des 30jährigen Zeitraums von 1981 bis 2010 zeigen sich bei ALADIN deutlich höhere Standardabweichungen im östlichen Flachland. Die höheren Lagen in CMIP5 zeigen eine geringe Variabilität im langjährigen Verlauf. Die höheren Temperaturen in CMIP5 sind zumindest in den höheren Lagen demnach in den 30 Jahren keinen großen Schwankungen unterworfen.

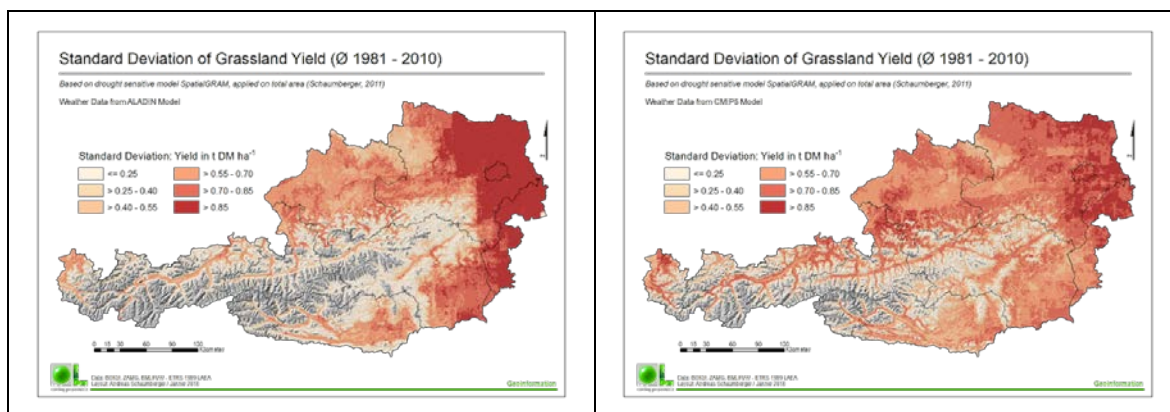


Abbildung 23: Standardabweichung der Ertragsschätzung mittels SpatialGRAM im Mittel für die Klimaperiode 1981 bis 2010 für die Klimamodelle ALADIN und CMIP5

Im Vergleich mit Grünlanderträgen auf der Grundlage von gemessenen Wetterdaten zeigen sich deutliche Abweichungen zu den beiden Modellen. *Abbildung 24* zeigt die Ertragsschätzung sowie die Standardabweichung für die Referenzperiode 1981 bis 2010 aus den historischen Wetterdaten. Die Variabilität der realen Verhältnisse ist in viel größerem Ausmaß gegeben, als es die Modelle projizieren. Die Unterschiede zwischen Modellen und Messwerten machen deutlich, dass die Auswertung von Ertragsänderungen für zukünftige Perioden auf Basis dieser Klimamodelle nur mit einer geeigneten Fehlerkorrektur erfolgen kann.

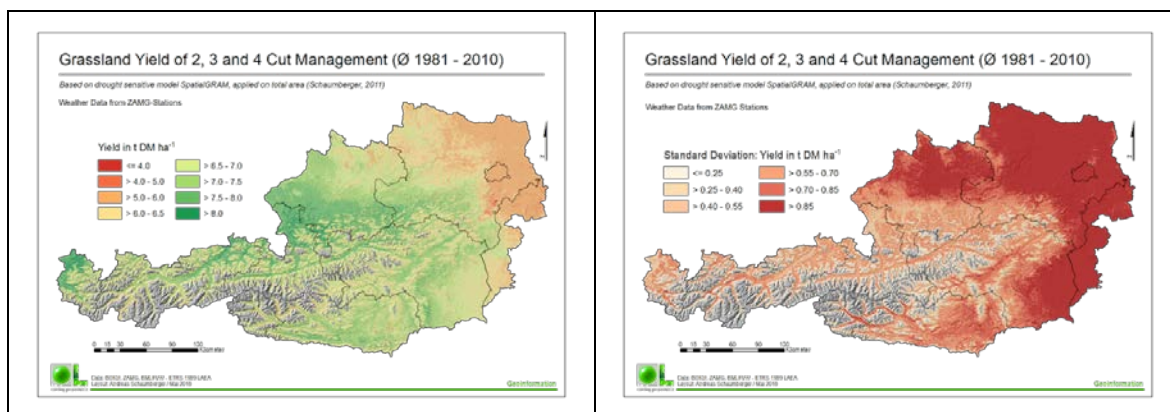


Abbildung 24: Ertragsschätzung und Standardabweichung als Ergebnisse aus dem Modell SpatialGRAM auf Basis historischer Wetterbeobachtungen an den ZAMG-Stationen im Mittel für die Periode 1981 bis 2010

Die nicht korrigierten, mittleren Erträge für die zukünftige Periode 2036 bis 2065 zeigen in *Abbildung 25* zum einen sowohl bei ALADIN als auch bei CMIP5 eine Ertragszunahme, die bei CMIP5 noch deutlicher ausgeprägt ist als bei ALADIN, zum anderen eine vergleichsweise geringe räumliche Differenzierung. Tendenziell profitiert das Berggebiet hier von der höheren Temperaturzunahme. Hohe Erträge sind hier auch bis in höhere Lagen zu erwarten. Allerdings ist damit auch ein niedriges Ertragsniveau im östlichen Flachland verbunden.

Die Auswertung der Standardabweichung für die beiden Modelle (*Abbildung 26*) zeigt für die Periode 2036 bis 2065 eine deutlich höhere Variabilität als in der Referenzperiode. Das Flachland rund um den Alpenhauptkamm ist davon am stärksten betroffen. Bei CMIP5 zeigt sich allerdings auch eine hohe Ertragsvariabilität in den höheren Lagen des Alpenhauptkamms. Die Projektion höherer Temperaturen in der Zukunft sowie ungleichmäßig

verteilte Niederschlagsereignisse zeigen einen viel stärkeren Einfluss auf die jährlichen Erträge in diesen Regionen. Da bei CMIP5 eine extremere Klimaveränderung als bei ALADIN zugrunde gelegt wird, ist auch die Standardabweichung generell deutlich höher.

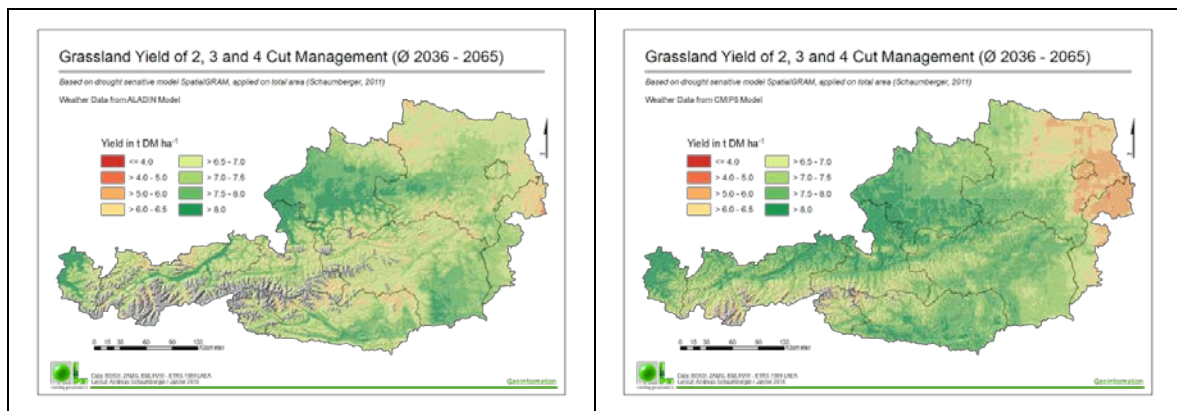


Abbildung 25: Ergebnisse der Ertragsschätzung mittels SpatialGRAM im Mittel für die Klimaperiode 2036 bis 2065 für die Klimamodelle ALADIN und CMIP5

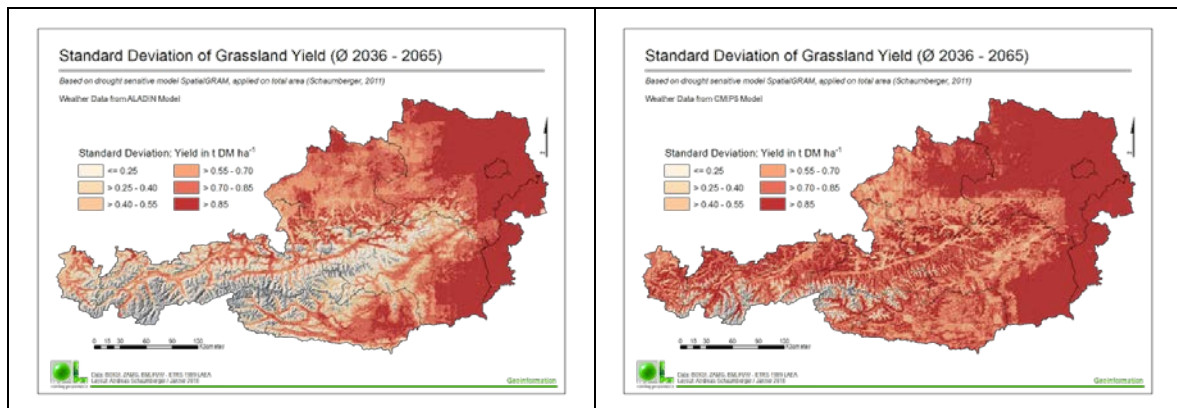


Abbildung 26: Standardabweichung der Ertragsschätzung mittels SpatialGRAM im Mittel für die Klimaperiode 2036 bis 2065 für die Klimamodelle ALADIN und CMIP5

Die Projektion des Klimas für die Periode 2036 bis 2065 auf der Basis von ALADIN und CMIP5 bedarf einer Fehlerkorrektur, wie es die Unterschiede von *Abbildung 24* und *Abbildung 22* sehr deutlich vor Augen führen. Die fehlerkorrigierten Erträge wurden nach folgender Rechenvorschrift gebildet:

$$M_c = (S_1 / M_1) \cdot M_2$$

M_c entspricht dem korrigierten Grünlandertrag für die Periode 2036 bis 2065. Gebildet wird dieser aus dem Verhältnis des Ertrages aus Wetterstationsdaten der Periode 1981 bis 2010 S_1 sowie dem Ertrag des Modells für die selbe Periode M_1 , multipliziert mit dem Modellerttrag der Periode 2036 bis 2065 M_2 .

In *Abbildung 27* werden die korrigierten Grünlanderträge für die Periode 2036 bis 2065 dargestellt. Erst durch die Fehlerkorrektur wird die charakteristische Ertragsverteilung zwischen Bergland und Flachland deutlich (vgl. *Abbildung 25*). Beim moderaten Szenario ALADIN sind hohe Erträge vor allem im intensiv genutzten Alpenvorland (Nordstaulagen) zu erwarten, wo die Wasserversorgung auch bei einer Zunahme der Temperaturen ausreicht. Niedrige Erträge werden sich erwartungsgemäß im östlichen Flachland einstellen. Das Modell CMIP5 differenziert zwischen Regionen mit hohen Erträgen und jenen mit

niedrigen noch stärker. Das Bergland weist großflächig deutlich höhere Erträge auf, als dies noch in der Referenzperiode 1981 bis 2010 der Fall ist. Auch die Trockengebiete im Osten und Südosten sind stärker ausgeprägt.

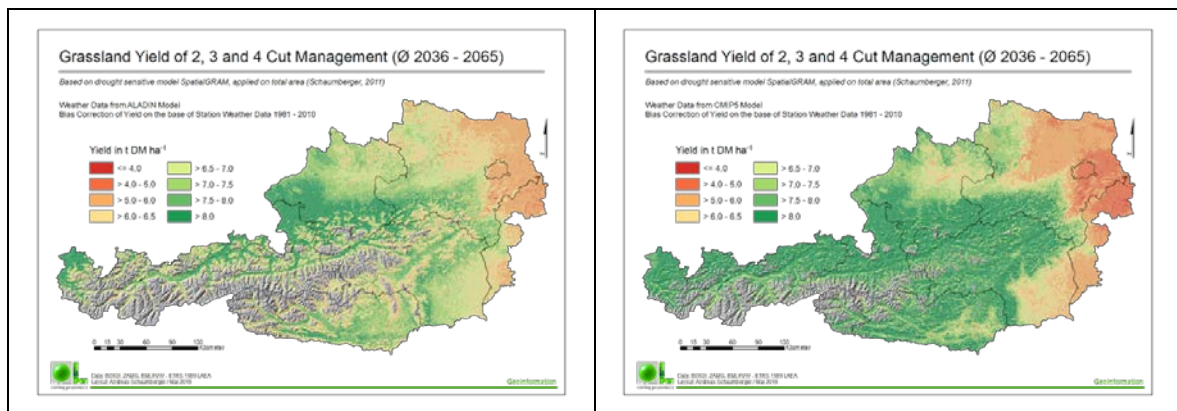


Abbildung 27: Ergebnisse der Ertragsschätzung mittels SpatialGRAM im Mittel für die Klimaperiode 2036 bis 2065 für die Klimamodelle ALADIN und CMIP5 nach einer Fehlerkorrektur auf Basis der Referenzperiode

Als Extremszenario beschreibt CMIP5 eine massive Zunahme der Temperatur und eine stärkere Variabilität bei den Niederschlägen. Die höheren Temperaturen wirken sich bei ausreichender Wasserversorgung vor allem im Berggebiet bis in hohe Lagen günstig für die Grünlandbewirtschaftung aus. Ertragseinbrüche sind in ausgedehnten Bereichen rund um den Alpenhauptkamm zu erwarten. Auch bei der CMIP5-Auswertung zeigt die Fehlerkorrektur eine deutlich realistischere Verteilung der Grünlanderträge auf, wie sie aufgrund der projizierten Klimaentwicklung zu erwarten ist und bildet damit gegenüber der nicht korrigierten Variante in *Abbildung 25* eine starke Verbesserung der Interpretierbarkeit.

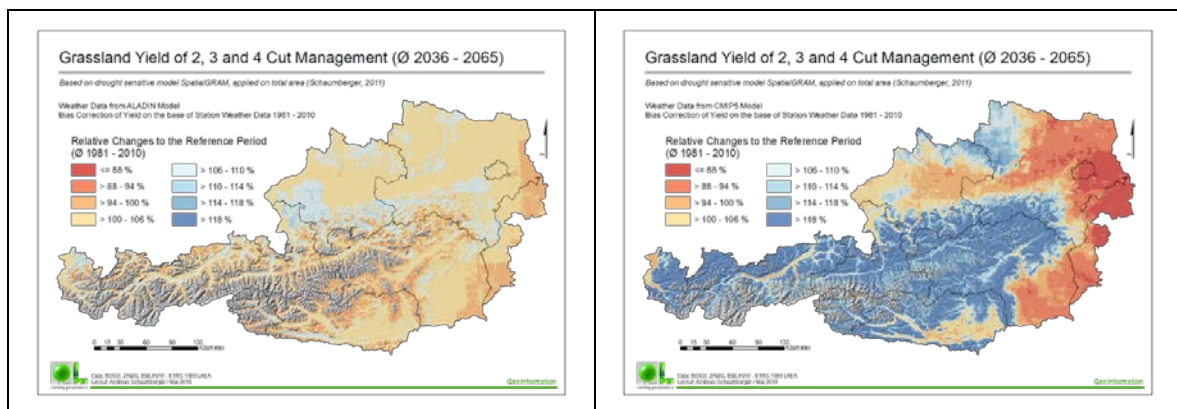


Abbildung 28: Fehlerkorrigierte relative Änderungen der Grünlanderträge im Vergleich der Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2036 und 2065, errechnet mittels SpatialGRAM für die Klimamodelle ALADIN und CMIP5

Das eigentliche Ergebnis aus den im vorliegenden Projekt ermittelten Grünlanderträgen bilden die relativen Ertragsveränderungen zwischen Referenz- und zukünftiger Periode. Aus methodischen Gründen, die in Schaumberger (2011) ausführlich diskutiert werden, ist SpatialGRAM in erster Linie dafür geeignet, diese relativen Unterschiede in zeitlicher und räumlicher Hinsicht herauszuarbeiten. Die oben dargestellten absoluten Ertragsschätzungen stellen lediglich Zwischenergebnisse dar und können nur unter Vorbehalt interpretiert werden. In *Abbildung 28* ist demnach das Endergebnis aus den Berechnungen mit den Wetterdaten der Klimamodelle ALADIN und CMIP5 kartographisch dargestellt.

Aus den Ergebnissen der Ertragsmodellierung und den daraus errechneten relativen Ertragsveränderungen sind mit den zur Verfügung stehenden Modelldaten folgende Erkenntnisse abzuleiten:

- Auf Basis des Klimaszenarios ALADIN gibt es kaum nennenswerte Verschiebungen der Grünlanderträge. In höheren Lagen kommt es zu einer leichten Ertragsdepression.
- CMIP5 zeigt einen sehr deutlichen Klimaeffekt auf die Grünlandbewirtschaftung. Neben massiven Ertragseinbußen im Flachland kommt es im Berggebiet zu einer deutlichen Ertragssteigerung, die hauptsächlich durch höhere Temperaturen bei ausreichender Wasserversorgung verursacht werden.

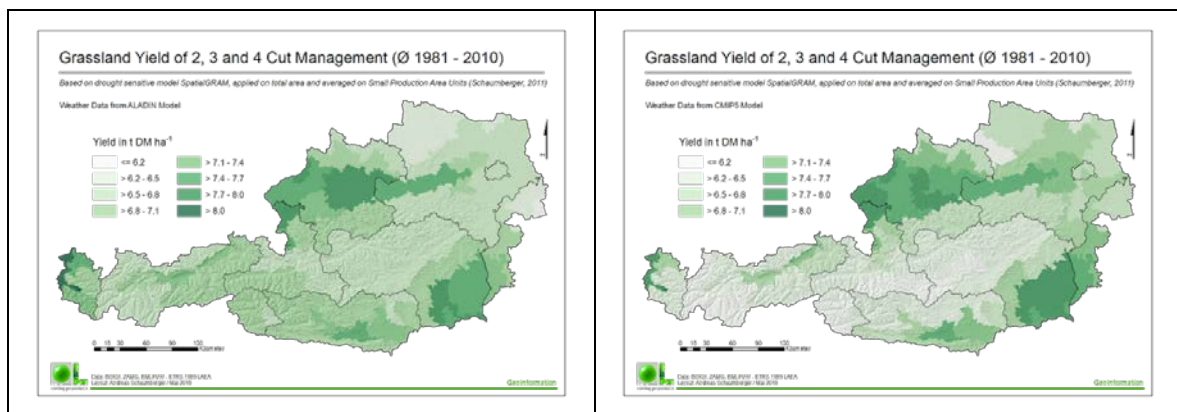


Abbildung 29: Ergebnisse der Ertragsschätzung mittels SpatialGRAM im Mittel für die Klimaperiode 1981 bis 2010 für die Klimamodelle ALADIN und CMIP5, gemittelt für Kleinproduktionsgebiete

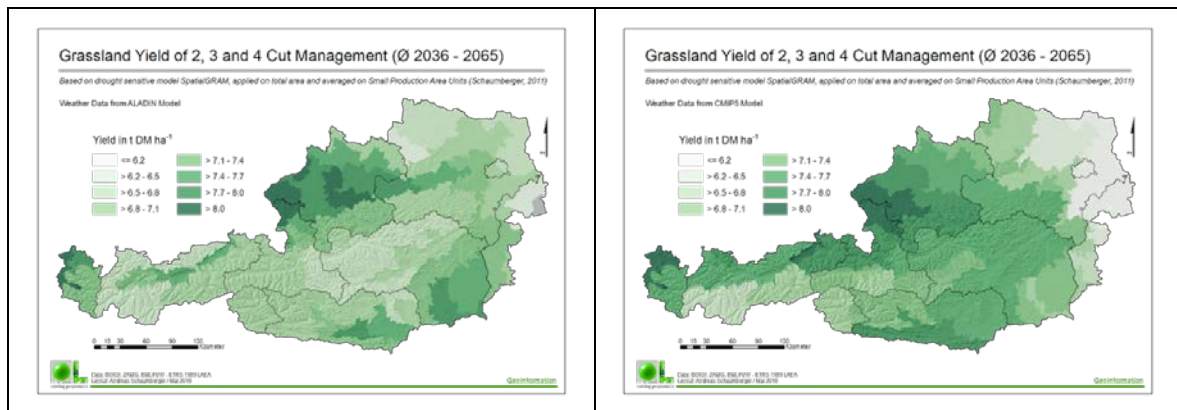


Abbildung 30: Ergebnisse der Ertragsschätzung mittels SpatialGRAM im Mittel für die Klimaperiode 2036 bis 2065 für die Klimamodelle ALADIN und CMIP5, gemittelt für Kleinproduktionsgebiete

Die bislang gezeigten Ergebnisse beziehen sich auf Rasteroberflächen mit möglichst vollständiger Flächenabdeckung. Um mit anderen BEAT-Projektergebnissen kompatibel zu sein, wurden sämtliche Rasterergebnisse auf Kleinproduktionsgebiete umgelegt. Dafür wurde die ArcGIS-Funktion *Zonal Statistics* verwendet, welche sämtliche Rasterzellen innerhalb einer Kleinproduktionsgebietsgrenze statistisch auswertet. Die räumlichen Mittelwerte wurden anschließend mittels *Join* mit der Gebietskulisse der Kleinproduktionsgebiete verlinkt und dann kartographisch aufbereitet. Die nachfolgenden Abbildungen entsprechen den Rasterergebnissen, lediglich die Darstellung ist hier aufgrund der Zuordnung zu den Kleinproduktionsvektoren anders.

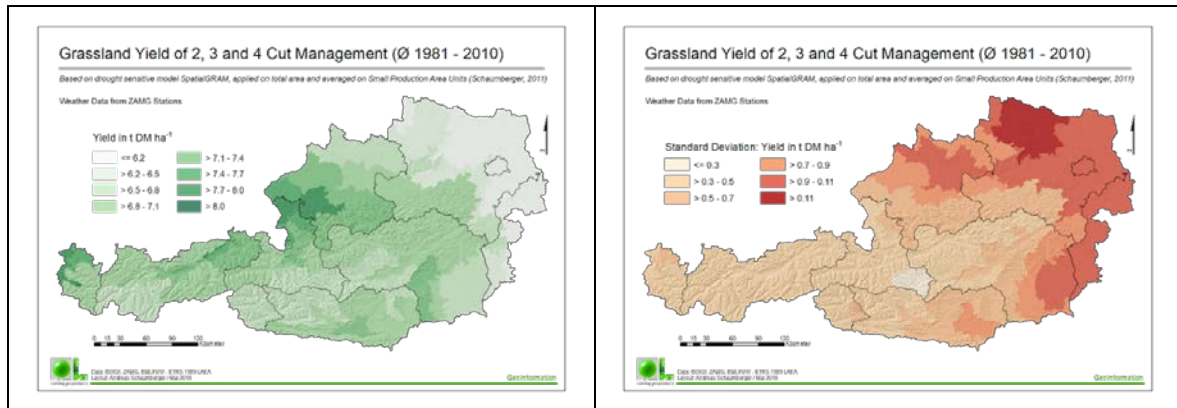


Abbildung 31: Ertragsschätzung und Standardabweichung als Ergebnisse aus dem Modell SpatialGRAM auf Basis historischer Wetterbeobachtungen an den ZAMG-Stationen im Mittel für die Periode 1981 bis 2010, gemittelt für Kleinproduktionsgebiete

Auf eine wiederholte Interpretation wird bei diesen Ergebnissen verzichtet, da sie sich lediglich in der Darstellung und Klassenbildung von den Rasterdaten unterscheiden. Auch hier zeigen die fehlerkorrigierten Auswertungen deutlich bessere Zusammenhänge zwischen Klima und den Erwartungswerten hinsichtlich einer räumlichen Verteilung der Ertragsänderungen.

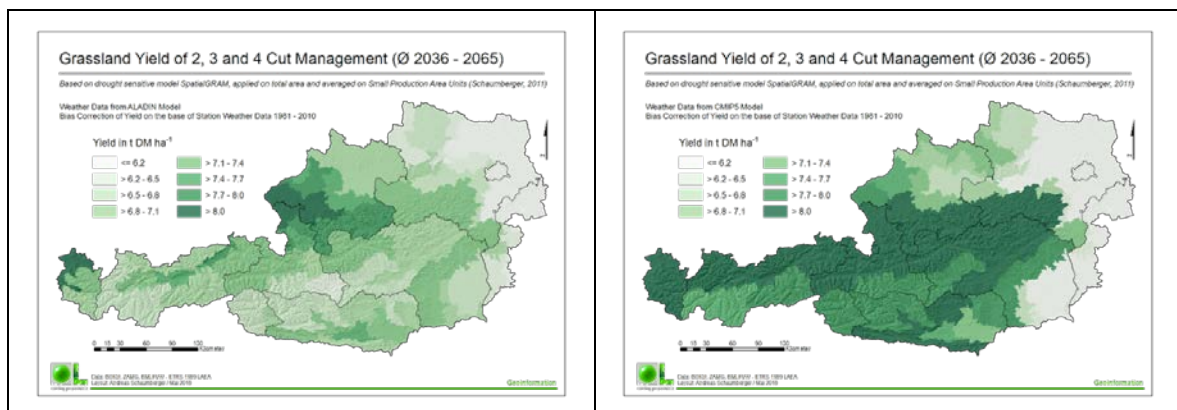


Abbildung 32: Ergebnisse der Ertragsschätzung mittels SpatialGRAM im Mittel für die Klimaperiode 2036 bis 2065 für die Klimamodelle ALADIN und CMIP5 nach einer Fehlerkorrektur auf Basis der Referenzperiode, gemittelt für Kleinproduktionsgebiete

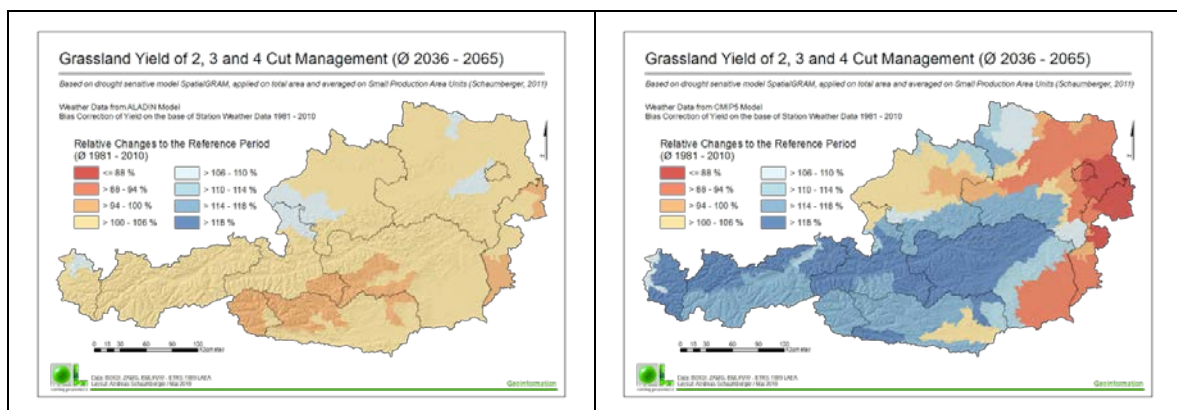


Abbildung 33: Fehlerkorrigierte relative Änderungen der Grünlanderträge im Vergleich der Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2036 und 2065, errechnet mittels SpatialGRAM für die Klimamodelle ALADIN und CMIP5, gemittelt für Kleinproduktionsgebiete

2.4 Auswertung von Grünlandqualitätserträgen für Kleinproduktionsgebiete

Für die Schätzung der Energiegehalte der Grünlanderträge wurden die Biomasse im Gegensatz zu dem in 3.4 beschriebenen Ansatz nicht mittels Modellrechnung (SpatialGRAM) unter Einbeziehung von Standort- und Klimafaktoren berechnet, sondern auf Basis von durchschnittlichen Ertragspotenzialen. Unter Einbeziehung von INVEKOS-Schlagnutzungsdaten wurden mittlere Ertragsniveaus je Grünlandart festgelegt und diese mittels Kennwerte für die grünlandartspezifische Energiedichte zur Berechnung des Energieertrags umgelegt. Dieser wurde anschließend für die Grünlandfläche innerhalb der Kleinproduktionsgebiete aufsummiert.

Bei den Kennwerten für Energiedichte und für die durchschnittlichen Trockenmasseerträge handelt es sich um Schätzwerte für die jeweiligen Grünlandarten, deren Flächenausmaß den Mehrfachtagsdaten (INVEKOS) des Jahres 2010 in Abstimmung mit der Referenzperiode 1981 bis 2010 entnommen wurden. Die verwendeten Trockenmasseertragspotenziale und Energiedichtezahlen sowie die Flächen der jeweiligen Grünlandart sind der *Tabelle 1* zu entnehmen.

Tabelle 1: Durchschnittliche Erträge und Flächensumme der Grünlandarten (INVEKOS, 2010)

Code	Name	kg TM/ha	MJ NEL/kg TM	Flächen [ha]
701	EINMÄHDIGE WIESE	3000	4,3	25.030
704	STREUWIESE	4500	3,2	4.492
707	HUTWEIDE	3000	5,0	64.696
708	BERGMÄHDER	2000	5,0	4.553
710	SONSTIGE GRÜNLANDFLÄCHEN	4000	5,0	2.697
715	DAUERWEIDE	7000	6,0	64.828
716	MÄHWIESE/-WEIDE ZWEI NUTZUNGEN	5500	5,3	264.739
717	MÄHWIESE/-WEIDE DREI UND MEHR NUTZUNGEN	8500	5,8	492.876

Die Festlegung der Kennwerte in *Tabelle 1* basiert auf den Arbeiten von Buchgraber (2000), Buchgraber und Gindl (2004) sowie Pötsch und Resch (2005).

Bei der Interpretation der Ergebnisse, die in den folgenden Abbildungen dargestellt sind, muss berücksichtigt werden, dass sowohl Trockenmasseerträge als auch die Energiedichte innerhalb einer Grünlandnutzungsform stark variieren können und sowohl von den Standort- als auch von den Bewirtschaftungsfaktoren abhängt (vgl. *Abbildung 34*). Zudem wird in der flächenmäßig mit Abstand bedeutendsten Grünlandklasse 717 nicht zwischen Drei-, Vier- und Mehrschnittsystem unterschieden. Gerade in dieser Klasse hängt der Ertrag sehr stark von der jeweiligen Nutzungsfrequenz ab, muss aufgrund der Datenverfügbarkeit jedoch mit einem einheitlichen Trockenmasse- und Energiekennwert qualifiziert werden.

Wie stark die Erträge innerhalb einer Grünlandart variieren können, zeigt die Auswertung von Pötsch in *Abbildung 34*. Ertragsberechnungen auf Basis von Durchschnittswerten stellen aus diesem Grund bestenfalls eine Annäherung an die reale Situation dar. Dies gilt vor

allem bei der Berechnung des Energieertrages, welcher das Ergebnis von zwei aufeinanderfolgenden Vereinfachungen ist, nämlich der Schätzung der Trockenmasseerträge mit Durchschnittswerten sowie deren Transformation in Energieerträge mittels durchschnittlicher Energiedichtekennzahlen.

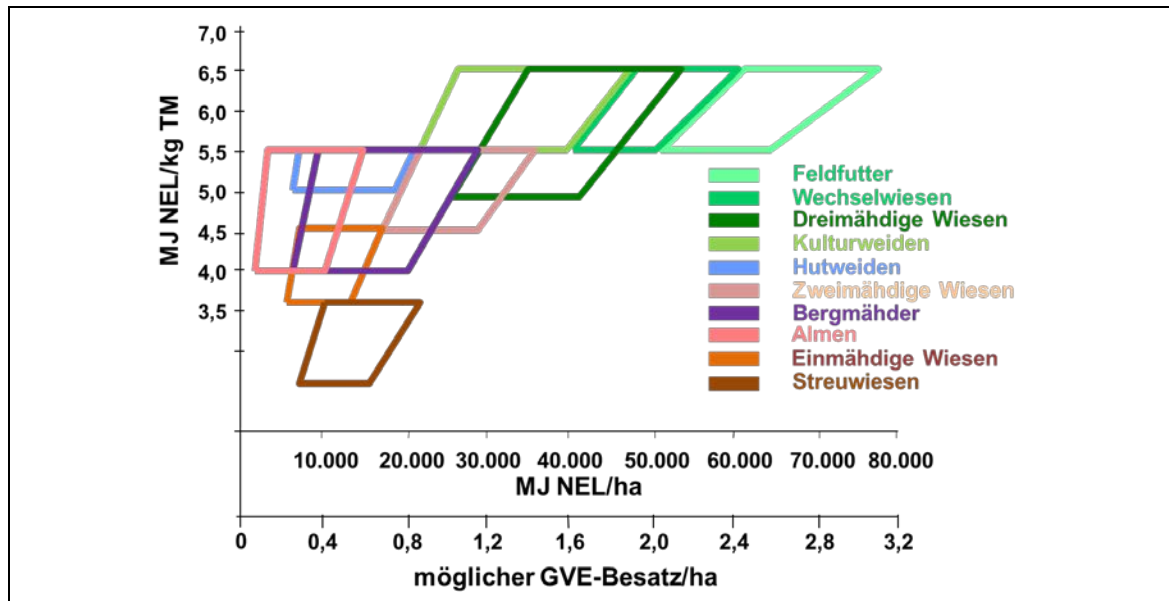


Abbildung 34: Ertrag und Futterqualität im österreichischen Grünland (Pötsch, 1997; Buchgraber 1998)

In *Abbildung 35* sind die berechneten Trockenmasse- und Energieerträge pro Flächeneinheit (ha), aggregiert auf Kleinproduktionsgebiete dargestellt. Die Karte der Trockenmasseerträge zeigt höhere Erträge in den typischen Grünlandregionen, insbesondere im intensiv genutzten Alpenvorland.

Um die im Projekt BEAT angenommene Klimaänderung zu berücksichtigen, wurden die Änderungsfaktoren der beiden Klimamodelle ALADIN und CMIP5, gemittelt auf Kleinproduktionsgebiete (vgl. *Abbildung 33*) verwendet. Die Ausgangssituation, dargestellt als mittlere Erträge in den Kleinproduktionsgebieten gemäß INVEKOS 2010, wurde mit den jeweiligen Änderungsfaktoren multipliziert und daraus die klimainduzierte Ertragsveränderung berechnet.

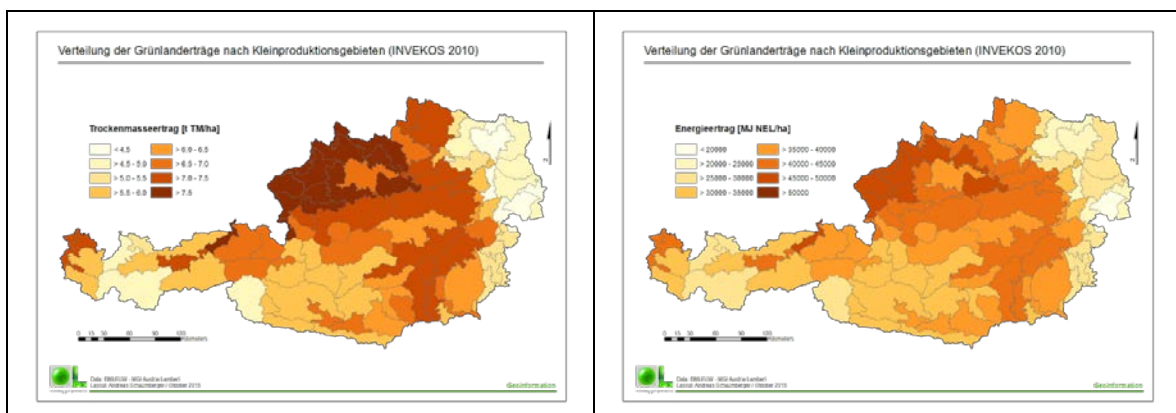


Abbildung 35: Grünlandtrockenmasse- und energieerträge unterschiedlicher Grünlandarten pro Flächeneinheit (ha) für das in INVEKOS 2010 ausgewiesene Grünland, aggregiert auf Kleinproduktionsgebiete

In *Abbildung 36* sind die Ergebnisse für die Anpassung der Erträge an die Änderungsfaktoren des Modells ALADIN dargestellt. Die Energieerträge (MJ NEL) pro Flächeneinheit (ha) zeigen im Vergleich zur Ausgangssituation (*Abbildung 35*) kaum Veränderungen, die Trockenmasseerträge nehmen in den intensiv genutzten Grünlandgebieten leicht zu.

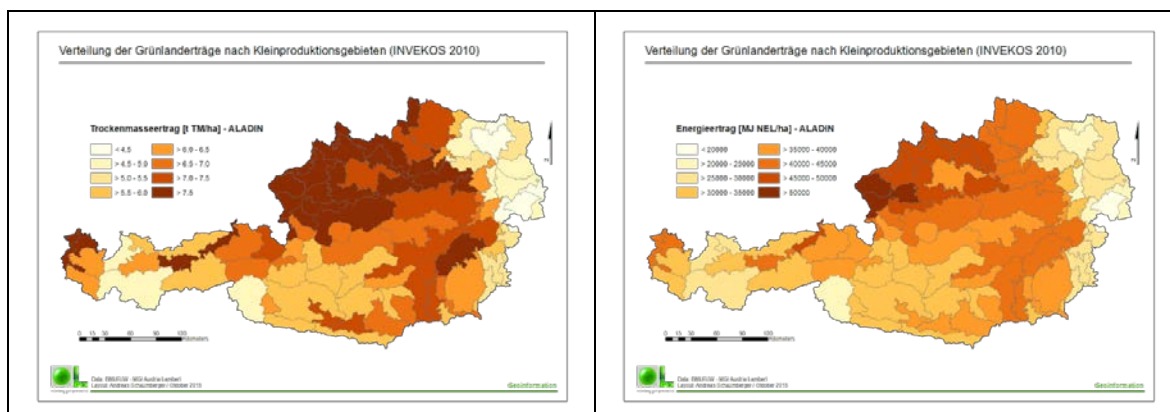


Abbildung 36: Grünlandtrockenmasse- und energieerträge unterschiedlicher Grünlandarten pro Flächeneinheit (ha) für das in INVEKOS 2010 ausgewiesene Grünland, aggregiert auf Kleinproduktionsgebiete für ein Klimaszenario gemäß dem Modell ALADIN

Abbildung 37 mit den Ergebnissen der Klimaänderung gemäß Modell CMIP5 hingegen zeigt deutlich Veränderungen in verschiedenen Landesteilen. Zunahmen in den intensiv genutzten Gebieten rund um den Alpenhauptkamm, aber auch Zunahmen im Berggebiet. Eine Ertragsabnahme ist in den östlichen und südöstlichen Landesteilen zu beobachten.

Die Veränderungen der Ausgangssituation entsprechen den relativen Änderungen, die in Kapitel 2.3.4 berechnet und in *Abbildung 33* dargestellt wurden. Die Energieerträge pro Flächeneinheit bleiben annähernd gleich hoch.

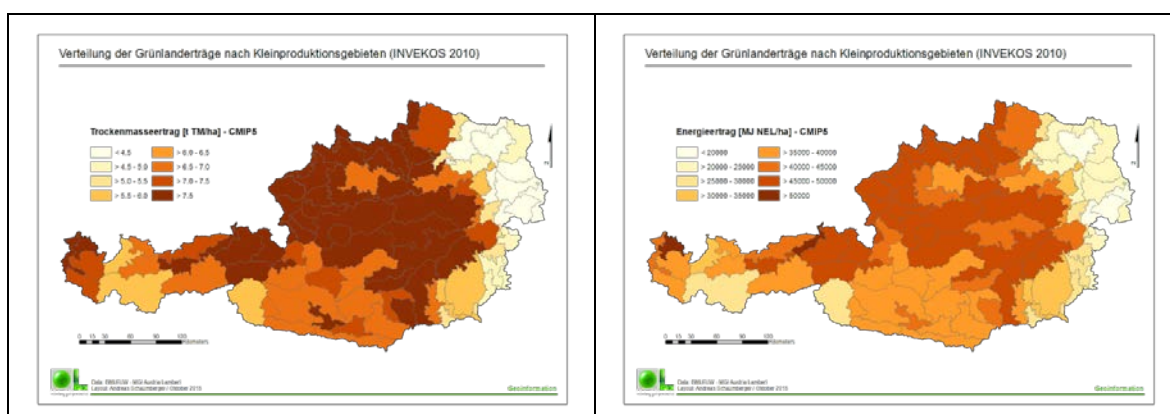


Abbildung 37: Grünlandtrockenmasse- und energieerträge unterschiedlicher Grünlandarten pro Flächeneinheit (ha) für das in INVEKOS 2010 ausgewiesene Grünland, aggregiert auf Kleinproduktionsgebiete für ein Klimaszenario gemäß dem Modell CMIP5

2.5 Schlussfolgerungen

Die Grünlanderträge in Österreich zeigen in Abhängigkeit des verwendeten Klimaszenarios eine mehr oder weniger starke Veränderung in Abhängigkeit des Klimas. Das moderate Szenario ALADIN weist sehr geringe Effekte auf die Ertragsdynamik für die Periode

2036 bis 2065 auf – im Wesentlichen bleibt die räumliche Verteilung der aktuellen Grünlanderträge auch in Zukunft unverändert. Beim extremen Szenario CMIP5 fällt die Veränderung aufgrund des stärkeren Klimasignals für die zukünftige Periode 2036 bis 2065 wesentlich deutlicher aus.

Ertragszunahmen sind im Berggebiet mit höheren Temperaturen bei ausreichender Wasserversorgung erklärbar. Ist die Wasserversorgung ein limitierender Faktor, kommt es zu Ertragseinbußen, wie sie im Flachland rund um den Alpenhauptkamm zu erwarten sind. Das aktuell hohe Ertragsniveau nördlich der Alpen in den Nordstaulagen wird sich nicht wesentlich weiter nach oben bewegen. Allerdings werden die höheren Lagen in den Tälern des Alpenhauptkamms aufgrund der günstigen Temperaturentwicklung ihre Produktivität steigern können,

Im Norden (Welser Heide), dem östlichen Flachland, der Südoststeiermark sowie im Süden Kärntens (Klagenfurter Becken) nimmt das Ertragspotenzial aufgrund der zu erwartenden Trockenperioden deutlich ab. Hier muss gesagt werden, dass in diesen Gebieten (vor allem im östlichen Ackerbaugebiet) ohnehin kaum Grünlandwirtschaft betrieben wird – es handelt sich also um eine hypothetische Ertragsdynamik. Die tatsächlich als Grünland bewirtschafteten Flächen sind bei Bedarf mit dem Grünland-Nutzungslayer nach INVEKOS oder CORINE entsprechend einzuschränken. Da es bei dieser Auswertung hauptsächlich darum geht, die Wirkung des Klimas auf den Grünlandertrag zu beschreiben, wurde diese räumliche Maskierung auf die Endergebnisse in der vorliegenden Projektarbeit nicht angewendet. Zudem wurden die auf Rasterzelebene ermittelten Ergebnisse zusätzlich auf Kleinproduktionsgebiete umgelegt und somit von den tatsächlichen Grünlandparzellen entkoppelt.

Die Projektionen von Klimaveränderungen beschränken sich in erster Linie auf relative Unterschiede zwischen einander gegenübergestellten Klimaperioden – das Klimaänderungssignal steht im Vordergrund. Auch bei Impaktstudien, wie bei der vorliegenden, ist das Änderungssignal primäres Ergebnis der Auswertungen. Die hier vorgestellten absoluten Grünlandertragsschätzungen sind wegen der zugrundeliegenden Modellkonzeption (vgl. die Beschreibung von SpatialGRAM in Schaumberger (2011)) lediglich als Zwischenergebnisse zu betrachten und nur hinsichtlich ihrer räumlichen Verteilung interpretierbar. Die relativen Veränderungen der gemittelten Grünlanderträge zwischen der Referenzperiode 1981 und 2010 und der zukünftigen Periode 2036 bis 2065 bilden jenen Datenbestand ab, der für weiterführende Analysen und der Kombination mit anderen Projektergebnissen heranzuziehen ist.

2.6 Literatur

- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. und Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Papers. Paper No 56, FAO, Rome, 326 S.
- Ansquer, P.; Al Haj Khaled, R.; Cruz, P.; Theau, J.-P.; Therond, O. und Duru, M. (2009): Characterizing and predicting plant phenology in species-rich grasslands. *Grass and Forage Science* **64** (1), 57-70.
- Buchgraber, K. (2000): Ertragspotentiale und Artenvielfalt auf Grünlandstandorten im Berggebiet. MAB-Forschungsbericht: Landschaft und Landwirtschaft im Wandel, Wien, Akademie der Wissenschaften, 22.-23. September 2000, 181-189.
- Buchgraber, K. und Gindl, G. (2004): Zeitgemäße Grünlandbewirtschaftung, 2. Auflage, *Leopold Stocker Verlag*, 192 S.
- Buchgraber, K.; Schaumberger, A. und Pötsch, E.M. (2011): Grassland Farming in Austria - status quo and future prospective. 16th Symposium of the European Grassland Federation "Grassland Farming and

- Land Management Systems in Mountainous Regions", Gumpenstein, Austria, Grassland Science in Europe, 16, August 29-31, 2011, 13-24.
- Murer, E. (2009): Überprüfung und Verbesserung der Pedotransferfunktion zur Ermittlung der Wasserspeicherfähigkeit im Boden, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen, 54 S.
- Murer, E.; Wagenhofer, J.; Aigner, F. und Pfeffer, M. (2004): Die nutzbare Feldkapazität der mineralischen Böden der landwirtschaftlichen Nutzfläche Österreichs. In Bundesamt für Wasserwirtschaft (Ed.): Schriftenreihe BAW, 20, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen, 72-78.
- Pötsch, E.M. und Resch, R. (2005): Einfluss unterschiedlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Nährstoffgehalt von Grünlandfutter. 32. Viehwirtschaftliche Fachtagung, Irdning, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 13.-14. April 2005, 1-14.
- Schaumberger, A. (2011): Räumliche Modelle zur Vegetations- und Ertragsdynamik im Wirtschaftsgrünland. Dissertation, Technische Universität Graz, Institut für Geoinformation, 264 S.
- Smit, H.J.; Metzger, M.J. und Ewert, F. (2008): Spatial distribution of grassland productivity and land use in Europe. *Agricultural Systems* **98** (3), 208-219.
- Sparks, T.H.; Croxton, P.J.; Collinson, N. und Taylor, P.W. (2005): Examples of phenological change, past and present, in UK farming. *Annals of Applied Biology* **146** (4), 531-537.
- Wagner, K. (1990a): Neuabgrenzung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete, Teil I (Burgenland, Niederösterreich, Wien, Steiermark und Kärnten), Schriftenreihe der Bundesanstalt für Agrarwirtschaft, 61, Bundesanstalt für Agrarwirtschaft Wien.
- Wagner, K. (1990b): Neuabgrenzung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete, Teil II (Oberösterreich, Salzburg, Tirol, Vorarlberg), Schriftenreihe der Bundesanstalt für Agrarwirtschaft, 62, Bundesanstalt für Agrarwirtschaft Wien.

3 Projekt zur Neuabgrenzung des Sonstig Benachteiligten Gebietes: Prüfung biophysikalischer Klimakriterien

3.1 Einleitung

Für die Abgrenzung des Sonstig Benachteiligten Gebietes in Österreich wurden biophysikalische Kriterien aus dem Bereich Klima untersucht und auf ihre Anwendbarkeit für Österreich geprüft. In der vorliegenden Arbeit wurden die vom Joint Research Center (JRC) erarbeiteten Kriterien „Low Temperature“ und „Dryness“ gemäß der dort definierten Methodik berechnet und ausgewertet. Die Beschreibung der angewandten Methoden sind folgendem Bericht entnommen:

Van Orshoven, J.V.; Terres, J.-M. and Tóth, T. (Eds.) (2014): JRC Science and Policy Report „Updated common bio-physical criteria to define natural constraints for agriculture in Europe - Definition and scientific justification for the common biophysical criteria“. European Commission, JRC, Institute for Environment and Sustainability, 68.

In nachfolgenden Kapitel werden die beiden hier erarbeiteten Kriterien aus der genannten Publikation auszugsweise wiedergegeben. In weiterer Folge werden sämtliche Ergebnisse auf Basis von stationsbasierten Wetterdaten als räumlich interpolierte Ergebnisse in Kartenform präsentiert.

3.2 Definition des JRC für bio-physikalischen Klimakriterien

3.2.1 Low Temperature

Authors: Guenther Fischer, Edmar Teixeira and Harrij van Velthuizen, IIASA, Laxenburg, Austria,
Edited by: Jos Van Orshoven (K.U.Leuven, Leuven, Belgium) and Jean-Michel Terres (JRC, Ispra, Italy),

Agronomic importance

Low temperatures limit crop growth and development through the impact on important physiological processes such as photosynthesis and leaf appearance. Land in which thermal-time accumulation is systematically not sufficient for crops to complete the production cycle is unfavorable for agriculture.

Definition

Low temperature is defined as the condition in which crop performance or survival is compromised by temperatures during the growing period which are insufficient for optimal growth and development of crops. In the context of less favourable areas for agriculture in Europe, low temperature is a characteristic of land for which thermal-time accumulation during the growing period is insufficient for plants to complete the production cycle.

Scientific background

Agricultural crops are able to grow and develop only within well-defined ranges of temperature (Porter and Gawith, 1999). The most common agricultural crops in Europe are (i) "C3" crops adapted to cool temperatures ranging from 5-30°C (e.g. wheat, potato), (ii) "C3" crops adapted to warm temperatures ranging from 15-35°C (e.g. soybean, rice) and (iii) "C4" crops adapted to moderately warm temperatures ranging from 10-35°C (e.g. maize, sorghum) (FAO, 1978-81). These climatic thresholds are mostly explained by the impact of temperature on enzymatic activities that regulate the rates of important plant physiological processes, such as photosynthesis and leaf appearance (Bonhomme, 2000).

Growth rates and yields are maximized when crops are grown near the species-specific optimal temperature (T_{opt}) but gradually decrease at lower temperatures until the base temperature (T_b) is reached, at which no development occurs. Similarly, at temperatures higher than T_{opt} , development rates decline until a critical temperature (T_{crit}), near lethal levels (Hodges, 1991). Negligible growth occurs for most agricultural crops at temperatures below 5°C or above 35-40°C (Porter and Semenov, 2005).

When crops are grown under lower than optimal temperatures, yields can be reduced by various mechanisms (Porter and Gawith, 1999) including: limited light interception (e.g. due to slow leaf area expansion), inefficient conversion of intercepted light into biomass (i.e. reduced photosynthesis rates), or direct damage to plant tissues caused by early or late frosts.

To successfully complete the growth cycle and fully attain their yield potential at harvest, crops have to be able to reach full canopy expansion and pass through specific phenological stages such as germination, flowering and maturity (Hodges, 1991). The rate of progress towards each of these phenological stages is largely regulated by temperature (Jamieson et al., 1995; Bonhomme, 2000). This explains why the length of the growth cycle of crops is variable when expressed in 'days' from emergence to maturity but conservative when expressed in 'thermal-time' (degree-days, °Cd) (Hodges, 1991). Specific thermal-time accumulations are needed for the completion of each phenological stage, until crops complete an entire production cycle.

Length of growing period or thermal-time accumulation requirements can be used to characterize land areas with temperature limitations.

Assessment

To assess low temperature as a land characteristic, the concepts of length of temperature growing period (LGPT, days) or thermal-time sums (TSb, degree days, °Cd) can be used:

- Either, the length of the temperature growing period (LGPT₅), i.e. the number of days with daily average temperatures (T_{avg}) above 5°C is calculated for each year. The LGPT₅ characterizes the days in which temperatures are conducive to crop growth; or
- The thermal-time sums (TSb), above a base temperature (T_b) of 5°C, are calculated by accumulating daily the difference between T_{avg} and T_b .

Finally, calculated values of LGPT₅ and TSb are compared with reference thresholds for severe limiting conditions. For this calculation, it is recommended to use data-sets with daily average temperature (T_{avg}).

Values for severe threshold

Temperature thresholds and thermal requirements for plant development vary among crop species and cultivars (Hodges, 1991). For European conditions, thermal-time sum requirements can be used as a reference to delimit thresholds for the development of agricultural crops. In general, optimal thermal-time requirement for most agricultural crops is above a TS5 of 1500°Cd (Boons-Prins et al. 1993). A TS5 of 1200°Cd coincides with the most northern distribution of cereal crops in Europe. Below this TS5 threshold of 1200°Cd, crops cannot grow because of very marginal thermal-time accumulation and increased risk of early and late frosts (Fischer G. et al. 2008 forthcoming).

Therefore, severely limiting low temperature is said to occur if TS5 is less than 1500°Cd ($T_b=5^{\circ}\text{C}$) or LGP t5 is less than 180 days.

As a refinement for the computation, the start of the growing period can be defined from the fifth day when 5 consecutive days fulfil the condition of having daily average temperature (T_{avg}) above 5°C. Conversely, the end of the period will occur on the fifth day when at least 5 consecutive days will have their average daily temperature below 5°C.

In order to take account of between year variability of meteorological conditions, a probabilistic approach is required. It is proposed to use the 80% / 20% probability exceedance / non exceedance approach, i.e. if in 7 or more years out of 30, the threshold value for severe low temperature condition is not reached, the land is classified as being under severe low temperature limitation.

A time series of daily meteorological data preferably over 30 (or more) recent years is required to assess the probability of exceedance.

Final remarks and conclusions

Low temperatures have an important impact on crop yield by limiting plant growth and development processes. Land areas where thermal-time sums are insufficient for crops to complete their production cycle are considered unfavorable for agriculture. This can be evaluated by using thresholds of thermal-time requirement.

References

- Bonhomme, R. (2000). "Bases and limits to using "degree-day" units." *European Journal of Agronomy* 13(1): 1-10.
- Boons-Prins, E. R., G. H. J. Koning, C. A. van Diepen and F. W. T. Penning de Vries (1993). Crop specific simulation parameters for yield forecasting across the European Community. Simulations Reports CABO-TT no. 32, Joint Research Centre.
- FAO (1978-81). Crop adaptability inventory. In: Report on the Agro-ecological Zones Project. World Soil Resources Report 48. FAO, Rome, Italy.
- Fischer G., Nachtergaele F., Prieler S., van Velthuizen H.T., Verelst L. and Wiberg D. (2008 forthcoming). Global Agro-ecological Zones Assessment (GAEZ 2007). IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy.
- Hodges, H. (1991). Predicting crop phenology. Boston, U.S.A., CRC Press.
- Jamieson, P. D., I. R. Brooking, J. R. Porter and D. R. Wilson (1995). "Prediction of leaf appearance in wheat: a question of temperature." *Field Crops Research* 41(1): 35-44.
- Porter, J. and M. Semenov (2005). "Crop responses to climatic variation." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 360(1463): 2021-2035.
- Porter, J. R. and M. Gawith (1999). "Temperatures and the growth and development of wheat: a review." *European Journal of Agronomy* 10(1): 23-36.

3.2.2 Dryness – Too dry conditions

Author: Tibor Tóth (Joint Research Centre, Italy)

Contributor: René Gommès (Joint Research Centre, Italy), (ex FAO, Italy)

Edited by: JM Terres (Joint Research Centre, Italy)

Agronomic Importance

Crop growth is affected by water stress (which is defined as the lack of available water), and the resulting periods of drought cause yield reduction. Indeed, availability of water is considered to be a critical parameter for crop production and animal husbandry. Plants adsorb water with their roots from the soil, where water availability closely follows weather conditions. While temporary drought occurrences can be spatially and temporally very variable, predominantly dry agricultural areas can be delineated by the deficit of water availability compared to water demand. Although agriculture has adapted and has developed in dry zones, dry conditions impose however severe restriction on cropping opportunities and on yield.

Definition

Too dry condition is “a natural permanent imbalance in the water availability consisting of low annual precipitation and a high annual evaporative demand, resulting in overall low soil water content and low carrying capacity of the ecosystems” according to Pereira (2009).

Dryness indices are indicators, which measure (i.e. express numerically) the severity of water stress at a location. The main use of the dryness indices is to delineate areas affected by water stress according to different severity levels. The UNEP Aridity Index (AI UNEP) is the ratio of the annual precipitation to the annual potential evapotranspiration, both expressed in the same units.

$$AI\ UNEP = P/PET$$

Where P is the total annual precipitation and PET is the total annual potential evapotranspiration (using the Penman-Monteith methodology in relation to a living grass reference crop (Allen et al, 1998)). Although, as an indicator, the climatic index values can be directly compared between locations, there are specific ranges denoting distinct zones according to the permanent water stress. The following table shows the threshold values of the different zones in increasing severity of dryness as suggested by the UNEP (Middleton and Thomas, 1997).

<i>Classification of zones</i>	<i>Dryness Index</i>
Hyperarid	AI ≤ 0.05
Arid	0.05 < AI ≤ 0.20
Semi-arid	0.20 < AI ≤ 0.50
Dry sub-humid	0.50 < AI ≤ 0.65

Scientific Background

It would be scientifically satisfying to consider the interactions between climate and soil to identify too dry areas taking into account the role of reservoir ensured by the soil. However-

er, this approach requires availability of soil parameters such as soil hydraulic properties and the adequate modeling of the soil-climate interaction through soil water balance calculation. In predominantly dry areas, the main driver for the soil water content is the climate, and the annual climatic water deficit is much larger than the usual capacity of soil to store water. Consequently, the use of climate related indices could provide a suitable approach to identify drought-prone areas in a rather simple way.

There are several climatic indices to express water stress in agricultural production, each having its respective advantages and drawbacks. Most of the indices are based on a limited set of parameters (temperature, precipitation, potential evapotranspiration) and the values of indices are typically closely correlated. Suitable climatic dryness indices should be simple, meaning that they should require few readily available input meteorological parameters, and should be based on a simple algorithm. A further requirement is that climatic indices should not be crop specific, but should show constraint for agricultural production in general. For the delineation of areas affected by climatic dryness, the UNEP Aridity Index (Sanderson, 1992, Middleton and Thomas, 1997) is potentially a good candidate, because of its simplicity and the easy availability of the necessary parameters to compute it.

Furthermore this index shows close similarity with others or it can be directly derived from them ("Budyko" and "Water deficit" indices) as described by Sanderson (1992). The UNEP Aridity Index was found to be suitable for expressing the relationship between biomass production and the severity of dry conditions (e.g: Le Houérou, 2004, Palmer et al., 2009).

Semi-Arid zones, corresponding to UNEP AI between 0.2 and 0.5, have annual rainfall from 300 to 800mm per year, depending on the relative occurrences of summer and winter rains. They usually supports grazing as the dominant land-use in the drier parts, as well as rainfed cropping in the wetter parts (Ffolliott et al, 2002). Perennial grasses are found nearly everywhere on undisturbed sites, and range in productivity from fair in the drier part of the zones to good in the wetter part. Most of the world's wheat lands, such as the Great Plains of the United States and Canada, are located in the semi-arid regions. Semi-arid lands are good grazing lands.

Dry sub-humid areas ($0.5 < AI < 0.65$) provides good conditions for rain-fed agriculture. They may receive rainfall above 800mm per year. The dry subhumid zones natural vegetation ranges from woodlands to fairly dense forests. In the dry subhumid zone, both rainfed cropping and livestock husbandry are successful most years. Indeed, they are very suitable for sustainable rainfed cereal farming (Hassan and Dregne, 1997).

Assessment

The calculation is carried out with the annual totals of Precipitation (P) and of Potential Evapotranspiration (PET) for each year of the available data time series. Where PET is computed using the Penman-Monteith methodology in relation to a living grass reference crop (Allen et al, 1998).

A full time series of meteorological data preferably over 30 (or more) recent years is required to assess the probability of exceedence at one location. If the probability of exceeding the severe limit ($AI_{UNEP} \leq 0.5$) in an area occurs more than 20 % of the time (i.e. this constraint occurs in at least 7 years out of 30) then the area is considered to be severely affected by too dry climatic conditions.

Values for severe threshold

Severe conditions would correspond to AI UNEP values ≤ 0.5 , which hamper crop and pasture growth and reduce production opportunities. Only with supplementary water supply, such as irrigation, normal crop and pasture growth can be secured in such areas.

Final remarks and conclusions

The UNEP dryness index indicates, (i.e. express numerically) the severity of water stress at a location and allows to delineate areas affected by water stress according to different severity levels, while being simple to compute and not related to specific crops.

References

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M., 1998. "Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements." Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy.
- Hassan H; Dregne H.G., 1997. Natural Habitats and Ecosystems Management in Drylands – Environment Department papers, paper no. 51. Toward environmentally and socially sustainable development – The World Bank
- Le Houérou, H. N., 2004. An Agro-Bioclimatic Classification of Arid and Semiarid Lands in the Isoclimatic Mediterranean Zones. *Arid Land Research and Management* 18: 301–346.
- Middleton, N. J., Thomas D., 1997. *World Atlas of Desertification*. UNEP, Arnold, London. UK.
- Palmer, A. R. , Fuentes, S., Taylor, D., Macinnis-Ng, C., Zeppel, M., Yunusa I., and Eamus, D., 2009. Towards a spatial understanding of water use of several landcover classes: an examination of relationships amongst pre-dawn leaf water potential, vegetation water use, aridity and MODIS LAI. *Ecohydrology* 3:1-10.
- Pereira, L. S., Cordery, I. and Iacovides, I., 2009, *Coping with Water Scarcity with water scarcity, Addressing the challenges*, Springer, Dordrecht, The Netherlands
- Sanderson, M., (Ed.), 1992. *UNESCO Sourcebook in Climatology for Hydrologists and Water Resource Engineers*. UNESCO, Paris.
- Vlachos, E., James, L.D., 1983. Drought Impacts. In: V. Yevjevich, L. V. Cunha, E. Vlachos (Eds.) *Coping With Droughts*. Water Resources Publications, Littleton, CO, pp. 44-73.

3.3 Basisdaten für die Berechnung der Klimakriterien

3.3.1 Wetterdaten

Die räumlichen Modelle von Temperatur, Referenz-Evapotranspiration nach Penman-Monteith und Niederschlag beruhen im Wesentlichen auf einer geostatistischen Interpolation von Wetterbeobachtungen. Als Grundlage dafür dienen Datenbestände der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) und des Hydrografischen Zentralbüros (HZB). Die in den Modellen verwendeten Parameter sind:

- Tagesmittel der Lufttemperatur [°C]
- Tagesmaximum der Lufttemperatur [°C]
- Tagesminimum der Lufttemperatur [°C]
- Lufttemperatur um 7:00, 14:00 und 19:00 Uhr [°C]
- Tagesmittel der relativen Luftfeuchte [%]

- Relative Luftfeuchte um 7:00, 14:00 und 19:00 Uhr [%]
- Globalstrahlung [$\text{MJ m}^{-2} \text{Tag}^{-1}$]
- Sonnenscheindauer [h]
- Tagesmittel der Windstärke [m s^{-1}]
- Niederschlagssumme (7:00 bis 19:00 Uhr) [mm]

Zur Erhöhung der Datendichte bei der Interpolation des Niederschlags werden für den verfügbaren Zeitraum Niederschlagsmessungen des HZB hinzugezogen.

3.3.2 Untersuchungszeitraum

Die biophysikalischen Klimakriterien sind laut JRC für eine mindestens 30-jährige Periode zu berechnen, die möglichst aktuell ist. In der vorliegenden Arbeit wurden 2 leicht unterschiedliche 30-Jahr-Perioden berechnet: 1981 bis 2010 – dies entspricht der aktuellen Klimanormalperiode sowie 1986 bis 2015 – dies ist der aktuellste verfügbare 30-jährige Zeitraum. Ergebnisse wurden zu Vergleichszwecken für beide Perioden berechnet, als Abgrenzungszeitraum gilt jedoch der aktuelle Datenbestand, das sind die Ergebnisse aus 1986 bis 2015.

3.3.3 Topografische Information

Für die geostatistische Interpolation von Temperatur und Referenz-Evapotranspiration spielt die Seehöhe eine bedeutende Rolle. Ein Digitales Höhenmodell (DHM) stellt die Höhenwerte als kontinuierliche Oberfläche bereit, welche im Mittel für jede Rasterzelle angegeben werden. Wird die Seehöhe als unabhängige Variable eines Modells verwendet, ist damit eine Regionalisierung standortbasierter Information auf einfache Weise möglich.

Bei einem Untersuchungsgebiet in der Größe Österreichs hat sich die Verwendung des DHM mit einer Auflösung von 250 Metern als praktikabel erwiesen. Die Interpolation von Wetterdaten basiert auf Beobachtungen an Messstationen. In der Regel beträgt die mittlere Nachbarschaftsdistanz bei einer durchschnittlichen Verfügbarkeit von etwa 270 Stützstellen (Wetterstationen) pro Tag ungefähr 10 km. Eine höhere Auflösung führt unter diesen Voraussetzungen lediglich zu Scheingenauigkeiten, die bei Berücksichtigung des quadratischen Zusammenhangs von Auflösung und der dafür benötigten Anzahl von Rechenoperationen nicht sinnvoll ist.

Eine geringere Auflösung würde die Höheninformation des komplexen Geländes zu stark glätten. Das verwendete DHM wurde vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) zur Verfügung gestellt und berücksichtigt neben der regelmäßigen Höheninformation auch Geländestrukturen wie Bruchlinien, Formenlinien und markante Einzelpunkte.

3.4 Biophysikalisches Kriterium „Low Temperature“

3.4.1 Temperaturkarten als Basisdatensatz

Für die Berechnung des Kriteriums „Low Temperature“ werden die an den Wetterstationen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) gemessenen Tagesmitteltemperaturen herangezogen. Für die Entwicklung räumlicher Modelle basierend auf den Stationsdaten eignen sich bevorzugt die in GI-Systemen verfügbaren methodischen Werk-

zeuge, welche durch entsprechende Kombination von deterministischen und stochastischen Ansätzen die Abbildung komplizierterer räumlicher Zusammenhänge unterstützen. Geostatistische Methoden (*Kriging*) bieten beispielsweise die Möglichkeit, Distanz oder Richtung zwischen Datenpunkten hinsichtlich ihrer räumlichen Korrelation auszuwerten und damit die Variabilität einer Oberfläche zu erklären (Childs, 2004).

Die vorliegende Arbeit orientiert sich bei der Interpolation der Temperatur an der weitverbreiteten Methode Residual Kriging, welche aus zwei Schritten besteht: Zunächst wird der Zusammenhang zwischen Temperatur und Seehöhe in einem deterministischen Modell abgebildet. In Österreich ist ein univariates Modell unter Einbeziehung der Seehöhe in vielen Fällen ausreichend. Realisiert wird dies durch eine einfache lineare Regression mit der Seehöhe als unabhängige Variable. In einem zweiten Schritt werden die im Zuge der Regressionsanalyse an den Messstationen bestimmten Residuen einer Interpolation unterzogen und so eine kontinuierliche Oberfläche generiert. Die am häufigsten dafür eingesetzte Methode ist Kriging, welche die räumliche Variabilität stochastisch beschreibt (Tveito, 2007, 81).

Nach Tveito (2007, 81) ist Residual Kriging für die Interpolation von täglichen Temperaturen geeignet, wobei das deterministische Modell sowohl aus monatlichen als auch aus täglichen Daten gebildet werden kann. In der vorliegenden Arbeit wird die Regression für monatliche Durchschnittstemperaturen unter Einbeziehung aller Messstationen gerechnet und die täglichen Residuen mittels Ordinary Kriging interpoliert. Die monatlichen Regressionen bilden damit den durchschnittlichen Höhenzusammenhang für ganz Österreich ab, welcher weniger von täglich variierenden Wittersituationen beeinflusst wird. Im Gegenzug werden diese Variationen verstärkt in den Residuen abgebildet. Die Residuenoberflächen werden täglich über den gesamten Untersuchungszeitraum von 1981 bis 2015 – das sind 12.782 Tage – berechnet. Eine genaue Beschreibung der Temperaturinterpolation findet sich in Schaumberger (2011).

3.4.2 Berechnung von Vegetationsdauer und Temperatursummen

Wird im Frühjahr eine bestimmte Temperatur anhaltend überschritten, beginnt das Pflanzenwachstum. Im vorliegenden Modell wird dies durch eine Überschreitung des Schwellenwertes von 5 °C Tagesmitteltemperatur für die Dauer von mindestens fünf Tagen abgebildet. Das Vegetationsende basiert auf einer Umkehrung des definierten Kriteriums – für fünf aufeinanderfolgende Tage wird die Tagesmitteltemperatur von 5 °C unterschritten. Die Kombination von Temperaturschwelle und einer Periode mit durchgehender Über- oder Unterschreitung dieser Schwelle zur Festsetzung von Beginn und Ende der klimatologischen Vegetationsperiode stellt in der Literatur einen gewissen Standard dar und wird für die vorliegende Arbeit vom JRC als optionale Erweiterung zur Berechnung des Klimakriteriums „Low Temperature“ vorgeschlagen. Die so definierte Vegetationsperiode schränkt den Zeitraum für die Prüfung des Low-Temperature-Kriteriums bei der Ermittlung von Tagen sowie auch bei der Berechnung von Temperatursummen ein. In beiden Fällen wird also nie das gesamte Kalenderjahr betrachtet.

Die Verarbeitung erfolgt mit C#-Algorithmen unter Verwendung des GIS-Rasterwerkzeuges *Map Algebra*. Über die einzelnen Tage in den Monaten des Frühjahrs (März bis Mai) und Herbstes (September bis November) wird in Tagesschritten iteriert und jeweils ein Zeitfenster von fünf Tagen gebildet. Dabei werden immer fünf Temperaturoberflächen als Objekte in den Arbeitsspeicher geladen und zur weiteren Verwendung vorgehalten. Zunächst müssen sämtliche Temperaturwerte einer Oberfläche hinsichtlich des 5-°C-Kriteriums klassifiziert werden. Die einzelnen Rasterzellen enthalten nach diesem Vor-

gang den Wert 1, wenn das Temperaturkriterium erfüllt und 0, wenn es nicht erfüllt ist. Durch Addition der fünf reklassifizierten Temperaturoberflächen ergibt sich für alle Zellen, welche das Kriterium für den Beginn oder das Ende der klimatologischen Vegetationsperiode erfüllen, die Summe von 5. Nur Zellen, welche diesen Wert aufweisen, werden in den Ergebnistraster übertragen, wobei hier der Tag des Jahres abgespeichert wird, der dem ersten der fünf Tage im Zeitfenster entspricht. Durch die Iteration in Tagesschritten erfüllen nach und nach die meisten Zellen die Bedingung eines für fünf Tage durchgehenden Über- bzw. Unterschreitens der 5-°C-Schwelle. Der Algorithmus terminiert mit Ende Mai für den Beginn und Ende November für das Ende der Vegetationsperiode. In allen Zellen, welche bis dahin keinen Beginn bzw. kein Ende aufweisen, wird ein einheitlicher Vegetationsbeginn mit 1. Juni und ein Vegetationsende mit 1. Dezember zugewiesen.

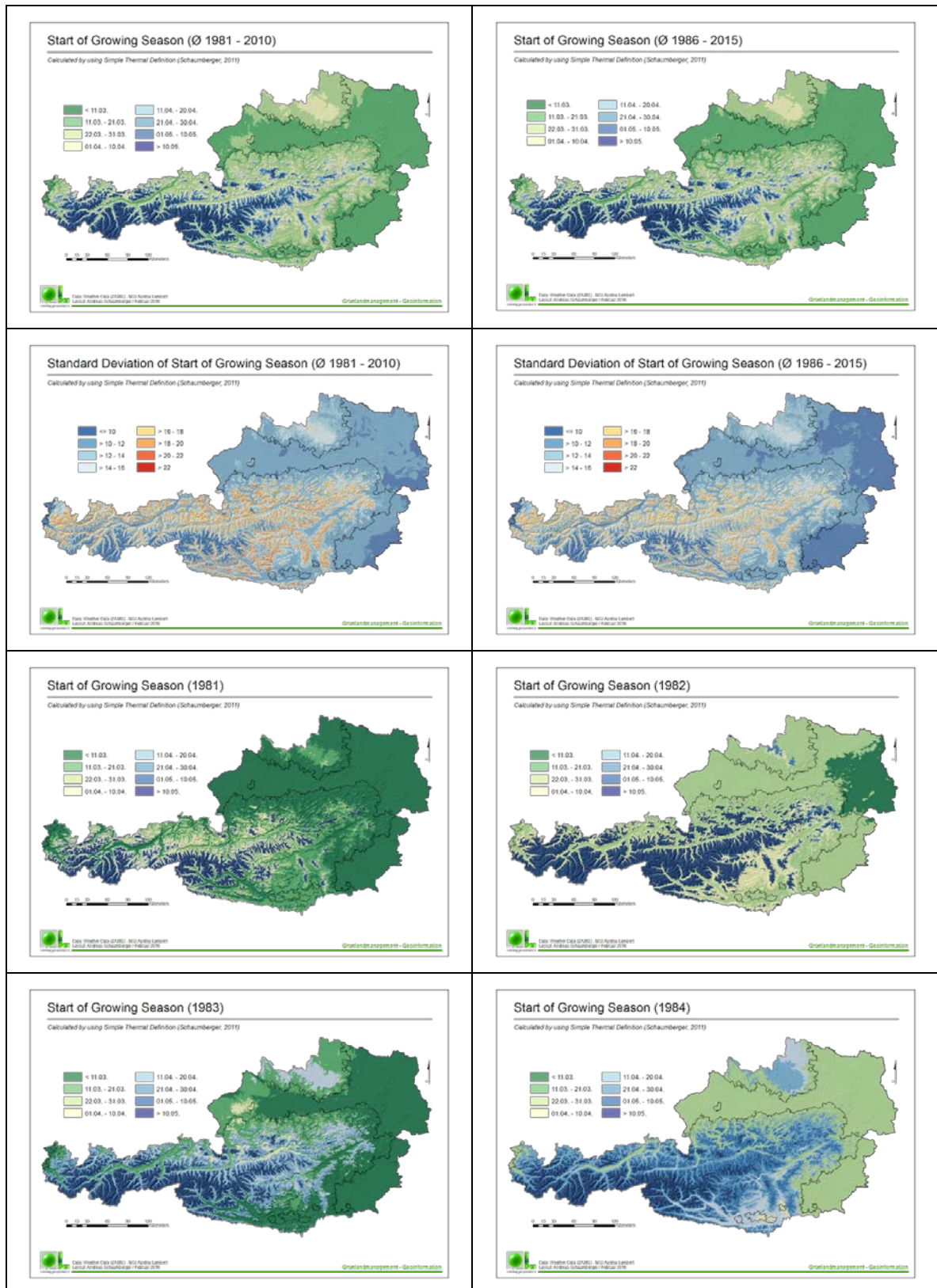
Als zusätzliche Berechnungsvariante wurde die Dauer der Vegetationsperiode (Zeitraum zwischen der Definition von Vegetationsbeginn und -ende) auf jene Tage eingeschränkt, welche Tagesmittelwerte von $> 5\text{ °C}$ aufwiesen.

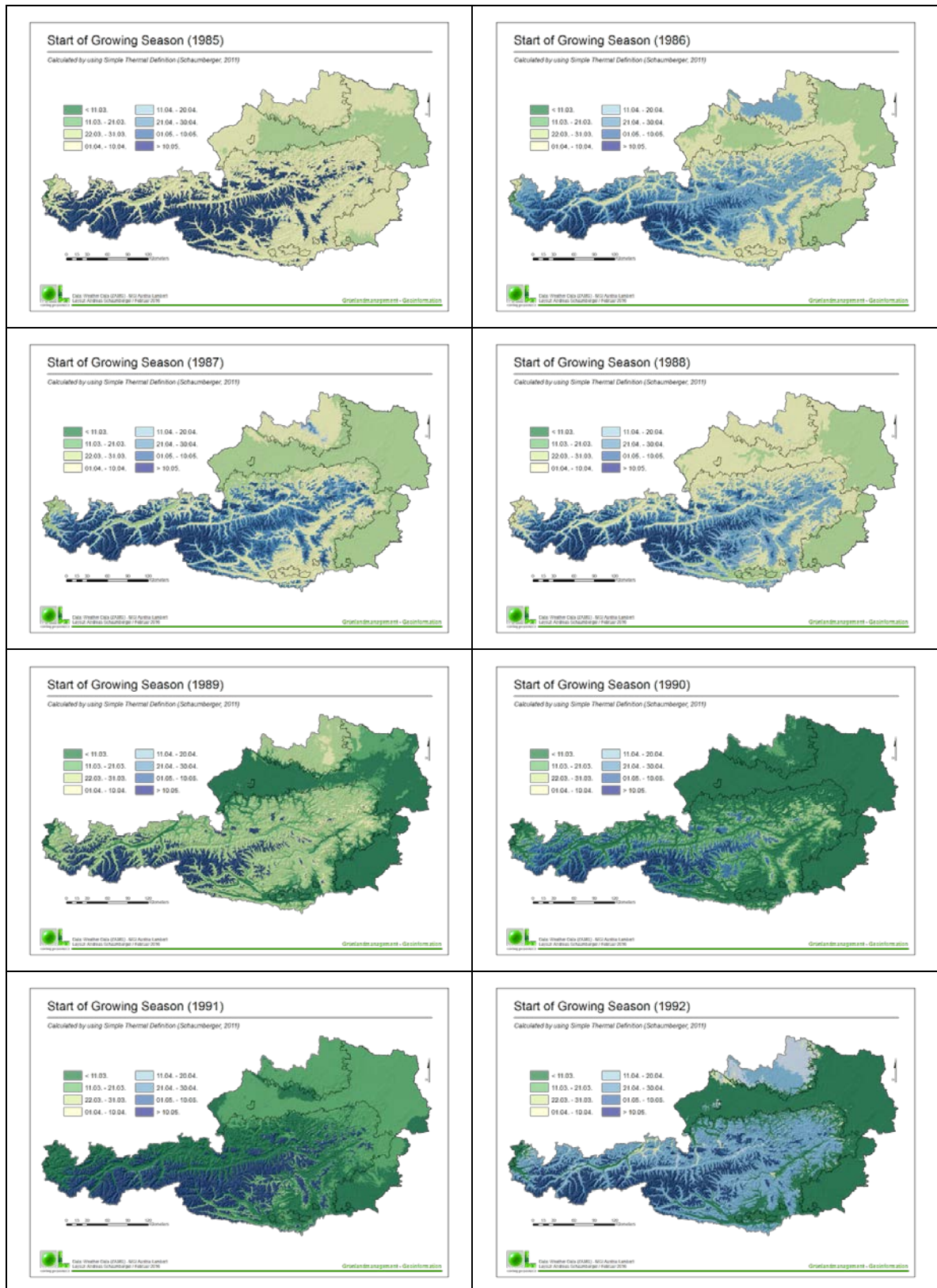
Für die Bildung der Temperatursummen wurden innerhalb der Vegetationsperiode jene Rasterzellen der täglichen Temperaturnuster aufsummiert, welche nach JRC-Vorgaben eine Basistemperatur von 5 °C überschritten haben.

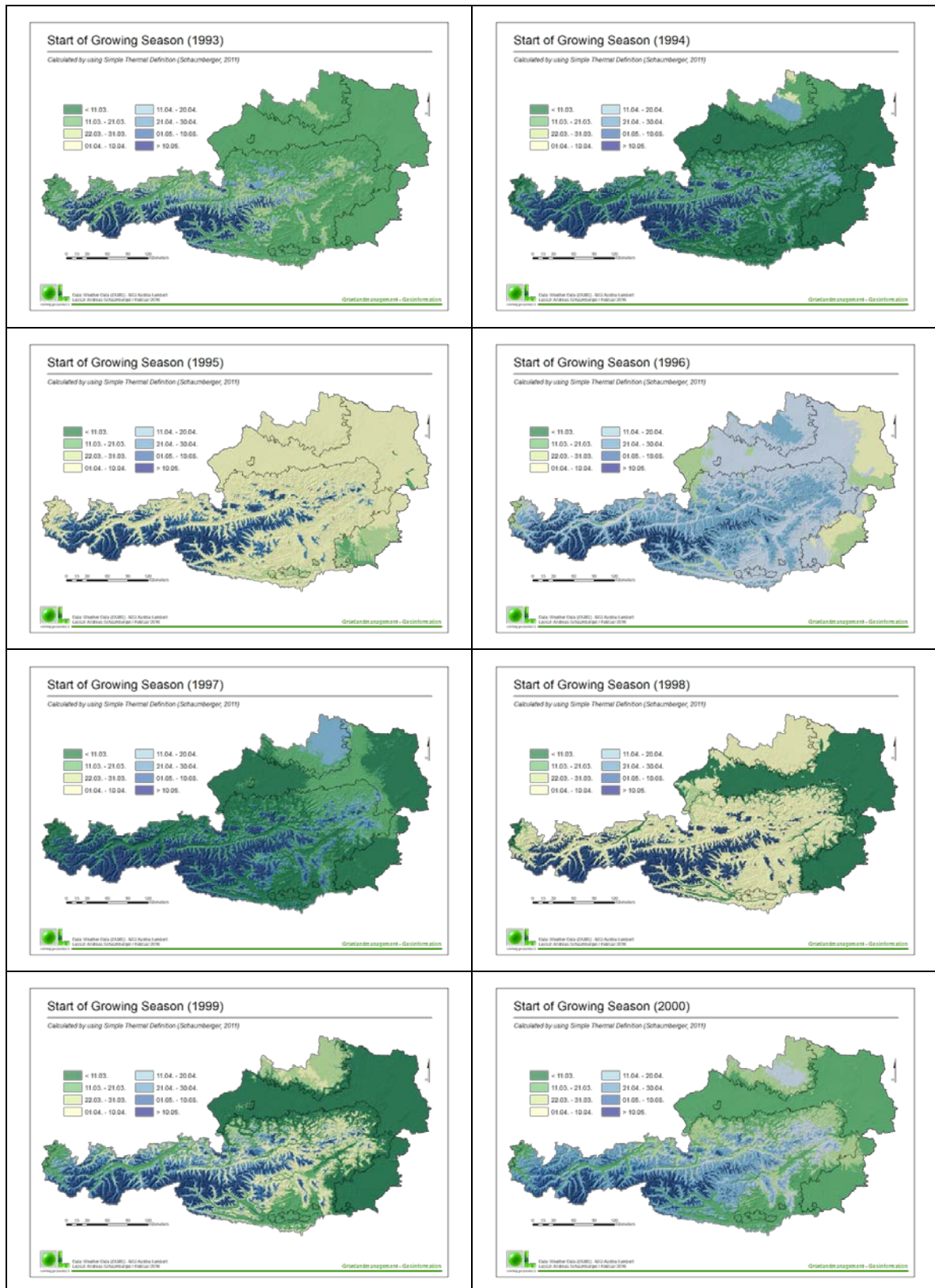
In den nachfolgenden Abbildungen werden zunächst die langjährigen Mittelwerte für Vegetationsbeginn, Vegetationsende, Vegetationsdauer und den Temperatursummen (Growing Degree Days) für die beiden Berechnungsperioden dargestellt. Nach den Auswertungen der Standardabweichung folgen die Karten der Einzeljahre. Aufgrund der Schwellenwertbedingungen durch die Kriterienfestlegung für die Vegetationsperiode (5 °C für 5 aufeinanderfolgende Tage) kommt es in manchen Regionen und Jahren zu unrealistischen Ergebnissen, deren negative Effekte durch die statistische Auswertung abgefedert werden.

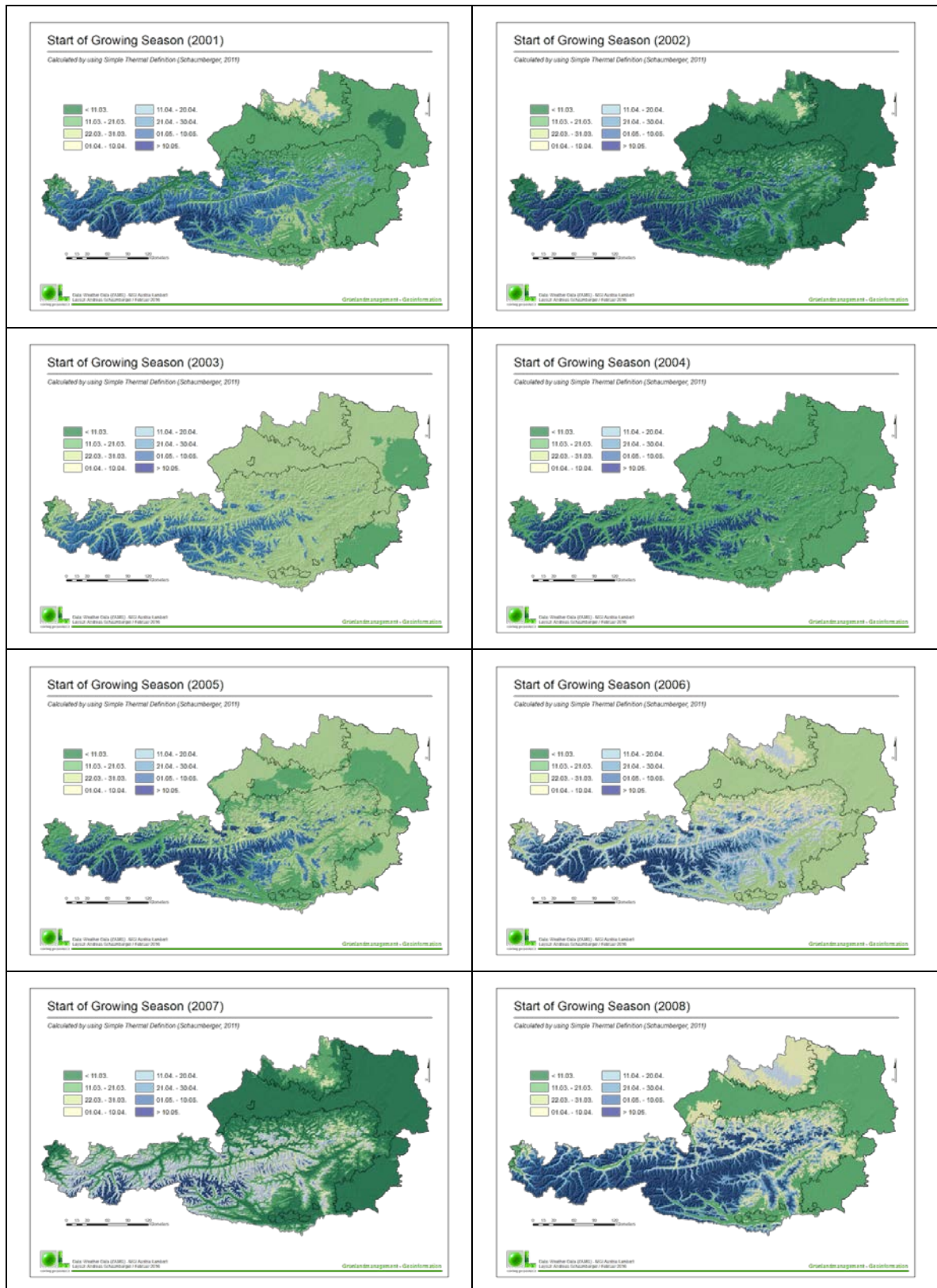
Die Karten der Abbildungen 6 bis 8 zeigen die Häufigkeiten der Kriterienerfüllung sowie die Abgrenzung mit einer Schwelle von mindestens 20 % aller Jahre, in denen die klimatischen Bedingungen mit einer entsprechend geringen Anzahl an Tagen bzw. geringen Temperatursumme erfüllt sind, um betroffene Gebiete als Sonstiges Benachteiligtes Gebiet abgrenzen zu können.

Alle Ergebniskarten enthalten die Grenzlinie des Berggebietes; mögliche Abgrenzungskriterien sind nur außerhalb der Gebietskulisse des Berggebietes relevant.









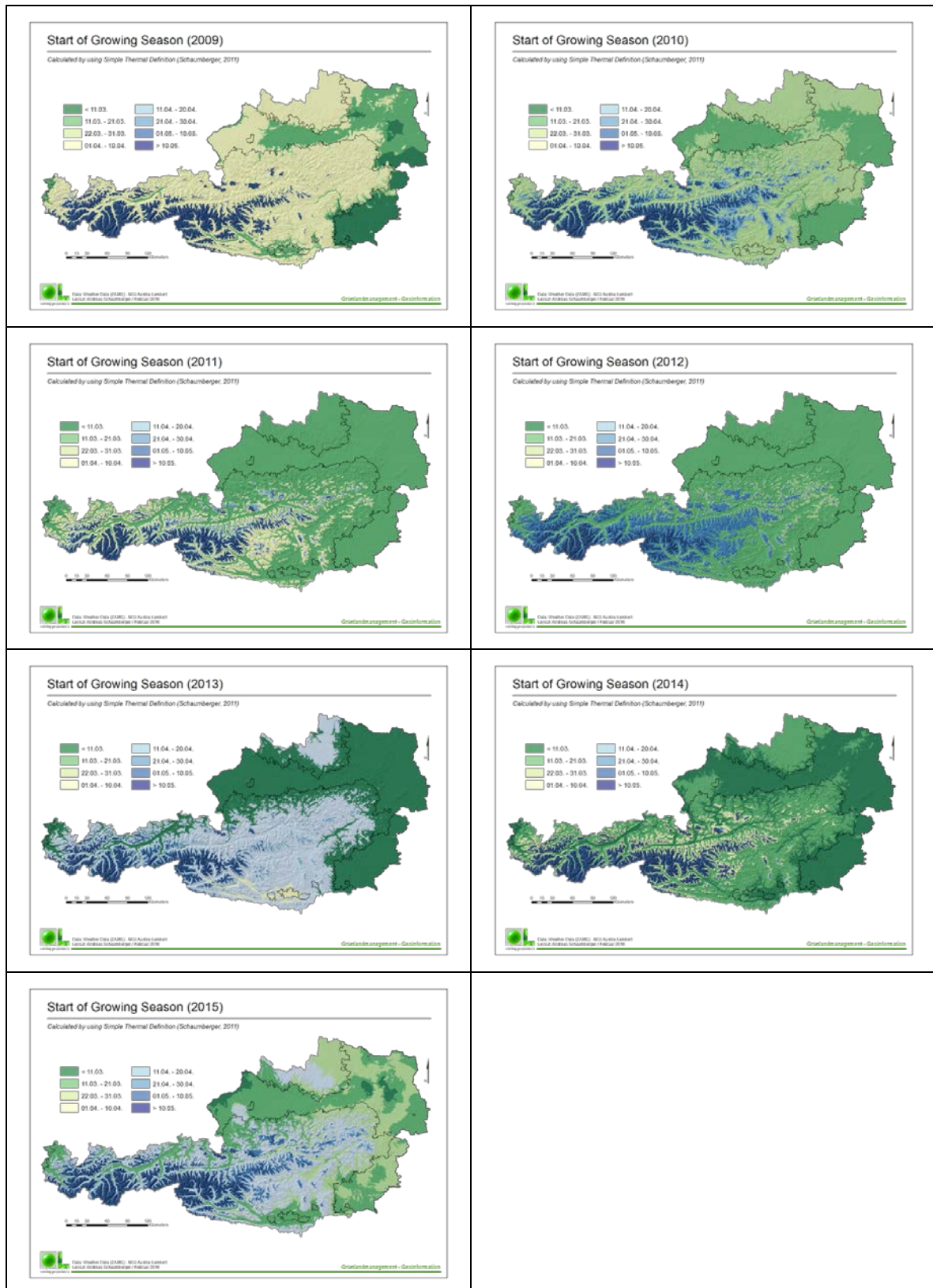
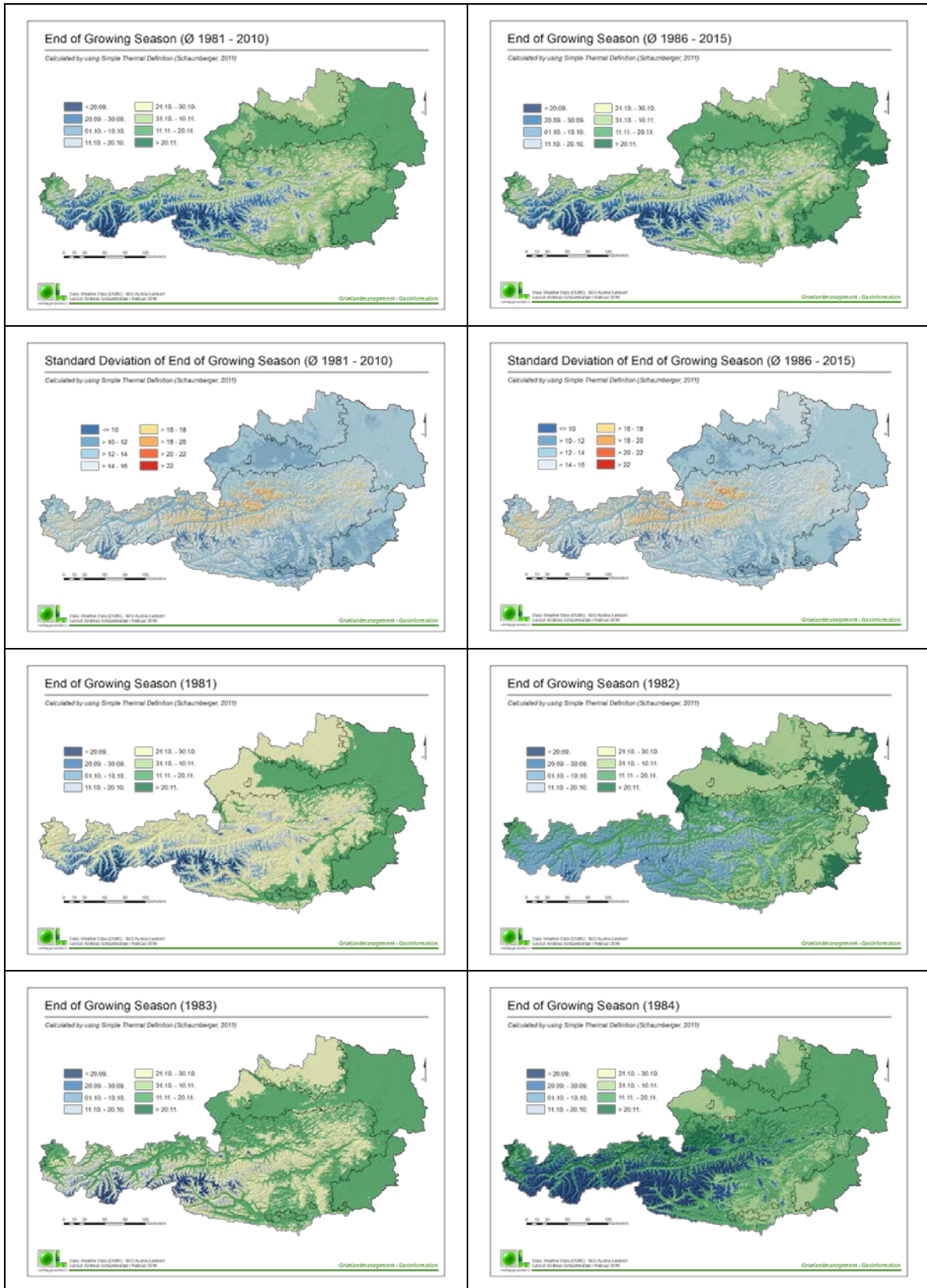
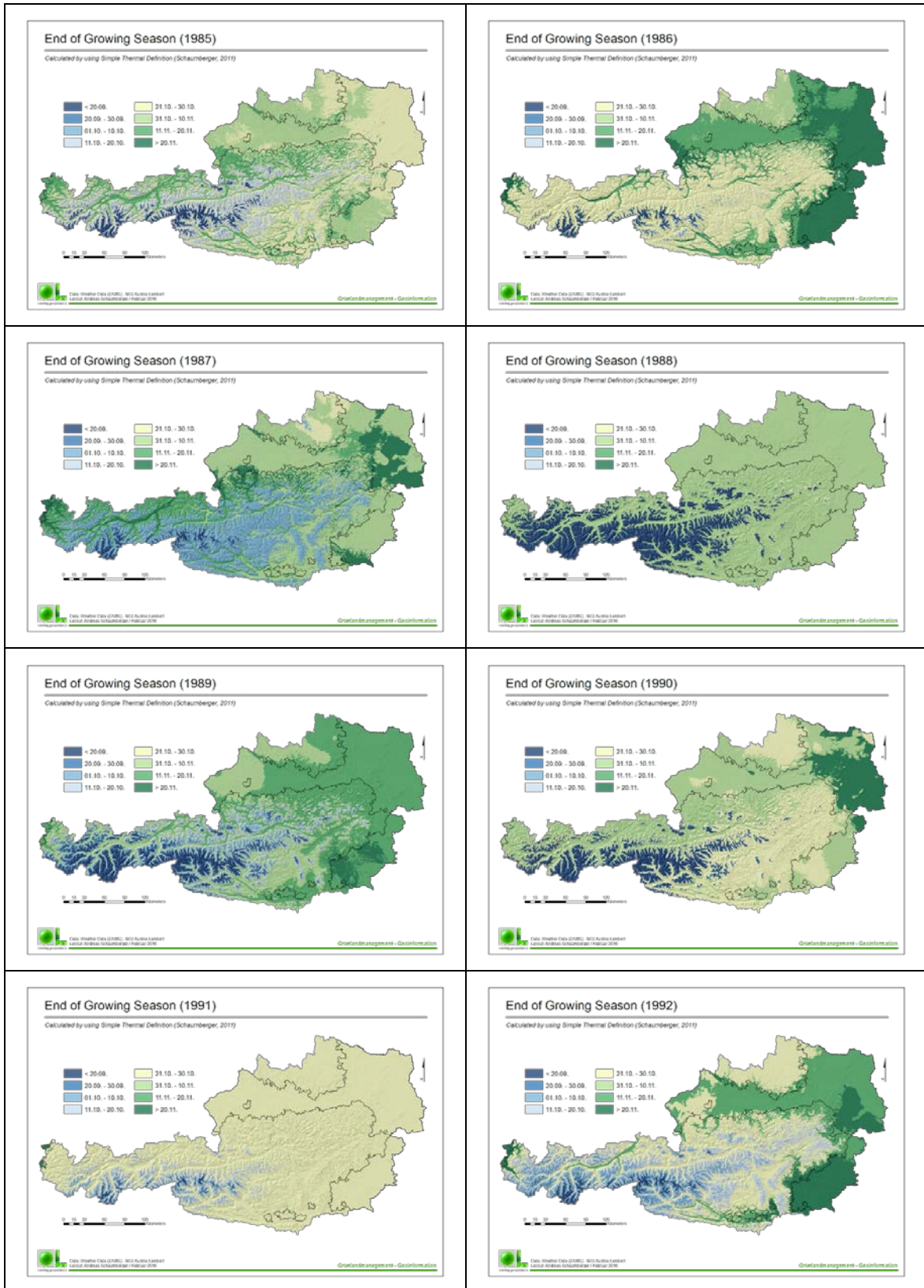
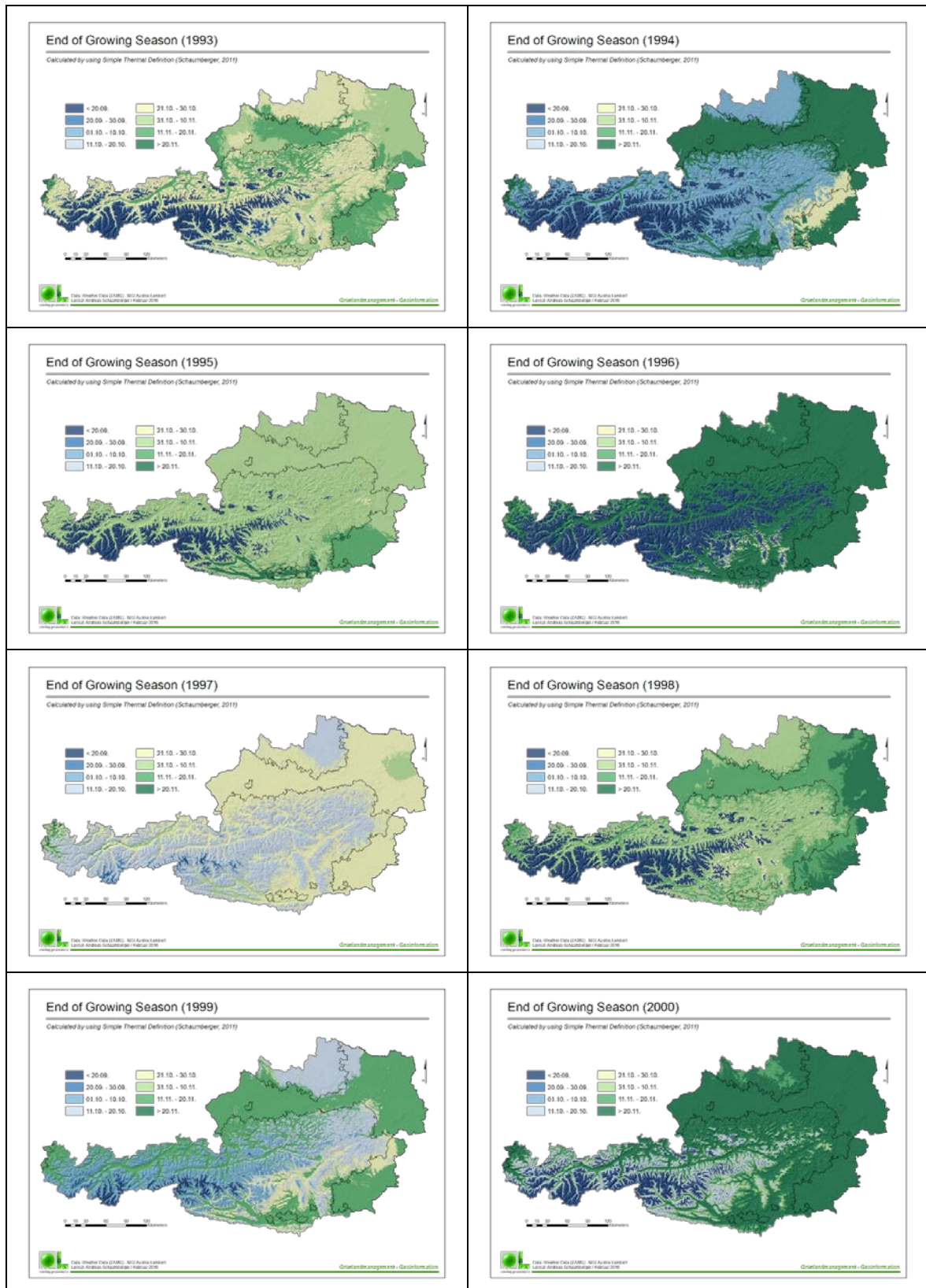
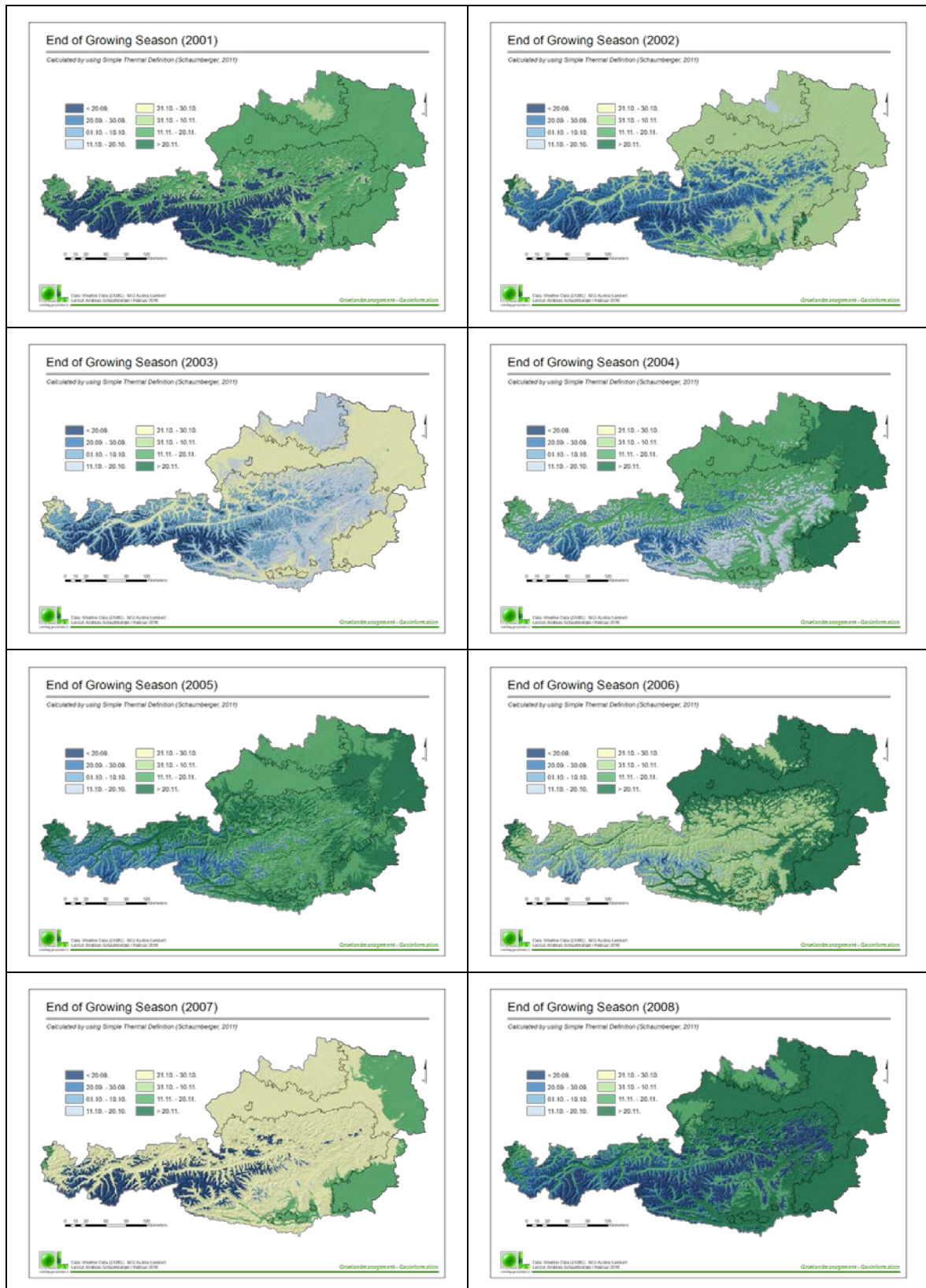


Abbildung 38: Beginn der Vegetationsperiode (ab 5 Tage mit $> 5^{\circ}\text{C}$ Tagesmitteltemperatur)









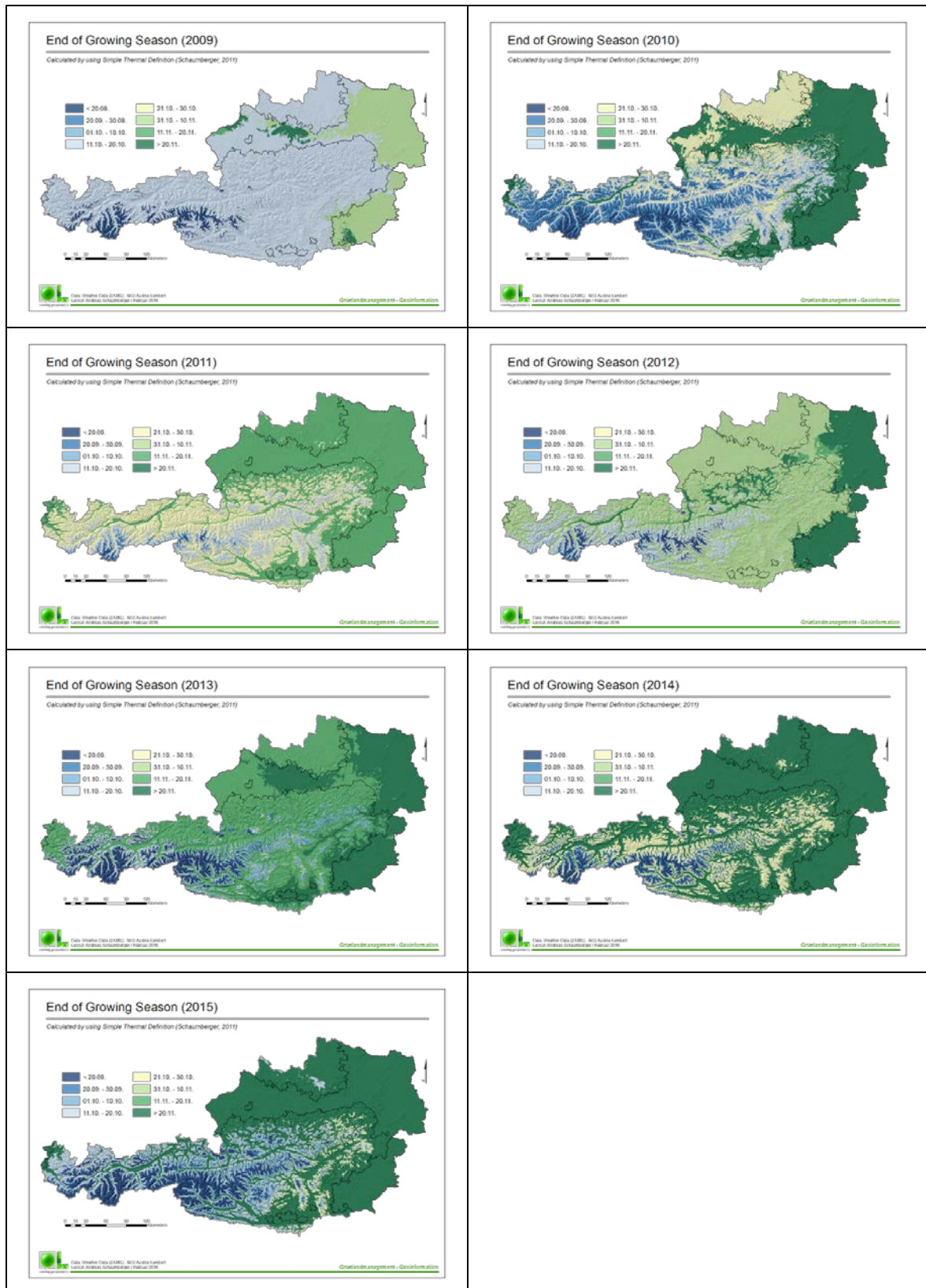
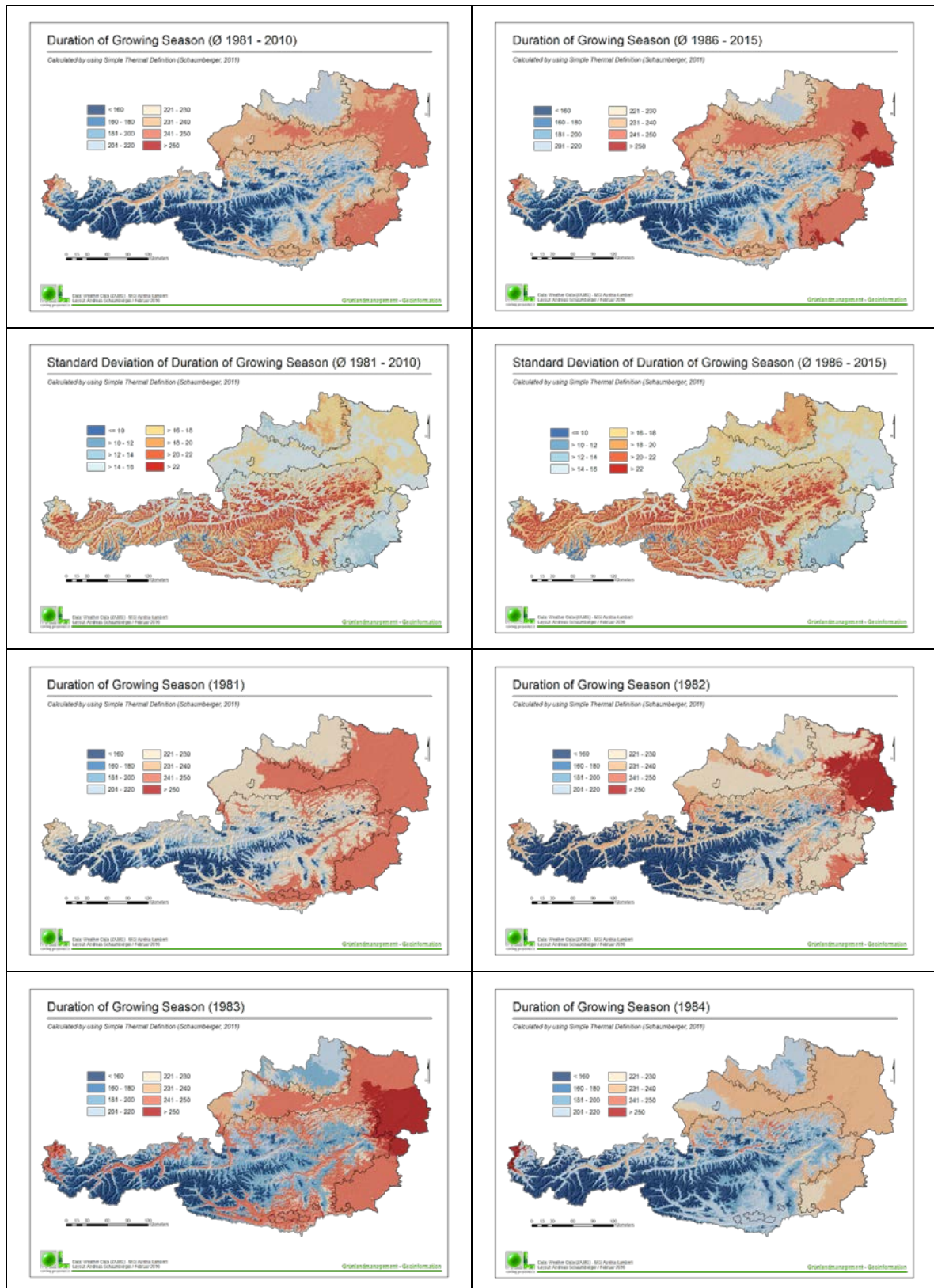
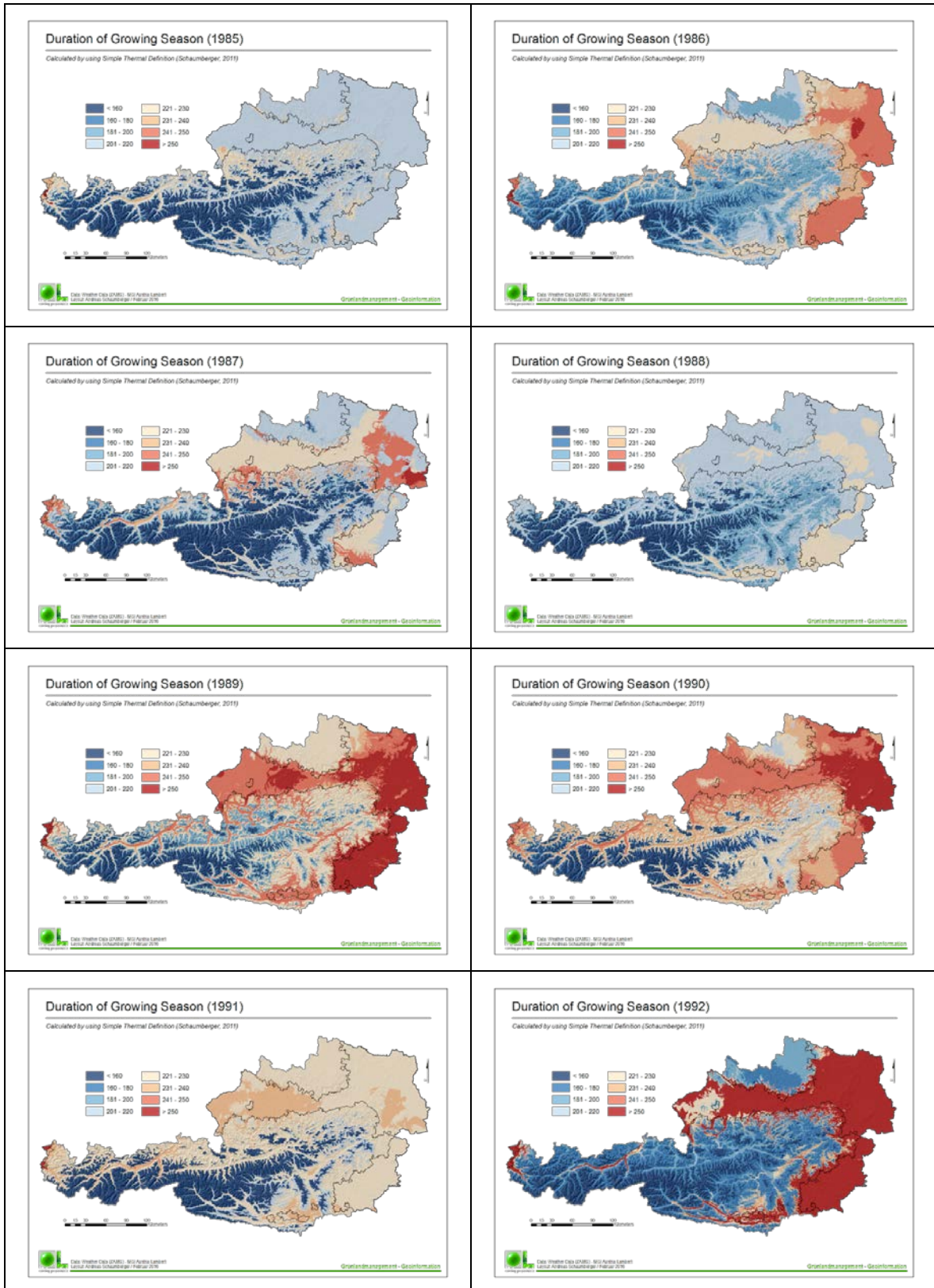
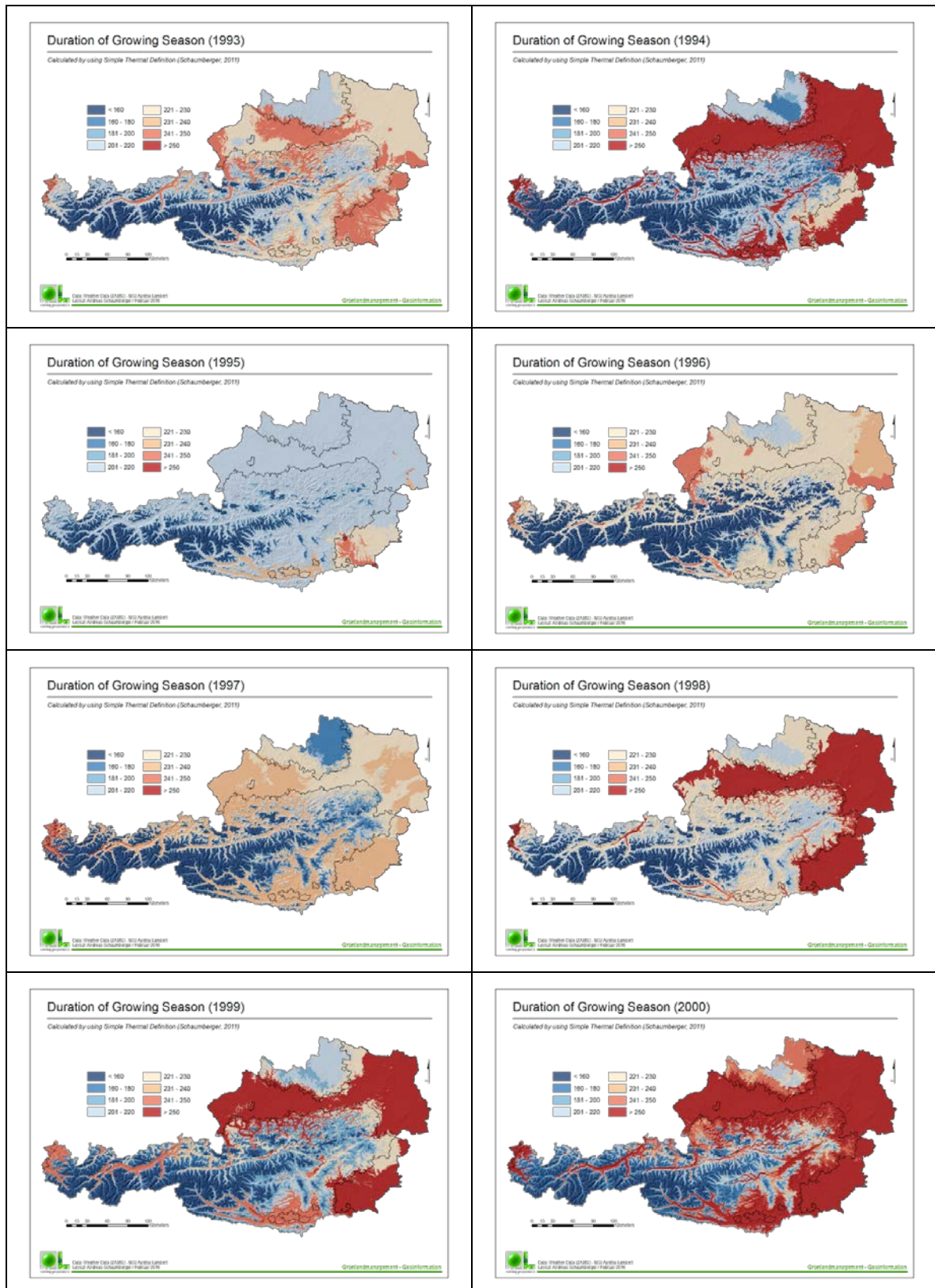
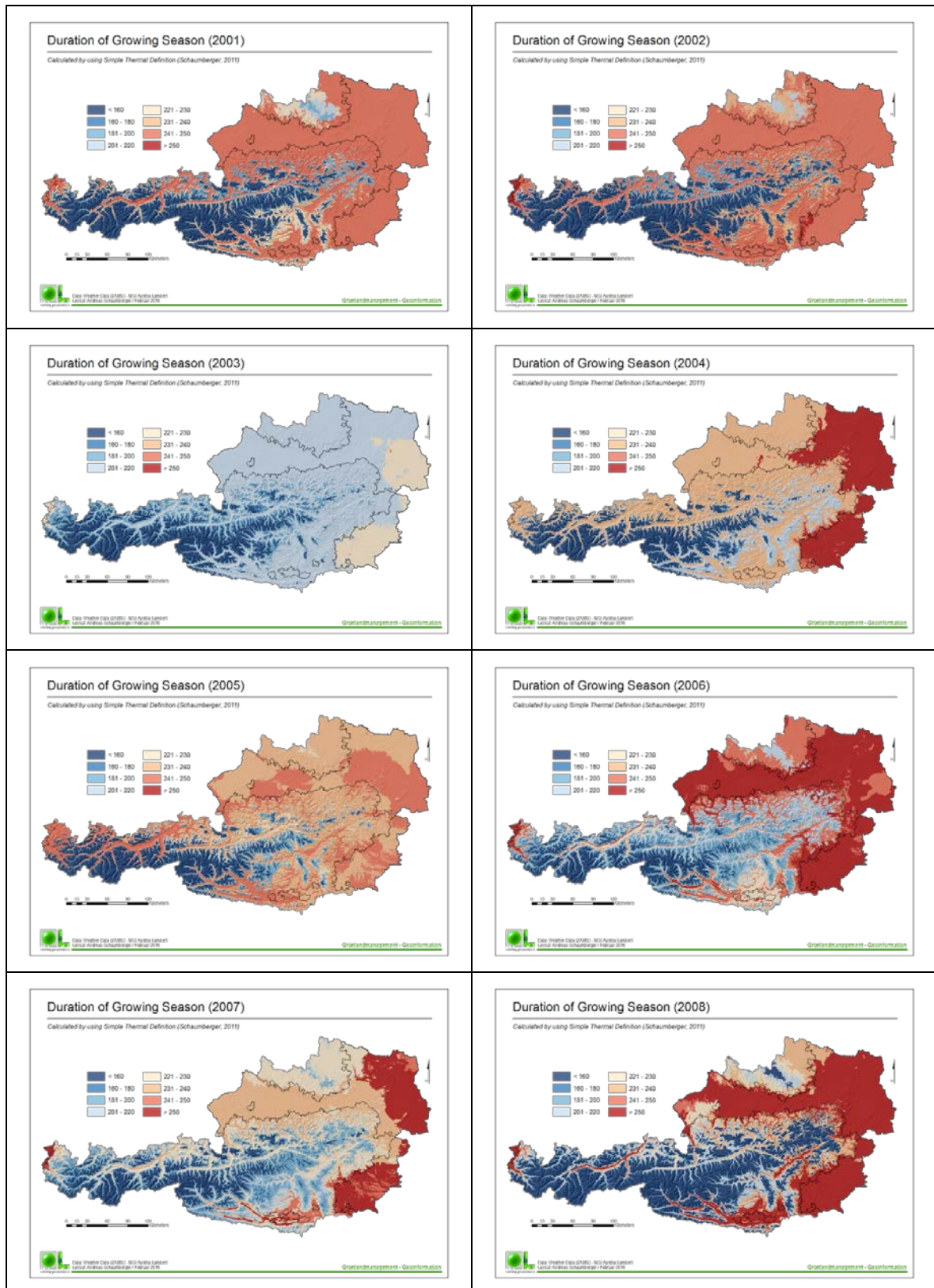


Abbildung 39: Ende der Vegetationsperiode (ab 5 Tage mit < 5 °C Tagesmitteltemperatur)









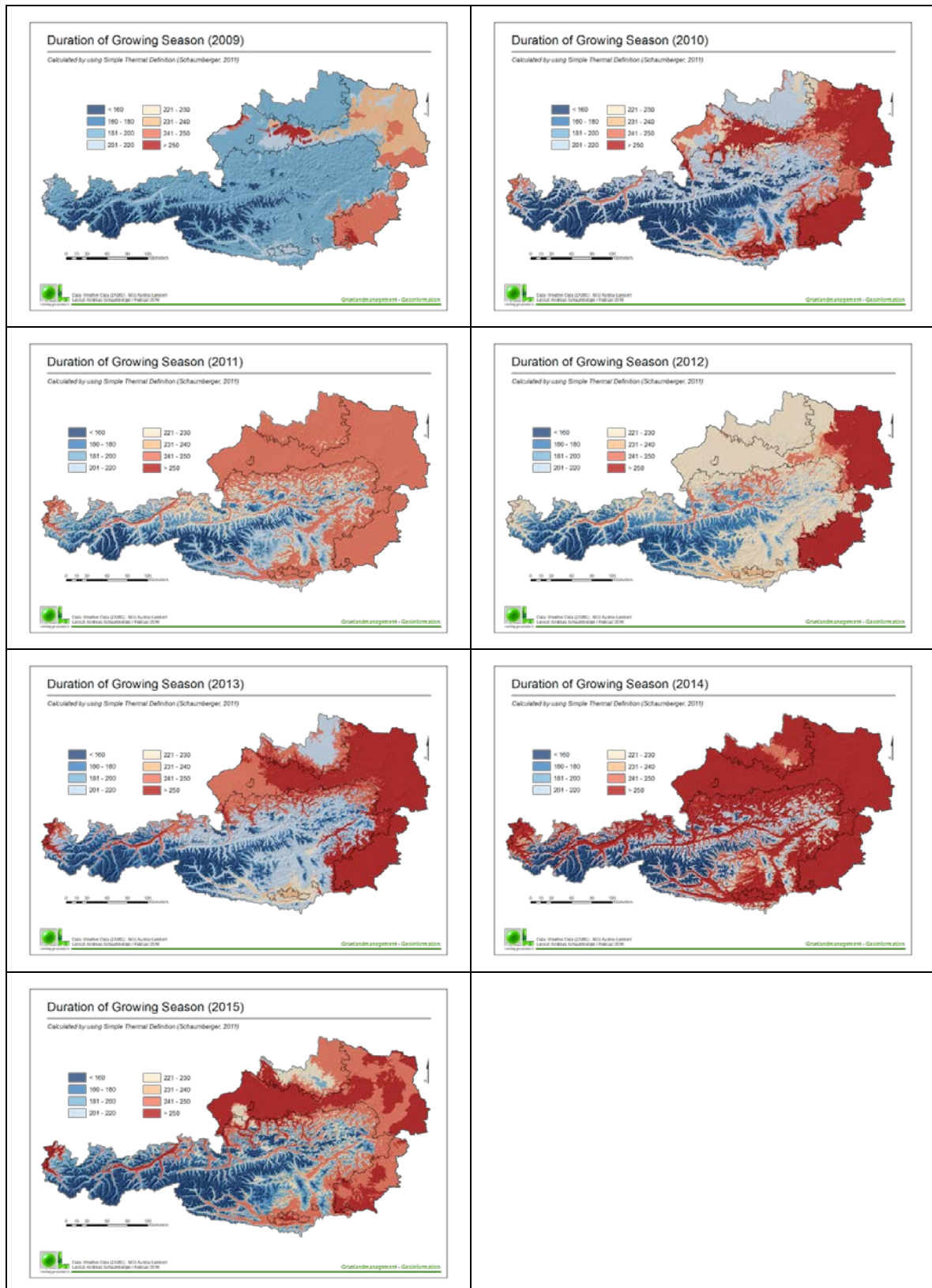
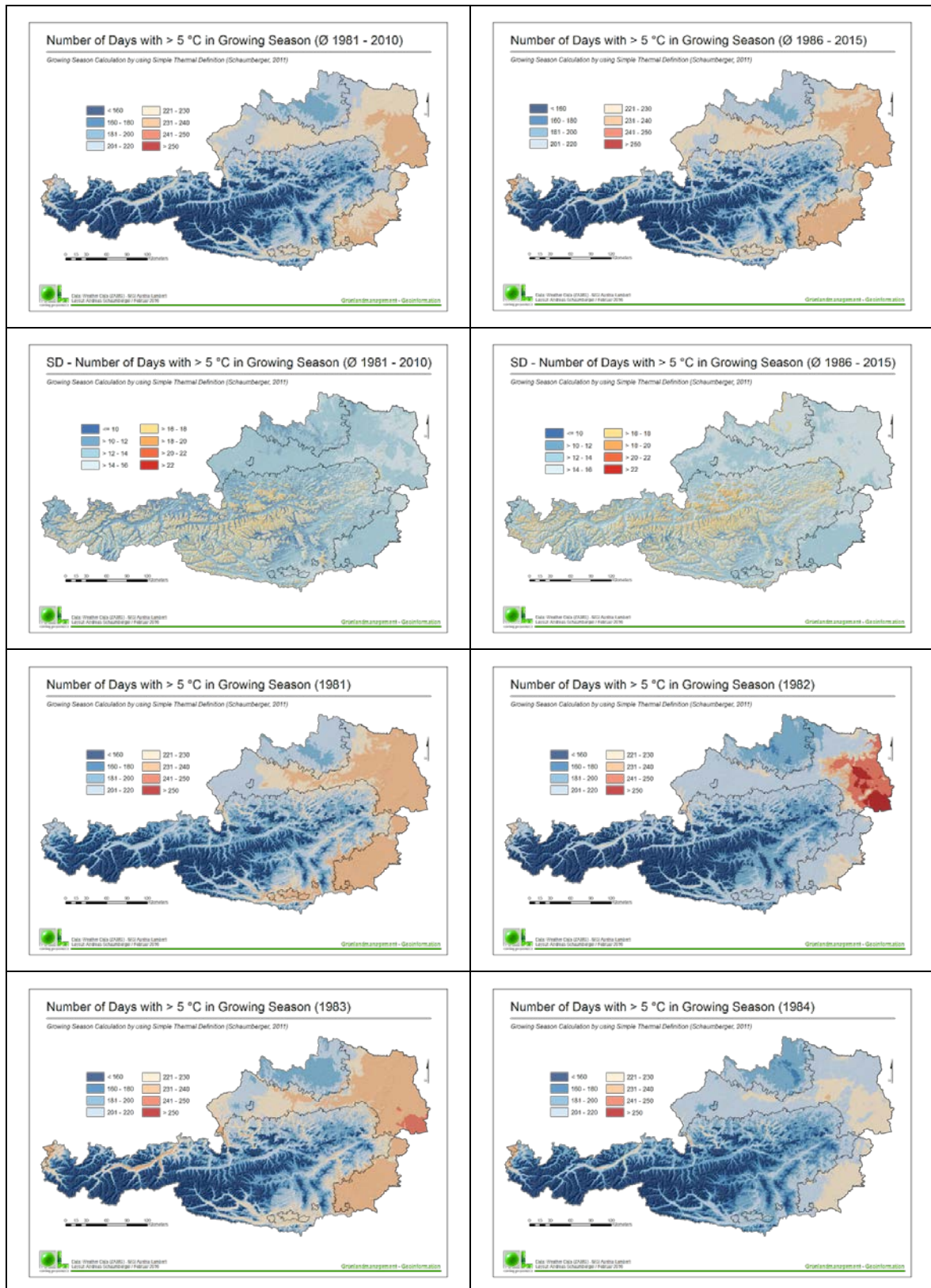
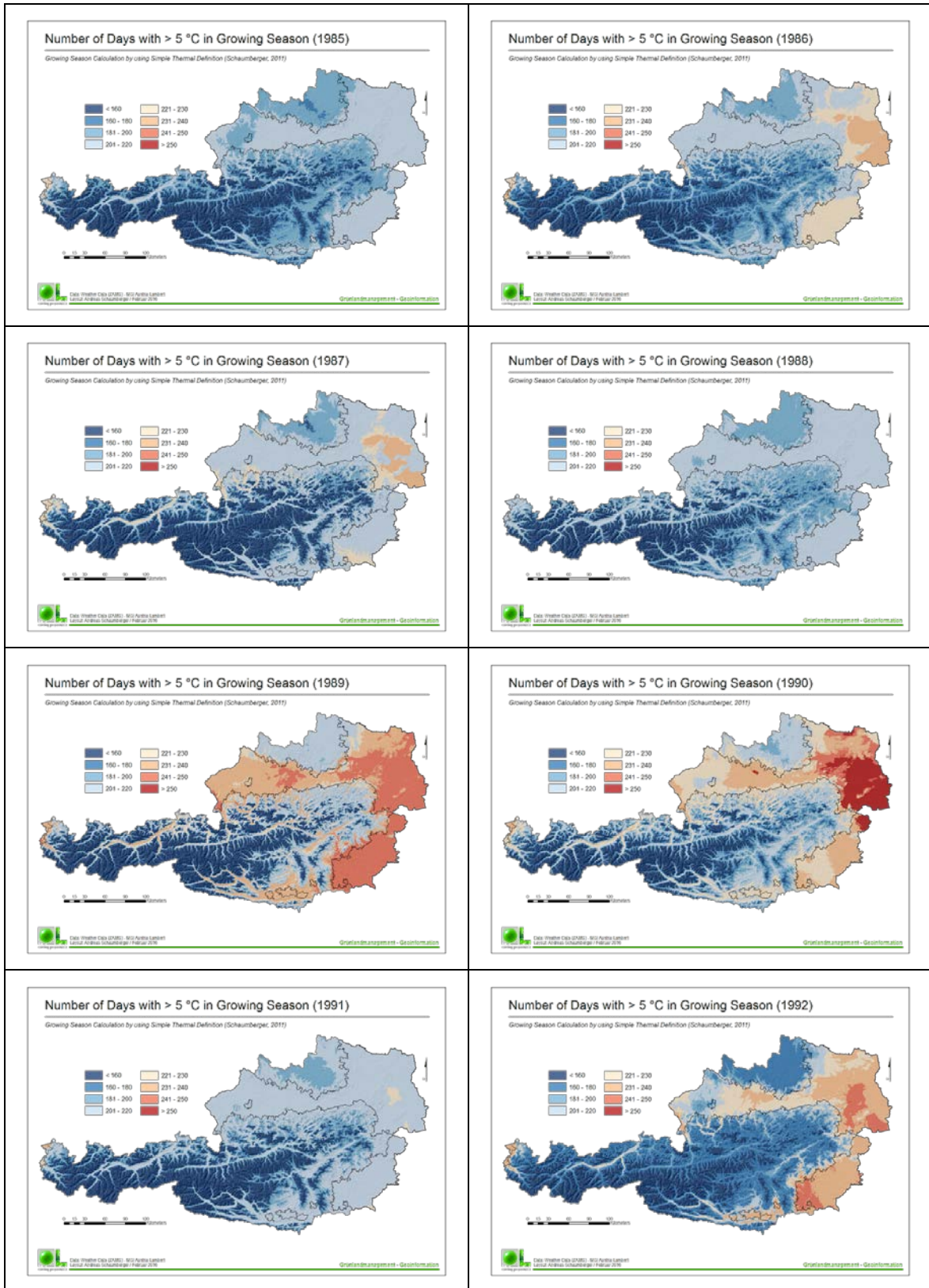
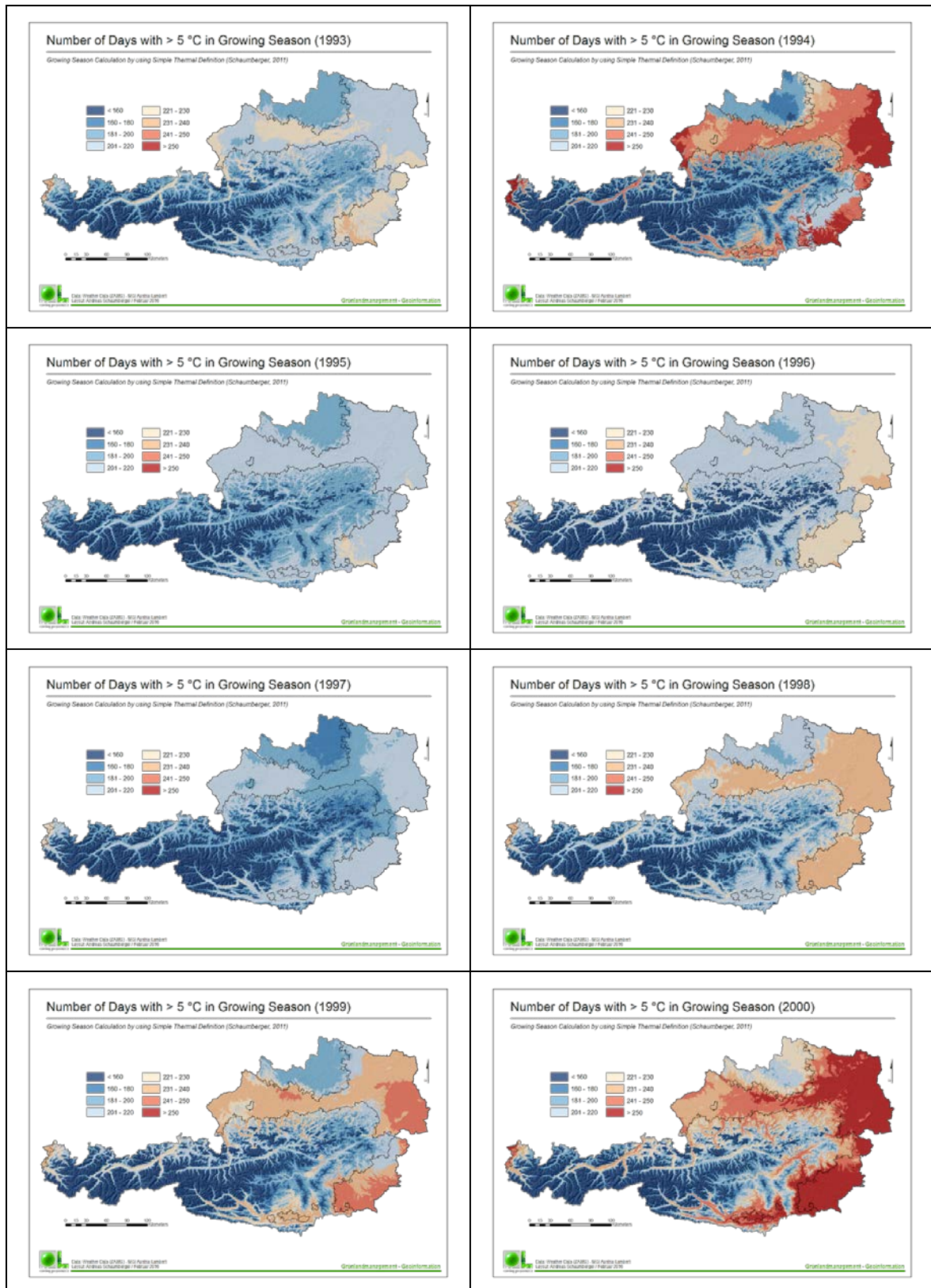
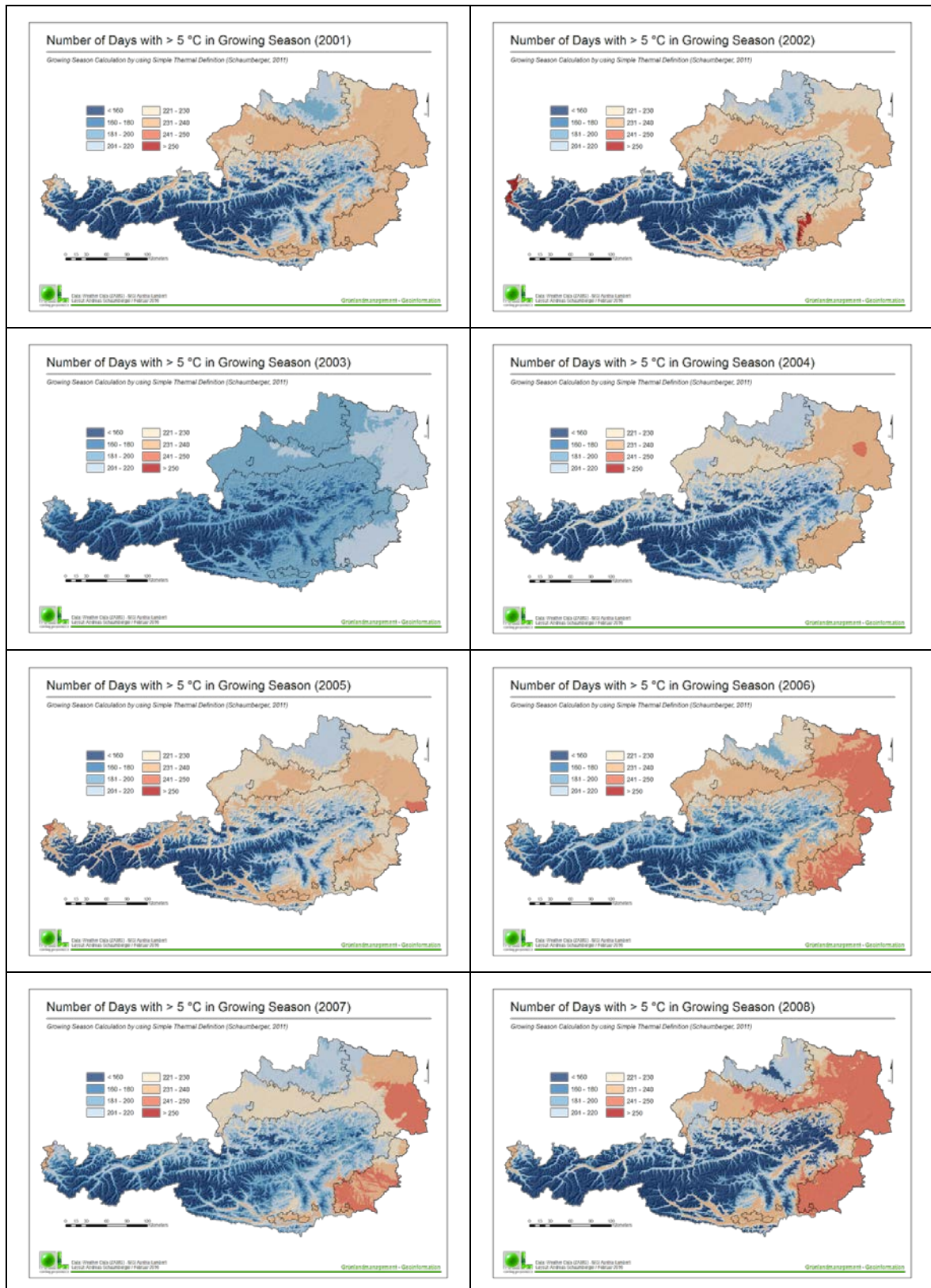


Abbildung 40: Dauer der Vegetationsperiode (ab 5 Tage mit $> 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $< 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ Tagesmitteltemperatur)









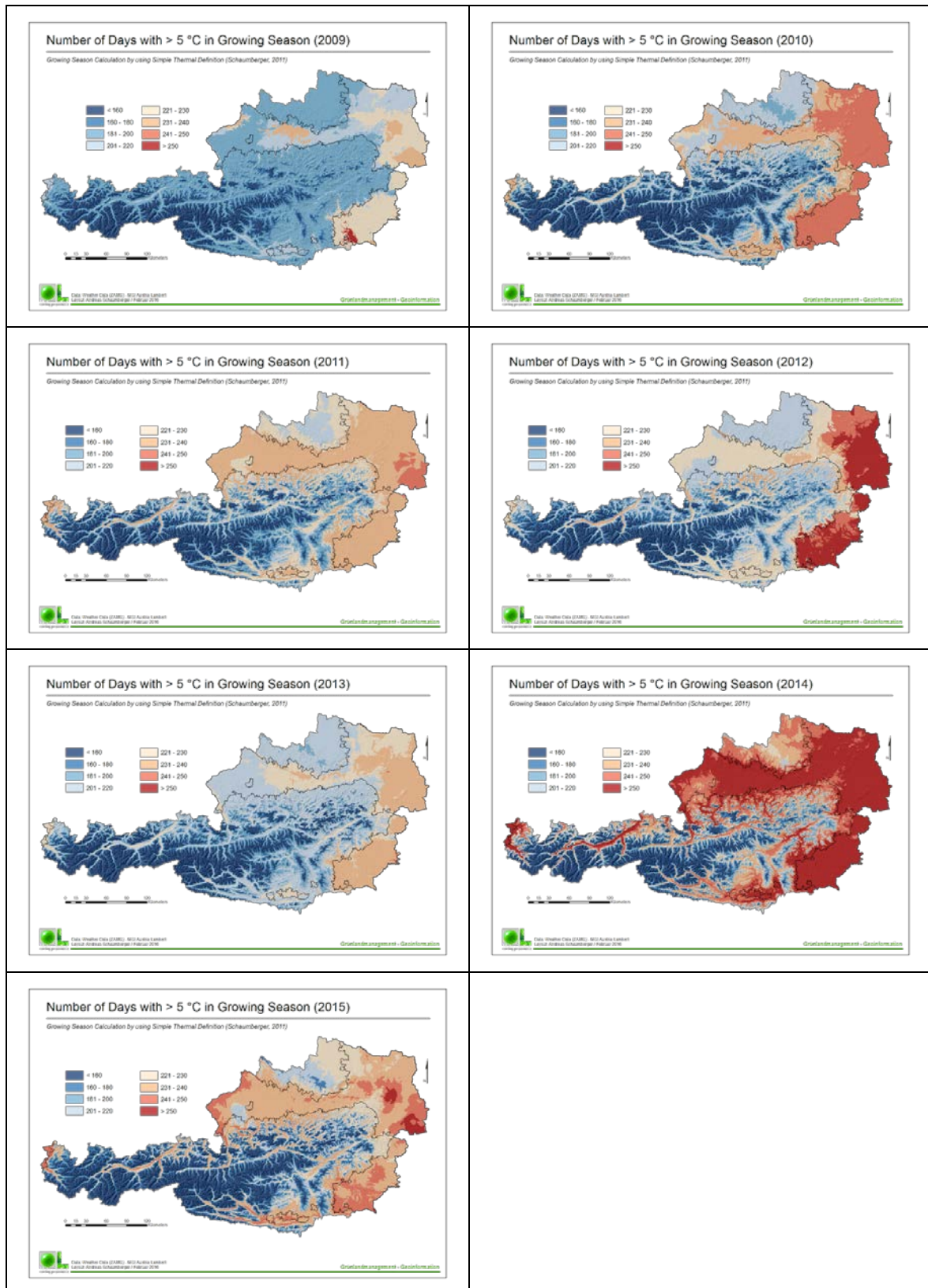
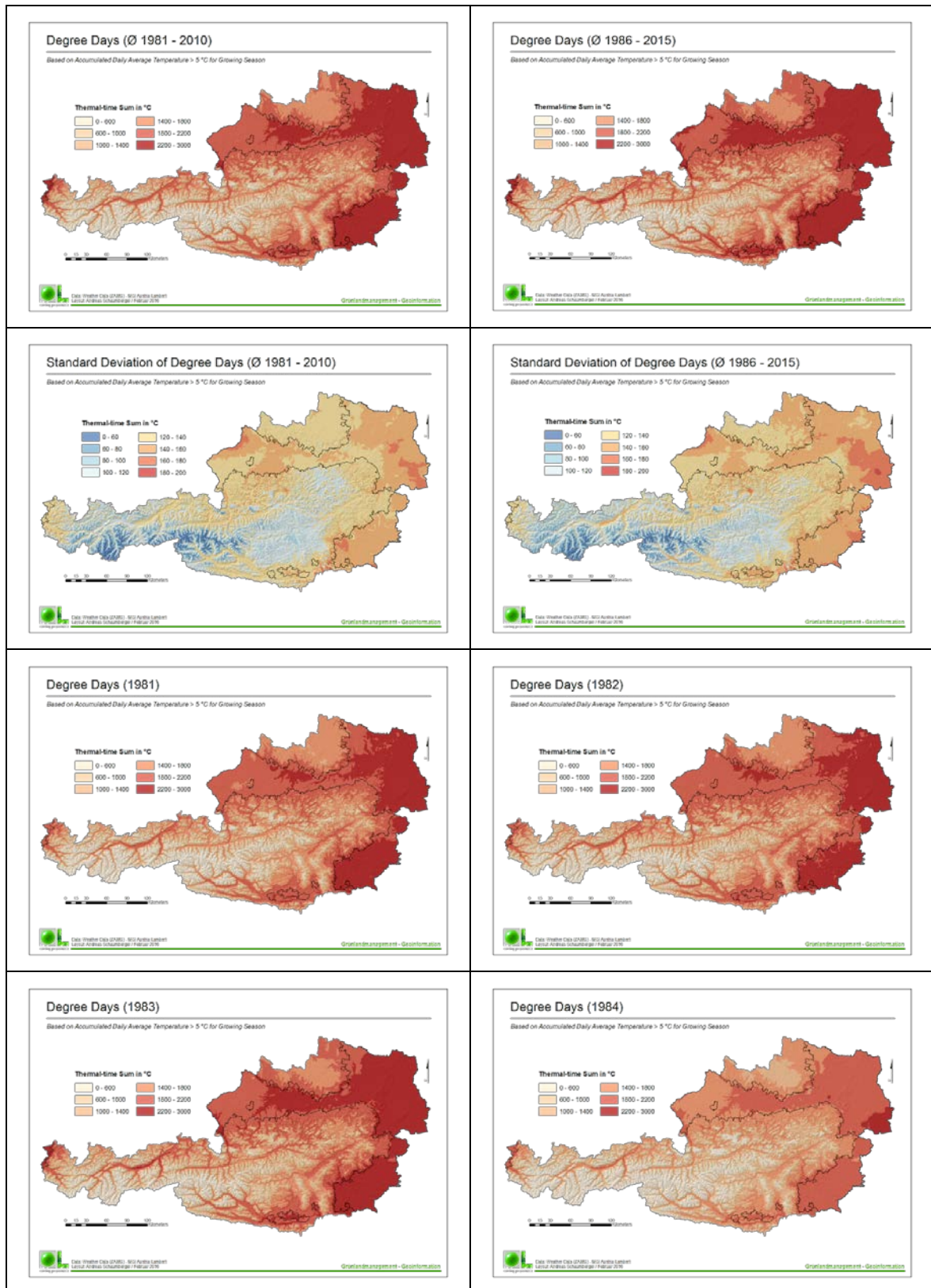
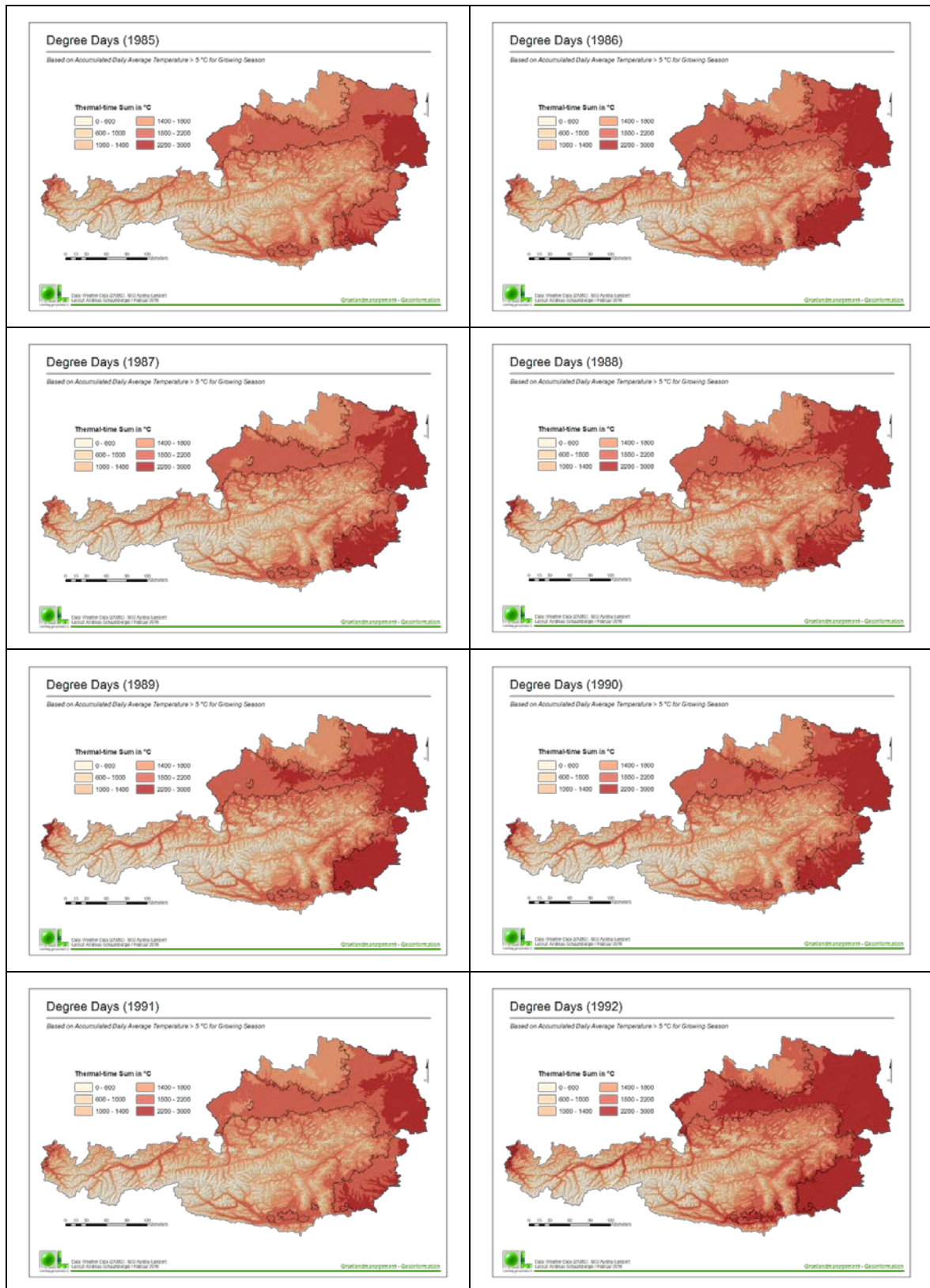
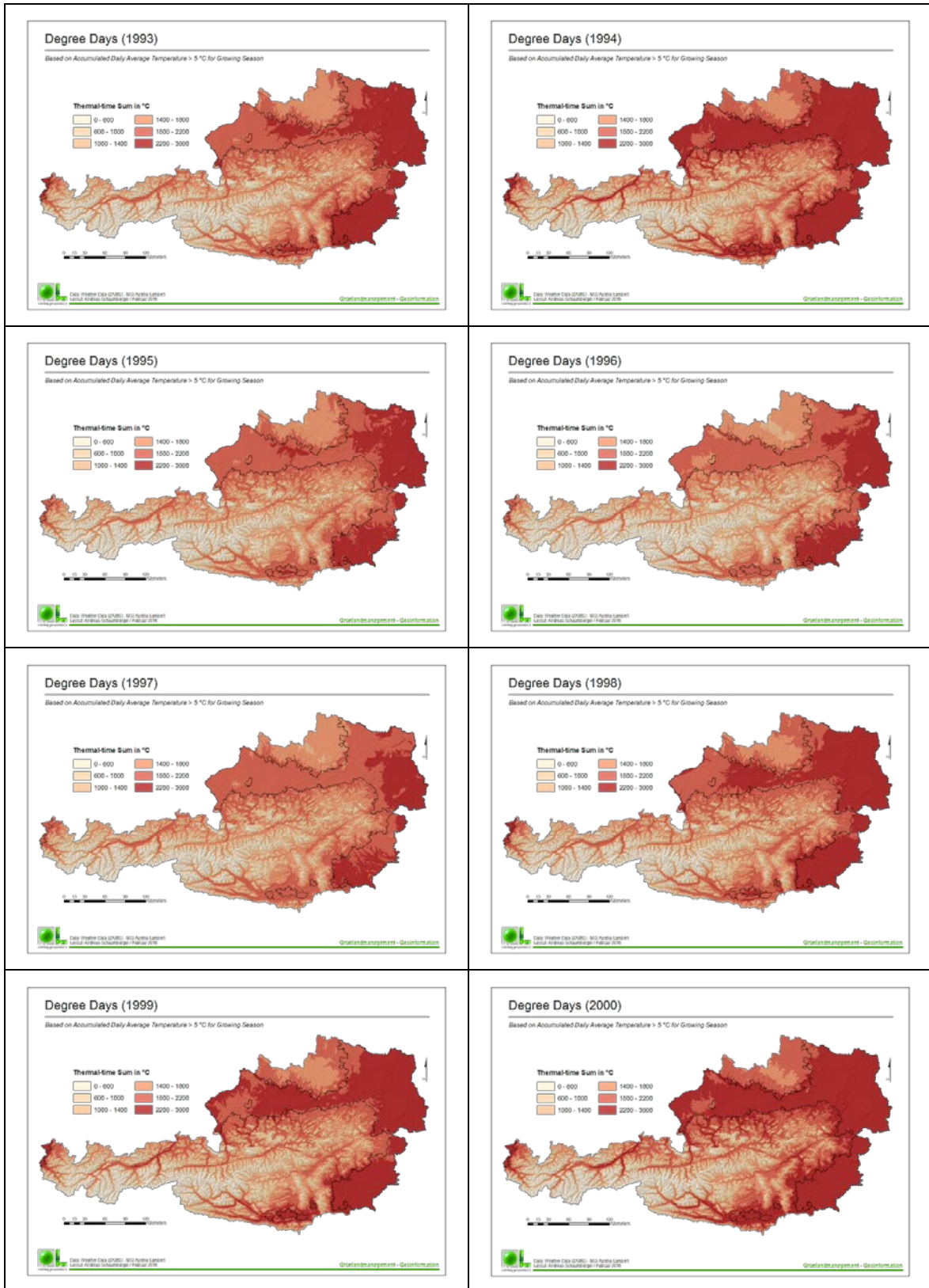
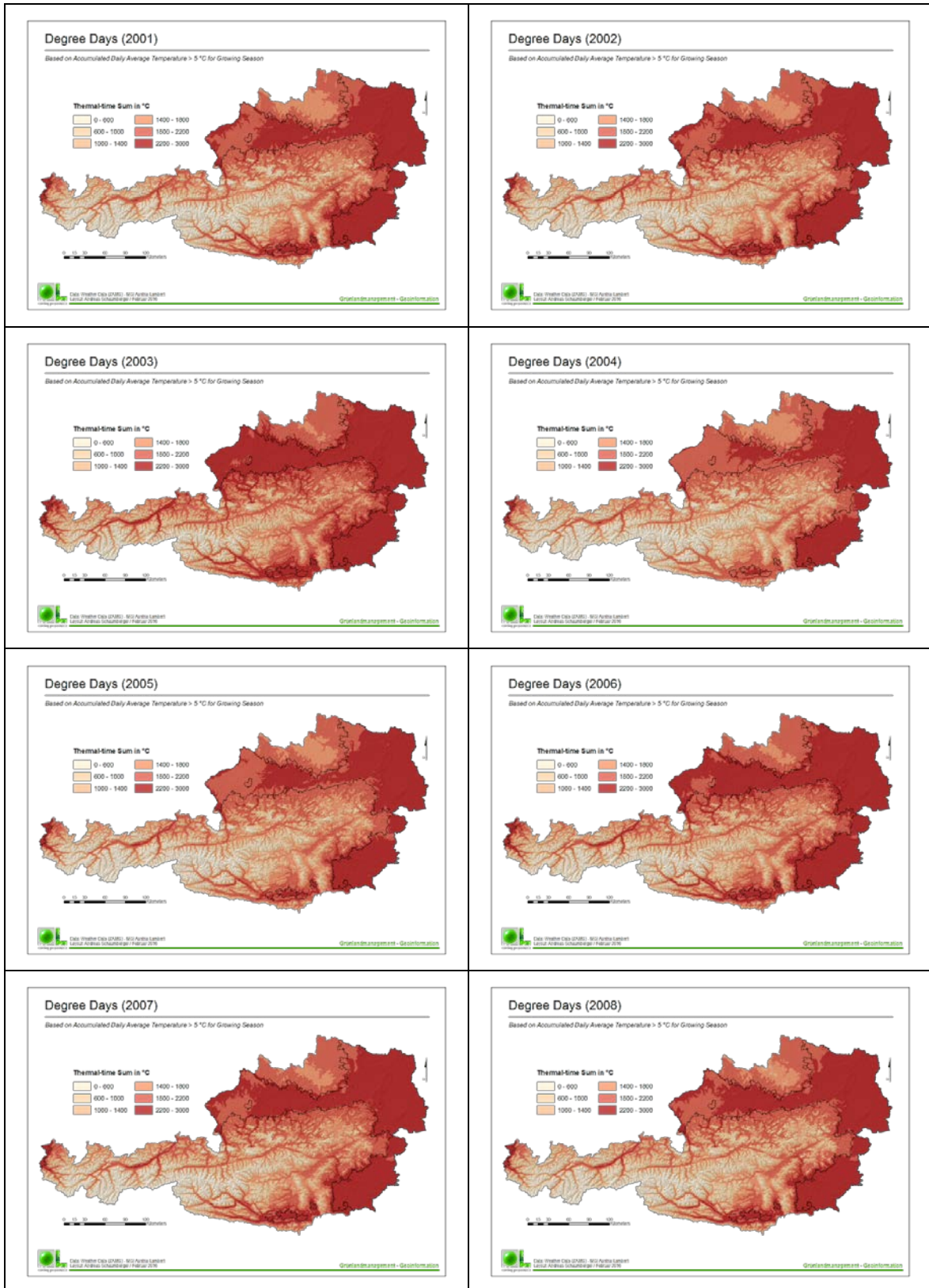


Abbildung 41: Anzahl an Tagen in der Vegetationsperiode mit > 5 °C Tagesmitteltemperatur









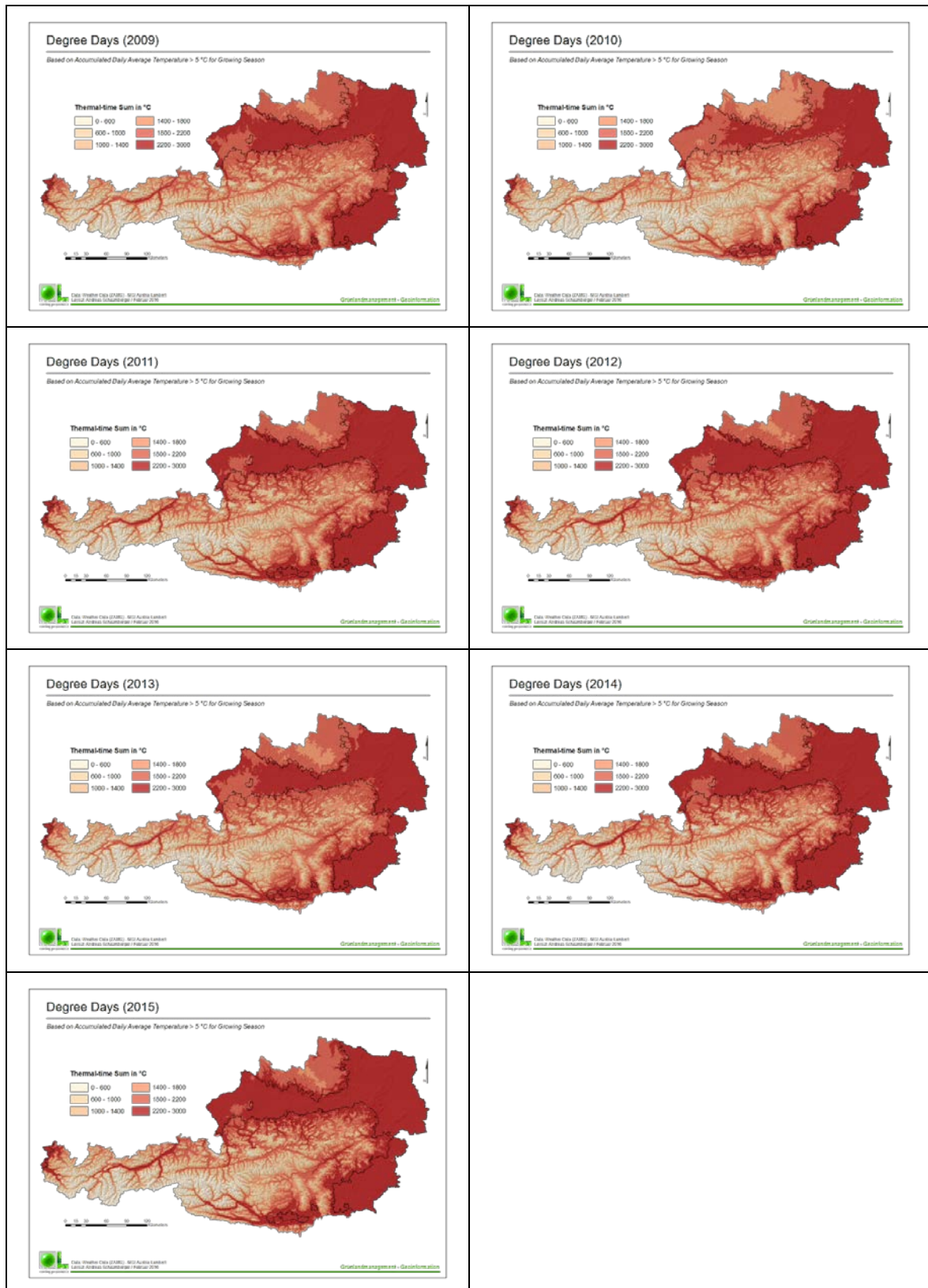


Abbildung 42: Temperatursumme in der Vegetationsperiode (Grad-Tage mit > 5 °C Tagesmitteltemperatur)

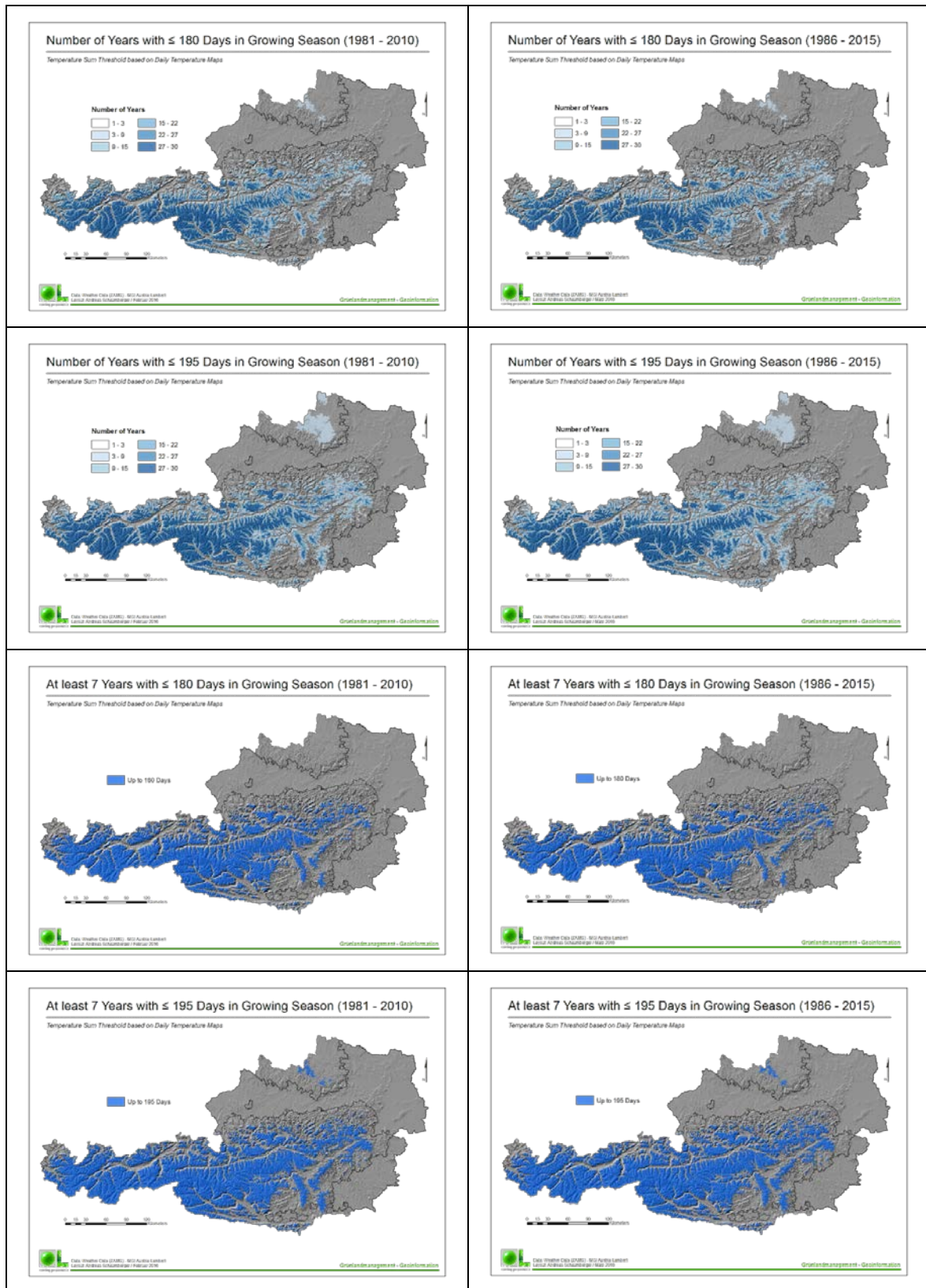


Abbildung 43: Kriterium „Low Temperature“ für die Dauer der Vegetationsperiode

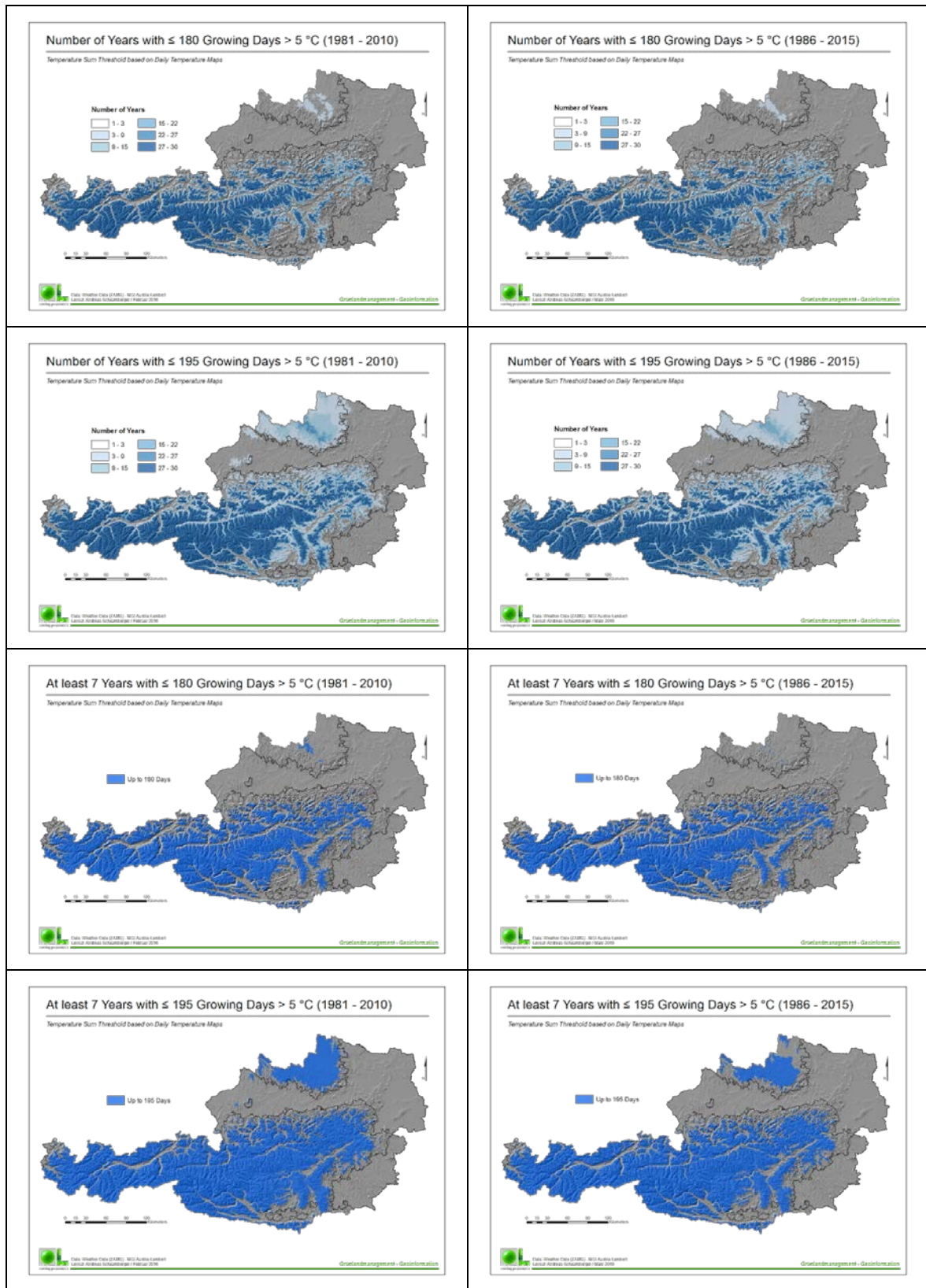


Abbildung 44: Kriterium „Low Temperature“ für Anzahl an Tagen mit $> 5^\circ\text{C}$ innerhalb der Vegetationsperiode

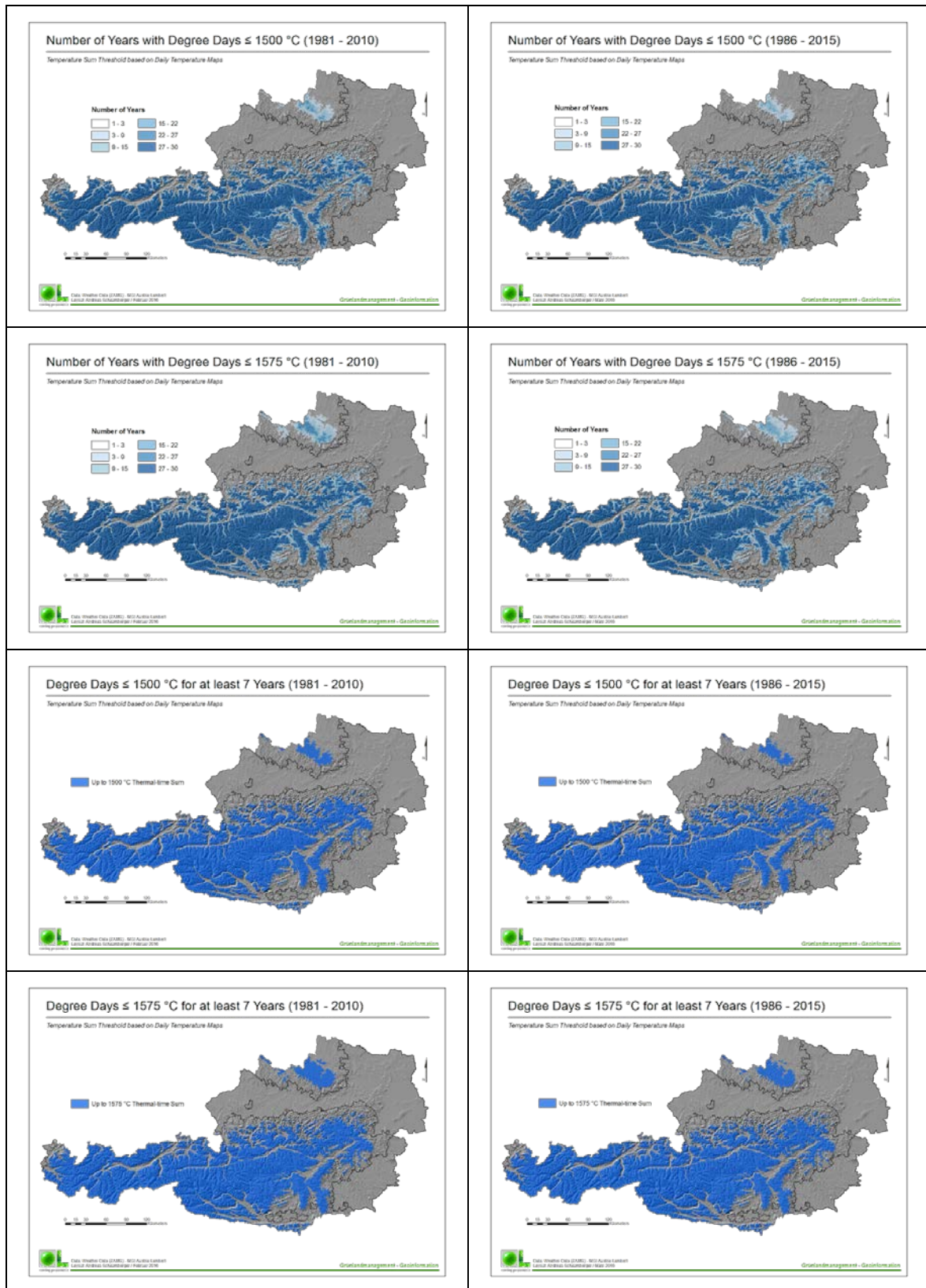


Abbildung 45: Kriterium „Low Temperature“ für die Temperatursumme innerhalb der Vegetationsperiode

3.4.3 Zusammenfassung

Das Kriterium „Low Temperature“ kann aufgrund der in den Abbildungen 6 bis 8 dargestellten Karten für den 30-jährigen Untersuchungszeitraum von 1986 bis 2015 für die potenziell abzugrenzenden Gebiete nicht zur Anwendung gebracht werden. Lediglich in großen Teilen des Berggebietes werden die Schwellenwerte dieses Kriterium erfüllt.

3.5 Biophysikalisches Kriterium „Dryness“

3.5.1 Interpolation des Niederschlags

Für die räumliche Interpolation des Niederschlags werden in der vorliegenden Arbeit Beobachtungen der ZAMG (1981-2015) und des HZB (1981-2011) kombiniert. Die Verwendung beider Datenquellen führt zu einer signifikanten Verdichtung der Interpolationsstützstellen. Am Beispiel der Daten für den 15. April 2000 soll dies demonstriert werden. Hier beträgt die mittlere Nachbarschaftsdistanz von 258 ZAMG-Messstationen knapp 10 km. Werden die 943 Niederschlagsmessstellen des HZB hinzugenommen, reduziert sich die mittlere Distanz bei insgesamt 1201 Stationen auf 4,7 km. In der vorliegenden Arbeit wird eine einfache geostatistische Interpolation mit Ordinary Kriging ohne Zusatzinformation durchgeführt. Im Gegensatz zu klimatologischen Niederschlagsoberflächen bzw. Jahres- und Monatssummen, die definitiv eine Höhenabhängigkeit aufweisen, ist dies bei täglichen Niederschlägen selten der Fall (Niederberger, 2000, 49ff) und wird deshalb auch nicht berücksichtigt.

3.5.2 Berechnung und Interpolation der Referenz-Evapotranspiration

Die Referenz-Evapotranspiration wird nach FAO-Penman-Monteith stationsbezogen und auf Tagesbasis errechnet. Grundlage für die Interpolation bilden die Daten der Wetterstationen der ZAMG. Sie sind zufällig verteilt und weisen eine mittlere Nachbarschaftsdistanz von 10 km auf.

Die Gleichungen wurden gemäß den Vorgaben des JRC den Empfehlungen der FAO (Allen *et al.*, 1998) entnommen. Die FAO-Penman-Monteith-Formel wird bei Verfügbarkeit der notwendigen Wetterdaten auf Tagesbasis angewandt und hat die Form

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot vpd}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)},$$

wobei ET_0 die Referenz-Evapotranspiration der definierten Grasoberfläche [mm d^{-1}] darstellt, R_n die Strahlungsbilanz an der Referenzoberfläche [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$], G die Bodenwärmestromdichte [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$], welche hier aufgrund der im Vergleich zu R_n geringen Größe vernachlässigt wird, T die Lufttemperatur in 2 m Höhe [$^{\circ}\text{C}$], u_2 die Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe [m s^{-1}], vpd das Sättigungsdefizit [kPa], Δ die Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$] und γ die Psychrometerkonstante [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$].

Im Gegensatz zur Interpolation von Temperaturdaten basiert die räumliche Modellierung der Referenz-Evapotranspiration nicht auf einem direkt an einer Messstation beobachteten Einzelwert, sondern es handelt sich um das Ergebnis der Berechnung mehrerer daran beteiligter meteorologischer Parameter. Die Referenz-Evapotranspiration wird somit aus den

Beobachtungsdaten einer Messstation nach FAO-Penman-Monteith berechnet und anschließend interpoliert.

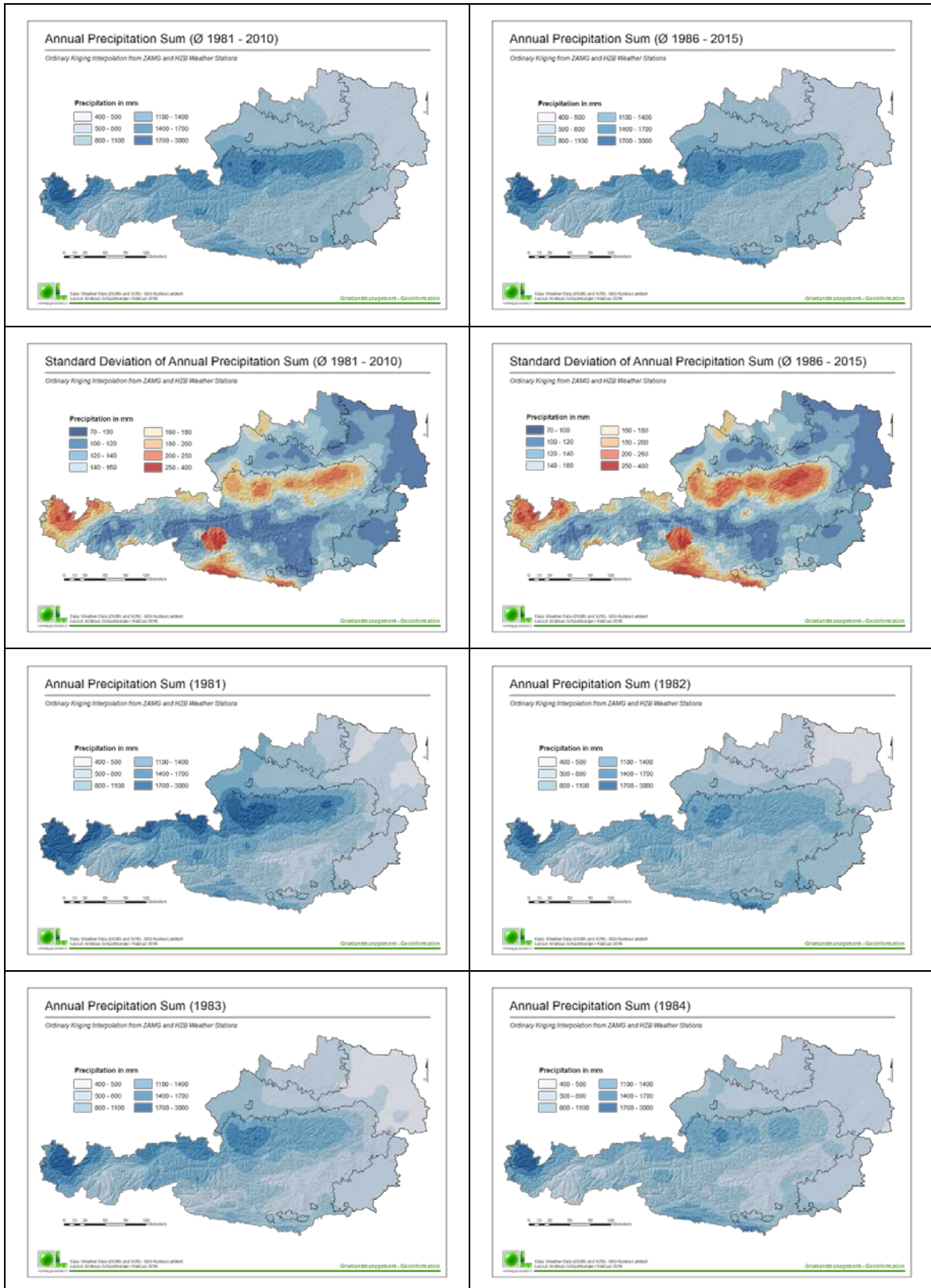
Die wichtigste Voraussetzung für eine Anwendung der Penman-Monteith-Gleichung ist die vollständige Verfügbarkeit der Einzelparameter an möglichst vielen Messstationen, um daraus ein dichtes Netz an Interpolationsstützstellen zu schaffen. Der Schätzung fehlender Parameter kommt demnach eine große Bedeutung zu. Fehlen einzelne Beobachtungsdaten (zum Beispiel die Globalstrahlung) können Schätzverfahren, wie sie in Schaumberger (2011) diskutiert werden, verwendet werden, um das Interpolationsstützstellennetz dennoch so dicht wie möglich zu halten. Nach der Berechnung der Referenz-Evapotranspiration an den Wetterstationen werden die Ergebnisse auf gleiche Weise wie die Temperatur interpoliert. Wie dort bereits beschrieben, wird mit Hilfe der Georegression die Höhenabhängigkeit der Evapotranspiration dazu genutzt, die Monatsmittelwerte mit einem DHM in die Fläche zu interpolieren und anschließend mit einer Interpolation der täglichen Residuen (Ordinary Kriging) zu verfeinern.

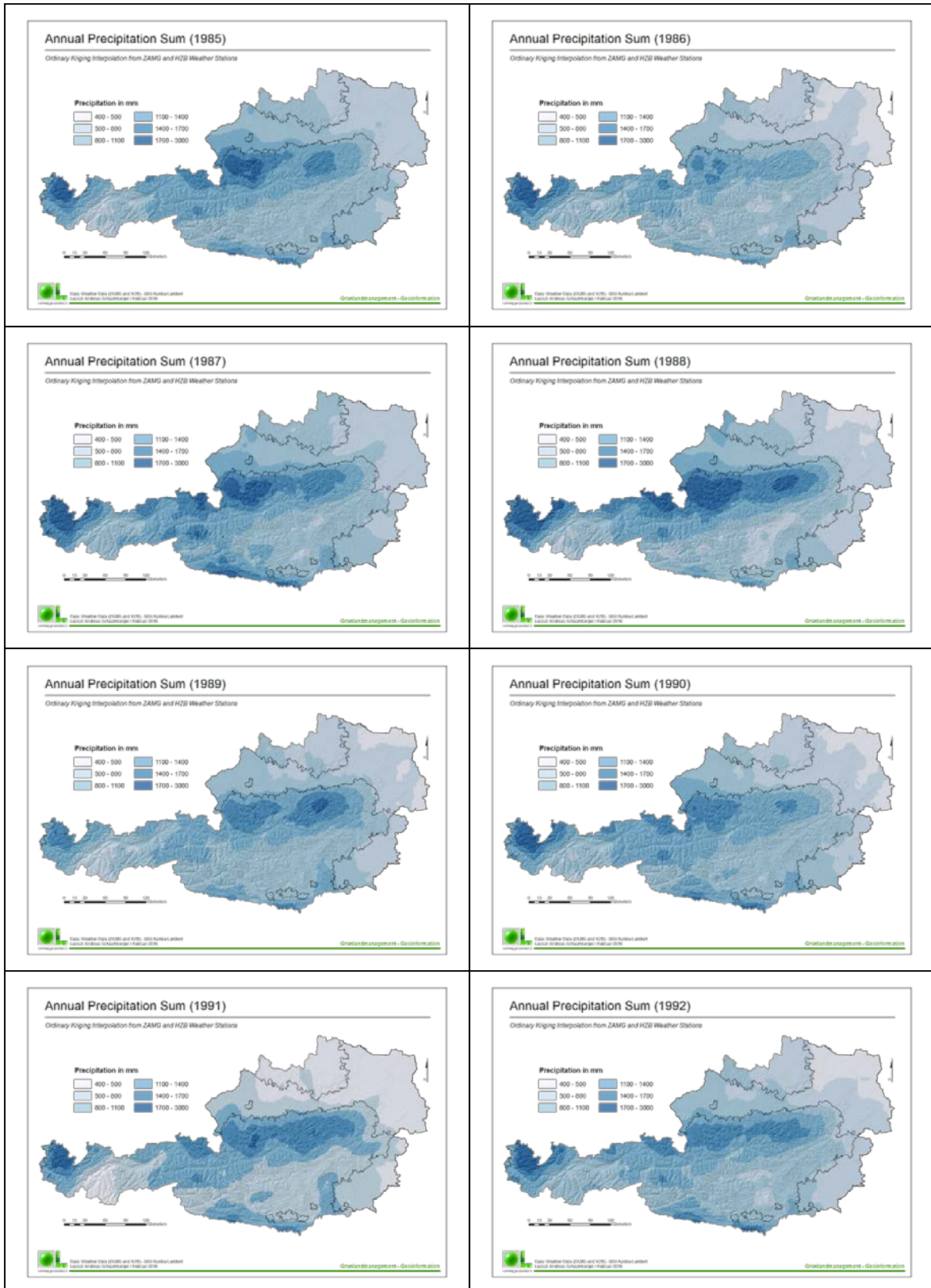
Die Evapotranspiration wird neben ihrer Höhenabhängigkeit in der Vegetationsperiode auch von unterschiedlichen Ausprägungen der Exposition und der Hangneigung beeinflusst. Strahlung und Temperatur sind maßgebliche Faktoren für die Evapotranspiration. Daraus ergibt sich zum einen die Berücksichtigung der temperaturbedingten Höhenabhängigkeit und zum anderen die Einbeziehung des strahlungsrelevanten Hangklimas. Die Seehöhe wird durch die Interpolationsmethode *Residual Kriging* berücksichtigt. Eine zusätzliche Anpassung hinsichtlich hangklimatischer Aspekte wird durch einen in Schaumberger (2011) entwickelten Globalstrahlungsfaktor realisiert und trägt letztendlich zu einer genaueren Bestimmung der Verdunstung bei, welche vor allem bei trockenen Bedingungen eine Differenzierung zwischen süd- und nordexponierten Hängen erfordert. Sämtliche Berechnungsschritte sind in Schaumberger (2011) ausführlich beschrieben.

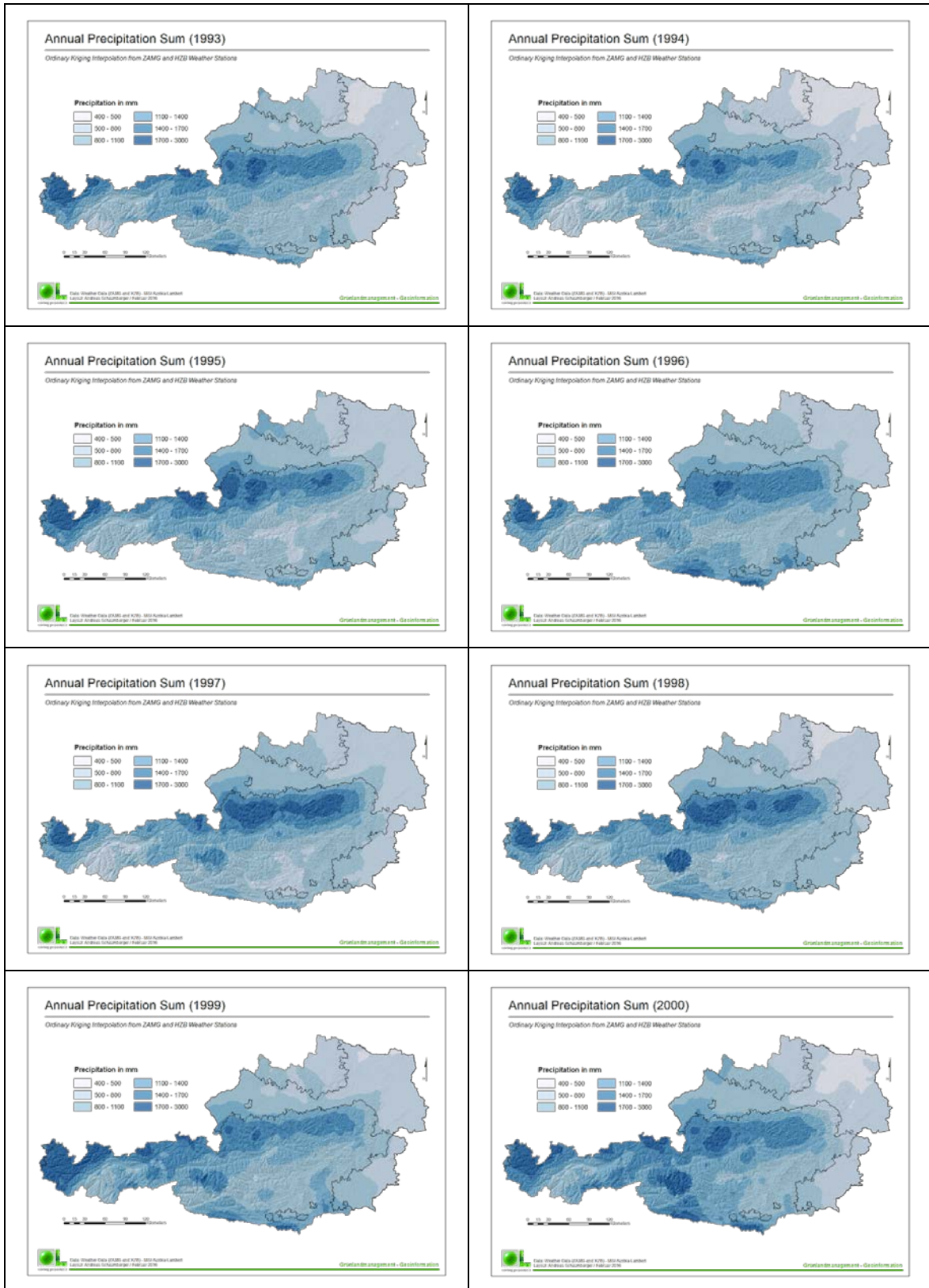
3.5.3 Aridity Index und Auswertung

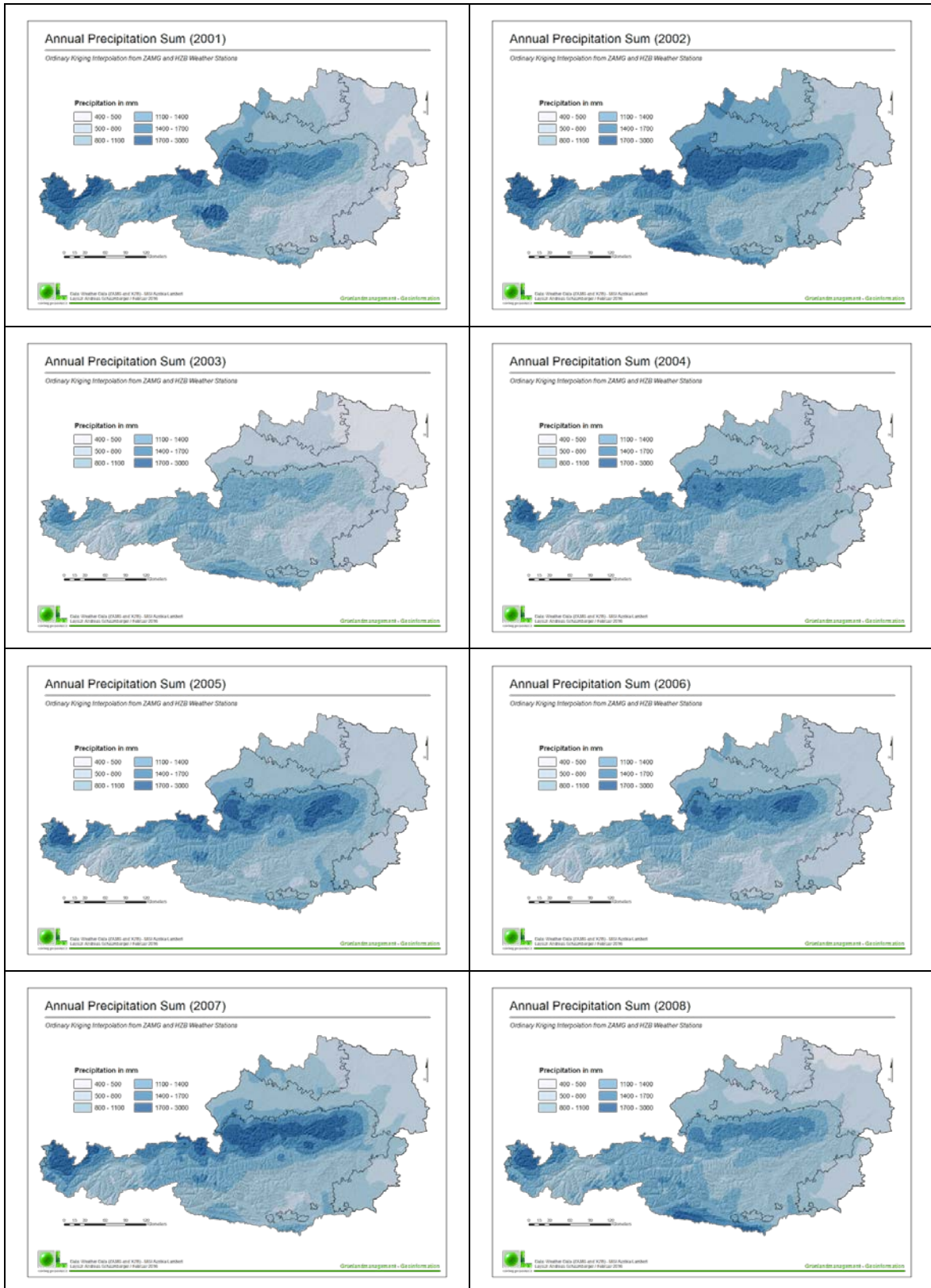
Die Basis für das Kriterium „Dryness“ bildet der UNEP-Aridity-Index (AI), welcher gemäß den Vorgaben des JRC aus der Relation von Jahresniederschlag zu Jahres-Referenz-Evapotranspiration berechnet wird. Die täglichen Ergebniskarten von Niederschlag und Verdunstung werden zu Jahressummen aggregiert und anschließend kombiniert. Aus den vom JRC festgesetzten Schwellenwerten wird die Trockenheit als AI von $\leq 0,5$ bzw. $\leq 0,6$ bestimmt.

In den nachfolgenden Abbildungen sind Niederschläge und Verdunstungswerte wieder in Einzeljahren dargestellt, denen jeweils eine Mittelwertbildung über die Untersuchungszeiträume sowie deren Standardabweichungen vorangestellt sind. In Abbildung 12 sind die Abgrenzungsergebnisse des AI dargestellt. Die Häufigkeit an Jahren, in denen das Schwellenwertkriterium erfüllt wurde, wird als Karte ausgegeben und zusätzlich noch mit dem Endergebnis erweitert, bei dem jene Gebiete dargestellt werden, in denen in mindestens 20 % der Jahre (≥ 7) eine Trockenheit gemäß AI-Definition festgestellt wurde.









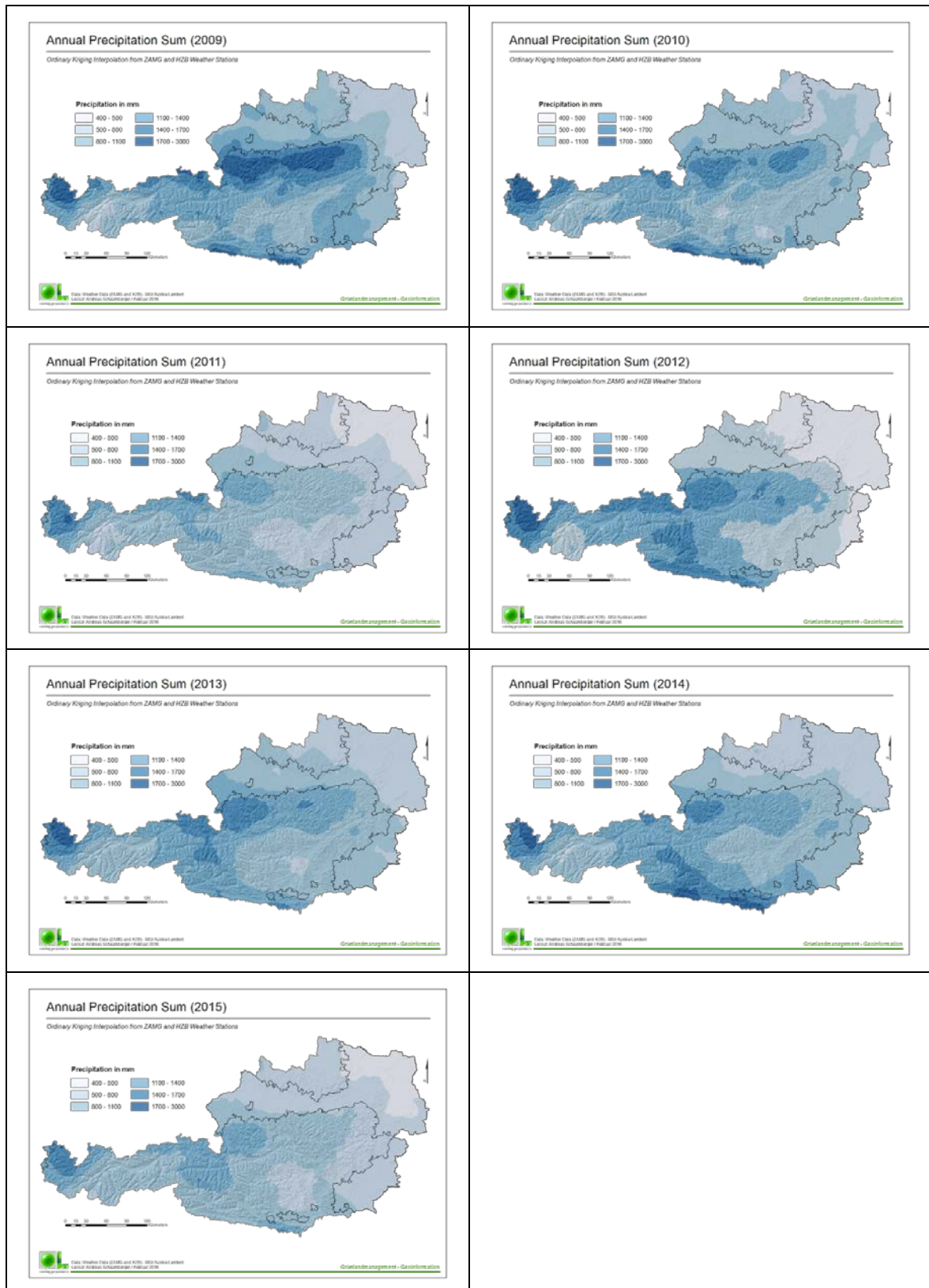
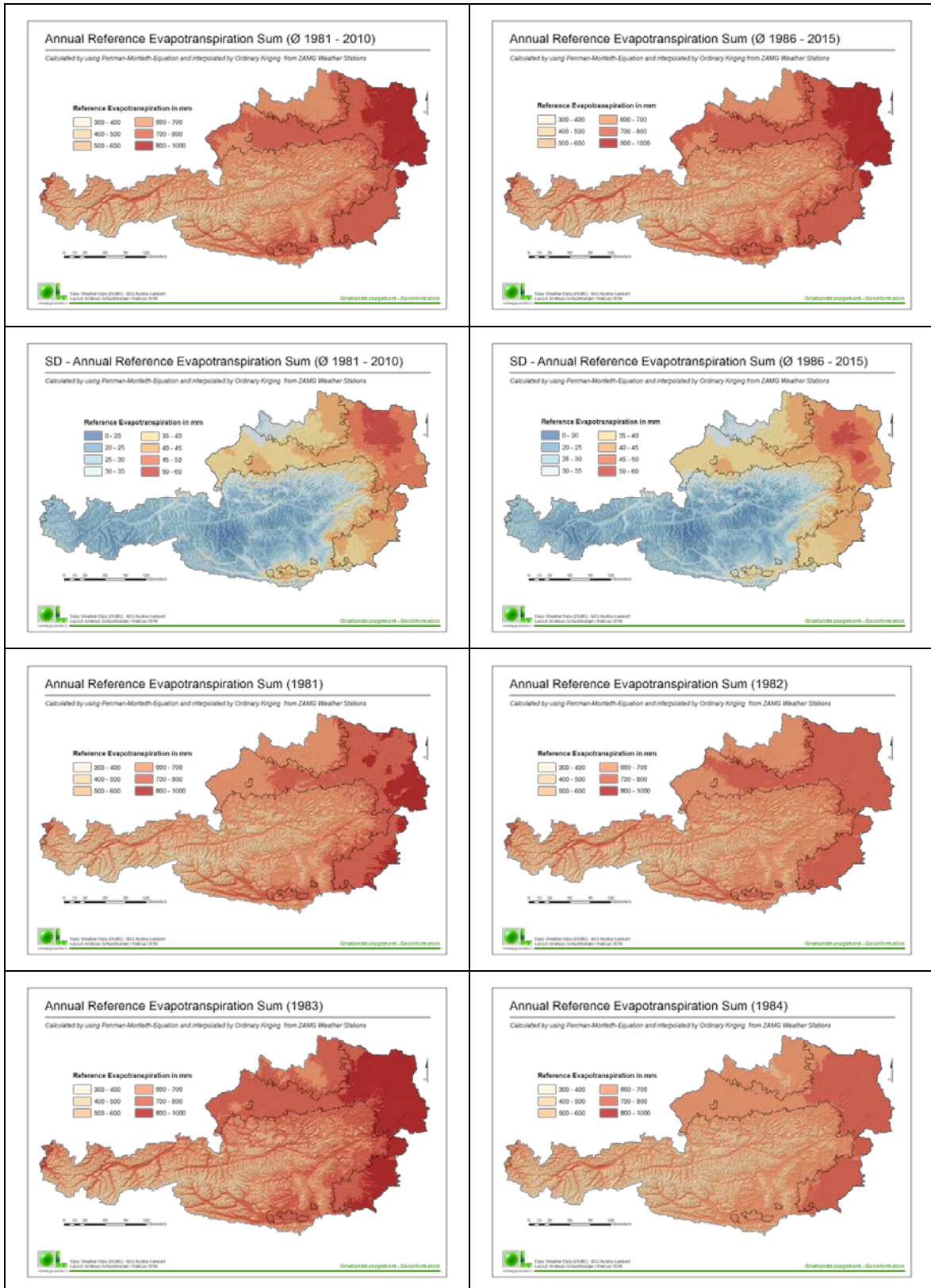
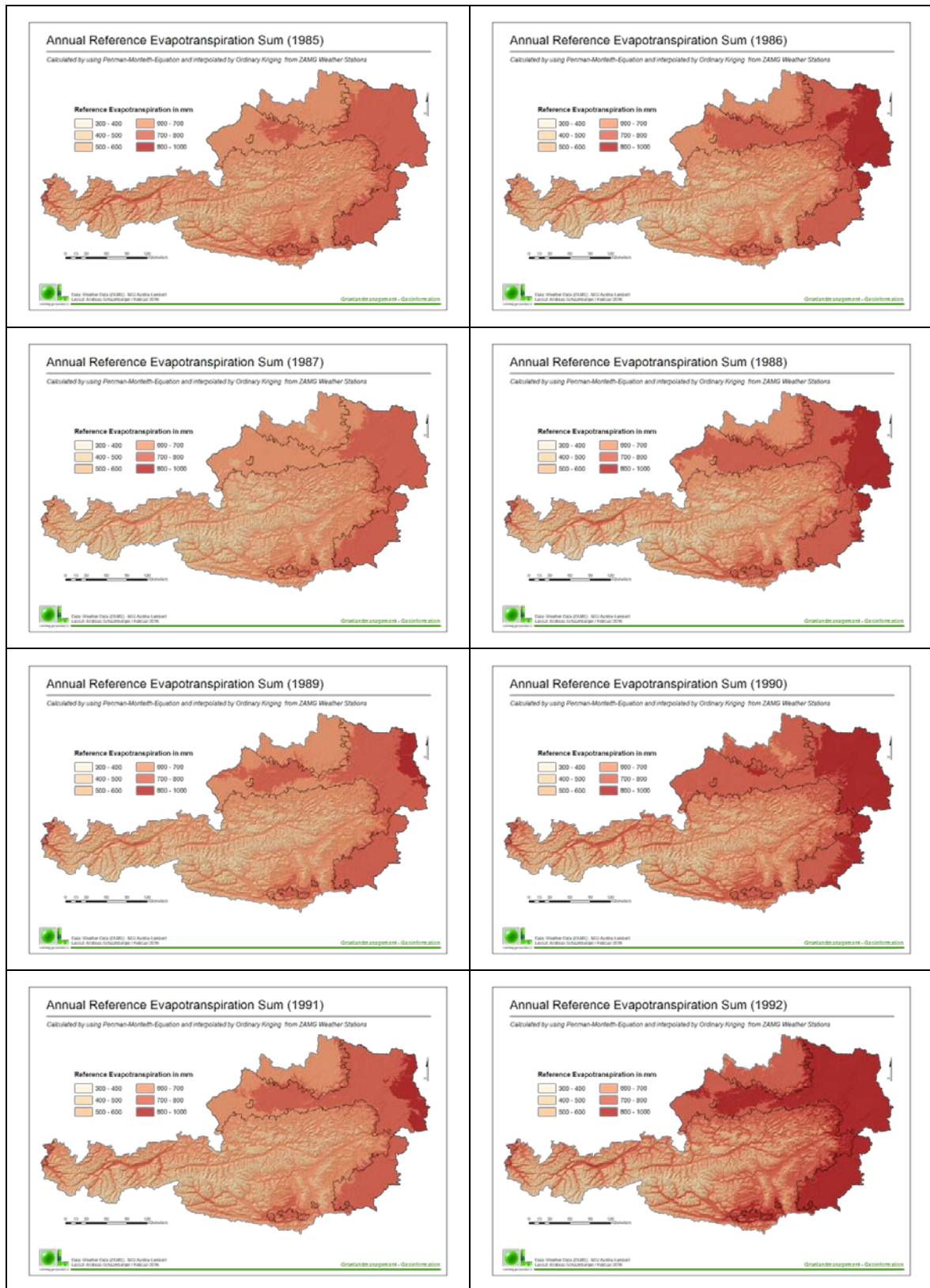
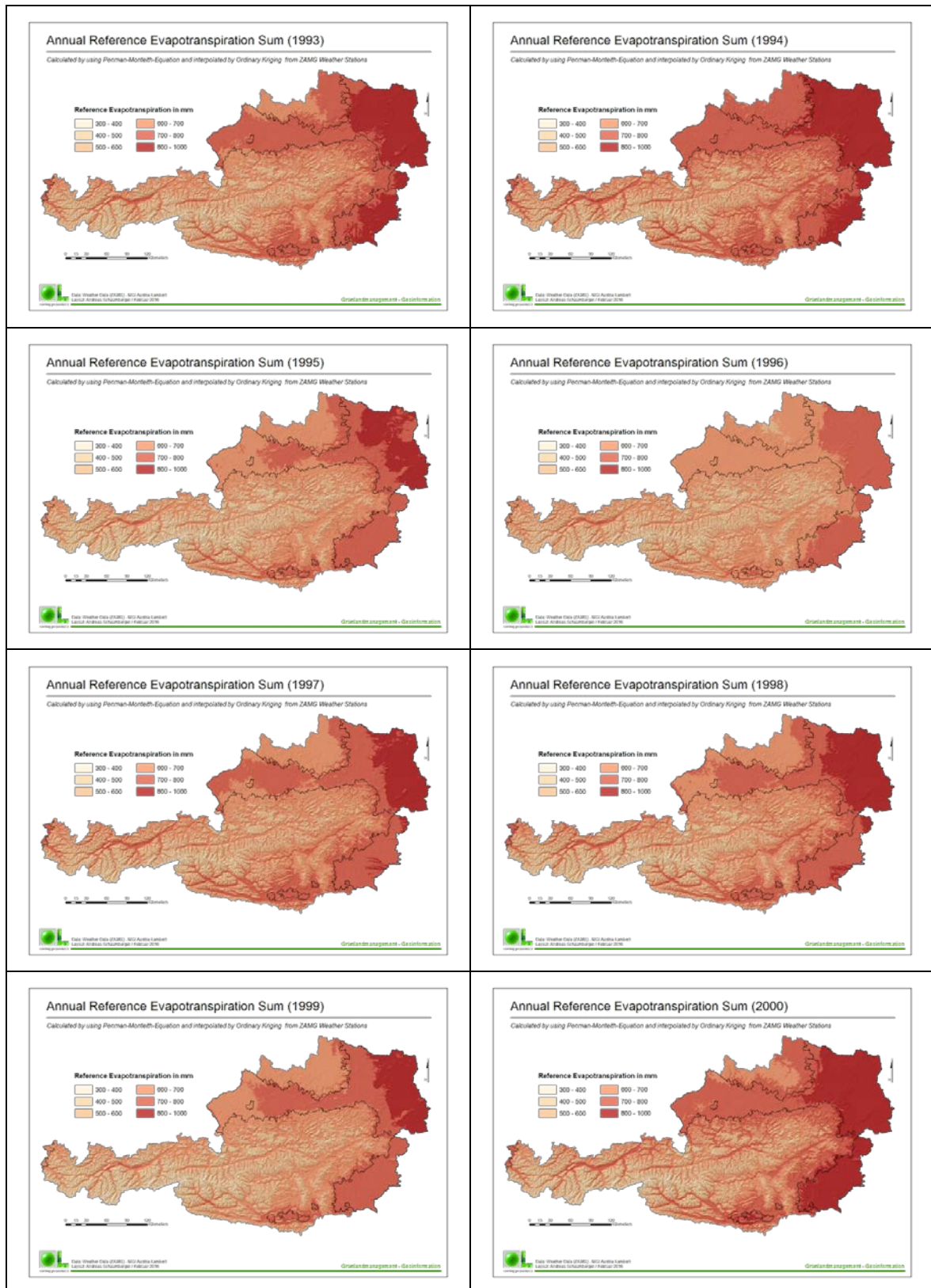
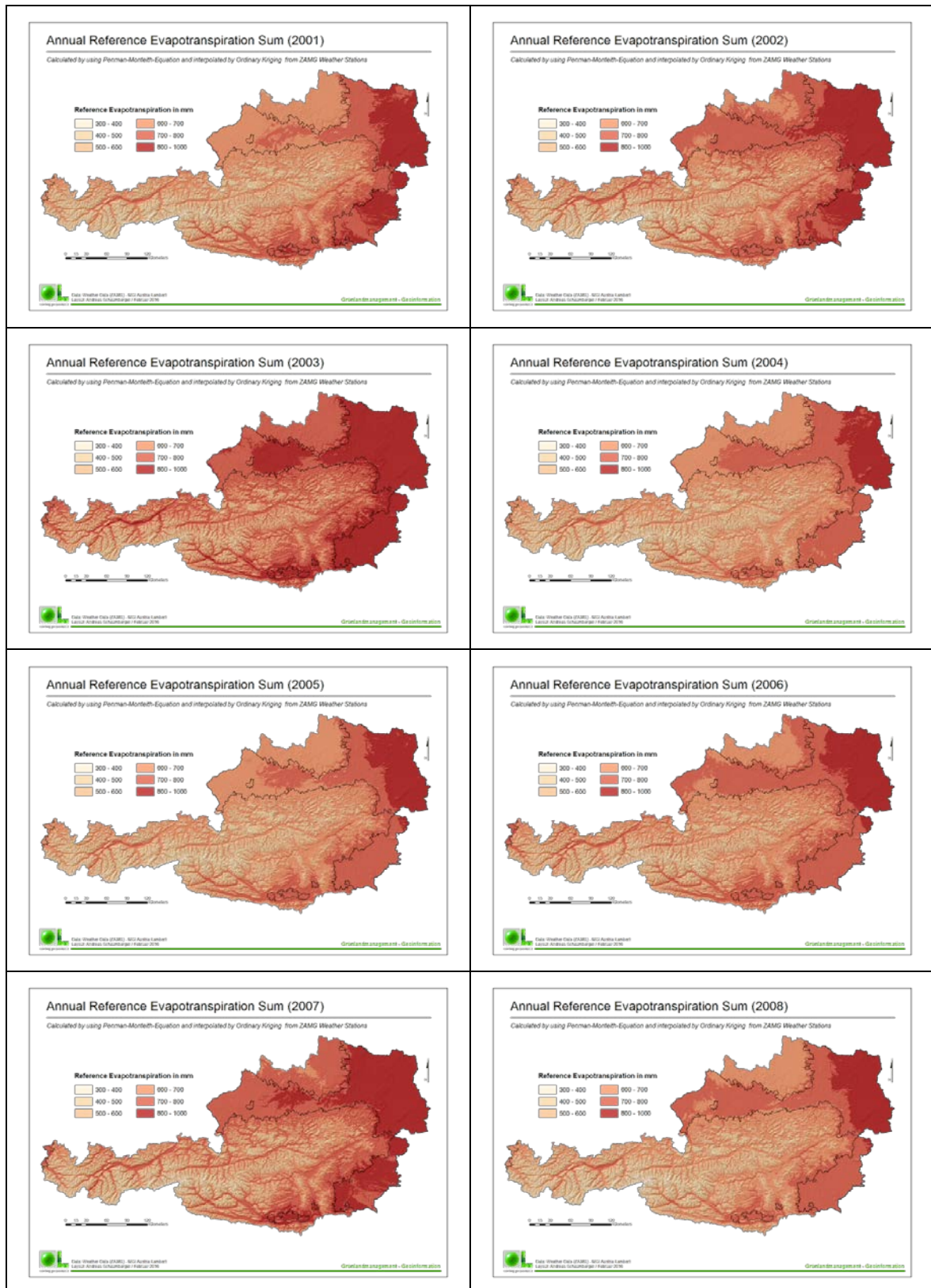


Abbildung 46: Jährliche Niederschlagssumme









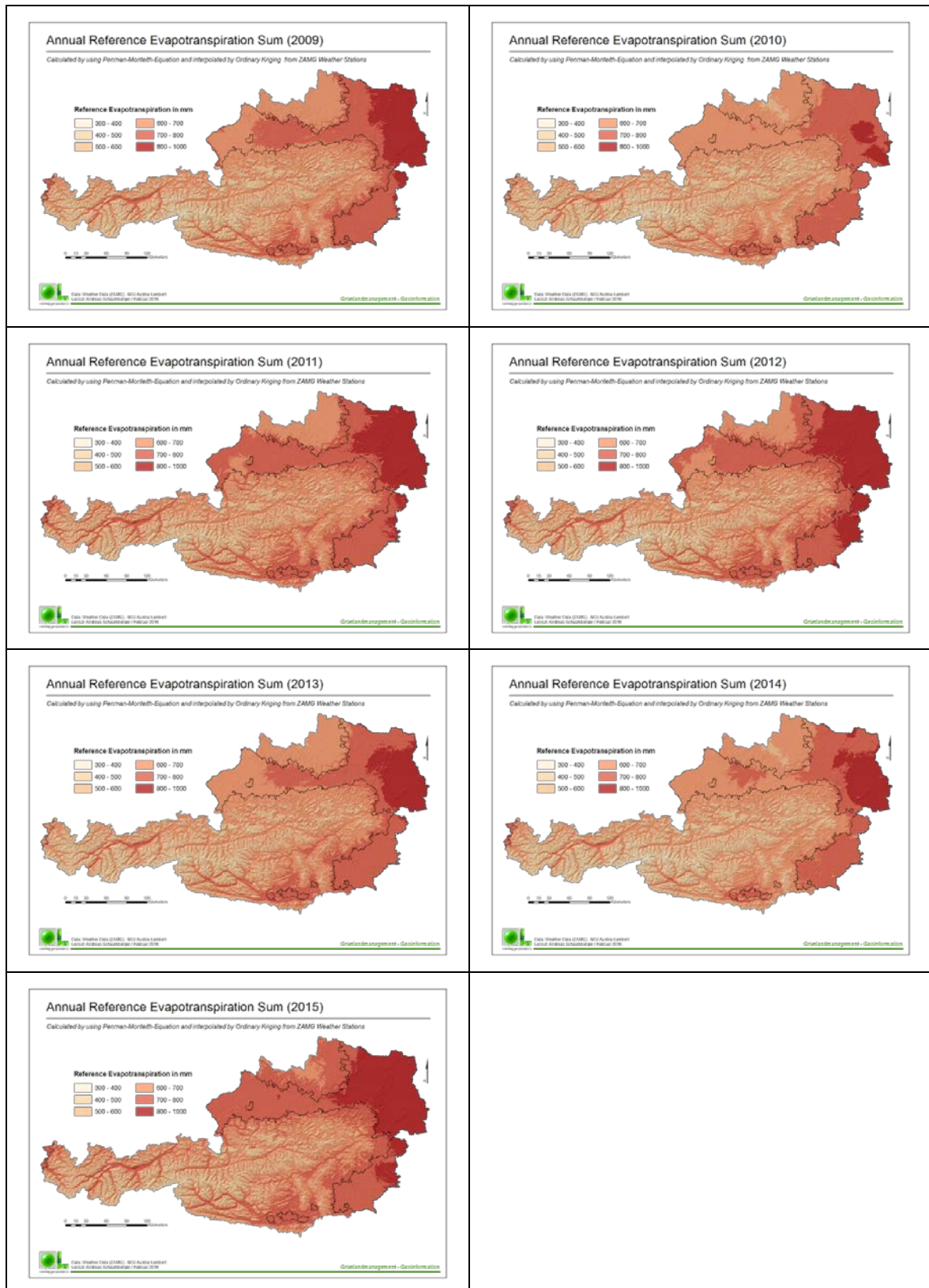
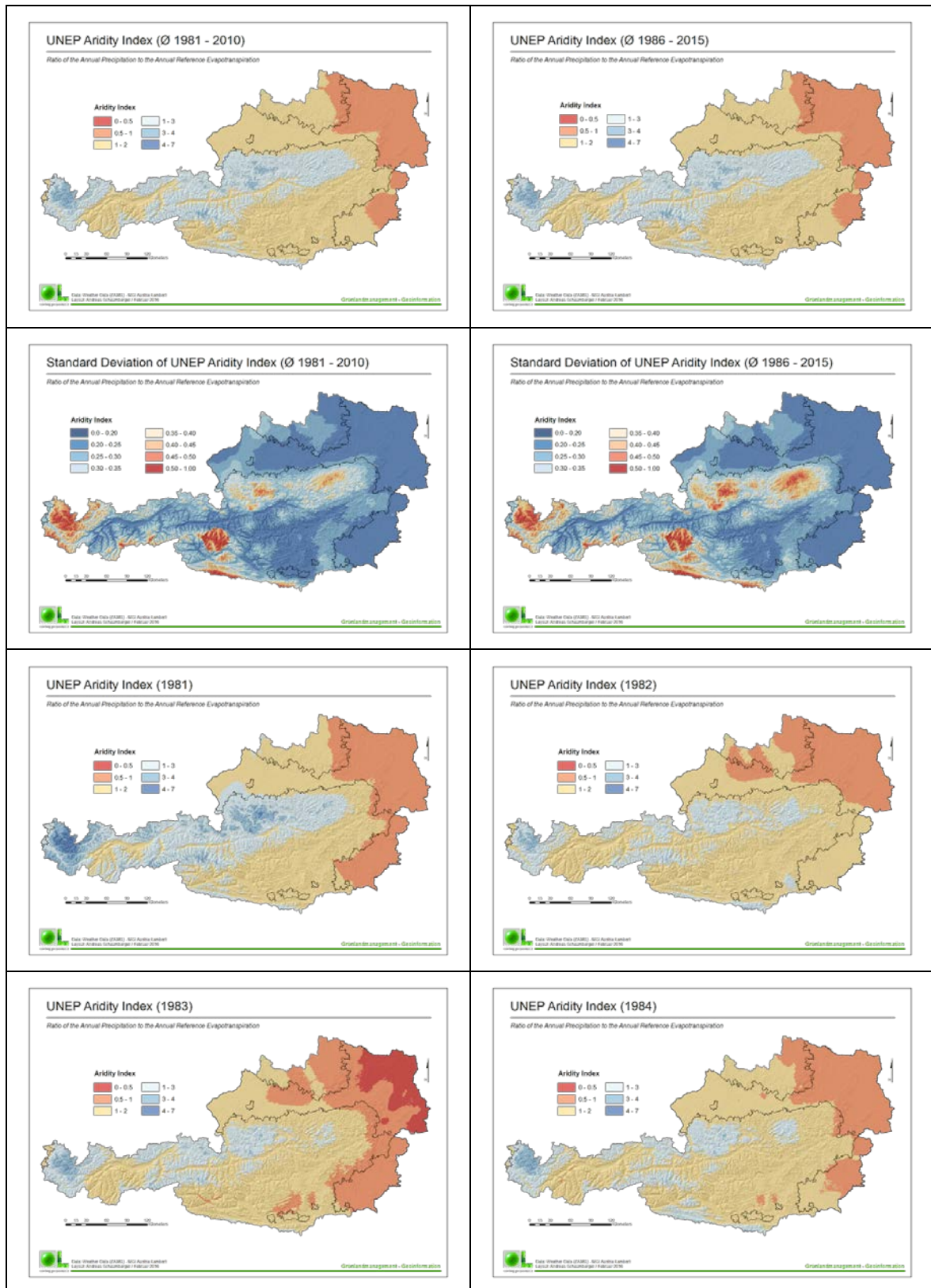
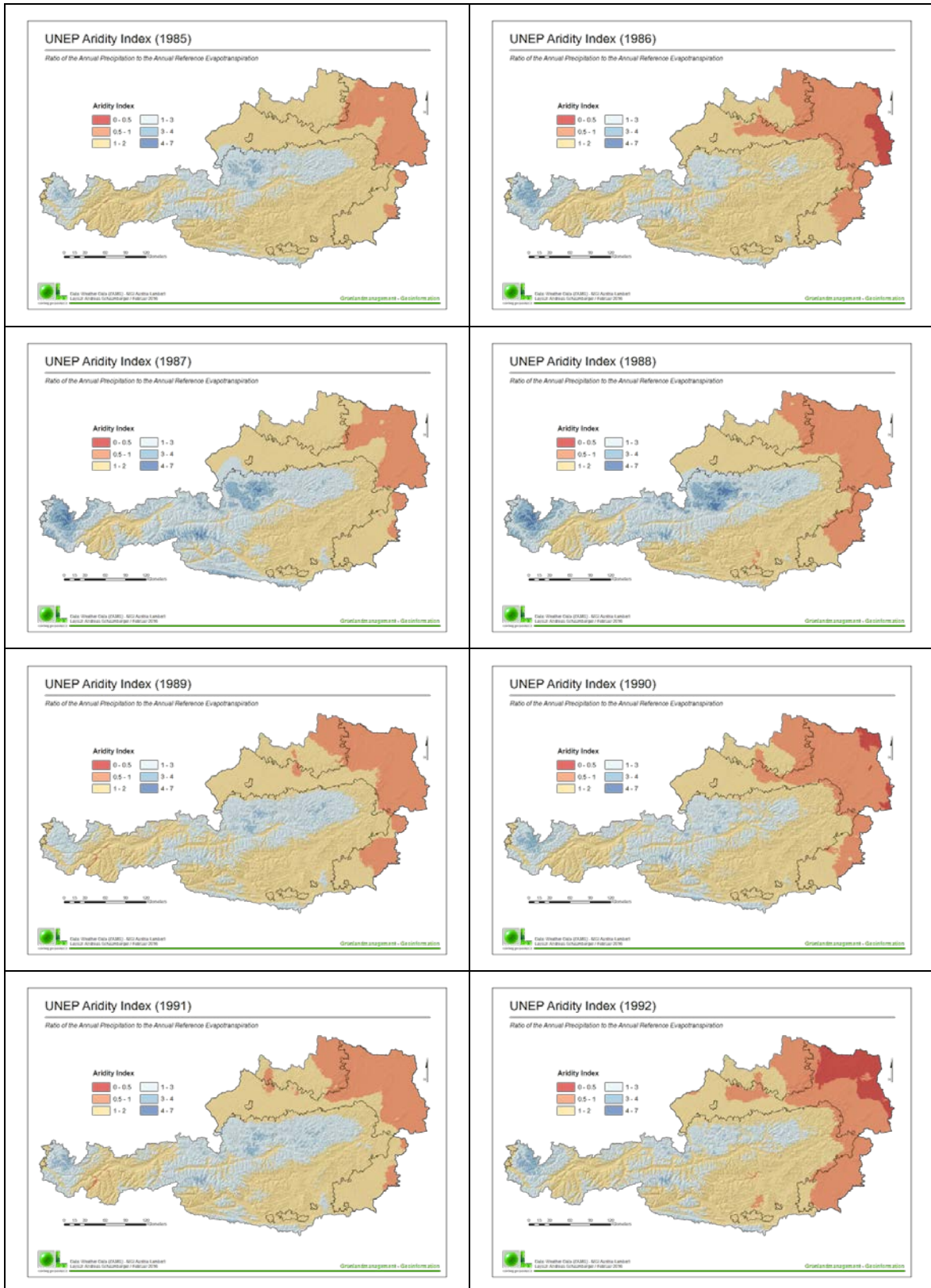
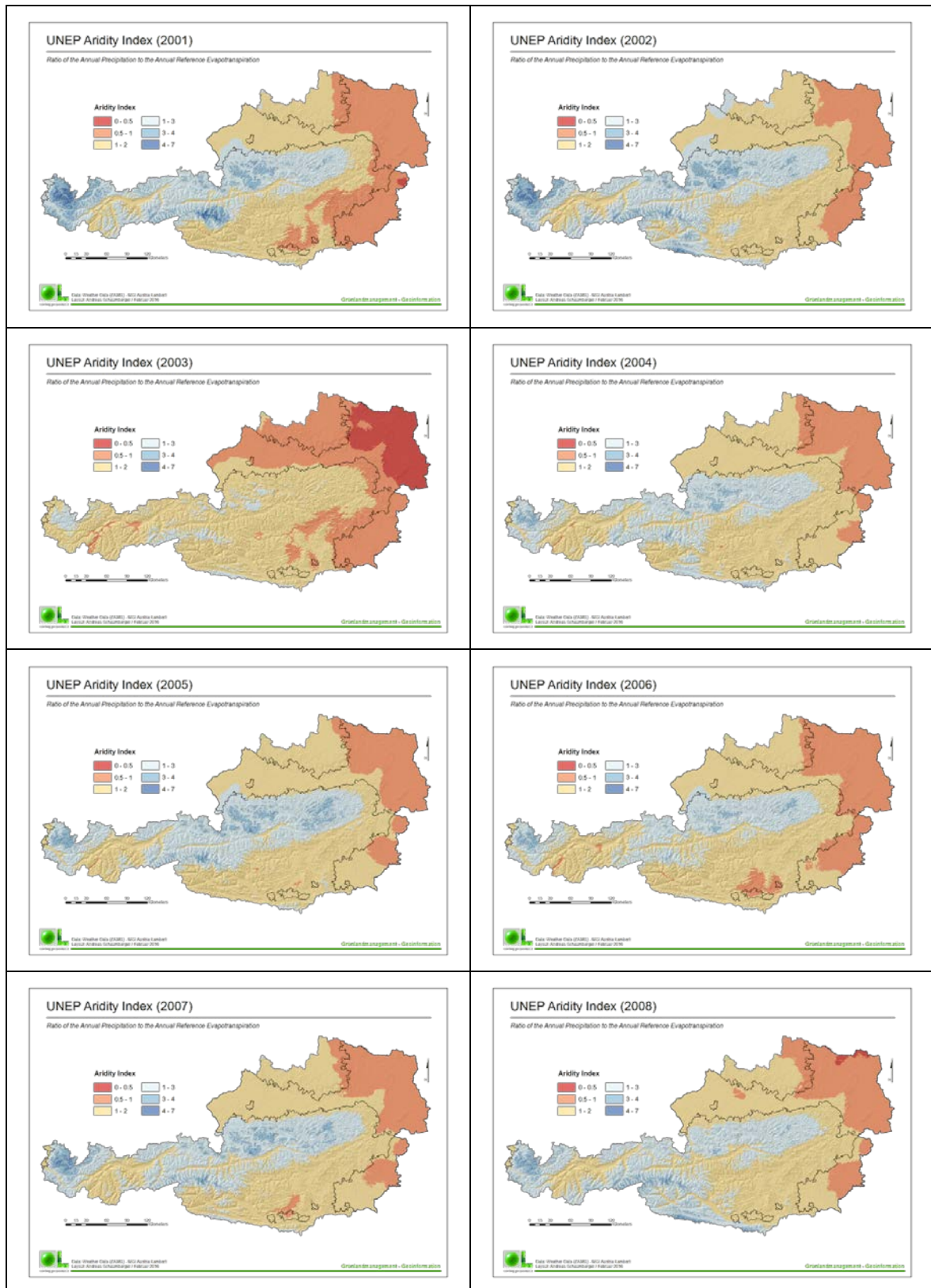


Abbildung 47: Jährliche Summe der Referenz-Evapotranspiration







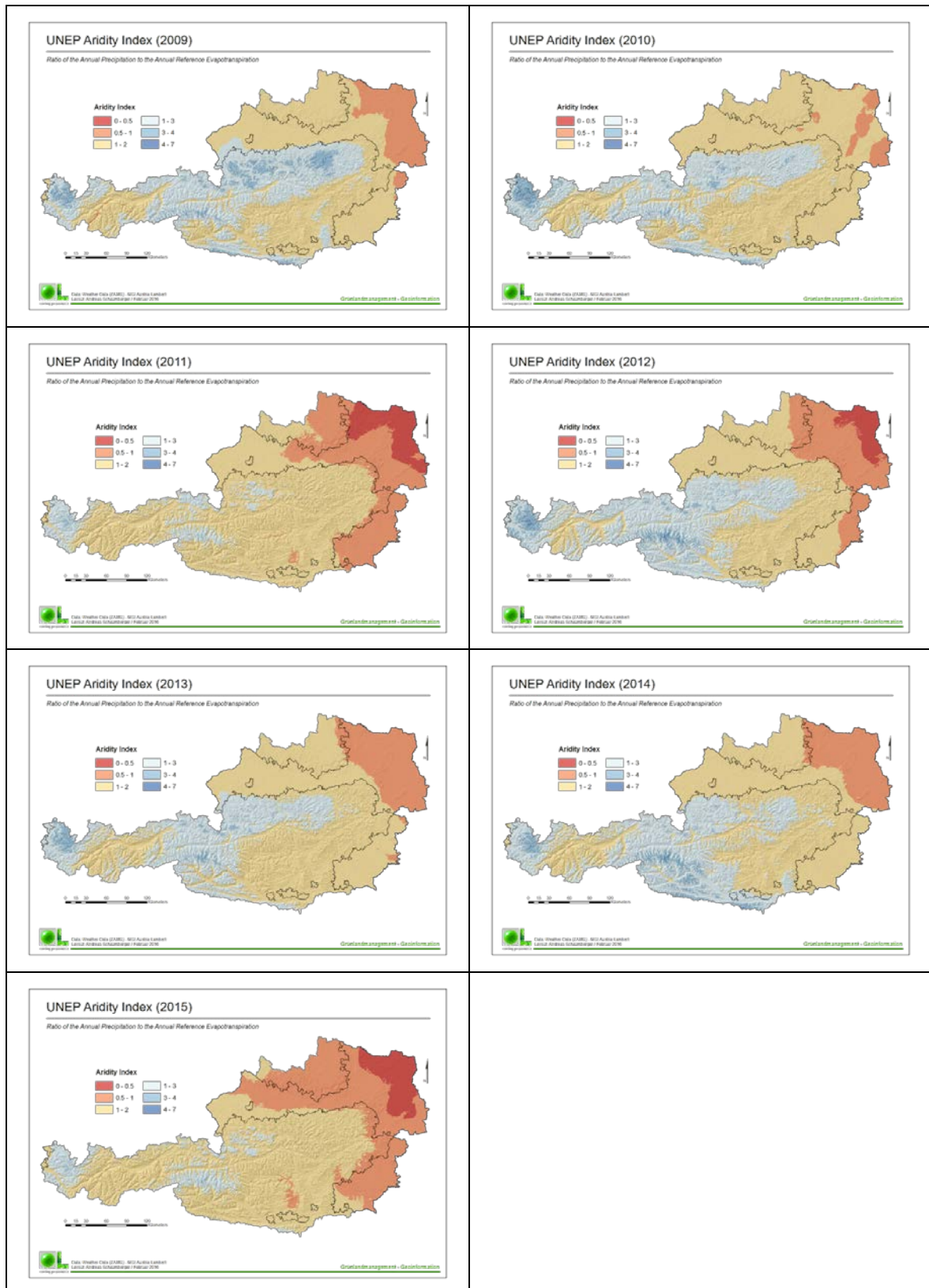


Abbildung 48: Aridity Index (Relation von Jahresniederschlagssumme zu Evapotranspirationssumme)

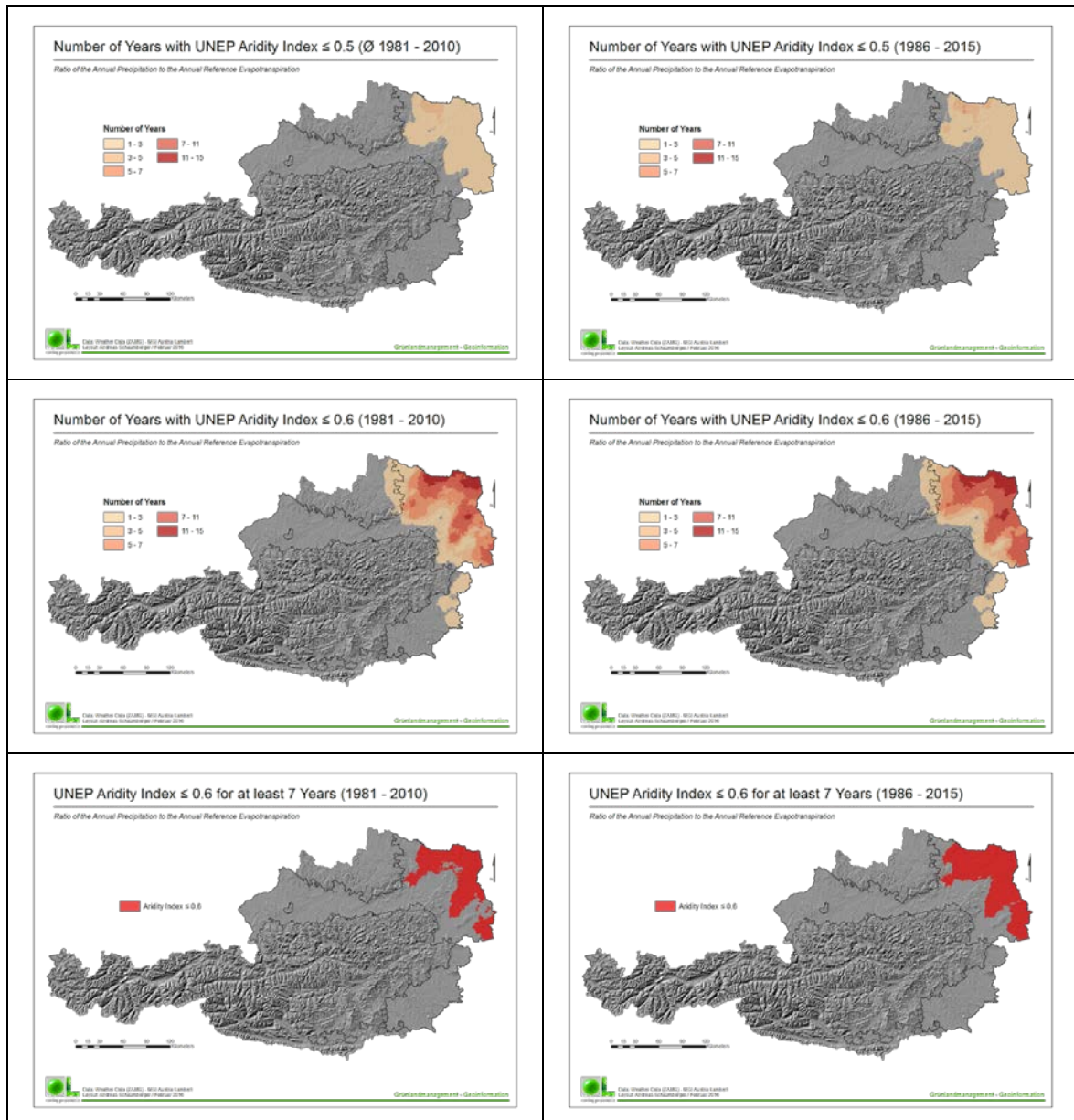


Abbildung 49: Kriterium „Dryness“ auf Basis des UNEP Aridity Index

3.5.4 Zusammenfassung

Der UNEP-Aridity-Index mit einem Schwellenwert von 0,5 tritt in Österreich so selten auf, dass damit die vom JRC gesetzte Mindestanzahl von 7 Jahren (20 % der 30-jährigen Untersuchungsperiode) nicht erreicht wird. Bei dem AI-Schwellenwert von 0,6 für Kriterienkombinationen ergibt sich für den Zeitraum 1986 bis 2015 die in *Abbildung 49* dargestellte Region im Nordosten als abzugrenzendes Gebiet.

Das ist auch gleichzeitig das einzige Gebiet, für das zumindest bei den etwas höher angesetzten Schwellenwerten zur Kombination verschiedener biophysikalischer Kriterien ein positives Ergebnis im Sinne der Ausweisung einer Abgrenzungsfläche auftritt.

3.6 Literatur

- Childs, C. (2004): Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst. ArcUser (July-September 2004), ESRI Press, Redlands, CA, USA, 32-35.
- Niederberger, J. (2000): Räumliche Interpolation von Niederschlag und Klimadaten. Diplomarbeit, Albert-Ludwigs-Universität, Institut für Hydrologie, Freiburg i.Br., 125 S.
- Schaumberger, A. (2011): Räumliche Modelle zur Vegetations- und Ertragsdynamik im Wirtschaftsgrünland. Dissertation, Technische Universität Graz, Institut für Geoinformation, 264 S.
- Tveito, O.E. (2007): The Developments in Spatialization of Meteorological and Climatological Elements. In Dobesch et al. (Eds.): Spatial Interpolation for Climate Data: The Use of GIS in Climatology and Meteorology, ISTE Ltd., London, 73-86.

4 Project AgroDroughtAustria: Development of a Spatial System for Monitoring and Forecasting Crop Specific Drought and Heat Stress Parameters

4.1 Abstract

There is hardly any doubt that climate change takes place in the 21st century and that precipitation and temperature patterns are significantly changing on local, regional and global scale. Regional climate model simulations (European Environment Agency, 2013) predict a dramatic rise of mean annual temperature values and reduced annual precipitation values particularly for the summer months in Southern and Central Europe till 2100.

As a consequence of climate change there is an increased likelihood of extreme weather events like droughts. The newly developed *ADA-MFS* (Agro Drought Austria Monitoring and Forecasting System) is introduced as a prototype tool for monitoring and forecasting crop specific drought and heat stress parameters for Austria. *ADA-MFS* has been developed within the ACRP project *AgroDroughtAustria* (ADA) with the aim to develop an operational drought monitoring and forecast system, useable for Austrian agricultural conditions and stakeholders. Land use data, information about the soil, vegetation characteristics and meteorological data are used as inputs for *ADIS* (Agricultural Drought Information System) – the core component of *ADA-MFS*.

ADIS is applied to monitor and forecast reference evapotranspiration, soil water balance, relative soil saturation, drought intensity and various crop specific drought and heat stress parameters. Forecasts are based on historical and forecast meteorological data and are calculated for a short term period of 10 days and a medium term period of any number of days – presently as well 10 days.

The main results are updated every 3 days and can be published as maps with a spatial resolution of 500 meters for the whole territory of Austria on an appropriate web application.

4.2 Introduction

The major focus of work package 4 within the *AgroDroughtAustria* project is the development of a spatial model denominated *ADA-MFS* (Agro Drought Austria Monitoring and Forecasting System) for monitoring and forecasting crop specific drought and heat stress parameters. The model covers automated spatial data manipulation, processing, visualization and storage and is mainly implemented through the software package *ADIS* (Agricultural Drought Information System) as the core component.

ADIS is based on the already existing models *SpatialGRAM* (Schaumberger, 2011) and *SOILCLIM* (Hlavinka *et al.*, 2011) for crop specific drought monitoring and forecasting and was developed within the framework of the project using the integrated development environment ECLIPSE and the object-oriented programming language JAVA.

ADIS is designed to work on a Windows Server with Oracle's Java Runtime Environment (JRE) installed and functional. *ADIS* is integrated in the operable *ADA-MFS*, which addi-

tionally is composed of a *FTP* (file transfer protocol) component for the download of the meteorological input data and a web based visualisation tool.

ADIS is split up into two major components: the monitoring component that allows the computation of drought and heat stress parameters for a limited time period (1981 till the last past day of the current year) using historical meteorological data and the forecast component for a user defined forecast period using a combination of forecast and historical meteorological data.

While the monitoring component of the program is run only once for the historical years 1981 till 2015, the forecast calculations are run on a regular time basis – basically every third day due to a mean forecast computation cycle of approximately two days. In the following chapters the model will be discussed in more detail with the main focus on the program's scope, the system's design, architecture and development, the major components and the overall methodology.

4.3 Scope of *ADA-MFS (ADIS)* and system development overview

The goal of the development is the creation of an automated system capable of stable and uninterrupted file handling, creation and display via the web with minimum human interaction. The development of the new monitoring and forecasting tool *ADIS* as the main component of *ADA-MFS* includes the integration of parts of *SpatialGRAM's* and *SOILCLIM's* source code, of new models and algorithms for crop drought stress detection and of spatial now- and forecast weather data input routines.

ADIS is designed to:

- import large volume digital meteorological, land use, soil and elevation data
- compute soil water balance values for all locations of the study area assigned to *ADA* specific crops
- assess drought and heat stress related parameters based on the soil water balance results
- compute crop yield reduction values
- perform all computational operations in monitoring and forecast mode
- export computation results for selected parameters in various numerical and graphical file formats
- allow the execution of all necessary computation tasks within a reasonable time frame in a fast and efficient way, carefully utilising available computer resources

The spatial drought monitoring and forecasting computations are based on the calculation of various crop specific biophysical parameters. The most essential parameters are exported as spatial data files and can be outlined as follows:

- Reference evapotranspiration *ETO* [mm]

- Crop coefficient K_c , crop interception $interc$ [mm], crop evapotranspiration ET_C [mm] and actual evapotranspiration ET_A [mm]
- Soil water content swc [mm]
- Relative soil saturation rss [%] (absolute as well as classified values)
- Drought Intensity DI (absolute as well as classified values)
- Heat stress indicator HSI [°C], drought stress indicator DSI [%] or the combined heat and drought stress indicator CSI [°C%]
- Crop yield reduction YR [%] (absolute as well as classified values)

The generation of *ADA-MFS* required several different working steps including the coding of *ADIS*. The development was accompanied by additional tasks such as the one-time preparation of meteorological, elevation and land use input data, the development and coding of a *FTP* download tool and of a web page prototype to visualise the results.

The first major working step of *ADIS* programming was the development and coding of adequate I/O interfaces to allow high performance data access and export. Based on the excellent performance and the relative small size of *netCDF* data files, the *netCDF* file format was chosen as main format for the creation, access, and sharing of the data. *netCDF* is described in more detail in the following chapters.

Due to the existence of the models *SpatialGRAM* and *SOILCLIM* and their programmatic implementations, significant time was spent in a second major working step to analyse the methodologies of the two models and to select suitable algorithms for the new software. Appropriate algorithms were, for the most part, transferred unaltered and to a small part adapted to the project specifications. Furthermore new project specific methodologies and algorithms were also developed and implemented.

In the next step a new extensive program logic was coded including the existing and newly developed algorithms. All program features have been implemented as static or instanceable classes in accordance with the object-oriented programming paradigm. All classes with their class methods and the number and types of class variables and, last but not least, the program structure itself have been optimized with regard to a balanced ratio of computer memory consumption and processing speed.

Several testing classes have been included to check the program's classes for functionality and correctness. Furthermore various methods have been implemented to export intermediate and final results of crucial calculation steps in *ASCII* text file format for evaluation and graphical visualisation purposes.

Besides *ADIS*, a separate application has been developed and coded to allow the download of all necessary meteorological monitoring and forecast files from a download server of the Austrian Central Institute for Meteorology and Geodynamics *ZAMG* (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik). The meteorological files use the *netCDF* file format, are created on a daily basis and can be downloaded at any time.

And last but not least a web page prototype was written to allow the illustration of the computation results. The web page is based on the open source platform *MapServer*, which allows the building of spatially enabled internet applications.

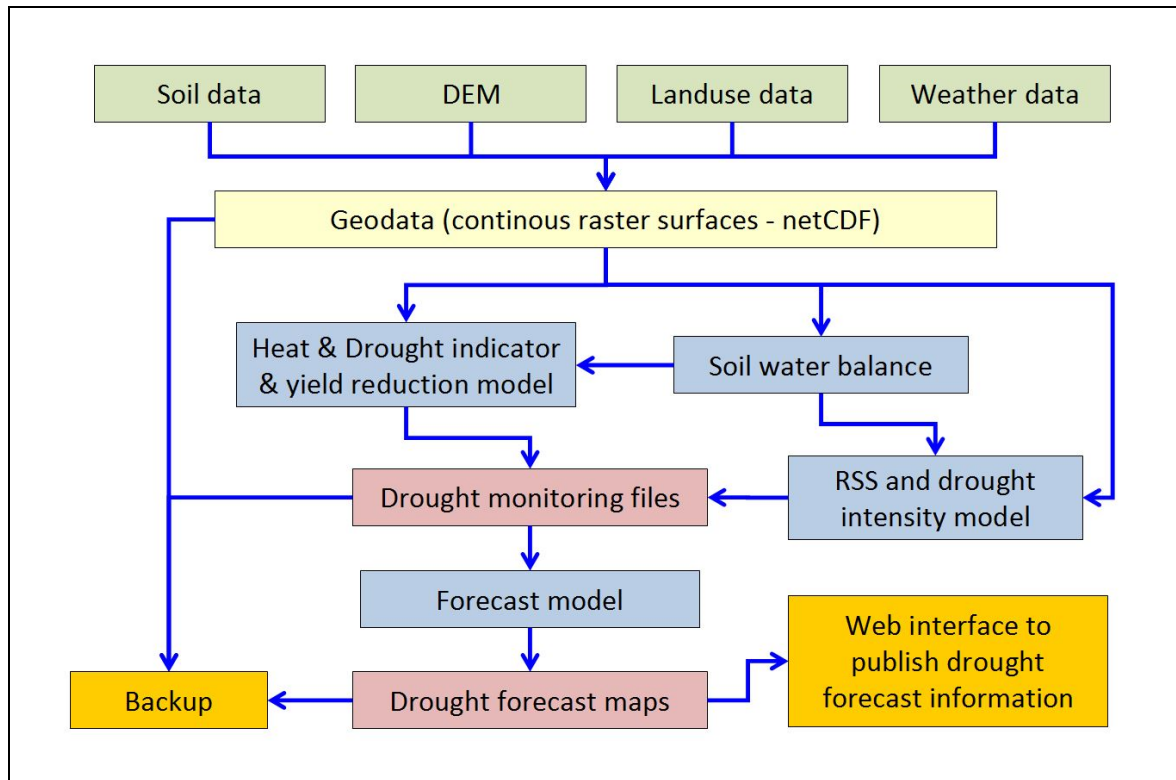


Figure 1: ADA-MFS system web architecture

All components of ADA-MFS are located on a Windows server. ADIS and the FTP download tool are triggered and controlled by the Windows task scheduler. The web architecture is depicted in figure 1.

4.4 ADIS system overview

ADIS is designed as a modular system controlled by a central module which at the same time defines the graphical user interface GUI. The user can adjust a limited number of parameters through the GUI before any of the four main computation processes is started. All parameter modifications are stored in ASCII text files and included at program start.

The computations are performed on a daily basis generating a large number of netCDF export files requiring a few Tera bytes of disk space. Conceptually ADIS is designed to keep the number of I/O operations as low as possible to improve overall performance.

The structural design of ADIS implements horizontal and vertical partitions. The horizontal partitions include four main computation processes:

1. The computation of the reference evapotranspiration of historical data (termed Historical ET0) and of forecast data – the computation of the reference evapotranspiration is based on the FAO Penman-Monteith method (Allen *et al.*, 1998).
2. The computation of the historical water balance development including heat & drought indicator and crop yield reduction development but excluding drought intensity development (termed Historical WB).
3. The computation of the historical drought intensity development (termed Historical DI)

- The computation of the ongoing and predicted development of the crop yield reduction parameters and of all drought parameters of the actual year (termed ADA Forecast)

Each of the four main computation processes can be selected in the program's GUI (see figure 2) and is executed within individual computer sessions. A simultaneous execution of the four tasks is not possible due to hardware restrictions and internal data relationships. It is not possible, for example, to compute historical or actual drought intensity values prior to the computation of ET₀ and historical soil water balance values. Thus, the following simple calculation sequence is obligatory: initially the historical ET₀ computations have to be executed for all historical years taken into consideration followed by the calculation of Historical WB. Only then it is possible to execute Historical DI or ADA Forecast. Historical DI and ADA Forecast do not depend on each other and can be arbitrarily executed.

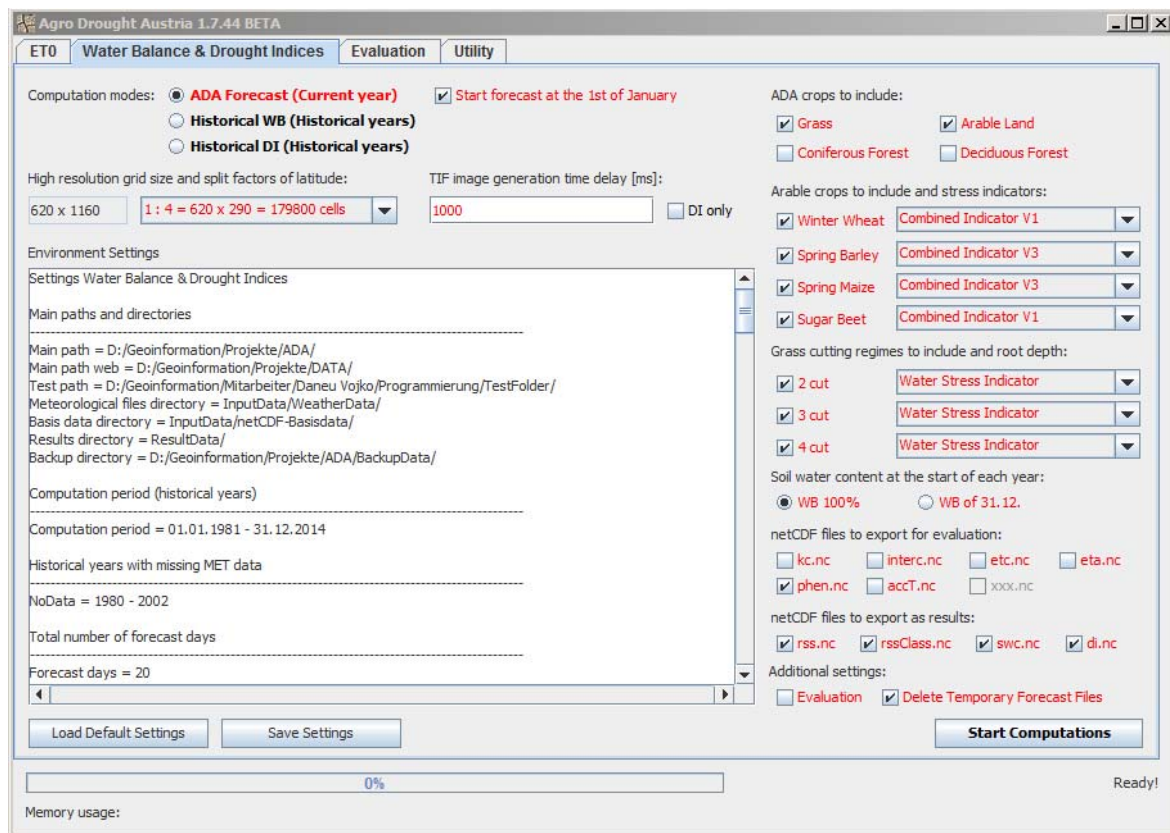


Figure 2: ADIS graphical user interface – “Water Balance & Drought Indices” tab selected

All four processes strictly follow a top down control and work distribution without any user interaction. The main modules of the processes are executed in individual threads allowing the visualization of the calculation progress with a progress bar. The system architecture of ADIS is depicted in figure 3. Starting point of the computation sequence is the one-time calculation of historical ET₀ for all historical years taken into consideration. The process is based on the combination of two modules (Java classes). The first module (“Control: ET₀”) controls data access to the meteorological input data and the chronological sequence of the computations. This applies to the computation of ET₀ for historical days (for the historical years 1981 till 2015) as well as for the historical days of the current year and any day of the two ADA forecast periods described later on. The second module (“Calc: ET₀”) holds the actual calculation logic. Core part of the module is a double loop that loops through each cell of the region of interest in latitude and longitude direction.

ET0 computation algorithms, which are collected in other Java helper classes, are invoked for each cell addressed in the double loop. This conceptual approach can be found in various other processes within the system architecture. The results of the historical ET0 computations are exported and stored in netCDF file format.

The next essential computation step following Historical ET0 comprises the execution of the Historical WB process. This process starts with the execution of the water balance calculations, which are driven by three modules. The first module is responsible for the temporal sequence of the computations (“Control: WB, RSS, SI”) looping through all historical years taken into consideration. At the beginning of each historical year, a second module (“Calc: Phen”) executes the calculation of the phenological stage entry dates of each of the considered crops across the whole year allowing afterwards the execution of the subsequent module (“Calc: WB, RSS, SI”), which first of all carries out the calculation of the soil water balance for each cell of the area of interest carrying an ADA crop type. The module furthermore allows the calculation of relative soil saturation values as well as the calculation of heat & drought indicator values. The main results and optionally also intermediate computation results are exported and stored in netCDF file format.

The Historical WB process furthermore allows the computation of crop yield reduction values based on heat and drought stress indicators. The module controlling the temporal sequence of the calculations (“Control: YR”) loops through each day of the historical year and accumulates the stress indicators (“Calc: SIS”) calculated and exported by the preceding modules. For a limited number of days of the historical year, which can be defined by the user, crop yield reduction values are calculated (“Calc: YR”), exported and stored in netCDF file format. Two subsequent final modules (“Control: Results” and “Control: Clean”) conclude the computation process. They are responsible for the distribution and final manipulation of the netCDF result files as well as the discharge of temporary files and result files, which are no longer required.

Once Historical ET0 and Historical WB computations are completed, the historical drought intensity computation process (Historical DI) or the forecast process (ADA Forecast) can be started. The historical drought intensity values are computed with two modules (“Control: DI” and “Calc: DI”). The drought intensity is quantified with the help of soil water content values, which are manipulated using a percentile method by NIST (NIST/SEMATECH, 2012). Historical DI is concluded in analogy to Historical WB using the two final clean up modules.

The most comprehensive process (ADA Forecast) allows the forecast of all those parameters, which are also calculated in the historical computations. The forecast refers to the actual (current) year, which can be split up into three stages: the (historical) days before the present (current) day denoted as stage 1, the days of the short-term forecast period which include the current day as first forecast day denoted as stage 2 and the days of the medium-term forecast period denoted as stage 3. The number of days of stage 2 is fixed to 10 days, whereas the number of days of stage 3 can be chosen by the user. ADA Forecast starts with the computation of all missing ET0 files for each day of stage 1 and 2. Subsequently the water balance calculations as well as the relative soil saturation and stress indicator calculations are carried out for stage 1 in analogy to the Historical WB process. The forecast computations of stage 2 are carried out with a combination of forecast and statistically manipulated meteorological input data, stage 3 uses solely statistically manipulated meteorological input data and stage 1 is based on observed data. The statistical evaluation of meteorological input data of the historical years require two intermediate computation steps (“Control: Mean” and “Calc: Mean”) to average statistical results. The averaged data is

then used to feed the drought intensity calculations, which are run in analogy to the Historical DI process. The ADA Forecast process furthermore provides the optional classification of predicted relative soil saturation values and the optional forecast of crop yield reduction values. The classification process (Control: RSS and Calc: RSS) uses a classification scheme defined by the user. The forecast of the crop yield reduction is computed in analogy to the Historical WB process, again using forecast and statistically manipulated meteorological input data instead of observed data. The forecast process is terminated with the two final clean up modules.

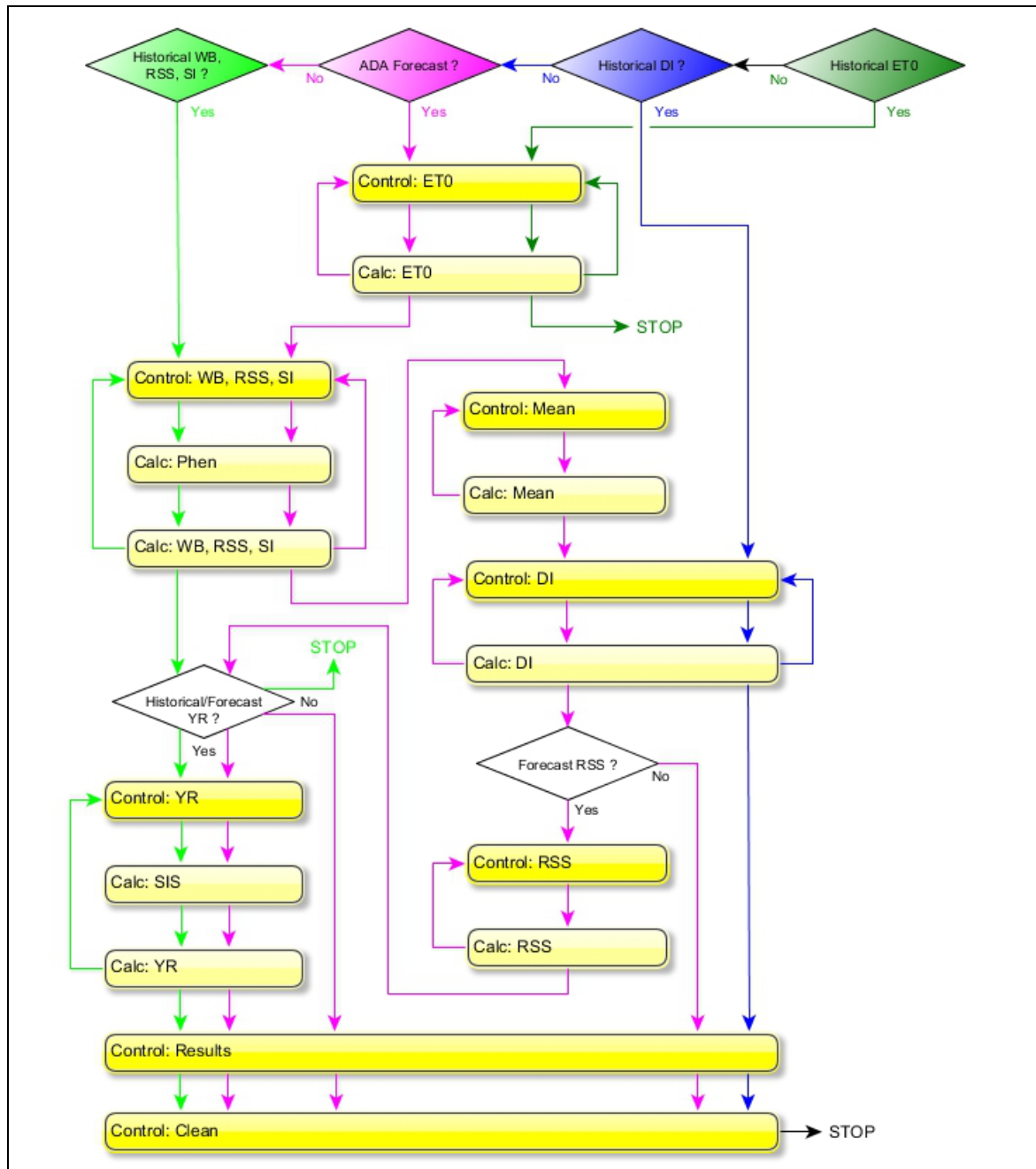


Figure 3: System architecture of ADIS. Control and calculation modules are depicted with rounded rectangles in yellow colour shades, decision switches with white or coloured diamond shaped nodes. The four main process flows (Historical ET0, Historical WB, Historical DI and ADA Forecast) are distinguished through the use of edges with different colouring

4.5 Methodology of *ADIS* data input

The model of *ADIS* works with daily time steps and uses various input parameters. The input information is supplied via binary files in *netCDF* file format. The *netCDF* file format is described later on in more detail. Each input file covers the complete territory of Austria using a grid resolution of 500 or 1000 meters. The *ADIS* input classes implement a method that converts the spatial resolution of 1000 meters to the final resolution of 500 meters. The model requires the following parameters:

- Wind speed at 10 meters [m/s]
- Mean air temperature at 2 meters for 18-6 UTC and for 6-18 UTC [°C]
- Minimum, mean and maximum air temperature at 2 meters [°C]
- Minimum, mean and maximum relative humidity at 2 meters [%]
- Global radiation [MJ/m² day]
- Precipitation sum for 18pd-6 UTC, for 6-18 UTC and for 0-24 UTC [mm]
- Elevation above sea level [m]
- Field capacity and available field capacity [Vol.%]
- Land cover information confined to a small selection of plant species denominated as *ADA* crops

The meteorological data is compiled by the *ZAMG* using the *INCA* analysis and now-casting system which provides improved numerical analysis in the now-casting and short forecast range up to 48 h (Haiden *et al.*, 2011). The meteorological data is supplied for each day of the historical years from 2003 till the present day (observed data) and modeled for a forecast period of 10 additional days. A resolution of 1000 meters is used. To extend the data basis and due to the lack of *INCA* data for the years 1981 till 2002, weather data has been spatially interpolated by the Agricultural Research and Education Centre Raumberg-Gumpenstein (*AREC*) using GIS algorithms developed by Schaumberger (2011). Results have been converted from *ArcGIS* format into the *netCDF* file format and stored in the input data base system.

The digital elevation model of the region of interest with a spatial resolution of 1000 meters was also supplied by *AREC*. The computation of soil water balance furthermore requires the knowledge of the water storage capacity of the soil. For this purpose the Federal Agency for Water Management (*BAW*) has derived field capacity and available field capacity information from the digital soil map of the Federal Research and Training Center for Forests, Natural Hazards and Landscape (*BFW*) (Murer, 2009, Murer *et al.*, 2004). The water storage capacity information has been supplied by *BAW* with a resolution of 500 meters and for two different soil layers – an upper layer with a thickness of 40 cm and a lower layer with a thickness of 60 cm.

And finally land cover information of the region of interest is needed to identify those areas, which are cultivated or populated with *ADA* specific plants. Only for those plants the monitoring and forecasting of drought and heat stress parameters is carried out. The following plants have been initially selected for the *ADA* computations: grassland, winter

wheat, spring barley, maize and sugar beet. The model furthermore has been designed to incorporate coniferous forest and broad-leaved forest as additional plants. All necessary settings have also been worked out for the two forest types and all computations can be carried out without any exception. Nevertheless, due to the complexity of forest modelling in this context and due to questionable results it was decided to keep the focus solely on grassland and the four *ADA* corn types.

As the underlying data for the identification of *ADA* crops, the land use distribution of *CLC2006 Corine Land Cover* data (Commission of the European Communities, 1995) has been used by *AREC*. *Corine* is a pan-European land cover / land use map and one of its databases is an inventory of land cover in 44 classes. In a first step the 44 *Corine* land use classes have been aggregated to 13 classes using a land use classification scheme from the MENDELU University in Brno. In a further step an additional partial aggregation to the seven *ADA* crops has been carried out by *AREC*. The aggregation was partial due to the fact that no distinction of the four *ADA* corn types (winter wheat, spring barley, maize and sugar beet) exists in the *Corine* data base. The four *ADA* corn types are represented in the *Corine* data base with just one class named *arable land*. In order to nevertheless be able to consider the *ADA* corn types, the following approach was worked out: all *ADA* computations are carried out repeatedly for four different crop scenarios. The first computation scenario just takes into consideration winter wheat as the only corn type. Subsequently all relevant attributes of winter wheat are allocated to the areas of the Austrian territory defined as *Corine* arable land. The other areas (grassland, coniferous forest and broad-leaved forest) remain unchanged. The resulting land use distribution is used for the subsequent *ADA* computations. After termination of the first calculation cycle and export of the results, the next crop scenario is initiated. Winter wheat is replaced by spring barley and a new calculation cycle is started. This procedure is repeated for maize and sugar beet. Figure 4 shows the *ADA* crop distribution for the Austrian territory. The land use layer is available in *netCDF* format at a resolution of 500 meters.

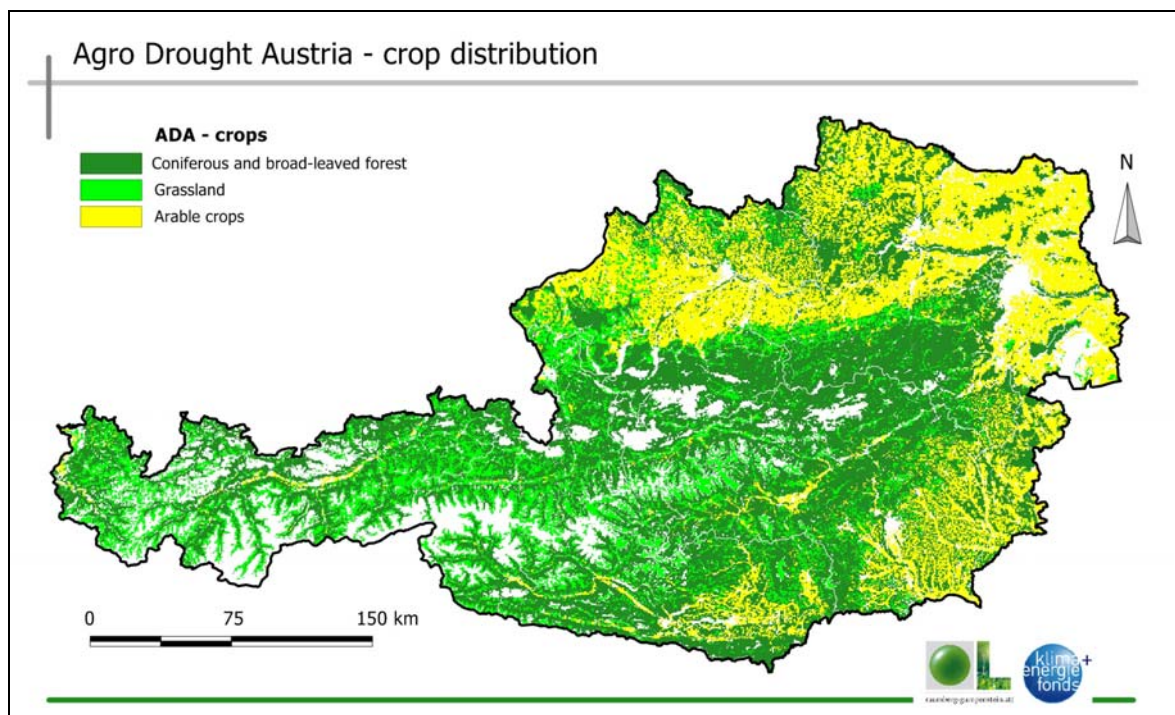


Figure 4: *ADA* crop distribution

Due to the large amount of scientific data involved in the computations it is vital to develop data I/O interfaces, which allow high performance data access and export. *netCDF* (Network Common Data Format) is a set of software libraries and self-describing, machine-independent data formats that support the creation, access, and sharing of array-oriented scientific data. *netCDF* was developed at the University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) within the Unidata program (www.unidata.ucar.edu) and is still actively supported by UCAR.

On the basis of the specific structure of a *netCDF* file and with the need of high I/O performance and low main memory consumption, three *Java* input classes have been written to import *netCDF* files partially or as a whole into *ADIS*. Each import class reads a distinct section of a single-parameter *netCDF* file allowing an efficient allocation of information identical from file to file to corresponding variables, arrays or lists within *ADIS*. An additional class was written to allow the import of multiple-parameter *netCDF* files. The export of parameter data into a *netCDF* file on the other hand is controlled by one single class. Based on the *netCDF* input classes, one more class finally controls the input procedure allowing also an increase of data resolution to predefined scale values.

The *netCDF* parameter reading input classes as well as the *netCDF* output class allow the manipulation of parameter data with different data types (short/integer, float and double). Furthermore an adequate scale factor is used to optionally transform the parameter data into the integer format – thus reducing the size of the *netCDF* files significantly.

4.6 Methodology of *ADIS* reference evapotranspiration *ET0* monitoring

According to Allen *et al.* (1998) evaporation is the process whereby liquid water is converted to water vapour and removed from the evaporating surface. Energy is required to change the state of the molecules of water from liquid to vapour. Direct solar radiation and, to a lesser extent, the ambient temperature of the air provide this energy. As evaporation proceeds, the surrounding air becomes gradually saturated and the process will slow down and might stop if the wet air is not transferred to the atmosphere. The replacement of the saturated air with drier air depends greatly on wind speed. Hence, solar radiation, air temperature, air humidity and wind speed are climatological parameters to consider when assessing the evaporation process.

Where the evaporating surface is the soil surface, the degree of shading of the crop canopy and the amount of water available at the evaporating surface are other factors that affect the evapotranspiration process. Frequent rains, irrigation and water transported upwards in a soil from a shallow water table wet the soil surface. Where the soil is able to supply water fast enough to satisfy the evaporation demand, the evaporation from the soil is determined only by the meteorological conditions.

However, where the interval between rains and irrigation becomes large and the ability of the soil to conduct moisture to near the surface is small, the water content in the topsoil drops and the soil surface dries out. Under these circumstances the limited availability of water exerts a controlling influence on soil evaporation. In the absence of any supply of water to the soil surface, evaporation decreases rapidly and may cease almost completely within a few days.

As a first step of the drought monitoring and forecasting computations the evapotranspiration from the reference surface, the so-called reference evapotranspiration *ET0*, is calculated. According to Allen *et al.* (1998) the reference surface is a hypothetical grass reference crop with an assumed crop height of 0.12 meters, a fixed surface resistance of 70 Sie-

mens/meter and an albedo of 0.23. The reference surface closely resembles an extensive surface of green, well-watered grass of uniform height, actively growing and completely shading the ground. The fixed surface resistance of 70 Siemens/meter implies a moderately dry soil surface resulting from about a weekly irrigation frequency.

ET_0 of historical years as well as ET_0 of the current year including the ADA forecast periods are calculated for each cell of the region of interest (the federal territory of Austria) and for each day. Figure 5 shows an example of the spatial distribution of the reference evapotranspiration on 15.06.2015. ET_0 can be computed solely from meteorological data. As a result of an expert consultation held in May 1990, the FAO Penman-Monteith method is now recommended as the sole standard method for the definition and computation of the reference evapotranspiration.

The FAO Penman-Monteith method requires radiation, air temperature, air humidity and wind speed data and is implemented without any modification in ADIS.

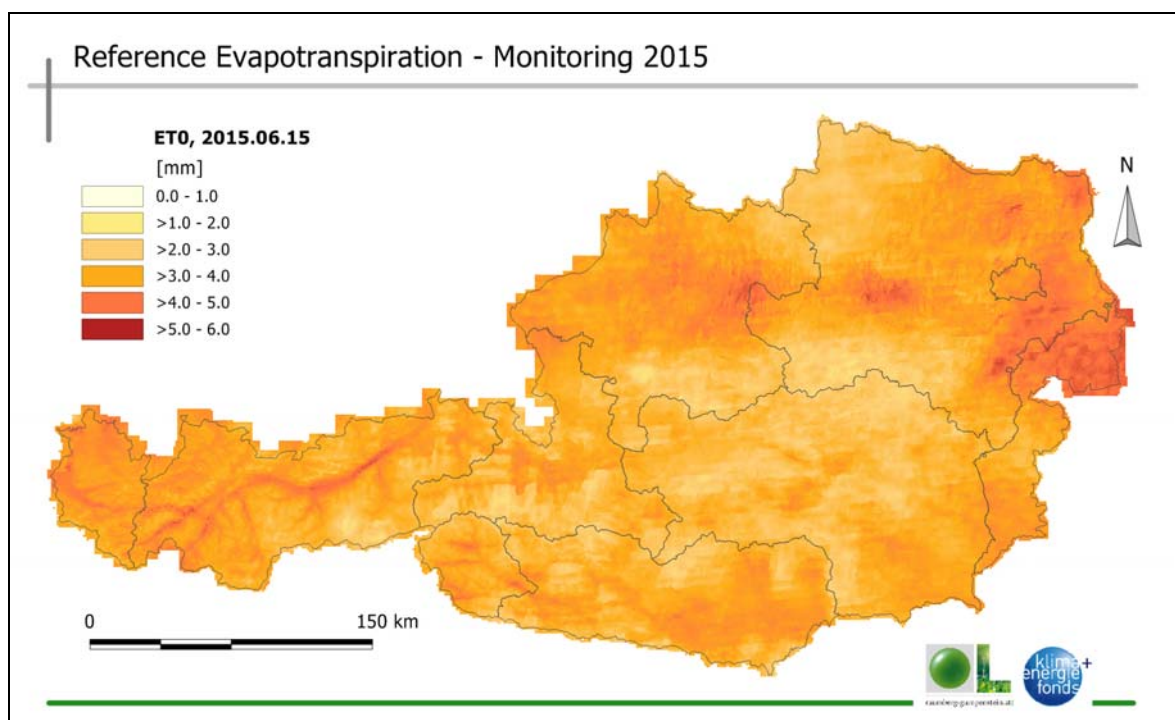


Figure 5: Spatial distribution of the reference evapotranspiration on 15.06.2015

4.7 Methodology of ADIS soil water balance and yield reduction monitoring

The ADIS modules (“Control: WB, RSS, SI” and “Calc: Phen” as well as “Calc: WB, RSS, SI”) for the computation of the soil water balance as an expression of the mass or volume of water in the soil is based on the concepts and models summarized in the FAO Irrigation and Drainage paper No. 56 (Allen *et al.*, 2005, Allen *et al.*, 1998). The FAO models have been adapted to the ADA framework combining *SpatialGRAM*'s and *SOILCLIM*'s approaches. In accordance with Allen *et al.* (1998) soil water balance computations include the estimates of the single crop coefficient K_c , of the crop interception preventing a fraction of the precipitation from reaching the soil, of the crop evapotranspiration ET_c and of the actual evapotranspiration ET_A . The soil water balance eventually is quantified by the calculation of the soil water content swc described by equations 1-3:

$$swc_{fc} = 1000 \cdot fc \cdot zr \quad (1)$$

$$swc = swc_{fc} - dr \quad (2)$$

$$wilt = (fc - afc) \cdot 1000 \cdot zr \quad (3)$$

where swc_{fc} is the soil water content at field capacity (mm), fc is the field capacity (Vol.%), zr is the rooting depth (m), dr is the root zone depletion (mm), $wilt$ is the permanent wilting point (mm) and afc is the available field capacity (Vol.%). With no rain, day for day the swc is reduced due to the water use of the plants till it reaches the water content at permanent wilting point. From that point on no more water can be extracted by the plants and the water content at permanent wilting point is kept in the soil for extended periods. The soil water content value is therefore always equal or higher than the wilting point value.

The soil water balance computations are carried out for two distinct soil layers (top and sub layer), which are weighted differently and adapted to the main root spaces of the crop types taken into consideration. The crop evapotranspiration of the top soil is weighted with 60 % and the sub soil with 40 % of the total crop evapotranspiration for each ADA crop type. The weighting concept implies, that the upper layer is responsible for the major part of crop evapotranspiration (Baeumer, 1978, 28).

The thickness of the upper layer of each cell covered with one of the four ADA corn types or one of the two ADA forest types is set to 40 cm and the thickness of the lower layer to 60 cm. These values can be changed by the user. The thickness values of the upper and lower layers of grassland are set to a fixed value of 20 cm each respectively. The estimate of the soil water balance and the crop yield reduction requires an accurate determination of the duration of the crop's phenological stages. The growing phase starts with the beginning of the growing season in the spring. This starting date is thus of decisive importance for the length of the vegetation period and the assessment of the period's phenological stages.

In the prevailing academic literature, a temperature criterion is often used to define the growing season. The criterion, denominated as Simple Thermal Definition STD requires a daily mean temperature higher than a threshold value on a defined number of consecutive days. Within the ADA framework the start of the growing season has been defined as the first day of 5 consecutive days with daily mean temperatures above 5°C for each ADA crop apart from maize.

The start of the growing season for maize has been defined as the first day of 5 consecutive days with daily mean temperatures above 10°C. Figure 6 graphically shows the calculation scheme of the start of the growing season for a sample time series. A detailed description of the computation method can be found in Schaumberger (2011, 87ff).

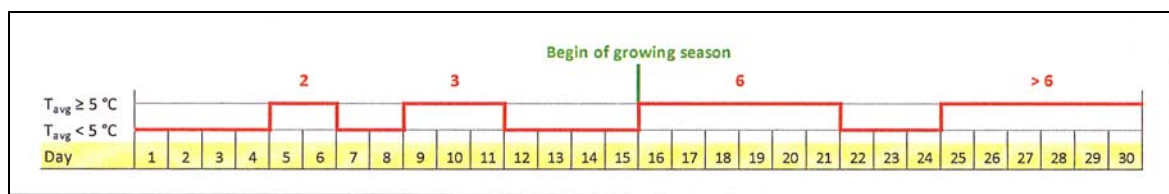


Figure 6: Schematic representation of the beginning of the growing season by STD

Multiple harvests within one vegetation period are a characteristic feature of cultivated grassland. Climatic favourable locations as much as an intensive farming usually allow four harvests (cuts) within one vegetation period, in exceptional cases even more. Cultivated grassland in less-favoured mountain locations mainly allow two or three cuts (Buchgraber et al., 2011).

Grassland harvest dates depend on many factors such as objective measurable criteria (like site and farming conditions) but also individual management options and preferences of the farmer. Because of that the computation of the harvest date basically remains an approximation with an inevitable range of error. Spatial modelling furthermore results in additional constraints leading to the introduction of explanatory variables, which can be supplied as continuous surfaces. The calculation of area-covering harvest date information therefore calls for further simplification and demands even greater concessions on the spread of estimated values against the real value. Crops are generally due for harvesting when a corresponding phenological stage entry date has been reached. The annual variability of the entry dates depends on the weather and in particular on the temperature development (Ansquer *et al.*, 2009).

To correlate harvest dates of cultivated grassland with temperature sums, long-term observations of temperature profiles and real harvest dates have been analysed. For this purpose, temperature data of monitoring stations spread across the entire country has been supplied ZAMG for the period 1990 till 2009. For the same time period, harvest date information of numerous trials throughout the country has been supplied by AREC. The harvest date information includes observations of two cut systems, three cut systems and four cut systems. The results of the correlations and the medians of all stations for a selected cut regime are depicted in figure 7. Nine harvest dates can be identified, which represent the statistical central values of each crop growth for each year and station used in the modelling process. The three trend lines of figure 7 do not show any functional relationship between the days of the year and the temperature sum values but solely show the different gradient's courses of the harvest date related temperature sums. The lower the cut frequency, the higher are the temperature sum level differences related to the harvest dates. As a consequence for the modelling process, the annual variability of the harvest dates predicted by temperature sums rises with increasing trend line slope. Eventually the reasons for this are the longer time durations of the single growth events. Temperature sums calculated in this manner and the corresponding harvest dates depicted in figure 7 provide the basis for the harvest model of grassland implemented in ADIS.

However, harvest dates depend not only on temperature conditions but on many other factors, which cannot be considered in a spatial implementation. As a result it is not possible to estimate harvest dates of grassland with sufficient accuracy based on temperature sums alone. The model used in ADIS furthermore does not consider water availability, which according to Smit *et al.* (2008) has a crucial influence on the productivity of grassland. Nevertheless temperature is particularly suited to describe time shifts of agricultural management as a response to phenological events (Sparks *et al.*, 2005). Therefore the temperature sum approach provides the basis for spatial modelling of harvest events within the scope of ADA.

To improve accuracy of the temperature sum approach for grassland and to prevent extreme deviations, relative changes of the annual temperature sums are used to calculate the deviations from the mean values instead of directly using the functional relation between temperature sum and harvest date. This ensures that shifts of harvest dates react less sensitive to temperature sum variations. Figure 8 shows a simplified scheme of the correlation of annual temperature sum anomalies with the resulting range of variation of harvest dates based on long-term grassland trials.

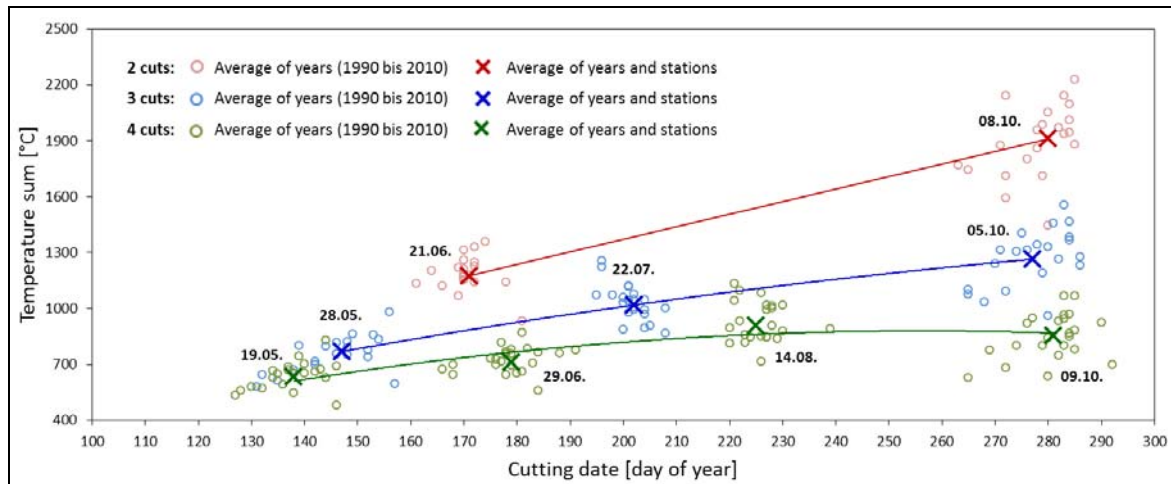


Figure 7: Relationship between temperature sums related to different growth events and harvest dates for different cut regimes and based on long-term average values.

The right column of figure 8 shows the temperature accumulation for an arbitrary growth of a specific cut regime of grassland. The median of the temperature sum at the harvest date (cutting date) results from all trials within the period of 1990 till 2009 and provides the basis value of 100 %. For each temperature sum, which is related to a mean harvest date of the current year, the deviation from the basis value is calculated and stored.

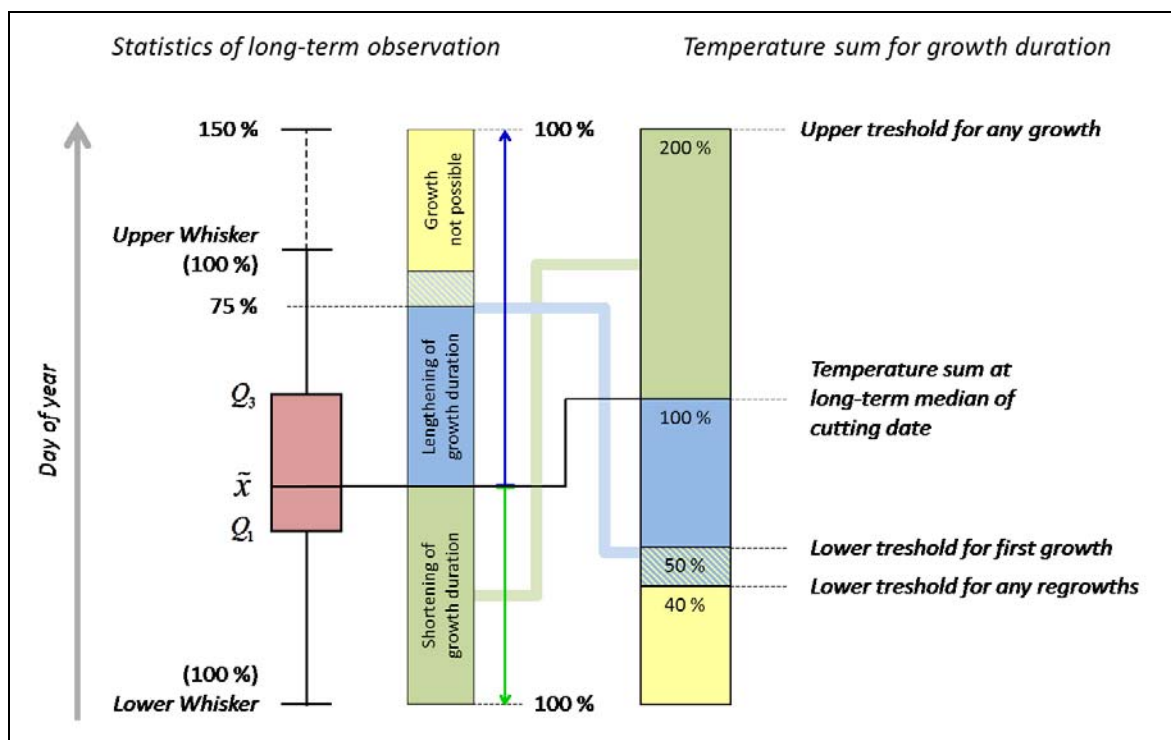


Figure 8: Determination of harvest dates from temperature sums

The upper threshold value of the deviation is fixed at 200 % (doubling of the temperature sum). All values beyond this limit are left out of consideration due to the assumption, that in those cases a cutting regime of higher frequency (and shorter growth period) is more appropriate and closer to reality. The lower threshold value of the first growth is fixed at 50 %. All values below this limit indicate a location that is not suited to the chosen cutting regime. This restriction prevents the designation of a specific cutting regime to an unsuited

altitude given the strong correlation between temperature and altitude. Due to the fact that all growths following the first growth show a higher variability of harvest dates, the lower threshold value is reduced to 40 %.

The left part of figure 8 shows the statistical parameters of the growth related harvest dates based on long-term observations. The box plot diagram depicts median, first and third quartiles as well as lower and upper whiskers with the interquartile range of 1.5. Those specific values are the basis for the translation of the of the temperature sum deviations. A deviation of more than 100 % results in a shortening of growth duration for the current year, since the ratio of the temperature sums is mapped to the interval between the median of the harvest day and the lower whisker. Above-average temperatures, having for example a deviation of 120 % of the long-term temperature sum, thus lead to an earlier harvest date.

If the temperature sum on the day of the long-term median is not reached, then a lengthening of the growth duration has to be assumed resulting in a later harvest date. That happens quite often in mountainous areas due to the decrease of the temperature sum with altitude. The lower threshold values of the first growth (50 %) and of the following growths (40 %) prevent implausible deviations from the minimum requirements of the temperature. The relative temperature sums are mapped to a larger range of harvest dates due to the extension of the interval between the median of the harvest day and the upper whisker by 50 %. Thus the maximum positive deviation of the harvest date for the first growth amounts to 75 % of the interval between the median of the harvest day and the upper whisker and 90 % for the following growths. Below-average temperatures, having for example a deviation of 80 % of the long-term temperature sum, thus lead to a later harvest date.

The definition of the threshold values (200 % and 50 % respectively 40 %) as well as the mapping procedure to an extended range (150 %) for positive deviations of the harvest dates were introduced due to extensive trials of the years of investigation.

For each cell of the region of interest the mean daily temperatures are accumulated day by day till the long-term median of the harvest dates is reached. In accordance with the methodology described above, the temperature sum is mapped to the value range of the long-term harvest date observations. The deviations of a particular year from the long-term central harvest date are stored in result maps and made available for further investigations. A detailed description of the generation of maps of cutting frequencies can be found in Schaumberger (2011, 205ff).

The cut date median values as well as the upper and lower whisker values for all cutting regimes (two, three and four cut systems) as used for the ADA computations are summed up in table 1.

Table 1: Crop cut date medians and upper and lower whiskers for grassland expressed as day of year

	First cut	Second cut	Third cut	Fourth cut
Crop cut date medians				
2 cut regime	168	274		
3 cut regime	148	206	271	
4 cut regime	139	181	227	277
Upper whisker				
2 cut regime	200	307		
3 cut regime	177	260	301	
4 cut regime	155	225	269	305
Lower whisker				
2 cut regime	141	250		
3 cut regime	125	161	229	
4 cut regime	122	154	193	239

A simplified model is used to describe the harvest frequency and harvest dates of winter wheat, spring barley, maize and sugar beet. Harvest frequency of all four crop types is set to one per year and harvest dates are correlated with temperature sums, fixed dates or fixed time periods. A detailed summary of all specifications in this context including the specifications for grassland can be found in table 3 and 4.

The assessment of harvest dates of the ADA crop types and of grassland is partially based on the calculation of temperature sum values TS . A degree-day algorithm is used by ADIS to accumulate temperature values from day to day starting with the 1st of January and ending with the 31st of December of each year taken into consideration. The algorithm first calculates the temperature value $DD(t)$ as outlined in formulas 4a and 4b:

$$DD(t) = 0 \quad (t \leq Tb) \quad (4a)$$

$$DD(t) = t - Tb \quad (t > Tb) \quad (4b)$$

where $DD(t)$ is the degree-day temperature value of a single day ($^{\circ}\text{C}$), t is the mean daily temperature ($^{\circ}\text{C}$) and Tb is a crop specific basis temperature ($^{\circ}\text{C}$). The single degree-day temperature values $DD(t)$ are summed up from day to day resulting in the temperature sum TS ($^{\circ}\text{C}$). The values of the basis temperatures as used in the ADIS computations are summed up in table 2:

Table 2: Basis temperature values of the ADA crops

Grassland	0 $^{\circ}\text{C}$
Winter wheat, spring barley, sugar beet	5 $^{\circ}\text{C}$
Maize	8 $^{\circ}\text{C}$

The crop evapotranspiration ET_c differs from the reference evapotranspiration ET_0 as the ground cover, canopy properties and aerodynamic resistance are taken into account. In the crop coefficient approach, ET_c is calculated by multiplying ET_0 with the crop coefficient K_c . The crop development is defined in terms of phenological development stages with varying K_c factors as a function of temperature sum (i.e. cumulative daily mean temperature), fixed dates and fixed time periods. The effects of characteristics that distinguish field crops from grass are integrated into the K_c calculations. In compliance with the FAO and SOILCLIM methodologies, 6 phenological stages are implemented in the program's description of the crop coefficient curves of winter wheat, spring barley and sugar beet:

1. Stage *out* (*interim*): stage with no plant growth during the winter season
2. Stage *ini*: stage that starts with the sowing event and lasts till plant emergence
3. Stage *dev*: plant development stage till achievement of maximum plant size with linear K_c value increase
4. Stage *mid*: stage till achievement of plant maturity
5. Stage *late*: stage between plant maturity and harvest with linear K_c value decrease
6. Stage *end*: stage of soil tillage after harvest

Since sugar beet cannot be forced into the predefined scheme of six phenological stages, a simplified model with three stages (*out*, *ini* and *dev*) is used to match the K_c curve as closely as possible to realistic conditions. Due to the multiple harvest feature of cultivated grassland, an adapted crop coefficient scheme is applied in compliance with the corresponding cut regime. In this case, too, less different stages are needed to describe the K_c course namely *out*, *ini*, *dev* and *end*. Due to multiple harvests of grass, the mid stage is replaced by multiple *dev* stages. All these considerations are also illustrated in figure 9.

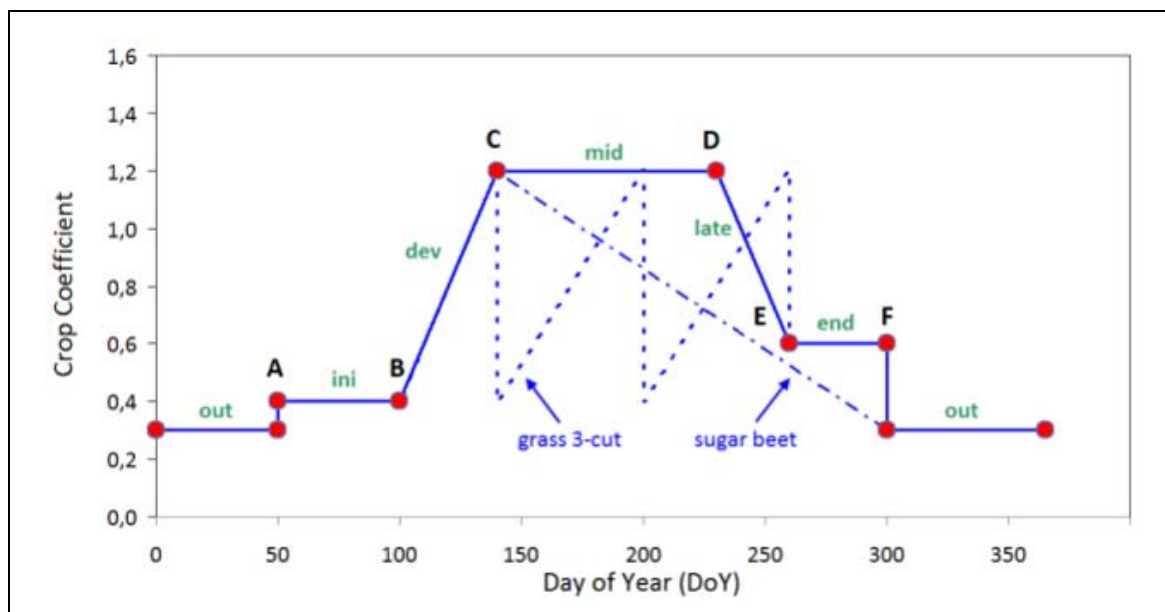


Figure 9: *Kc* courses of different ADA crop types. The blue continuous line represents the *Kc* courses of winter wheat, spring barley and sugar beet, the blue dashed lines the *Kc* courses of grass (3 cut regime) and sugar beet. The 2 and 4 cut regimes of grass have *Kc* courses in accordance with the number of cuts. The graph focuses on the illustration of the phenological stages – the values of the crop coefficients

The phenological stage entry events for the individual crop types as implemented in ADIS are outlined in table 3 and 4.

Table 3: Phenological stage entry events of grassland for different cut regimes. The entry events of the *ini* and *out* stages are defined with calendar dates, the entry events of the first development stage *dev1* with the start of growing season and the entry events of *dev2*, *dev3*, *dev4* and *end* with temperature sums

	ini	dev1	dev2	dev3	dev4	end	out
2 cut regime	01.03	SGS	1170°C			1900°C	31.10
3 cut regime	01.03	SGS	770°C	1020°C		1260°C	31.10
4 cut regime	01.03	SGS	630°C	710°C	910°C	850°C	31.10

Table 4: Phenological stage entry events of the four ADA corn types. The entry events of the *ini* and *out* stages are defined with calendar dates, the entry events of the development stage *dev* with the start of growing season of winter wheat and spring barley (SGS) and maize (SGS-M) as well as with a temperature sum for sugar beet. The entry events of *mid* and *late* are defined with temperature sums and the entry events of *end* are defined with a period of 14 consecutive days.

	ini	dev	mid	late	end	out
Winter wheat	01.03	SGS	350°C	692°C	+14	30.11
Spring barley	01.03	SGS	502°C	568°C	+14	30.11
Maize	01.04	SGS-M	249°C	1238	+14	30.11
Sugar beet	01.03	300°C	2400°C			31.12

ET_0 as well as ET_C depict the amount of evaporation at standardized conditions – assuming fully saturated soil layers. In reality ET_C is reduced significantly with the lack of soil water due to drought conditions. In accordance with Allen et al. (1998, 161) an additional water stress coefficient K_s is introduced to correct ET_C and compute the actual evapotranspiration ET_A according to formula 5:

$$ET_A = K_s \cdot ET_C \quad (5)$$

With the knowledge of ET_A the root zone depletion dr can be calculated and thereby also the soil water content swc , as outlined at the beginning of this chapter. The soil water content is then expressed as proportion of water soil profile saturation in %, denominated as relative soil saturation rss (Trnka *et al.*, 2014). rss is calculated using formula 6, classified, exported in *netCDF* file format and presented as final result of the soil water balance computations.

$$rss = (swc - wilt) / (swc_{fc} - wilt) \quad (6)$$

where rss is the relative soil saturation (%), swc is the actual soil water content (mm), swc_{fc} is the soil water content at field capacity (mm) and $wilt$ is the permanent wilting point (mm). Although not directly related to the soil water balance, an additional parameter is computed within the soil water balance module “*Calc: WB, RSS, SI*”. It is the *ADA* crop stress indicator parameter *SI*, which is introduced and developed within the *ADA* project. The amount of yield loss due to these stresses depends on growth stage, severity of the stress, and the number of days the crop is stressed. A set of calibrated indicators and methods on crop specific drought and heat vulnerability and impacts based on field experiment data and crop model application have been developed within the *ADA* project. Three different crop stress indicators *SI* have been taken into further consideration and implemented in *ADIS*:

1. A drought stress indicator *DSI* showing the percentage ratio of the current root zone depletion (mm) to the soil water content at available field capacity (mm) for an upper soil layer of 20 cm thickness,
2. A heat stress indicator *HSI* as a function of the maximum daily temperature and a predefined temperature threshold value,
3. A combined stress indicator *CSI* as a function of the drought stress indicator and the maximum daily temperature.

The assessment of the stress indicators is incorporated in the water balance computation process to avoid double calculation of necessary parameters like the root zone depletion or soil water content values, thus increasing the overall performance of *ADIS*. With the export of the *SI* results as *netCDF* files, the water balance computations are completed.

To estimate crop yield losses due to drought and heat stress, simple interrelations have been worked out. A viable approach has been found through formula 7, which shows the impact of the crop stress indicator factor on crop yield reduction as a linear function:

$$YR = B \cdot sis + A \quad (7)$$

where YR is the relative crop yield reduction as percentage of the maximum possible crop yield (%), sis is the crop specific stress indicator sum and A and B are crop specific coefficients. The stress indicator sums are computed in analogy to the computation of temperature sums for each day of the accumulation period but without any restricting constraint. The accumulation periods differ from crop to crop and are outlined in table 5:

Table 5: Start dates and end events of stress indicator sum accumulation.

	Accumulation start date	Accumulation end event
Winter wheat	01.03.	Start of stage end
Spring barley	01.03.	Start of stage end
Maize	01.05.	Start of stage end
Sugar beet	01.05.	Start of stage out (31.12.)
Grassland – 2 cut regime	01.05.	Start of stage end (second harvest)
Grassland – 3 cut regime	01.05.	Start of stage dev3 (second harvest)
Grassland – 4 cut regime	01.05.	Start of stage dev4 (third harvest)

The crop yield reduction values are finally classified using the following classification scheme: 0-5% ; 5-30% ; 30-60% ; >60%. The classified results are exported in *netCDF* file format and can be presented to the stake holders as final results.

4.8 Methodology of *ADIS* drought intensity monitoring

Another product of *ADIS* are maps of the intensity of dryness referred to as drought intensity maps (Trnka *et al.*, 2014). Drought intensity can be expressed as a measure of deviation from the statistically derived „normal“ state. For each grid cell the current soil water content at a given day is compared to the soil water content distribution of the historical years from 1981 till 2015 for the same day +/- 10 days. The drought intensity value expresses the probability of repetition of soil moisture in the given day.

The drought intensity computations rely on a percentile-based approach, using a percentile method by NIST (NIST/SEMATECH, 2012). Computing the percentile value of the cell's *swc* for a given day in relation to the group of *swc* observations for the same day of all years taken into consideration reveal its percental deviation from the “normal” *swc* state. The higher the *swc* deviation from the entire observation set (the smaller the percentile value), the higher is the drought magnitude of the cell for the particular day. To suppress statistical outliers, the *swc* values of 10 days before and 10 days after the particular day are included in the percentile computations. The default number of 10 days can be altered by the user.

The percentile values are classified using a user defined drought intensity class table. By default table 6 is used (Trnka *et al.*, 2014):

Table 6: Drought intensity classification in relation to percentile values.

Percentile	Drought intensity class
0 – 1	Extreme drought
> 1 – 2	Exceptional drought
> 2 – 5	Significant drought
> 5 – 10	Moderate drought
> 10 – 20	Starting drought
> 20 – 30	Decreased soil moisture content
> 30	No drought

Drought intensity class results are exported in *netCDF* file format and can be presented to the stake holders as another final result.

Predicting future dry events in a region is essential for finding sustainable solutions to water management and risk assessment of drought occurrences. A drought early warning system with severity and spatial extent in a timely manner provides invaluable information to decision-makers and stakeholders. The drought prediction approach used in *ADIS* is based on weighted meteorological historical and forecast data for a short term forecast period of 10 days, on historical meteorological data for medium term forecast of any number of days and on an averaging process.

The basic approach of the *ADIS* forecast model consists in a repeated calculation of soil water content time series for each historical year and a subsequent arithmetic averaging of the results as shown in figure 10. The fundamental difference to the *swc* monitoring option as described before is the differing meteorological input data used in the *swc* forecast computations. The *ADIS* forecast computation process starts with the *swc* computation of all past days of the current year using measured meteorological data. The subsequent *swc* computation of all days of the short term forecast period are based on forecast meteorological data also delivered by *ZAMG* at first. The *swc* values of the medium term period are

then calculated using meteorological input data of the first historical year (1981). To suppress a discontinuous time series pattern of the *swc* between the short and medium term period a weighting process including historical meteorological data of the first historical year is applied to the short term meteorological forecast values. A weighting algorithm is used that emphasizes the forecast data at the beginning of the short term forecast period and the historical data at the end of the short term period. The *ADIS* forecast computation process is then repeated for all remaining historical years (1982 till 2014) resulting in 35 different *swc* time series which are arithmetically averaged. The resulting averaged *swc* values are finally expressed as relative soil saturation values, classified (“*Control: RSSCLASS*” and “*Calc: RSSCLASS*”) and exported in *netCDF* file format. The averaged *swc* values are furthermore also used to calculate crop yield reduction and drought intensity forecast values. The results of 6 selected days of the two forecast periods are converted into a graphical format and published via an appropriate web application.

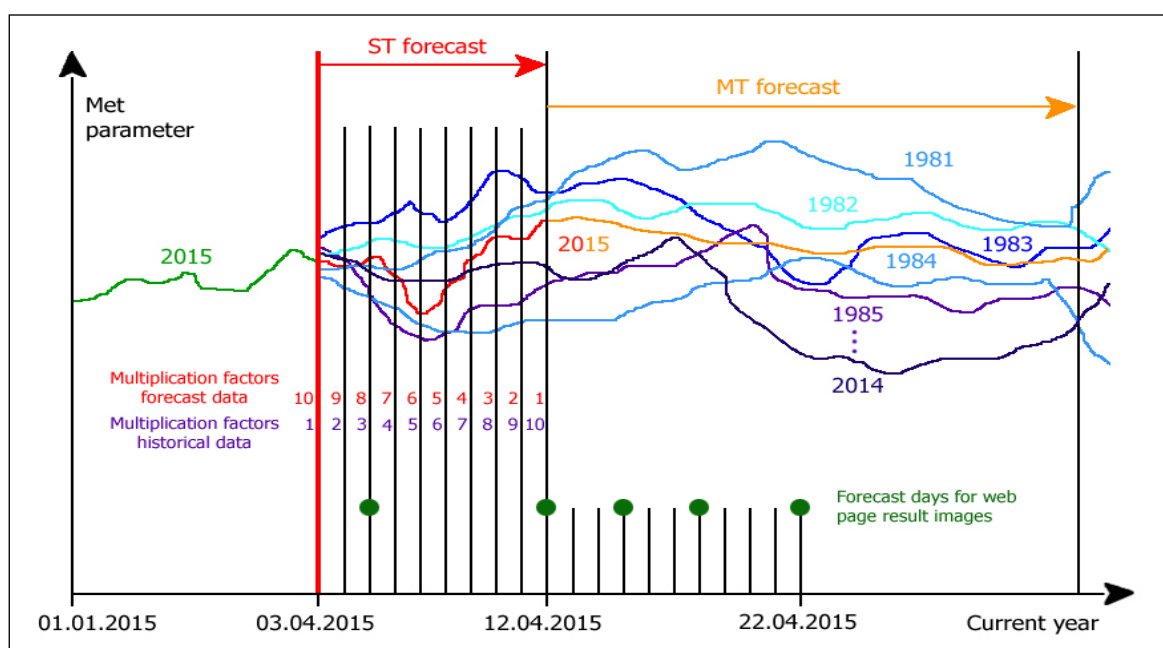


Figure 10: *ADIS* forecast model schema

Figure 10 shows an example of an *ADA* forecast computed on 03.04.2015: Green line: *swc* values computed with observed meteorological data from 01.01.2015 till 02.04.2015. Blue line (1981): *swc* values of the *ST*-forecast period (03.04.2015 till 12.04.2015) are computed with inversely weighted (see displayed multiplication factors) and averaged forecast and historical meteorological data from 03.04. till 12.04. The *swc* values values of the *MT*-forecast period (13.04.2015 till 22.04.2015) are computed with historical meteorological data from 13.04.2015 till 22.04.2015. The *swc* course of the other historical years (blue lines 1982 till 2014) are computed analogously. All blue *swc* lines are then averaged resulting in the final red and orange *swc* forecast course. The *swc* forecast results of 5 days (green dots) are picked out from the 20 days period, exported as *netCDF* file and published on a web page.

4.9 Results

The results of the Agro Drought Austria Monitoring and Forecasting System *ADA-MFS* are maps showing the relative soil saturation, drought intensity and crop yield reduction situation over the Austrian territory in a grid resolution of 500 meters for rooting zone layers of

0-40 cm (grassland) and 0-100 cm (winter wheat, spring barley, maize and sugar beet). All examples displayed in the figures 11 - 16 are for a selected date (13.07.2015) and calculated with historical (measured) meteorological data. The maps are visualized and demonstrated on a web page prototype at the final project symposium of AgroDroughtAustria.

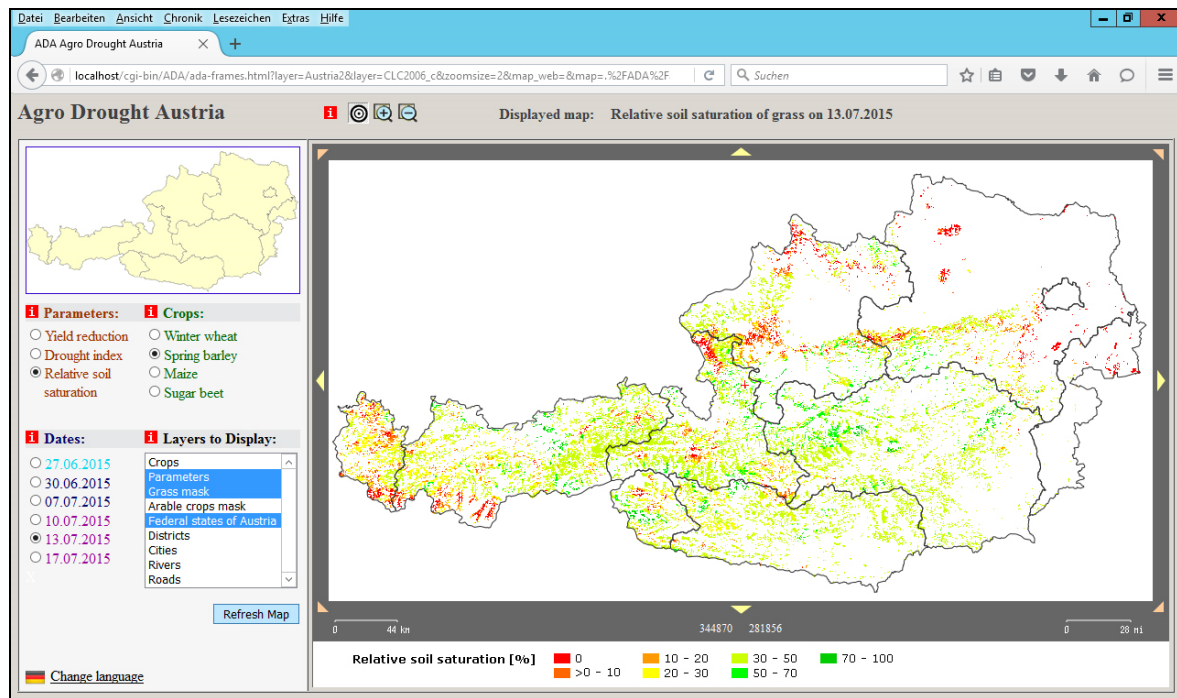


Figure 11: Relative soil saturation distribution of grassland for the Austrian territory on 13.07.2015.

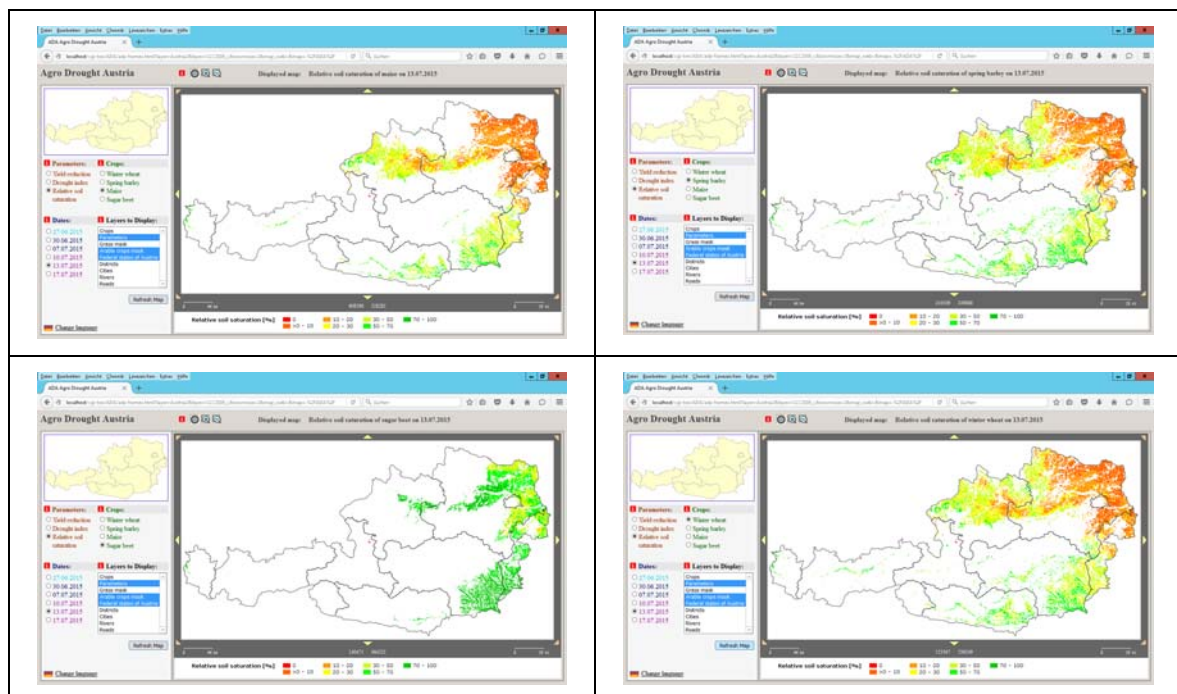


Figure 12: Relative soil saturation distribution of maize (upper left), spring barley (upper right), sugar beet (lower left) and winter wheat (lower right) for the Austrian territory on 13.07.2015.

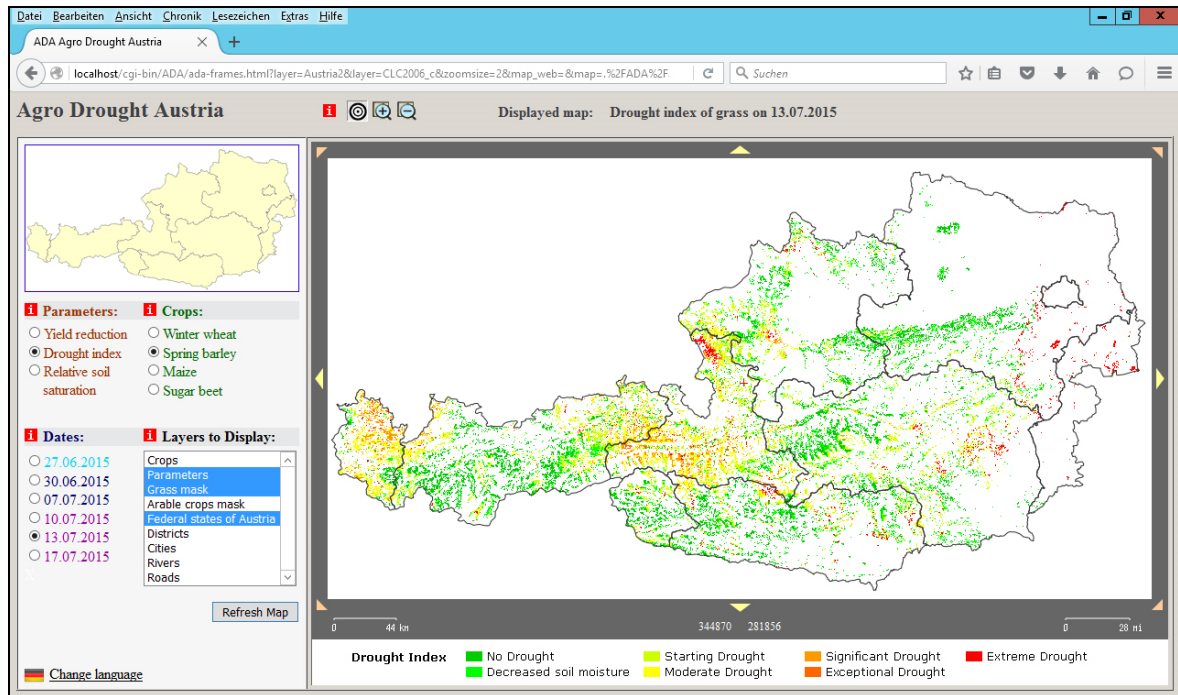


Figure 13: Drought intensity distribution of grassland for the Austrian territory on 13.07.2015

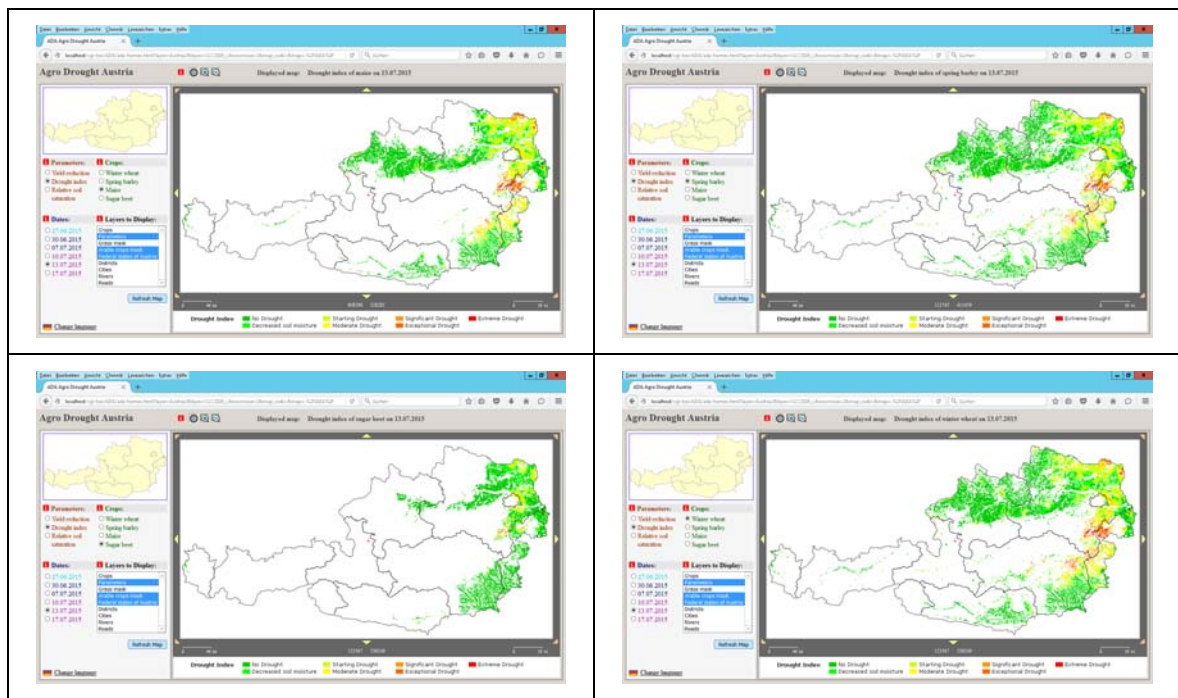


Figure 14: Drought intensity distribution of maize (upper left), spring barley (upper right), sugar beet (lower left) and winter wheat (lower right) for the Austrian territory on 13.07.2015

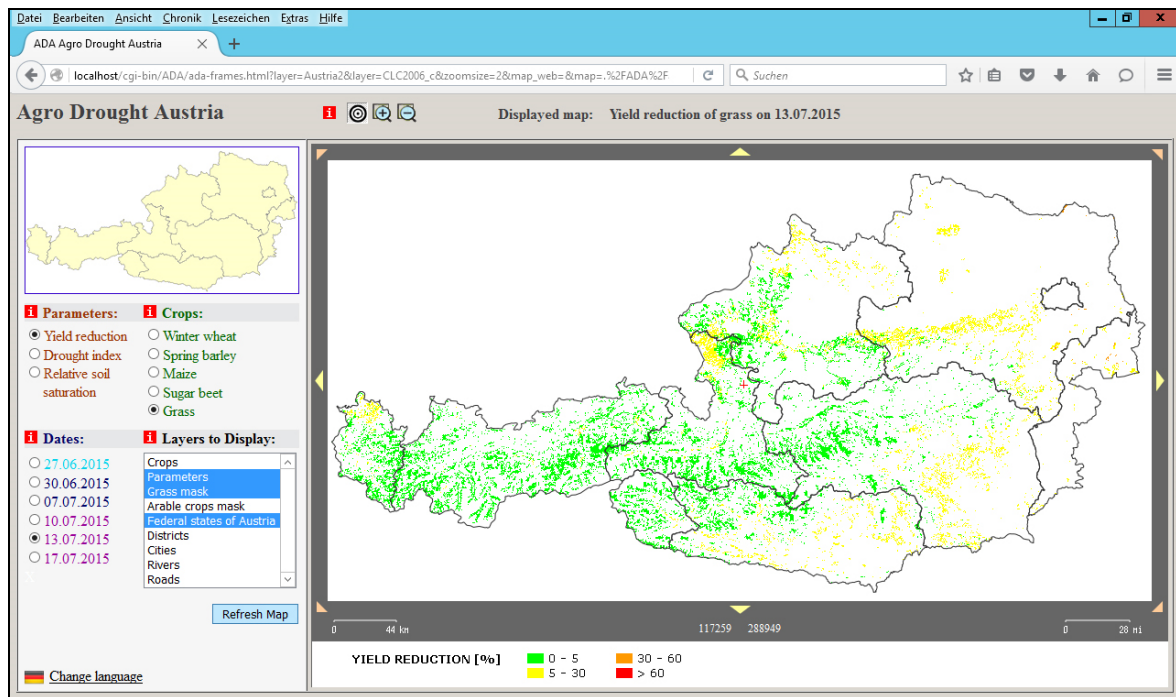


Figure 15: Crop yield reduction distribution of grassland for the Austrian territory on 13.07.2015

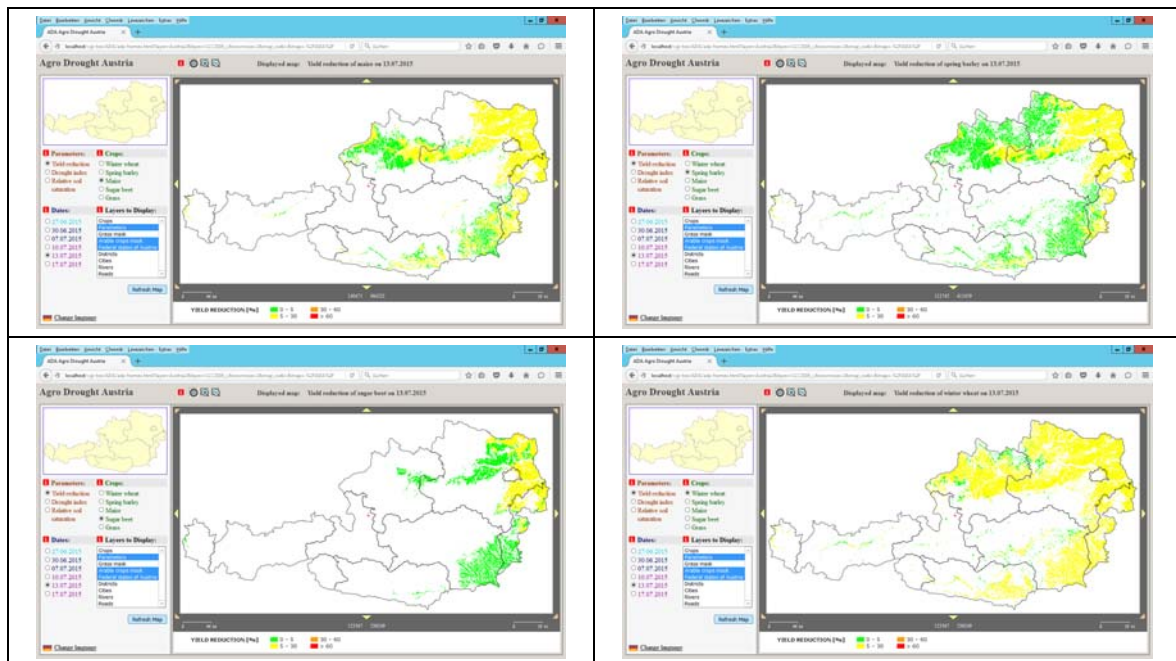


Figure 16: Crop yield reduction distribution of maize (upper left), spring barley (upper right), sugar beet (lower left) and winter wheat (lower right) for the Austrian territory on 13.07.2015

Online Resources

Commission of the European Communities (1995): CORINE Land Cover. <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>.

European Environment Agency (2013): Global and European temperature (CSI 012/CLIM 001/CLIM 003). http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/global-and-european-temperature/ds_resolveuid/6f7963c558e848778854fba1c6066dc.

NIST/SEMATECH (2012): e-Handbook of Statistical Methods, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook>.

5 Gesamte Literaturübersicht

- Allen, R.G.; Walter, I.A.; Elliott, R.; Howell, T.; Itenfisu, D. und Jensen, M.E. (2005): The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation, *American Society of Civil Engineers*, Reston, VA, USA, 216 S.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. und Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Papers. Paper No 56, FAO, Rome, 326 S.
- Ansquer, P.; Al Haj Khaled, R.; Cruz, P.; Theau, J.-P.; Therond, O. und Duru, M. (2009): Characterizing and predicting plant phenology in species-rich grasslands. *Grass and Forage Science* **64** (1), 57-70.
- Baeumer, K. (1978): Allgemeiner Pflanzenbau, 2. Auflage, *Verlag Eugen Ulmer*, Stuttgart, 264 S.
- Buchgraber, K. (2000): Ertragspotentiale und Artenvielfalt auf Grünlandstandorten im Berggebiet. MAB-Forschungsbericht: Landschaft und Landwirtschaft im Wandel, Wien, Akademie der Wissenschaften, 22.-23. September 2000, 181-189.
- Buchgraber, K. und Gindl, G. (2004): Zeitgemäße Grünlandbewirtschaftung, 2. Auflage, *Leopold Stocker Verlag*, 192 S.
- Buchgraber, K.; Schaumberger, A. und Pötsch, E.M. (2011): Grassland Farming in Austria - status quo and future prospective. 16th Symposium of the European Grassland Federation "Grassland Farming and Land Management Systems in Mountainous Regions", Gumpenstein, Austria, Grassland Science in Europe, 16, August 29-31, 2011, 13-24.
- Childs, C. (2004): Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst. *ArcUser* (July-September 2004), *ESRI Press*, Redlands, CA, USA, 32-35.
- Guggenberger, T.; Hofer, O.; Fahrner, W.; Sucher, B.; Wiedner, G. und Bader, R. (2012): Fachatlas Landwirtschaft - Entwicklung landwirtschaftlicher Geodaten im Geographical Grid System Austria. Raumberg-Gumpenstein, Forschungsbericht, Band 49, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irdning, 508 S.
- Haiden, T.; Kann, A.; Wittmann, C.; Pistotnik, G.; Bica, B. und Gruber, C. (2011): The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System and Its Validation over the Eastern Alpine Region. *Weather and Forecasting* **26** (2), 166-183.
- Hlavinka, P.; Trnka, M.; Balek, J.; Semerádová, D.; Hayes, M.J.; Svoboda, M.D.; Eitzinger, J.; Možný, M.; Fischer, M.; Hunt, E. und Žalud, Z. (2011): Development and evaluation of the SoilClim model for water balance and soil climate estimates. *Agricultural Water Management* **98** (8), 1249-1261.
- Murer, E. (2009): Überprüfung und Verbesserung der Pedotransferfunktion zur Ermittlung der Wasserspeicherfähigkeit im Boden, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen, 54 S.
- Murer, E.; Wagenhofer, J.; Aigner, F. und Pfeffer, M. (2004): Die nutzbare Feldkapazität der mineralischen Böden der landwirtschaftlichen Nutzfläche Österreichs. In Bundesamt für Wasserwirtschaft (Ed.): Schriftenreihe BAW, 20, *Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt*, Petzenkirchen, 72-78.
- Niederberger, J. (2000): Räumliche Interpolation von Niederschlag und Klimadaten. Diplomarbeit, Albert-Ludwigs-Universität, Institut für Hydrologie, Freiburg i.Br., 125 S.
- Pötsch, E.M. und Resch, R. (2005): Einfluss unterschiedlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Nährstoffgehalt von Grünlandfutter. 32. Viehwirtschaftliche Fachtagung, Irdning, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 13.-14. April 2005, 1-14.
- Schaumberger, A. (2011): Räumliche Modelle zur Vegetations- und Ertragsdynamik im Wirtschaftsgrünland. Dissertation, Technische Universität Graz, Institut für Geoinformation, 264 S.
- Smit, H.J.; Metzger, M.J. und Ewert, F. (2008): Spatial distribution of grassland productivity and land use in Europe. *Agricultural Systems* **98** (3), 208-219.

- Sparks, T.H.; Croxton, P.J.; Collinson, N. und Taylor, P.W. (2005): Examples of phenological change, past and present, in UK farming. *Annals of Applied Biology* **146** (4), 531-537.
- Strauss, F. (2012): Modeling climate change and impacts on crop production in Austria. Dissertation, University of Natural Resources and Life Sciences, Institute for Sustainable Economic Development, Vienna, 147 S.
- Strauss, F.; Formayer, H. und Schmid, E. (2013): High resolution climate data for Austria in the period 2008–2040 from a statistical climate change model. *International Journal of Climatology* **33** (2), 430-443.
- Trnka, M.; Rotter, R.P.; Ruiz-Ramos, M.; Kersebaum, K.C.; Olesen, J.E.; Zalud, Z. und Semenov, M.A. (2014): Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. *Nature Climate Change* (Advance online publication), 1-7.
- Tveito, O.E. (2007): The Developments in Spatialization of Meteorological and Climatological Elements. In Dobesch *et al.* (Eds.): *Spatial Interpolation for Climate Data: The Use of GIS in Climatology and Meteorology*, ISTE Ltd., London, 73-86.
- Wagner, K. (1990a): Neuabgrenzung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete, Teil I (Burgenland, Niederösterreich, Wien, Steiermark und Kärnten), Schriftenreihe der Bundesanstalt für Agrarwirtschaft, 61, Bundesanstalt für Agrarwirtschaft Wien.
- Wagner, K. (1990b): Neuabgrenzung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete, Teil II (Oberösterreich, Salzburg, Tirol, Vorarlberg), Schriftenreihe der Bundesanstalt für Agrarwirtschaft, 62, Bundesanstalt für Agrarwirtschaft Wien.