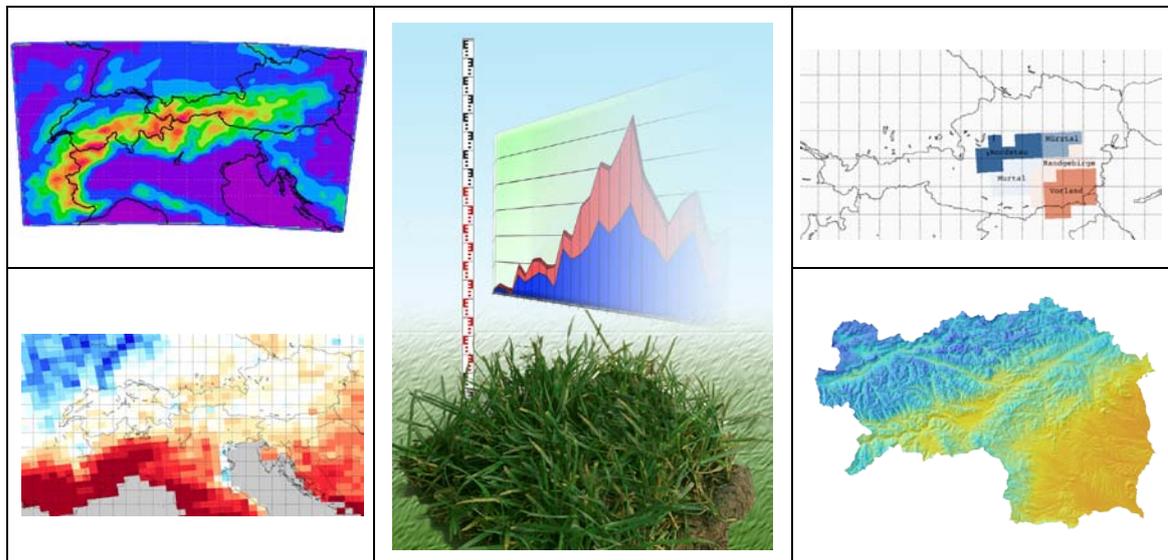




AgroClim2 – Landwirtschaftliche Ertragsentwicklung und Trockengefährdung unter geänderten Klimabedingungen in der Steiermark

Endbericht



Andreas Gobiet, Georg Heinrich, Martin Steiner,
Armin Leuprecht, Matthias Themeßl

Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel (WegCenter) und Institutsbereich für Geophysik,
Astrophysik und Meteorologie, Universität Graz

Andreas Schaumberger Karl Buchgraber

Lehr- und Forschungszentrum Landwirtschaft Raumberg Gumpenstein (LFZ)

Gefördert vom Zukunftsfonds des Landes Steiermark

März 2009

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	4
TABELLENVERZEICHNIS	9
1. EINLEITUNG	10
2. METEOROLOGISCHE TROCKENGEFÄHRDUNGSINDIZES FÜR DIE GRÜNLANDWIRTSCHAFT	12
2.1. Verwendete Datensätze und Methodik	12
2.1.1. Meteorologischer Datensatz (Stationsauswahl)	12
2.1.2. Landwirtschaftliche Ertragsdaten	14
2.1.3. Statistische Methoden	14
2.1.4. Trockengefährdungsindizes	15
2.1.4.1. Aridity Index nach UNEP	15
2.1.4.2. Minimumindex	16
2.1.4.3. Defizitindex	16
2.1.4.4. Anomalieindex	17
2.1.4.5. Anomalieindex mit 5-Tagesschwelle	17
2.1.4.6. Anomalieindex mit 5-Tagesschwelle und Gewichtung	17
2.2. Evaluierung der Trockengefährdungsindizes	18
2.2.1. Zeitreihen der Indizes von 1961 bis 2007	18
2.2.1.1. Aridity Index nach UNEP	18
2.2.1.2. Minimumindizes	20
2.2.1.3. Defizitindex	20
2.2.1.4. Anomalieindex	21
2.2.1.5. Anomalieindex mit 5-Tagesschwelle	21
2.2.1.6. Anomalieindex mit 5-Tagesschwelle und Gewichtung	22
2.2.2. Korrelationen zwischen Trockengefährdungsindizes und landwirtschaftlichen Ertragsdaten	22
3. FEHLERKORREKTUR VON KLIMAMODELLDATEN UND IHRE ANWENDUNG AUF TROCKENGEFÄHRDUNGSINDIZES	25
3.1. Verwendete Datensätze und Methodik	25
3.1.1. Beschreibung der MM5 Klimasimulationen	25

3.1.2.	ECA&D Beobachtungsdatensatz	27
3.1.3.	Regionseinteilung der Steiermark	27
3.1.4.	Fehlerkorrektur von Klimamodelldaten	28
3.2.	Zukünftige Entwicklung von Trockenheit	32
3.2.1.	Klimaänderung von Temperatur und Niederschlag	33
3.2.2.	Klimaänderung ausgewählter Trockengefährdungsindizes	36
4.	RÄUMLICHE MODELLIERUNG DER VERÄNDERUNG DES GRÜNLANDERTRAGES IN DER STEIERMARK AUF BASIS VON BODENWASSERBILANZ UND WASSERSTRESS UNTER EINBEZIEHUNG EINES KLIMAMODELLS	39
4.1.	Einleitung und Problemstellung	39
4.1.1.	Die Grünlandbewirtschaftung in der Steiermark	41
4.1.2.	Modellgrundlage zur Schätzung von Ertragsänderungen	45
4.2.	Material und Methoden	46
4.2.1.	Systemumgebung und Datengrundlage	46
4.2.2.	Überblick und Modellzusammenhang	47
4.2.3.	Modell der potenziellen Globalstrahlung	48
4.2.4.	Modell der Referenz-Evapotranspiration	49
4.2.5.	Modell der Thermischen Vegetationsperiode	50
4.2.6.	Modell der Schnitthäufigkeit und des Schnittzeitpunktes	51
4.2.7.	Modell der Bodenwasserbilanz	53
4.2.7.1.	Berechnung der Crop Evapotranspiration	53
4.2.7.2.	Wasserspeicherfähigkeit des Bodens	54
4.2.7.3.	Berechnung der aktuellen Evapotranspiration	55
4.2.8.	GRAssland Statistical Model (GRAM)	58
4.2.9.	Technische Aspekte der Implementierung	60
4.3.	Ergebnisse und Diskussion	61
4.3.1.	Repräsentation der Topographie durch den Globalstrahlungsfaktor	61
4.3.2.	Referenz-Evapotranspiration	62
4.3.3.	Analyse der Thermischen Vegetationsperiode	67
4.3.4.	Schnitthäufigkeit und Schnittzeitpunkt	72
4.3.5.	Bodenwasserbilanz	74

4.3.5.1. Crop Evapotranspiration	74
4.3.5.2. Aktuelle Evapotranspiration	76
4.3.6. Veränderung der Wachstumsbedingungen im Grünland	81
4.3.7. Ertragsentwicklung im Grünland	83
4.4. Zusammenfassung und Ausblick	91
5. ZUSAMMENFASSUNG	93
6. LITERATURVERZEICHNIS	95

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

- Abb. 2-1: Messstationsnetz in der Steiermark (Quelle: www.zamg.ac.at, bearbeitet).
Blau: Verwendete Stationen in der Obersteiermark; Rot: verwendete Stationen in der Untersteiermark. 13
- Abb. 2-2: Mittlere Aridity Indexwerte nach UNEP über die Klimanormalperiode 1961 bis 2007 für die verwendeten Messstationen der ZAMG. 19
- Abb. 2-3: Vergleich der Aridity Indizes nach UNEP von Mürzzuschlag und Fürstenfeld. 19
- Abb. 2-4: Vergleich der Zeitreihen der Minimum-Indizes mit und ohne Schwellen. 19
- Abb. 2-5: Vergleich der Defizitindexwerte von Mürzzuschlag und Fürstenfeld der Jahre 1961 bis 2007. 21
- Abb. 2-6: Vergleich der Anomalieindizes für die Stationen Mürzzuschlag und Fürstenfeld in den Jahren 1961 bis 2007. 22
- Abb. 3-1: Räumliche MM5 Konfiguration. Abbildung links: Modellgebiet 1 mit einer horizontalen Auflösung von 30 x 30 km. Abbildung rechts: Modellgebiet 2 mit einer horizontalen Auflösung von 10 x 10 km. Die Orografie ist farblich dargestellt und die Übergangszone ist durch die Linie markiert. 27
- Abb. 3-2: Umsetzung der Klimaregionen innerhalb der Steiermark im ECA&D Datensatz. 27
- Abb. 3-3: Schematische Darstellung der Fehlerkorrekturmethode „Quantile-Mapping“. Kumulative Verteilungen der simulierten Temperaturen und Niederschläge aus dem Klimamodell werden an die beobachteten Verteilungen angepasst. 28
- Abb. 3-4: Mittlere saisonale Differenzen zwischen fehlerkorrigierter Temperatur (oben) bzw. fehlerkorrigiertem Niederschlag (unten) aus der Hindcast-Simulation und den Beobachtungsdaten aus dem ECA&D Datensatz im Zeitraum 1981-1990. Links: Winter (DJF); Rechts: Sommer (JJA). 29
- Abb. 3-5: Mittlere Temperatur-Fehler der unkorrigierten (links) und fehlerkorrigierten (rechts) Hindcast-Simulation für das Jahr 1999. Oben: Winter (DJF); Unten: Sommer (JJA). 30

- Abb. 3-6: Mittlere Niederschlagsfehler [mm/Tag] der unkorrigierten (links) und fehlerkorrigierten (rechts) Hindcast-Simulation für das Jahr 1999. Oben: Winter (DJF); Unten: Sommer (JJA). 31
- Abb. 3-7: Box-Whisker-Plots (10, 25, 50, 75, 95 Quantile und Mittelwert) der Modellfehler der unkorrigierter (links) und fehlerkorrigierter (rechts) Hindcast-Simulation für Temperatur (oben) und Niederschlag (unten) im Jahr 1999. Regionen: A: Nordstau, B: Mürztal, C: Murtal, D: Randgebirge, E: Vorland. 32
- Abb. 3-8: Mittlere saisonale Differenzen zwischen fehlerkorrigierter Klimaszenario- (2041-2050) und Kontroll-Simulation (1981-1990) für die Klimaparameter Temperatur in [°C] (linke Spalte) und Niederschlag in [%] (rechte Spalte); Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA), Herbst (SON) von oben nach unten. 35
- Abb. 3-9: Mittlere saisonale Differenzen zwischen fehlerkorrigierter Klimaszenario- (2041-2050) und Kontroll-Simulation (1981-1990) für die Trockengefährdungsindizes *SPI* (linke Spalte) und *AI* (rechte Spalte); Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA), Herbst (SON) von oben nach unten. 38
- Abb. 4-1: Verteilung von Betriebs- und Grünlandbewirtschaftungstypen in der Steiermark (2007). 42
- Abb. 4-2: Räumliche Verteilung der landwirtschaftlichen Betriebstypen im Flachland und Berggebiet der Steiermark (2007). 43
- Abb. 4-3: Räumliche Verteilung der Grünlandflächen mit Unterscheidung der Nutzungstypen (2007). 44
- Abb. 4-4: Räumliche Verteilung der Grünlandnutzungsintensität (bezogen auf Gemeindeflächen) und der Grünlandbetriebe in der Steiermark (2007). 44
- Abb. 4-5: Räumliche Verteilung der auf Wetterstationen bezogenen Interpolationsstützpunkte der Klimadaten (ZAMG: Temperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung und Wind; ZAMG & HZB: Niederschlag). 47
- Abb. 4-6: Schematische Darstellung des Programmablaufs mit den Hauptmodellkomponenten. 47
- Abb. 4-7: Schema der Berücksichtigung unterschiedlicher Geländeoberflächen. 49

Abb. 4-8:	Schematische Darstellung der Rasterzellenbezogenen Überprüfung des Temperaturkriteriums für den Beginn der Vegetationsperiode.	50
Abb. 4-9:	Schematische Darstellung der Modellierung von Vegetations- und Nutzungsperiode.	51
Abb. 4-10:	Relative Verteilung der Aufwuchszeiten und daraus ableitbare Schnitttermine.	52
Abb. 4-11:	Ausgewählte Standorte für die Evaluierung der Ergebnisse.	61
Abb. 4-12:	Strahlungsraster mit und ohne Berücksichtigung von Exposition und Neigung.	62
Abb. 4-13:	Rasterdaten der topographiebedingten Änderung in den Strahlungswerten.	62
Abb. 4-14:	Räumliche Verteilung der Referenz-Evapotranspiration im Mai der Dekade 1980.	63
Abb. 4-15:	Räumliche Verteilung der Referenz-Evapotranspiration im Mai der Dekade 2040.	64
Abb. 4-16:	Räumliche Verteilung der Referenz-Evapotranspiration im August der Dekade 1980.	65
Abb. 4-17:	Räumliche Verteilung der Referenz-Evapotranspiration im August der Dekade 2040.	65
Abb. 4-18:	Differenzen der Referenz-Evapotranspiration im Mai der Dekaden 1980 und 2040.	66
Abb. 4-19:	Differenzen der Referenz-Evapotranspiration im August der Dekaden 1980 und 2040.	66
Abb. 4-20:	Differenz der mittleren Temperatur von Dekade 1980 und 2040 in Gumpenstein.	67
Abb. 4-21:	Differenz der mittleren Temperatur von Dekade 1980 und 2040 in Kirchberg/Walde.	67
Abb. 4-22:	Beginn der Thermischen Vegetationsperiode in der Dekade 1980.	68
Abb. 4-23:	Beginn der Thermischen Vegetationsperiode in der Dekade 2040.	68
Abb. 4-24:	Ende der Thermischen Vegetationsperiode in der Dekade 1980.	69
Abb. 4-25:	Ende der Thermischen Vegetationsperiode in der Dekade 2040.	70
Abb. 4-26:	Dauer der Thermischen Vegetationsperiode in der Dekade 1980.	71
Abb. 4-27:	Dauer der Thermischen Vegetationsperiode in der Dekade 2040.	71

Abb. 4-28:	Aus der mittleren Thermischen Vegetationsperiode der Dekade 1980 abgeleitete durchschnittliche Schnittanzahl in der Steiermark.	72
Abb. 4-29:	Aus der mittleren Thermischen Vegetationsperiode der Dekade 2040 abgeleitete durchschnittliche Schnittanzahl in der Steiermark.	73
Abb. 4-30:	Nutzbare Feldkapazität (Oberboden: 0 - 20 cm) für landwirtschaftlich genutzte Flächen.	74
Abb. 4-31:	Zusammenhang von Evapotranspiration und Pflanzenfaktor.	75
Abb. 4-32:	Beispiel einer Pflanzenfaktor-Rasteroberfläche für den 30. Juni 1985 (EH5).	76
Abb. 4-33:	Änderung der mittleren Monatsniederschlagssumme der Dekaden 1980 und 2040.	77
Abb. 4-34:	Mittlere Referenz-Evapotranspiration am Standort Kirchberg/Walde im Dekadenvergleich 1980 und 2040.	78
Abb. 4-35:	Änderung der mittleren Temperatur der Dekaden 1980 und 2040.	79
Abb. 4-36:	Änderung der mittleren Globalstrahlung der Dekaden 1980 und 2040.	79
Abb. 4-37:	Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit der Dekaden 1980 und 2040.	79
Abb. 4-38:	Änderung des mittleren Sättigungsdefizits der Dekaden 1980 und 2040.	80
Abb. 4-39:	Verlauf der Evapotranspiration am Standort Gumpenstein im Jahr 1986 und 2044.	80
Abb. 4-40:	Verlauf der Evapotranspiration am Standort Piber im Jahr 1986 und 2044.	81
Abb. 4-41:	Verlauf der Evapotranspiration am Standort Kirchberg/Walde im Jahr 1986 und 2044.	81
Abb. 4-42:	Verlauf der Evapotranspiration am Standort Hatzendorf im Jahr 1986 und 2044.	81
Abb. 4-43:	Growth Supporting Factor am Standort Gumpenstein für die Dekaden 1980 und 2040.	82
Abb. 4-44:	Growth Supporting Factor am Standort Piber für die Dekaden 1980 und 2040.	82
Abb. 4-45:	Growth Supporting Factor am Standort Kirchberg/Walde für die Dekaden 1980 und 2040.	82
Abb. 4-46:	Growth Supporting Factor am Standort Hatzendorf für die Dekaden 1980 und 2040	83
Abb. 4-47:	Temperatursumme für den 4. Aufwuchs des Jahres 1986.	84

Abb. 4-48:	Effektive Temperatursumme für den 4. Aufwuchs des Jahres 1986.	85
Abb. 4-49:	Reduktion durch den Growth Supporting Factor für den 4. Aufwuchs des Jahres 1986.	85
Abb. 4-50:	Temperatursumme für den 4. Aufwuchs des Jahres 2044.	86
Abb. 4-51:	Effektive Temperatursumme für den 4. Aufwuchs des Jahres 2044.	87
Abb. 4-52:	Reduktion durch den Growth Supporting Factor für den 4. Aufwuchs des Jahres 2044.	87
Abb. 4-53:	Jahresbruttoertrag im Grünland für das Jahr 1986.	88
Abb. 4-54:	Jahresbruttoertrag im Grünland für das Jahr 2044.	88
Abb. 4-55:	Relative Änderungen des Jahresbruttoertrages im Grünland im Vergleich der Dekaden 1980 und 2040 in der Steiermark.	89

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 2-1: Zuordnung der Messstationen der ZAMG zu den einzelnen Regionen und Bezirken.	13
Tab. 2-2: Einteilung des Aridity Index (nach UNEP).	16
Tab. 2-3: Überblick der Minimumindexwerte mit den unterschiedlichen Schwellen für die beiden Messstationen Mürzzuschlag und Fürstenfeld.	20
Tab. 2-4: Korrelationen zwischen Trockengefährdungsindizes und Ertragsdaten.	24
Tab. 3-1: Mittlere saisonale und jährliche Temperaturdifferenzen [°C] zwischen fehlerkorrigierter Klimaszenario- (2041-2050) und Kontroll-Simulation (1981-1990) für die Steiermark; Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA), Herbst (SON).	33
Tab. 3-2: Mittlere saisonale und jährliche relative Niederschlagsdifferenzen [%] zwischen fehlerkorrigierter Klimaszenario- (2041-2050) und Kontroll-Simulation (1981-1990) für die Steiermark; Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA), Herbst (SON).	34
Tab. 3-3: Mittlere saisonale und jährliche relative Differenzen des <i>SPI</i> zwischen fehlerkorrigierter Klimaszenario- (2041-2050) und Kontroll-Simulation (1981-1990) für die Steiermark; Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA), Herbst (SON).	37
Tab. 3-4: Mittlere saisonale und jährliche relative Differenzen des <i>AI</i> zwischen fehlerkorrigierter Klimaszenario- (2041-2050) und Kontroll-Simulation (1981-1990) für die Steiermark; Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA), Herbst (SON).	37

1. EINLEITUNG

Der globale Klimawandel und seine regionalen Ausprägungen und Auswirkungen werden in den letzten Jahren immer stärker spürbar. Das Projekt AgroClim widmet sich einem wichtigen Aspekt des Klimawandels, nämlich seinen Auswirkungen auf landwirtschaftliche Trockengefährdung in der Steiermark. Die Wichtigkeit dieses Themas war unter anderem im Jahr 2003 spürbar, als eine Hitzewelle europaweit geschätzte landwirtschaftliche Schäden von 30 Milliarden Euro verursachte. Auch Österreich war von der Dürre schwer betroffen, etwa durch Einbußen in der Futtermittelproduktion von bis zu 75 % [ZAMG, 2003]. Zunehmende Trockengefährdung spielt auch für das Bundesland Steiermark eine zentrale Rolle und vor allem die Situation in den südlichen und östlichen Landesteilen erfordert Anpassungskonzepte, welche auf genaue Analysen der Ist-Situation sowie einer ausgewogenen Beurteilung der künftigen Entwicklung basieren müssen.

Global wurde im Zeitraum 1906 – 2005 ein Temperaturanstieg von $+0.74 \pm 0.18$ °C verzeichnet, wobei die Menschheit durch den Ausstoß von Treibhausgasen mit sehr großer Wahrscheinlichkeit (> 90 %) den Hauptanteil dieser Erwärmung zu verantworten hat [Solomon et al., 2007; Alcamo et al., 2007]. Die Kontinente erwärmen sich schneller als die Meeresoberfläche was sich beispielsweise im Alpenraum durch einen Temperaturanstieg von $+1.2$ °C im 20. Jahrhundert äußert [Auer et al., 2007]. Noch höhere Temperaturanstiege sind in der südlichen und östlichen Steiermark zu verzeichnen wie im ersten Teil dieses Projekts [Gobiet et al., 2008a] dargelegt wurde. Ein Anstieg der Temperatur wirkt sich auf den Wasserkreislauf aus. In Europa ergaben sich daraus Niederschlagszunahmen in den nördlichen Regionen (insbesondere im Winter) und Abnahmen in den südlichen Regionen (insbesondere im Sommer und Herbst). Die Steiermark liegt in der Grenzzone zwischen zunehmenden und abnehmenden Niederschlägen. Untersuchungen im Rahmen des ersten Teils dieses Projekts weisen auf eine Zweiteilung der Steiermark hin, wobei die nördlichen Regionen in den letzten 40 - 50 Jahren eher zunehmende und die südlichen Regionen eher gleich bleibende oder abnehmende Niederschläge verzeichneten. Allerdings sind diese Niederschlagstrends meist nicht statistisch signifikant.

Ziel des Projektes *AgroClim1* (2006-2008, Förderung durch das Amt der Steiermärkischen Landesregierung FA10A, Agrarrecht und ländliche Entwicklung) war es, die Entwicklung der Trockengefährdung in der Vergangenheit zu untersuchen und eine erste Abschätzung zu geben, inwiefern Zukunftsszenarien aus Klimamodellen zur Kopplung mit räumlich hoch aufgelösten landwirtschaftlichen Wachstumsmodellen geeignet sind. Die Ergebnisse des Projekts *AgroClim1* sind im Bericht von Gobiet et al. [2008a] dargestellt.

Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick über die Ergebnisse des zweiten Projektteiles (*AgroClim2*, 2008-2009, Förderung durch den Zukunftsfonds Steiermark) in dem die zu erwartende zukünftige Entwicklung der Trockengefährdung in der Steiermark untersucht wird. Der Bericht setzt sich aus drei Teilen zusammen: Der erste Teil widmet sich dem Design von meteorologischen Trockengefährdungsindizes (d.h., Indizes die ohne zusätzliche Information über den Boden direkt aus meteorologischen Messungen oder Simulationen abgeleitet werden können) und untersucht ihre Aussagekraft bezüglich landwirtschaftlicher Erträge. Derartige Indizes können relativ einfach aus Simulationen des zukünftigen Klimas abgeleitet werden. Der zweite Teil des Berichtes beschäftigt sich mit Fehlern in Klimamodellen und deren Korrektur. Diese Fehler verhindern meist die regional aussagekräftige und landwirtschaftlich relevante Analyse von Klimaszenarien. Die entwickelten Methoden werden auf ein Klimaszenario angewandt und die zukünftige Entwicklung der Trockengefährdung in der Steiermark anhand ausgewählter Trockengefährdungsindizes dargestellt. Im dritten Teil wird das Klimaszenario mit einem Wachstumsmodell für Grünland gekoppelt daraus konkrete Überlegungen hinsichtlich der Auswirkung des Globalen Klimawandels auf landwirtschaftliche Erträge, insbesondere jene des Wirtschaftsgrünlandes, abgeleitet.

2. METEOROLOGISCHE TROCKENGEFÄHRDUNGSINDIZES FÜR DIE GRÜNLANDWIRTSCHAFT

Autoren: M. Steiner, A. Gobiet, G. Heinrich, A. Schaumberger

Da räumlich hochaufgelöste Bodendaten in hinreichender Qualität oft nicht vorhanden sind, wurden in *AgroClim2* verschiedene Trockengefährdungsindizes entworfen, für deren Berechnung ausschließlich Niederschlag und potentielle Evapotranspiration (ihrerseits berechnet aus relativer Luftfeuchte, Temperatur, Windgeschwindigkeit, und Globalstrahlung) herangezogen wurden. Die Basis zur Berechnung der verschiedenen Indizes stellt die nettopotentielle Evapotranspiration dar, welche als Differenz zwischen Niederschlag und potentieller Evapotranspiration definiert ist und als Indikator Wasserdefizit im Boden betrachtet werden kann.

Im Folgenden werden die entworfenen Trockengefährdungsindizes vorgestellt. Wie auch schon in *AgroClim1* [Gobiet et al. 2008a] wurden Korrelationen zwischen den entworfenen Trockengefährdungsindizes und landwirtschaftlichen Ertragsdaten für die Steiermark berechnet, um ihre Eignung für landwirtschaftliche Analysen zu überprüfen. Aufgrund der Wichtigkeit der Grünlandwirtschaft in der Steiermark, wurde das Hauptaugenmerk auf mehrmähdige Wiesen gelegt. Zusätzlich wurden auch für andere Kulturarten Korrelationen berechnet. Diese weisen jedoch andere Vegetationsperioden als mehrmähdige Wiesen auf und die potentielle Verdunstung ist nicht auf diese Kulturen abgestimmt, wodurch die Korrelationen mit den Erträgen dieser Kulturarten abgeschwächt werden.

2.1. Verwendete Datensätze und Methodik

2.1.1. Meteorologischer Datensatz (Stationsauswahl)

Für die Berechnung der Trockengefährdungsindizes werden meteorologische Daten benötigt und diese liefern Messstationen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG). Für spätere Korrelationen zwischen Trockengefährdungsindizes und Ernteerträgen, stehen Ertragsdaten der *Statistik Austria* der einzelnen steirischen Bezirke zur Verfügung. Daher wurde bei der Auswahl der meteorologischen Messstationen darauf geachtet,

dass diese als repräsentativ für den jeweiligen Bezirk anzusehen sind. Zusätzlich wurde eine Unterteilung in Ober- und Untersteiermark getroffen. Eine genaue Beschreibung der Stationsauswahl ist Heinrich [2008] zu entnehmen. Die Daten sind auf Tagesbasis und stammen aus den Jahren 1961 bis 2007, wobei nur die Monate April bis September berücksichtigt wurden (Vegetationsperiode von mehrmähdigen Wiesen).

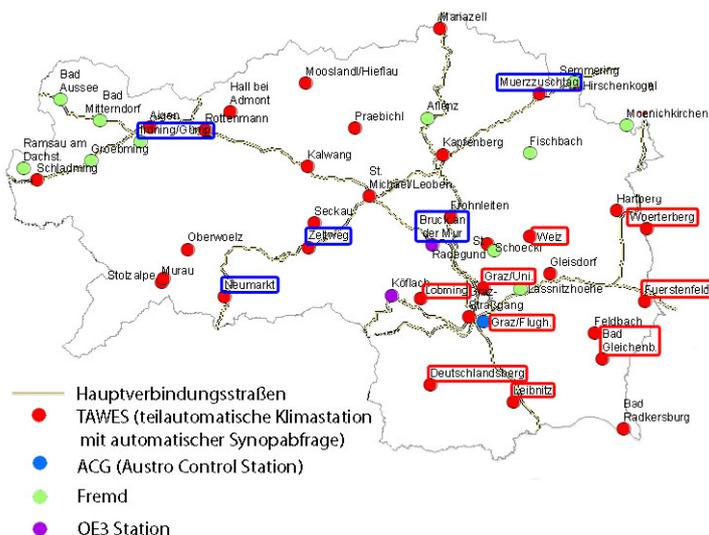


Abb. 2-1: Messstationsnetz in der Steiermark (Quelle: www.zamg.ac.at, bearbeitet). Blau: Verwendete Stationen in der Obersteiermark; Rot: verwendete Stationen in der Untersteiermark.

Region	Bezirk	Messstation
Obersteiermark	Liezen	Irdning-Gumpenstein
	Mürzzuschlag	Mürzzuschlag
	Bruck an der Mur	Bruck an der Mur
	Leoben	Bruck an der Mur
	Murau	Neumarkt
	Judenburg	Zeltweg
	Knittelfeld	Zeltweg
Untersteiermark	Voitsberg	Lobming
	Graz Umgebung	Graz Flughafen
	Graz Stadt	Graz Universität
	Weiz	Weiz
	Fürstenfeld	Fürstenfeld
	Hartberg	Wörterberg
	Deutschlandsberg	Deutschlandsberg
	Leibnitz	Leibnitz
	Radkersburg	Bad Gleichenberg
Feldbach	Bad Gleichenberg	

Tab. 2-1: Zuordnung der Messstationen der ZAMG zu den einzelnen Regionen und Bezirken.

Die Zuordnung der Messstationen zu den einzelnen Bezirken in der Steiermark ist in Tab. 2-1 aufgelistet. In Abb. 2-1 sind die verwendeten Messstationen in der Obersteiermark blau umrahmt und die der Untersteiermark rot.

Die für die Berechnung der Indizes benötigten Daten der potentiellen Evapotranspiration (PET) wurden vom Lehr- und Forschungszentrum Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein (LFZ) zur Verfügung gestellt. Näheres zur Berechnung der PET ist Schaumberger [2008] zu entnehmen.

2.1.2. Landwirtschaftliche Ertragsdaten

Die zur Korrelation mit Trockengefährdungsindizes verwendeten landwirtschaftlichen Ertragsdaten stammen von der *Statistik Austria*. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Korrelationen zwischen Trockengefährdungsindizes und landwirtschaftlichen Ertragsdaten herzustellen, wurde für diese Arbeit ein Ertragsdatensatz für die Steiermark auf Jahresbasis und Bezirksebene verwendet, welcher bereits im ersten Teil dieses Projekts verwendet wurde [Gobiet et al. 2008a]. Die Erträge decken den Zeitraum 1995 – 2006 ab und liegen in der Einheit Dezitonnen pro Hektar (dt/ha) vor. Eine nähere Erläuterung zur Ernteerhebung ist in Heinrich [2008] zu finden.

Aus den vorhandenen 32 Kulturarten der Erntestatistik wurden auf Grund ihrer Wichtigkeit für die Steiermark folgende ausgewählt:

- Grün- und Silomais,
- Körnermais inklusive Corn-Cob-Mix (CCM),
- Sommergerste,
- Wintergerste und
- Mehrmähdige Wiesen

2.1.3. Statistische Methoden

Der von Bravais und Pearson stammende Korrelationskoeffizient hat die Form

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x})(y_i - \hat{y})}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x})^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}} \quad (2-1)$$

und wurde für die Korrelationsberechnungen zwischen Indizes und Ertragsdaten verwendet. $x_1 \dots x_n$ und $y_1 \dots y_n$ sind die Datenreihen für welche die Korrelationen berechnet wird. Ein Korrelationskoeffizient von $r_{xy} = 0$ bedeutet keine Korrelation, $|r_{xy}| = 1$ bedeutet vollständige Korrelation. Zur Überprüfung der Signifikanz wurde ein t-Test durchgeführt mit einem Signifikanzniveau von 95 %. Der t-Test ist folgendermaßen definiert:

$$t = \frac{r_{xy}}{\sqrt{\frac{1-r_{xy}^2}{n-2}}} \quad (2-2)$$

Wobei n für die Freiheitsgrade steht. Eine genauere Beschreibung für Korrelationskoeffizient und t-Test ist Heinrich [2008] zu entnehmen.

2.1.4. Trockengefährdungsindizes

Die Grundlage zur Berechnung der verschiedenen Trockengefährdungsindizes bilden die beiden Parameter Niederschlag und potentielle Verdunstung (Referenzverdunstung für mit Gras bewachsene Oberflächen) auf Tagesbasis. Durch Bilanzierung der potentiellen Evapotranspiration mit dem Niederschlag wird eine rein klimatische Wasserbilanz hergestellt. Der Vergleich von Feuchtigkeitzufuhr über den Niederschlag mit dem aus der Verdunstung resultierenden Wasserbedarf kann als guter Indikator für Trockenstress angesehen werden und dient als Ausgangspunkt bei der Berechnung der Trockengefährdungsindizes. Die Berechnung der Indizes für ein bestimmtes Jahr bezieht sich auf die angenommene Vegetationsperiode für mehrjährige Wiesen (April bis September).

2.1.4.1. Aridity Index nach UNEP

Dieses Kapitel bezieht sich auf Middleton [1992]. Der Aridity Index ist nach dem United Nations Environment Programme (UNEP) ist folgendermaßen definiert:

$$Aridity\ Index = \frac{\Sigma\text{Niederschlag}}{\Sigma\text{potentielle Evapotranspiration}} = \frac{P}{PET} \quad (2-3)$$

Zur Berechnung des Aridity Index nach UNEP werden Niederschlag und potentielle Verdunstung über die Vegetationsperiode aufsummiert und das Verhältnis der beiden gebildet. Dabei bedeuten alle Werte über eins einen Überschuss an Wasser. Werte unter eins besagen, dass der Niederschlag geringer als die Verdunstung ist, und somit ein Defizit in der benötigten Wassermenge besteht.

Die Einteilung der Aridity Indexwerte nach UNEP zeigt Tab. 2-2:

Zonen	Grenzen
Hyperaride Zone	$P/PET < 0,05$
Aride Zone	$0,05 \leq P/PET < 0,20$
Semiaride Zone	$0,20 \leq P/PET < 0,50$
Trocken subhumide Zone	$0,50 \leq P/PET < 0,65$
Feuchte Zone	$0,65 \leq P/PET$

Tab. 2-2: Einteilung des Aridity Index (nach UNEP).

7.5 % der Erdoberfläche fallen in die hyperaride Zone. In dieser Zone sind Niederschläge stark variabel, es kann auch jahrelange keinen Niederschlag geben. In der ariden Zone gibt es in Winterregenzonen einen durchschnittlichen Jahresniederschlag von 200 mm und in Sommerregenzonen 300 mm. Bei der semiariden Zone sind es 500 mm für Winterregenzonen und 800 mm für Sommerregenzonen. In der trocken subhumiden Zone ist die zwischenjährliche Niederschlagsvariabilität geringer als 25 %. Dieser Einteilung zu Folge liegt die Steiermark in der feuchten Zone.

2.1.4.2. Minimumindex

Der *Minimumindex* steht für das Minimum der *akkumulierten nettopotentiellen Evapotranspiration* eines Jahres. Die *nettopotentielle Evapotranspiration (nPET)* eines bestimmten Tages berechnet sich wie folgt:

$$nPET = \text{Niederschlag} - \text{potentielle Evapotranspiration} = P - PET \quad (2-4)$$

Um die *akkumulierte nettopotentielle Evapotranspiration* eines Jahres zu erhalten, werden alle Werte innerhalb der Vegetationsperiode aufsummiert. Um den Index zu verfeinern, wurden Schwellenwerte eingeführt. Konzeptionell wird dabei davon ausgegangen, dass der Boden nur eine bestimmte Menge an Wasser halten kann, wird der Schwellenwert überschritten, dann fließt das überschüssige Wasser ab. Als Schwellenwerte dafür wurden die akkumulierten nPET-Werte mit mehr als Null, 30 und 40 Millimeter gewählt.

2.1.4.3. Defizitindex

Der *Defizitindex* ist als der größte negative Abstand zwischen *akkumulierter nPET* über die Vegetationsperiode eines bestimmten Jahres und dem *akkumulierten nPET-Klimamittel* definiert. Für die Berechnung des Klimamittels wurde die Referenzperiode 1961 bis 2007 herangezogen. Bei diesem Index wird davon ausgegangen, dass Werte unterhalb des Klimamittels sich negativ auf das Pflanzenwachstum auswirken. Je weiter sich die aktuelle

nPET-Kurve in negativer Richtung vom Klimamittel entfernt, desto mehr Trockenheit herrscht vor.

2.1.4.4. Anomalieindex

Der *Anomalieindex* gibt die Summe aller aktuellen nPET-Werte (nicht akkumuliert) über die Vegetationsperiode eines Jahres unter dem Klimamittel an. Dies würde bedeuten, dass sobald nPET-Werte unter dem Klimamittel liegen, es negative Auswirkungen auf die Pflanze gibt.

2.1.4.5. Anomalieindex mit 5-Tagesschwelle

Um auf die Pflanzenwelt genauer einzugehen, wurde für den *Anomalieindex* eine Schwelle eingeführt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass es erst ab fünf aufeinander folgenden Tagen unter dem Klimamittel negative Auswirkungen für die Pflanze gibt. Mehr als fünf Tage unter dem Klimamittel würde eine Dürreperiode bedeuten. Für die Berechnung des Index heißt das, wenn diese Fünftagesgrenze überschritten wird, werden die Werte vom ersten Tag der Dürreperiode bis zum letzten Tag aufsummiert. Der Index ergibt sich aus der Summe aller dieser Perioden welche die Fünftagesgrenze überschritten haben.

2.1.4.6. Anomalieindex mit 5-Tagesschwelle und Gewichtung

Ein weiterer Index, welcher die Auswirkung von Trockenheit auf Pflanzen noch genauer widerspiegeln sollte, wurde versuchsweise kreiert. Dieser basiert auf den beiden vorangegangenen Indizes. Dabei wurde zusätzlich eine Gewichtung eingeführt, die für die Anzahl der Tage multipliziert mit der Summe der Werte, welche sich unter dem Klimamittel befinden und die Fünftagesgrenze überschritten haben, steht. Der Index ergibt sich dann über die Summe aller dieser Perioden eines Jahres.

2.2. Evaluierung der Trockengefährdungsindizes

2.2.1. Zeitreihen der Indizes von 1961 bis 2007

Für einen Vergleich der Indizes wurden die beiden Messstationen Mürzzuschlag aus der Obersteiermark (feuchteres Gebiet) und Fürstenfeld aus der Untersteiermark (trockeneres Gebiet) gewählt. Linienunterbrechungen in den Abbildungen bedeuten Fehlwerte. Für die jeweiligen Indizes wurden langjährige Mittelwerte über die Periode 1961 bis 2007 berechnet und zum Vergleich herangezogen.

2.2.1.1. Aridity Index nach UNEP

Abb. 2-2 gibt einen Überblick der berechneten Aridity Indizes nach UNEP in der Steiermark. Abb. 2-3 zeigt eine Darstellung der Entwicklung der Indizes für die ausgewählten Stationen Mürzzuschlag und Fürstenfeld über die Periode 1961 bis 2007.

Mürzzuschlag hat einen mittleren Aridity Index nach UNEP von 1.18 (d.h. Niederschlag ist größer als die potentielle Evapotranspiration). Fürstenfeld hat einen Aridity Index nach UNEP von 0.79. In Abb. 2-3 ist sehr gut zu erkennen, dass Mürzzuschlag über alle Jahre hinweg höhere Indexwerte hat als Fürstenfeld. Betrachtet man die Rekordsommer 1992 und 2003, dann widerspiegeln die niedrigeren Indexwerte für beide Stationen die trockene und heiße Situation in beiden Jahren. Für Mürzzuschlag weist der Aridity Index nach UNEP im Jahr 2003 einen Wert von 0.93 und für Fürstenfeld 0.49 auf. Es liegen somit beide Stationen deutlich unter dem langjährigen Mittel. Ebenso trocken war das Jahr 1992 mit Werten von 0.85 für Mürzzuschlag und 0.38 für Fürstenfeld. Ein sehr feuchtes Jahr für Mürzzuschlag war 1996 mit einem Indexwert von 2.05 was theoretisch bedeutet, dass es doppelt so viel Niederschlag gab als effektiv verdunstet wurde.

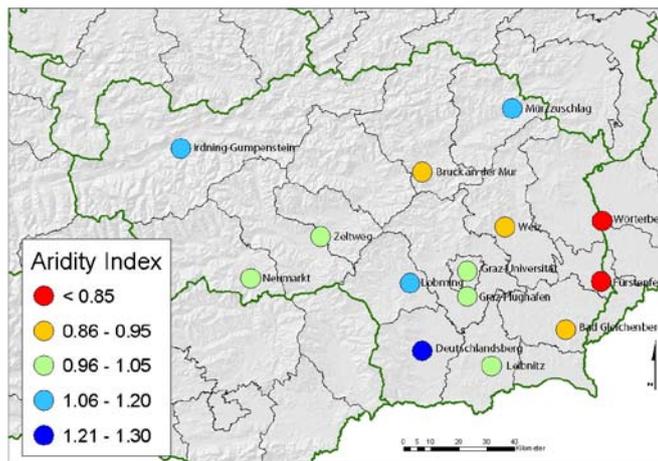


Abb. 2-2: Mittlere Aridity Indexwerte nach UNEP über die Klimanormalperiode 1961 bis 2007 für die verwendeten Messstationen der ZAMG.

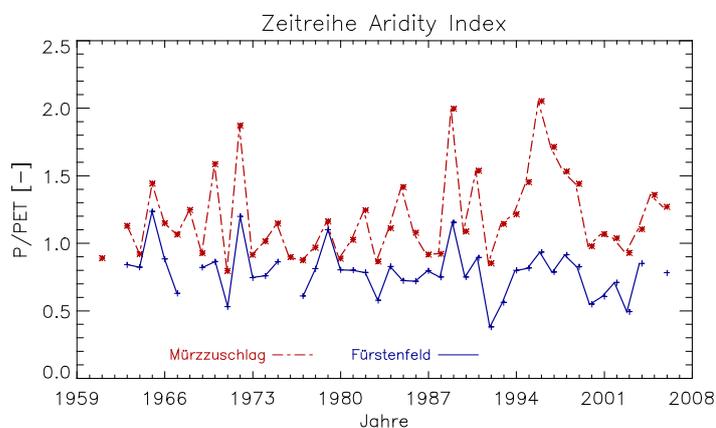


Abb. 2-3: Vergleich der Aridity Indizes nach UNEP von Mürzzuschlag und Fürstenfeld.

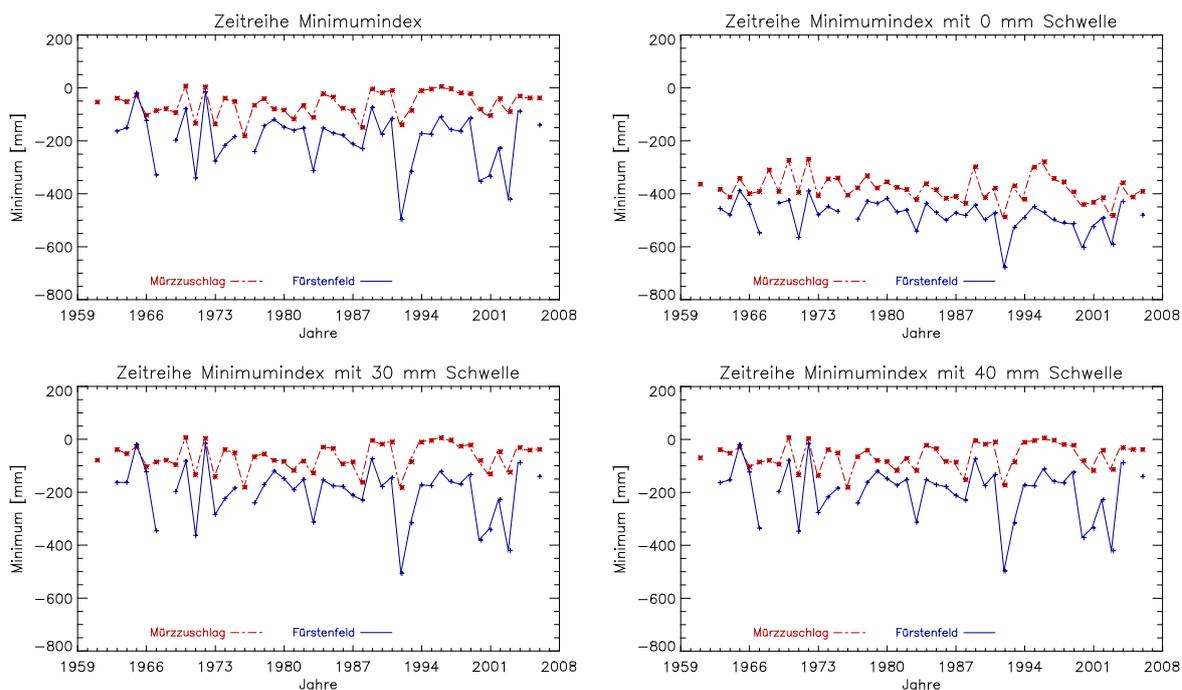


Abb. 2-4: Vergleich der Zeitreihen der Minimum-Indizes mit und ohne Schwellen.

2.2.1.2. Minimumindizes

Genauso wie beim Aridity Index nach UNEP, sind bei allen Minimumindizes die extrem trockenen und heißen Jahre 1992 und 2003 deutlich zu erkennen (siehe Abb. 2-4), wobei in Fürstenfeld die Indexwerte im Allgemeinen kleiner sind als in Mürzzuschlag. Tab. 2-3 gibt einen Überblick für die Minimumindizes mit und ohne Schwellenwerte vom langjährigen Mittel und den trockenen Jahren 1992 und 2003.

	<i>Schwelle</i>	<i>Langjähriges Mittel [mm]</i>	<i>1992 [mm]</i>	<i>2003 [mm]</i>
<i>Mürzzuschlag</i>	<i>keine Schwelle</i>	-61	-140	-90
	<i>0 mm</i>	-365	-487	-482
	<i>30 mm</i>	-66	-182	-123
	<i>40 mm</i>	-64	-172	-113
<i>Fürstenfeld</i>	<i>keine Schwelle</i>	-194	-497	-421
	<i>0 mm</i>	-418	-677	-591
	<i>30 mm</i>	-197	-506	-421
	<i>40 mm</i>	-208	-497	-421

Tab. 2-3: Überblick der Minimumindexwerte mit den unterschiedlichen Schwellen für die beiden Messstationen Mürzzuschlag und Fürstenfeld.

Aus Tab. 2-3 kann man erkennen, dass sich die Indexwerte bei keiner Schwelle, sowie bei der 30 und 40 mm Schwelle in Fürstenfeld nicht stark unterscheiden. Hingegen kommt es bei der 0 mm Schwelle zu einer starken Änderung des Index. Für Mürzzuschlag sieht das Bild für das langjährige Mittel ähnlich aus, jedoch sind in den Jahren 1992 und 2003 stärkere Unterschiede zwischen keiner und den 30 mm bzw. 40 mm Schwellen zu erkennen. Sämtliche Indexwerte für die Jahre 1992 und 2003 liegen deutlich unter den jeweiligen langjährigen Mittelwerten.

2.2.1.3. Defizitindex

Die Defizitindexwerte (siehe Abb. 2-5) zeigen in den 70iger Jahren große Schwankungen. Es ist auch zu erkennen, dass es in Mürzzuschlag in den 70igern größere Abweichungen vom Klimamittel gibt als in Fürstenfeld. Das durchschnittliche Defizit für Mürzzuschlag hat einen Wert von -95 mm und für Fürstenfeld -83 mm. Fürstenfeld zeigt die größten Defizite in den Jahren 1992 (-357 mm) und 2003 (-281 mm). Mürzzuschlag hat in den Jahren 1992 und 2003 Abweichungen von -212 mm bzw. -150 mm.

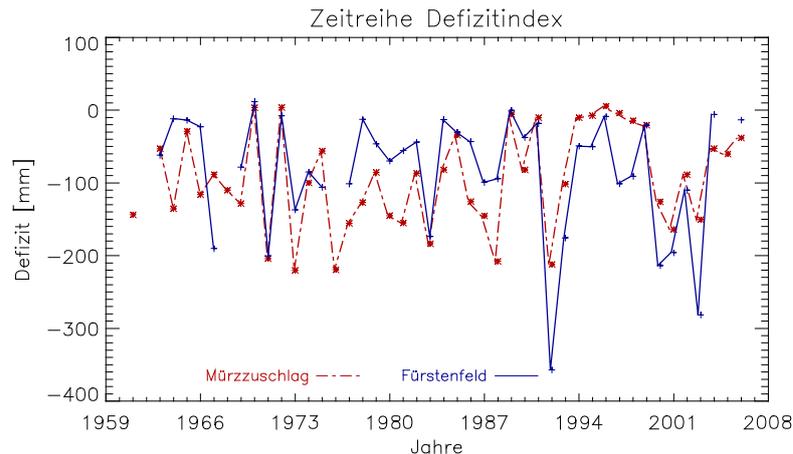


Abb. 2-5: Vergleich der Defizitindexwerte von Mürrzuslag und Fürstenfeld der Jahre 1961 bis 2007.

2.2.1.4. Anomalieindex

Die Anomalieindizes (siehe Abb. 2-6 links oben) über die Jahre 1961 bis 2007 zeigen für Mürrzuslag geringere Werte als für Fürstenfeld. Bedenkt man, dass der Anomalieindex als Summe aller Werte unter den Klimamittelwerten eines Jahr definiert ist, bedeutet dies, dass es in Mürrzuslag generell stärkere Abweichungen gibt als in Fürstenfeld. Der Mittelwert über die Periode 1961 bis 2007 beträgt für Mürrzuslag -442 mm und für Fürstenfeld -374 mm. Die Indizes zeigen für die trockenen Jahre 1992 und 2003 wieder starke Ausprägungen, wobei die Anomalien für Mürrzuslag (-556 mm bzw. -550 mm) stärker ins Negative gehen als für Fürstenfeld (-555 mm bzw. -473 mm).

2.2.1.5. Anomalieindex mit 5-Tagesschwelle

Verglichen mit den vorherigen Indizes, dreht sich bei diesem Index (siehe Abb. 2-6 rechts oben) das Bild ein wenig. Die Abweichungen vom Klimamittel sind in Mürrzuslag und Fürstenfeld ähnlich. Der Mittelwert beträgt für Mürrzuslag -252 mm und für Fürstenfeld -237 mm. Der Indexwert für Fürstenfeld im Jahre 1992 (-509 mm) ist stärker negativ als für Mürrzuslag (-417 mm). Im Jahr 2003 ist dies allerdings umgekehrt (-366 mm für Fürstenfeld und -402 mm für Mürrzuslag).

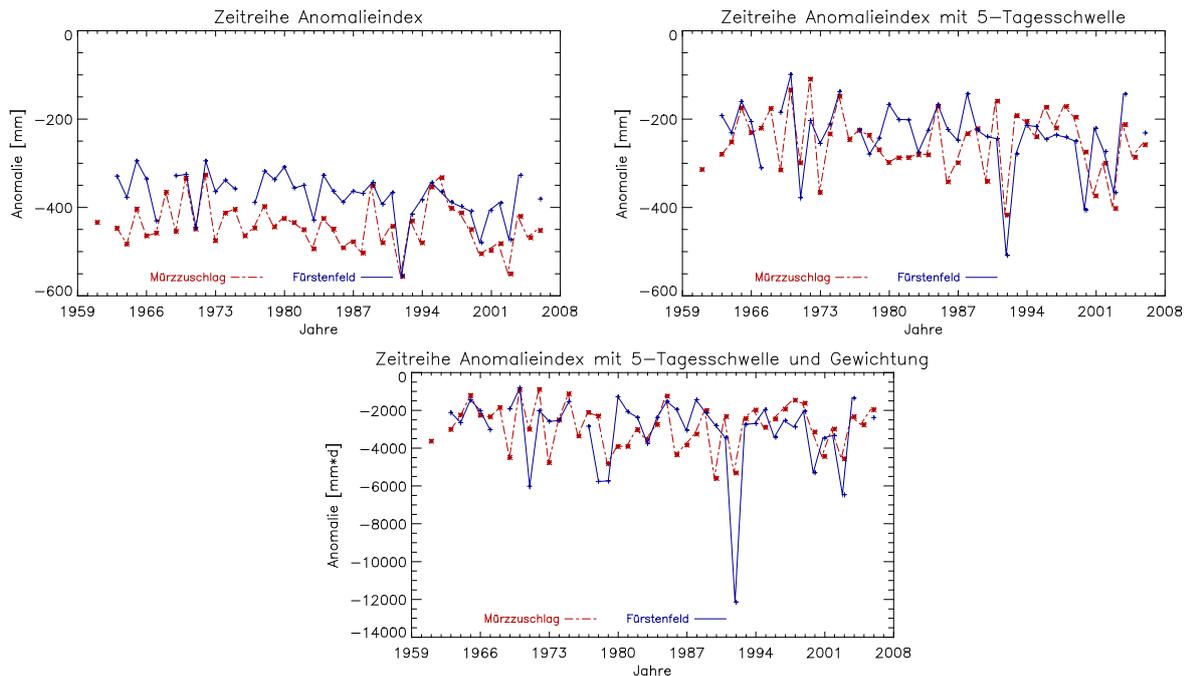


Abb. 2-6: Vergleich der Anomalieindizes für die Stationen Müzzuslag und Fürstenfeld in den Jahren 1961 bis 2007.

2.2.1.6. Anomalieindex mit 5-Tagesschwelle und Gewichtung

Hier tendieren die Indexwerte (siehe Abb. 2-6 unten) von Müzzuslag weniger ins Negative als die von Fürstenfeld. Das langjährige Mittel über die Periode von 1961 bis 2007 beträgt für Müzzuslag $-2866 \text{ mm} \cdot \text{d}$ und für Fürstenfeld $-3022 \text{ mm} \cdot \text{d}$. In den Jahren 1992 und 2003 gibt es starke Anomalien für Fürstenfeld ($-12137 \text{ mm} \cdot \text{d}$ bzw. $-6456 \text{ mm} \cdot \text{d}$). In Müzzuslag sind diese deutlich geringer ($-5314 \text{ mm} \cdot \text{d}$ bzw. $-4560 \text{ mm} \cdot \text{d}$).

2.2.2. Korrelationen zwischen Trockengefährdungsindizes und landwirtschaftlichen Ertragsdaten

Das Hauptaugenmerk bei den Korrelationen wurde auf die mehrmähdigen Wiesen gelegt, da die meteorologischen Daten auf die Vegetationsperiode dieser abgestimmt wurden und sich die potentielle Verdunstung auf mit Gras bedeckten Oberflächen bezieht. Für die anderen Kulturarten wären bessere Korrelationen zu erwarten, wenn für diese die Vegetationsperioden sowie die potentielle Verdunstung abgestimmt würden.

Wie schon vorher erläutert, liegen die Ertragsdaten für den Zeitraum 1995 bis 2006 auf Jahresbasis und Bezirksebene vor. Dabei weisen alle Erträge im Jahr 1996 eine Datenlücke auf und die maximale Stichprobengröße für die Ertragsdaten der einzelnen Bezirke beträgt somit elf Jahre. Kulturen, die in einem bestimmten Jahr nicht angebaut wurden und daher

keinen Ertrag aufweisen, wurden als Fehlwerte behandelt und fließen somit nicht in die Berechnung der Korrelationen mit ein. Um die statistische Stichprobe zu erhöhen, wurden die Trockengefährdungsindizes und die dazugehörigen Erträgen der Bezirke der Unter- und Obersteiermark zu jeweils einer Stichprobe zusammengefasst (vgl. Tab. 2-1).

Für Grün- und Silomais gibt es nur in der Untersteiermark signifikante Ergebnisse. Die Korrelationen (r) bewegen sich zwischen 0.21 und 0.34. Am Besten schneidet der Minimumindex ohne Schwelle (0.34), am schlechtesten der Aridity Index nach UNEP (0.21) ab. Somit kann man mit einer erklärten Variabilität zwischen 4.5 % und 11.6 %. Beim Körnermais inklusive CCM gibt es nur eine signifikante Korrelation für die Untersteiermark beim Minimumindex mit einer Schwelle von 0 mm ($r = 0.21$). Die Sommergerste ist mit den betrachteten Indizes nicht signifikant korreliert. Bei der Wintergerste gibt es für alle Indizes in der Ober- und Untersteiermark signifikante Korrelationen. In der Obersteiermark ist je nach Index zwischen 8.4 % und 14.4 % und in der Untersteiermark zwischen 7.3 % und 15.2 % der Variabilität der Erträge durch die Trockengefährdungsindizes erklärbar.

Bei den mehrmähdigen Wiesen wurden, wie erwartet, die besten Ergebnisse erzielt. In der Untersteiermark werden generell höhere Korrelationen als in der Obersteiermark erreicht. Die erklärte Variabilität des Ertrages liegt in der Obersteiermark zwischen 9 % ($r = 0.30$) und 21.2 % ($r = 0.46$) und in der Untersteiermark zwischen 15.2 % ($r = 0.39$) und 38.4 % ($r = 0.62$). Es ist klar zu sehen, dass in der Untersteiermark der Ernteertrag stärker von den klimatischen Bedingungen abhängig ist, als in der Obersteiermark. Die besten Korrelationen liefert der Minimumindex ohne Schwelle, die Schlechtesten die Anomalieindizes.

Vergleicht man die Ergebnisse für mehrmähdige Wiesen mit den in *AgroClim1* angewendeten Indizes [Heinrich, 2008; Gobiet et al., 2008a], dann zeigen die Resultate im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung. Die Korrelationskoeffizienten liegen im Bereich von 0.6 und sind also nur leicht höher als die einfachen meteorologischen Indizes. Dieses Ergebnis demonstriert die Anwendbarkeit der meteorologischen Indizes auch in Gebieten in denen keine ausreichenden Informationen über die Beschaffenheit des Bodens vorhanden sind was ihre allgemeine Anwendbarkeit, etwa auf Klimaszenarien in größeren Gebieten, gewährleistet.

	Aridity Index (nach UNEP)	Minimum	Minimum mit 0 mm Schwelle	Minimum mit 30 mm Schwelle	Minimum mit 40 mm Schwelle	Defizit	Anomalie	Anomalie mit Schwelle	Anomalie mit Schwelle und Gewichtung
Grün- und Silomais									
Obersteiermark	-0.17	-0.18	-0.16	-0.17	-0.17	-0.07	-0.03	-0.03	-0.01
Untersteiermark	0.21	0.34	0.25	0.33	0.33	0.31	0.22	0.24	0.22
Körnermais inklusive CCM									
Obersteiermark	0.01	0.14	-0.10	0.14	0.15	0.23	0.03	-0.01	0.07
Untersteiermark	0.04	0.17	0.21	0.17	0.17	0.15	0.18	0.17	0.08
Sommergerste									
Obersteiermark	-0.11	-0.02	-0.12	-0.02	-0.01	0.05	-0.01	-0.08	0.04
Untersteiermark	-0.16	-0.15	-0.09	-0.14	-0.14	-0.16	-0.09	-0.08	-0.12
Wintergerste									
Obersteiermark	-0.29	-0.36	-0.35	-0.37	-0.37	-0.38	-0.33	-0.32	-0.29
Untersteiermark	-0.27	-0.37	-0.21	-0.36	-0.36	-0.38	-0.39	-0.27	-0.26
Mehrmähdige Wiesen									
Obersteiermark	0.30	0.45	0.38	0.45	0.45	0.46	0.33	0.33	0.41
Untersteiermark	0.53	0.62	0.55	0.61	0.61	0.56	0.39	0.39	0.44
Korrelationskoeffizient									
	signifikant					nicht signifikant			

Tab. 2-4: Korrelationen zwischen Trockengefährdungsindizes und Ertragsdaten.

3. FEHLERKORREKTUR VON KLIMAMODELL-DATEN UND IHRE ANWENDUNG AUF TROCKENGEFÄHRDUNGSINDIZES

Autoren: G. Heinrich, A. Gobiet, A. Leuprecht, M. Themeßl

Dieser Teil des Berichtes widmet sich der zukünftigen Entwicklung von Trockengefährdung mit besonderem Fokus auf das Bundesland Steiermark anhand ausgewählter Trockengefährdungsindizes. Als Zukunftsszenario dient eine hochaufgelöste Klimasimulation, welche anhand des mesoskaligen Modelles MM5 im Rahmen des Projektes "Research for Climate Protection: Model Run Evaluation (**reclip:more**)" durchgeführt wurde.

Im Vorgängerprojekt *AgroClim1* wurde untersucht inwiefern sich die Klimamodelldaten zur Bestimmung von Trockenheit eignen. Um den Modellfehler zu verringern, wurden zunächst die zur Berechnung der Indizes benötigten Klimaparameter Temperatur und Niederschlag einer Fehlerkorrektur unterzogen.

Mit Hilfe der fehlerkorrigierten Modelldaten werden nun die beiden Trockengefährdungsindizes *Standardized Precipitation Index (SPI)* und *Aridity Index (AI)* (Definition siehe Heinrich [2008]) berechnet und es wird die zukünftige Entwicklung von Trockengefährdung für die Periode 2041-2050 für den gesamten Alpenraum und speziell für das Bundesland Steiermark abgeschätzt.

3.1. Verwendete Datensätze und Methodik

3.1.1. Beschreibung der MM5 Klimasimulationen

Die heutzutage verwendeten globalen Klimamodelle (GCMs) sind in der Lage, das Klimasystem auf globaler bis kontinentaler Skala gut zu beschreiben [z.B., Solomon et al., 2007]. Jedoch eignen sich diese Modelle auf Grund ihrer geringen räumlichen Auflösung von einigen hundert Kilometern nur bedingt zur regionalen Abschätzung von Klimafolgen. Um eine bessere Auflösung von regionalen Klimaprozessen zu erreichen, werden vermehrt regionale Klimamodelle (RCMs) eingesetzt. Beim sogenannten „dynamischen Downscaling“ werden regionale Klimamodelle mit einer höheren Auflösung in grob aufgelöste globale Modelle eingebettet, um so eine verbesserte Darstellung kleinskaliger, regional wirk-

samer Prozesse zu erreichen [z.B. Giorgi und Mearns, 1999]. Die meisten regionalen Klimamodelle werden heutzutage mit einer horizontalen Auflösung von 25-50 km angetrieben [z.B. Hewitt und Griggs, 2004]. Speziell für das orografisch komplexe Gelände der Alpen scheint diese Auflösung immer noch zu grob zu sein, weshalb sich das Projekt "Research for Climate Protection: Model Run Evaluation (reclip:more)" [Loibl et al., 2007] zum Ziel setzte, Klimasimulationen mit zwei regionalen Klimamodellen im Alpenraum mit einer hohen horizontalen Auflösung von nur 10 km durchzuführen.

Eines davon ist das mesoskalige Modell *MM5* [Dudhia, 2003], das durch zweifaches Einbetten in die groben Datenfelder der globalen Modelle sukzessive auf die hohe Auflösung von 10 km gebracht wurde (30 km x 30 km für den Großteil von Europa und 10 km x 10 km für den Alpenraum; vgl. Abb. 3-1). Weitere Details zur Modellkonfiguration können Gobiet et al. [2006] entnommen werden. An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass diese Klimasimulation nur eine Realisierung aus einer Vielzahl von möglichen Entwicklungen des Klimas in der Steiermark darstellt. Die Ergebnisse der Klimasimulation ist mit Unsicherheiten behaftet, für die es bis dato nur sehr rudimentäre quantitative Abschätzungen gibt [Gobiet et al., 2008b]. Im derzeitig laufenden Projekt reclip:century werden verschiedene hochaufgelöste Klimasimulationen für den Alpenraum durchgeführt, um dann in weiterer Folge die Modellunsicherheiten genauer quantifizieren zu können.

Gobiet et al. [2006] führten drei verschiedene Simulationen durch, die jeweils eine Dekade abdecken und sich dadurch unterscheiden, dass das mesoskalige Modell *MM5* durch unterschiedliche globale Modelle (~120 km horizontale Auflösung) an den seitlichen Rändern angetrieben wurde:

- **Hindcast-Simulation:** Die Randbedingungen des regionalen Modells repräsentieren den beobachteten Zustand der Atmosphäre in der Vergangenheit. Die Randbedingungen stammen aus der *ERA-40* Reanalyse des Europäischen Zentrums für Mittelfristig Wettervorhersage [Uppala et al., 2004] und die Simulation deckt den Zeitraum 1981-1990 ab. Diese Simulation wurde zur Modellevaluierung und Modellkorrektur benutzt.
- **Klimaszenario-Simulation:** Die Randbedingungen sind dem globalen Klimamodell *ECHAM5* [Roeckner et al., 2003], basierend auf dem IPCC Emissions-Szenario IS92a [Leggett et al., 1992] entnommen. Die Simulation wurde für die zukünftige Dekade 2041-2050 durchgeführt und wurde zur Abschätzung der zukünftigen Trockengefährdung verwendet.
- **Kontroll-Simulation:** Diese Simulation dient als Vergleichsbasis zur *Klimaszenario-Simulation* und wurde daher ebenfalls mit dem globalen Klimamodell *ECHAM5* während der Periode 1981-1990 (basierend auf gemessenen Treibhausgaskonzentrationen) angetrieben. Aus der Differenz zwischen Klimaszenario- und Kontroll-Simulation lässt sich der Klimawandel ableiten wobei sich gröbere Modellfehler durch die Bildung der Differenz aufheben.

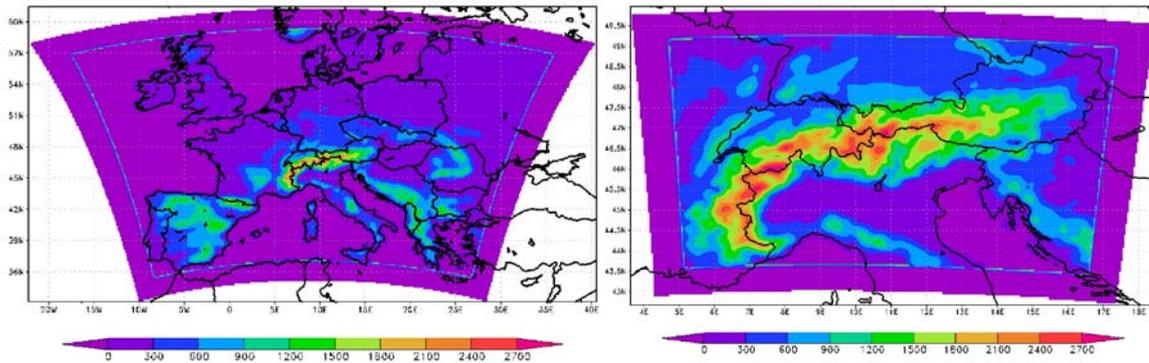


Abb. 3-1: Räumliche MM5 Konfiguration. Abbildung links: Modellgebiet 1 mit einer horizontalen Auflösung von 30 x 30 km. Abbildung rechts: Modellgebiet 2 mit einer horizontalen Auflösung von 10 x 10 km. Die Orografie ist farblich dargestellt und die Übergangszone ist durch die Linie markiert.

3.1.2. ECA&D Beobachtungsdatensatz

Zur Evaluierung und zur Fehlerkorrektur der regionalen Klimamodelldaten wurde der erst kürzlich veröffentlichte, innerhalb des EU FP6 Projektes ENSEMBLES (www.ensembles-eu.org) entstandene gerasterte *European Climate Assessment & Dataset (ECA&D)* Datensatz herangezogen [Haylock et al., 2008]. Dieser Datensatz enthält tägliche Temperaturen (Mittel, Minimum und Maximum) und Niederschlagssummen in einem Gitterpunktabstand von 0.25° (rund 25 km) und deckt ganz Europa im Zeitraum zwischen 1950-2006 ab.

3.1.3. Regionseinteilung der Steiermark

Die Regionseinteilung der Steiermark erfolgt analog zu *AgroClim1* und somit ergeben sich insgesamt fünf Klimaregionen: *Nordstau*, *Mürztal*, *Murtal*, *Randgebirge* und *Vorland*. In Abb. 3-2 ist gezeigt, wie die fünf Klimaregionen im *ECA&D* Datensatz umgesetzt wurden (vgl. *AgroClim1*).

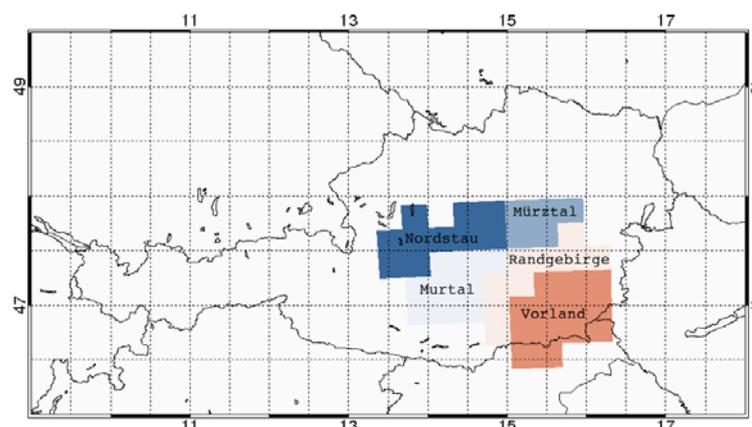


Abb. 3-2: Umsetzung der Klimaregionen innerhalb der Steiermark im *ECA&D* Datensatz.

3.1.4. Fehlerkorrektur von Klimamodelldaten

Bei der Modellevaluierung vergleicht man die mit Beobachtungsdaten angetriebene Klimasimulationen (d.h. die *Hindcast-Simulation*) mit einem Beobachtungsdatensatz, um so die Modellfehler zu analysieren. Die Evaluierung der *Hindcast-Simulation* wurde schon im Rahmen von *AgroClim1* für die Steiermark durchgeführt und es wurde gezeigt, dass das Modell generell zu kalte Temperaturen und zu hohe Niederschläge simuliert. Diese Modellfehler wirken sich in weiterer Folge auch auf die Berechnung der Trockengefährdungsindizes aus.

Ein zentraler Bestandteil von *AgroClim2* war es, mit Hilfe empirisch-statistischer Methoden im Nachhinein („post-processing“) die Fehlercharakteristik von Klimamodelldaten zu verbessern, um so eine optimierte Weiterverwendung dieser Daten zu gewährleisten.

Innerhalb des EU-Projektes *CLAVIER* (Climate Change And Variability: Impact on Central and Eastern Europe, <http://www.clavier-eu.org/>) konnte das Wegener Zentrum Expertise in der Fehlerkorrektur von Klimamodelldaten gewinnen (v.a. für die beiden Klimaparameter Temperatur und Niederschlag). Unter verschiedenen empirisch-statistischen Korrekturmethode zeichnet sich das sog. „Quantile-Mapping“ [z.B., Dettinger, 2004; Wood, 2004; Boé, 2008] als effiziente und robuste Methode ab. Dabei werden die Quantilen der kumulativen Verteilung der simulierten Daten an jene der Beobachtungen angepasst (vgl. Abb. 3-3). Die Methode wurde dabei so umgesetzt, dass für jeden Tag im Jahr eine Anpassung der kumulativen Verteilung der simulierten Tagesmitteltemperatur bzw. der Tagesniederschlagssumme aus der *Hindcast-Simulation* an jene des *ECA&D* Datensatzes erfolgte. Jahreszeitlich variierende Fehlercharakteristika des Klimamodells werden dadurch automatisch berücksichtigt.

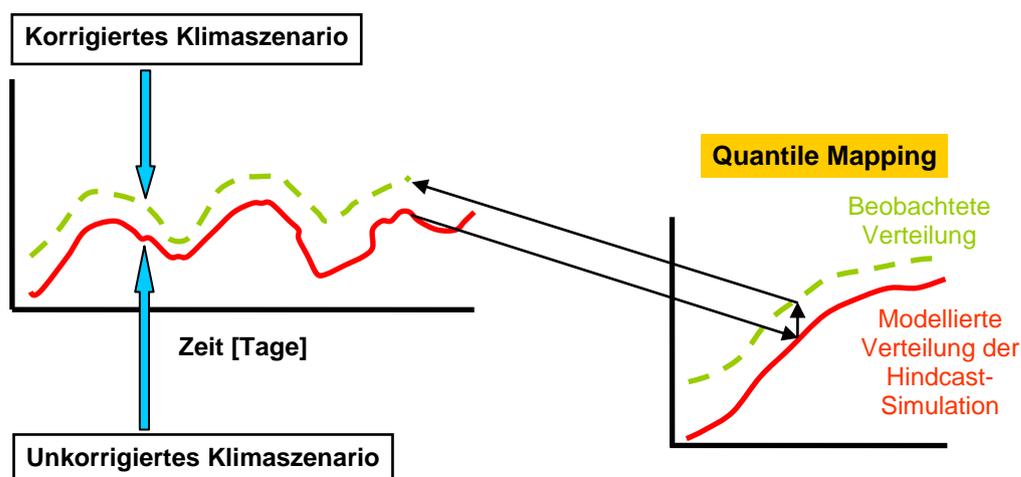


Abb. 3-3: Schematische Darstellung der Fehlerkorrekturmethode „Quantile-Mapping“. Kumulative Verteilungen der simulierten Temperaturen und Niederschläge aus dem Klimamodell werden an die beobachteten Verteilungen angepasst.

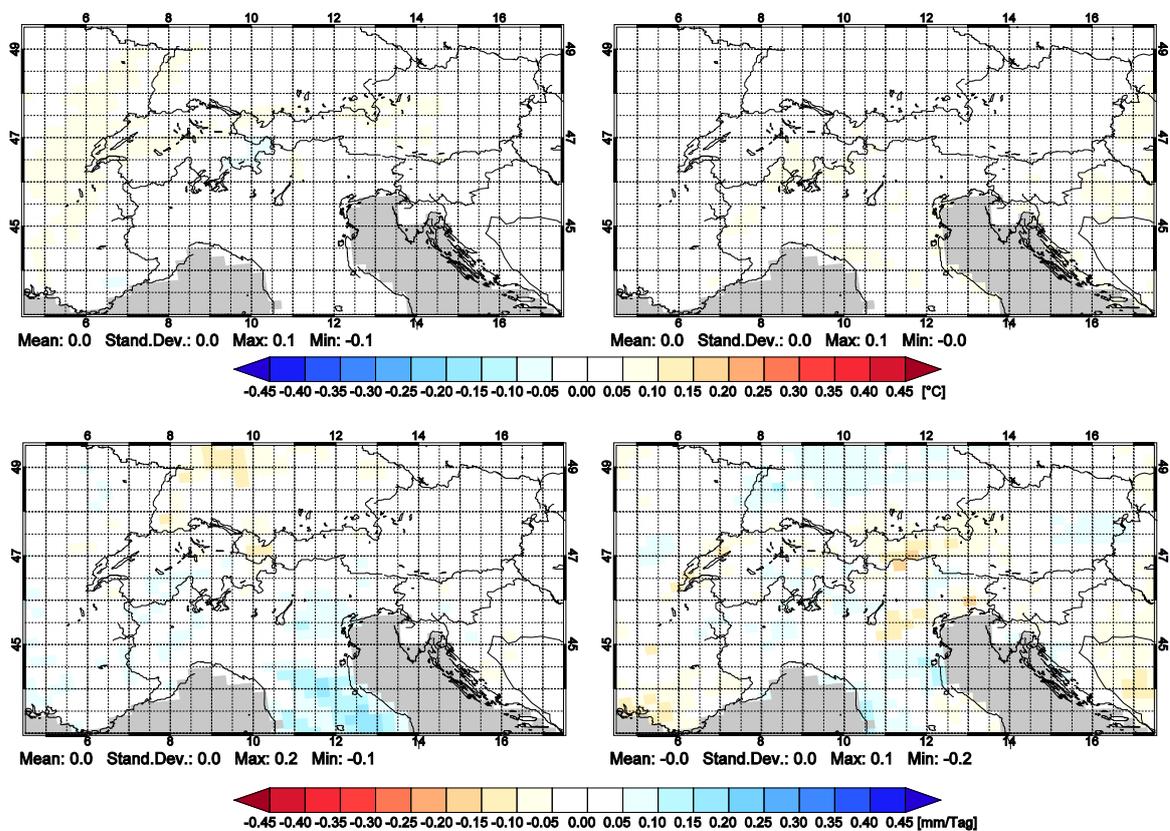


Abb. 3-4: Mittlere saisonale Differenzen zwischen fehlerkorrigierter Temperatur (oben) bzw. fehlerkorrigiertem Niederschlag (unten) aus der Hindcast-Simulation und den Beobachtungsdaten aus dem ECA&D Datensatz im Zeitraum 1981-1990. Links: Winter (DJF); Rechts: Sommer (JJA).

In Abb. 3-4 sind die mittleren Differenzen für die Sommer- (JJA: Juni, Juli, August) und Wintersaison (DJF: Dezember, Jänner, Februar) zwischen fehlerkorrigierter Temperatur bzw. fehlerkorrigiertem Niederschlag aus der *Hindcast-Simulation* und den Beobachtungsdaten aus dem *ECA&D* Datensatz im Zeitraum 1981-1990 gezeigt. Die verbleibenden Fehler sind sehr klein (-0.1°C bis 0.1°C und -0.2 mm/Tag bis 0.2 mm/Tag). Da in diesem Fall die Referenz- und Evaluierungsperiode identisch sind (1981-1990) demonstriert Abb. 3-4 ausschließlich, dass das theoretische Konzept des Quantile Mapping und seine praktische Umsetzung wie erwartet funktioniert.

Zur weiteren Evaluierung der Fehlerkorrektur wurde das Jahr 1999 der *Hindcast-Simulation* herangezogen, welches außerhalb der Kalibrierungsperiode liegt. Dadurch kann der Erfolg der Methode (die ja schlussendlich auf eine Simulation der Periode 2041 – 2050 angewendet werden soll) realistischer beurteilt werden. Einschränkend muss gesagt werden, dass diese Methode ausschließlich die Fehler der regionalen Simulation korrigiert. Die Fehler des globalen Klimamodells bleiben unberücksichtigt, werden aber in Folge durch den Vergleich mit der Referenzsimulation (die ebenfalls auf dem globalen Klimamodell

basiert) grob korrigiert. Eine subtilere Korrekturmethode für das globale Klimamodell befindet sich derzeit in Ausarbeitung. In Abb. 3-5 und Abb. 3-6 sind die mittleren Fehler der unkorrigierten und fehlerkorrigierten Modelldaten aus der *Hindcast-Simulation* für das Jahr 1999 dargestellt. Wie man aus den Abbildungen erkennen kann, ergibt sich eine deutliche Verbesserung der Modellfehler für beide Parameter. Die Temperaturfehler werden im Mittel über dem Alpenraum von -1.1 °C (Winter) beziehungsweise -2.6 °C (Sommer) auf -0.2 °C und 0.0 °C , die mittleren Niederschlagsfehler von $+0.6\text{ m/Tag}$ (Winter) beziehungsweise $+0.9\text{ mm/Tag}$ (Winter) auf -0.3 mm/Tag und $+0.5\text{ mm/Tag}$ reduziert.

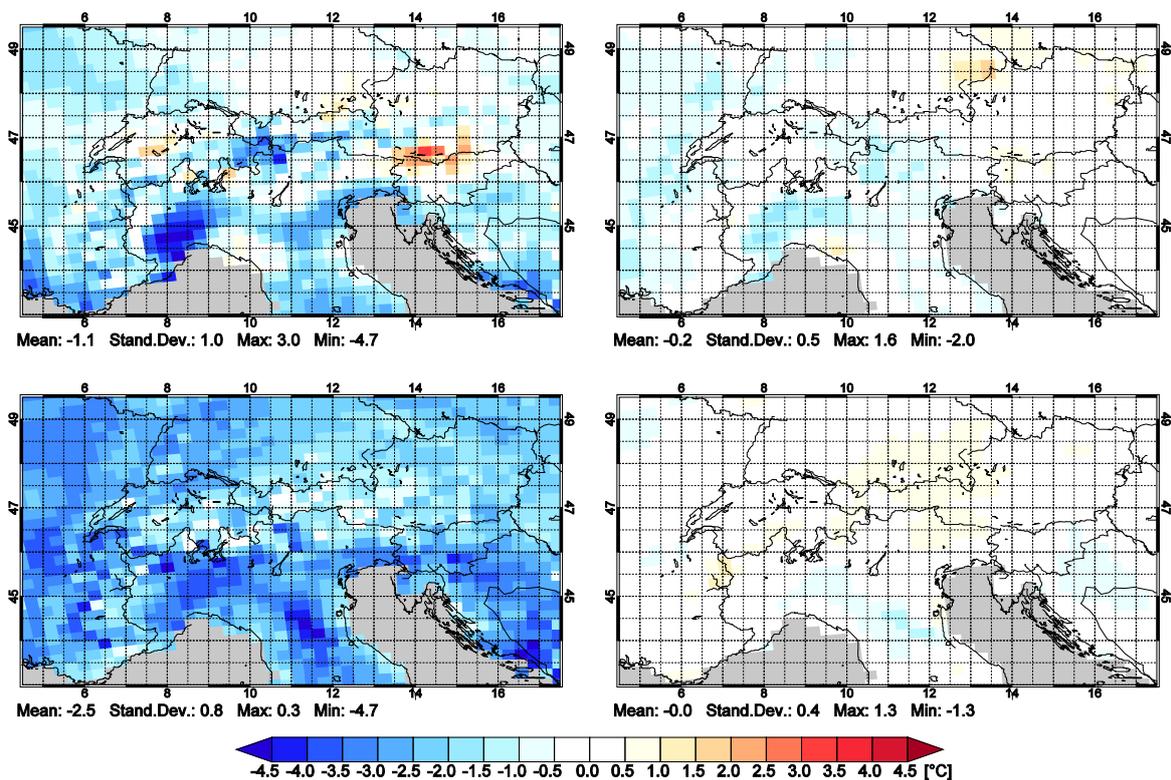


Abb. 3-5: Mittlere Temperatur-Fehler der unkorrigierten (links) und fehlerkorrigierten (rechts) Hindcast-Simulation für das Jahr 1999. Oben: Winter (DJF); Unten: Sommer (JJA).

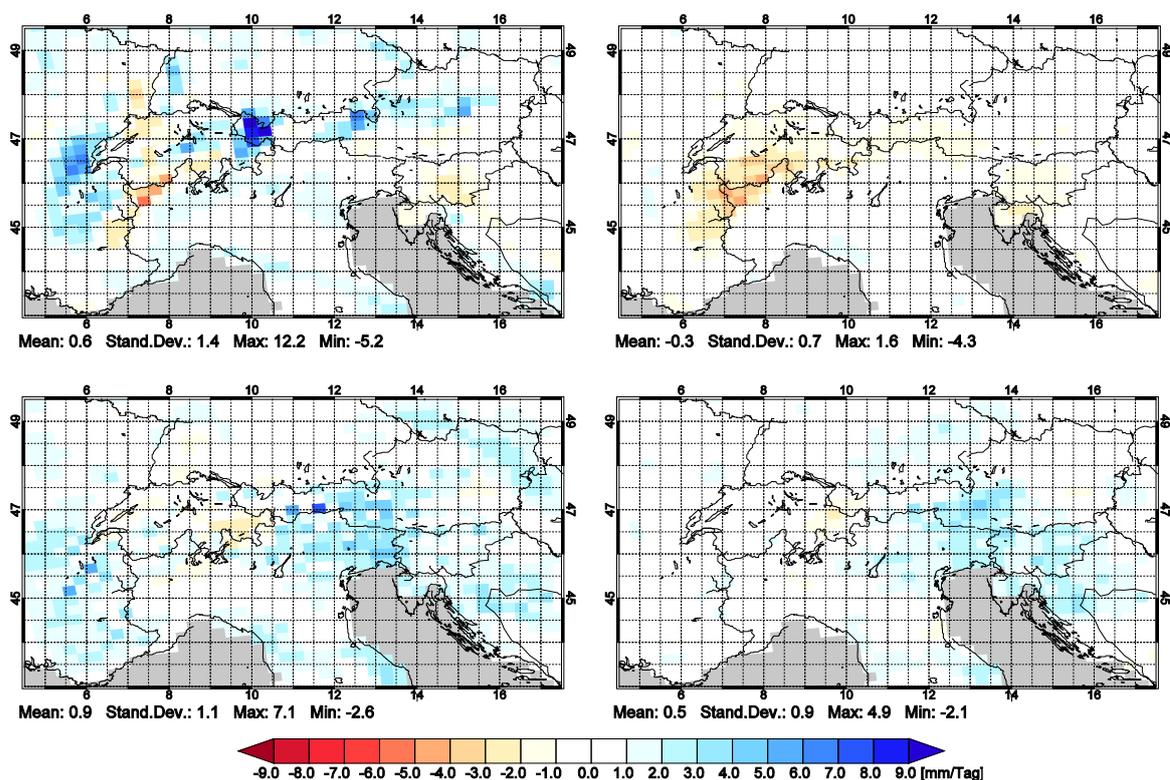


Abb. 3-6: Mittlere Niederschlagsfehler [mm/Tag] der unkorrigierten (links) und fehlerkorrigierten (rechts) Hindcast-Simulation für das Jahr 1999. Oben: Winter (DJF); Unten: Sommer (JJA).

In Abb. 3-7 sind die Fehler der unkorrigierten und fehlerkorrigierten *Hindcast-Simulation* für die einzelnen Klimaregionen der Steiermark im Jahr 1999 dargestellt. Dabei zeigen die Box-Whisker-Plots vor allem eine wesentliche Verbesserung der mittleren Fehler (bzw. der Mediane der Fehler) über das gesamte Jahr für beide Parameter und alle Subregionen. Die Variabilität der täglichen Differenzen zwischen Modell- und Beobachtungsdaten weist hingegen keine merkliche Veränderung auf. Das ist eine grundsätzliche Einschränkung der Korrekturmethode, was jedoch bei klimatologischen Anwendungen unproblematisch ist.

Hat man die empirisch-statistische Beziehung zwischen der *Hindcast-Simulation* und den Beobachtungsdaten hergestellt, kann man diese auch auf die *Kontroll-* bzw. *Klimaszenario-Simulation* anwenden und erhält so eine fehlerkorrigierte Form des Klimaszenarios.

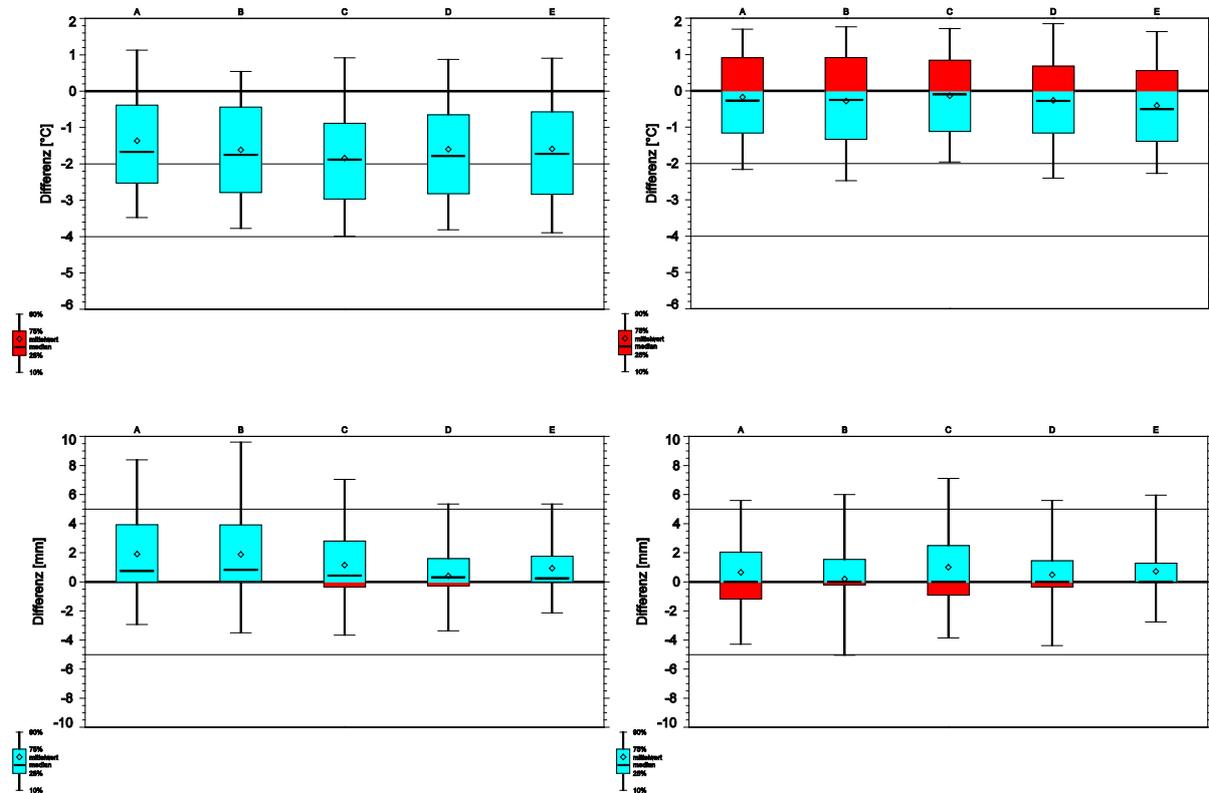


Abb. 3-7: Box-Whisker-Plots (10, 25, 50, 75, 95 Quantile und Mittelwert) der Modellfehler der unkorrigierter (links) und fehlerkorrigierter (rechts) Hindcast-Simulation für Temperatur (oben) und Niederschlag (unten) im Jahr 1999. Regionen: A: Nordstau, B: Mürztal, C: Murtal, D: Randgebirge, E: Vorland.

3.2. Zukünftige Entwicklung von Trockenheit

In den nächsten beiden Abschnitten werden die Klimaänderungssignale der beiden Klimaparameter Temperatur und Niederschlag und der Trockengefährdungsindizes *Standardized Precipitation Index (SPI)* und *Aridity Index (AI)* gezeigt. Die Auswahl dieser beiden Trockengefährdungsindizes beruht auf den guten Korrelationen mit mehrmähdigen Wiesen in Heinrich [2008]. Die Klimaänderung dieser Parameter berechnet sich dabei als Differenz der langjährigen Mittel zwischen *Klimaszenario-* (Periode 2041-2050) und *Kontroll-Simulation* (Periode 1981-1990) unter Verwendung fehlerkorrigierter Daten (siehe Abschnitt 3.1).

3.2.1. Klimaänderung von Temperatur und Niederschlag

Abb. 3-8 zeigt die mittleren saisonalen Differenzen zwischen fehlerkorrigierter *Klimaszenario*- und *Kontroll-Simulation* für die beiden Klimaparameter Temperatur und Niederschlag.

Das Temperaturänderungssignal weist dabei im räumlichen Mittel über den gesamten Alpenraum ein graduelles Ansteigen mit den Jahreszeiten vom Winter bis zum Herbst auf: Winter (DJF) 1.9 °C, Frühling (MAM) 2.4 °C, Sommer (JJA) 2.6 °C und Herbst (SON) 2.7 °C. Zur räumlichen Charakteristik der Temperaturänderung zählt eine stärkere Erwärmung entlang des Alpenhauptkammes in allen Saisonen, sowie eine deutlich ausgeprägte Nord-Süd Trennung im Sommer.

In Tab. 3-1 sind die mittleren saisonalen und jährlichen Temperaturänderungen für die einzelnen Klimaregionen der Steiermark aufgelistet (vgl. Abb. 3-2). Dabei zeigen die Subregionen *Mürztal*, *Murtal* und *Randgebirge* in allen Saisonen eine vergleichsweise höhere Erwärmung als die beiden Regionen *Nordstau* und *Vorland*. Für die gesamte Steiermark ergibt sich eine mittlere jährliche Temperaturerhöhung von 2.4 °C, mit einer Erwärmung von 1.9 °C im Winter und 2.6 °C in den übrigen Jahreszeiten.

Die Niederschlagsänderung ist in Prozent relativ zur *Kontroll-Simulation* ausgedrückt, und weist im Mittel über den gesamten Alpenraum im Winter (9.6 %) und Frühling (2.8 %) eine Zunahme und im Sommer (-11.0 %) und Herbst (-14.0 %) eine Abnahme auf. Vor allem im Sommer und Herbst wirkt sich der Alpenhauptkamm auf die räumliche Verteilung des Niederschlagsmusters aus und führt zu einer Niederschlagszunahme in den nördlichen und zu einer Abnahme in den südlichen Regionen.

	<i>Nordstau</i>	<i>Mürztal</i>	<i>Murtal</i>	<i>Randgebirge</i>	<i>Vorland</i>	<i>Steiermark</i>
Winter	1.8	1.9	2.0	2.0	1.9	1.9
Frühling	2.5	2.7	2.7	2.6	2.5	2.6
Sommer	2.4	2.6	2.6	2.7	2.6	2.6
Herbst	2.5	2.7	2.7	2.7	2.5	2.6
Jahr	2.3	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4

Tab. 3-1: Mittlere saisonale und jährliche Temperaturdifferenzen [°C] zwischen fehlerkorrigierter Klimaszenario- (2041-2050) und Kontroll-Simulation (1981-1990) für die Steiermark; Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA), Herbst (SON).

	<i>Nordstau</i>	<i>Mürztal</i>	<i>Murtal</i>	<i>Randgebirge</i>	<i>Vorland</i>	<i>Steiermark</i>
Winter	10.3	14.6	12.7	17.6	25.1	16.8
Frühling	8.2	7.2	-3.1	1.0	-0.4	2.0
Sommer	-7.8	-7.1	0.3	-4.4	-11.0	-6.4
Herbst	-17.0	-21.3	-28.3	-31.0	-35.3	-27.6
Jahr	-2.4	-3.3	-7.1	-7.6	-11.8	-7.1

Tab. 3-2: Mittlere saisonale und jährliche relative Niederschlagsdifferenzen [%] zwischen fehlerkorrigierter Klimaszenario- (2041-2050) und Kontroll-Simulation (1981-1990) für die Steiermark; Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA), Herbst (SON).

In Tab. 3-2 sind die mittleren saisonalen und jährlichen Niederschlagsänderungen für die einzelnen Klimaregionen der Steiermark aufgelistet (vgl. Abb. 3-2). Insgesamt ergeben sich die deutlichsten Änderungen im Winter mit einer starken Zunahme, und im Herbst mit einem stark ausgeprägten Niederschlagsrückgang. Im Winter zeigt sich die stärkste Zunahme in den südlichen Regionen *Randgebirge* und *Vorland*, während im Frühling die nördlichen Regionen *Nordstau* und *Mürztal* die höchste Niederschlagszunahme verzeichnen. Im Sommer und Herbst zeigen in Summe die weiter südlich gelegenen Regionen, *Randgebirge* und *Vorland*, die stärkste Abnahme. Aufgrund der unterschiedlichen Vorzeichen der Niederschlagsänderungen in den einzelnen Saisonen ergeben sich in der Jahresniederschlagsmenge vergleichsweise geringe Änderungen. Diese weisen jedoch einen deutlichen Nord-Süd Gradienten auf, mit einer geringeren Abnahme in den nördlichen Klimaregionen als in den südlichen.

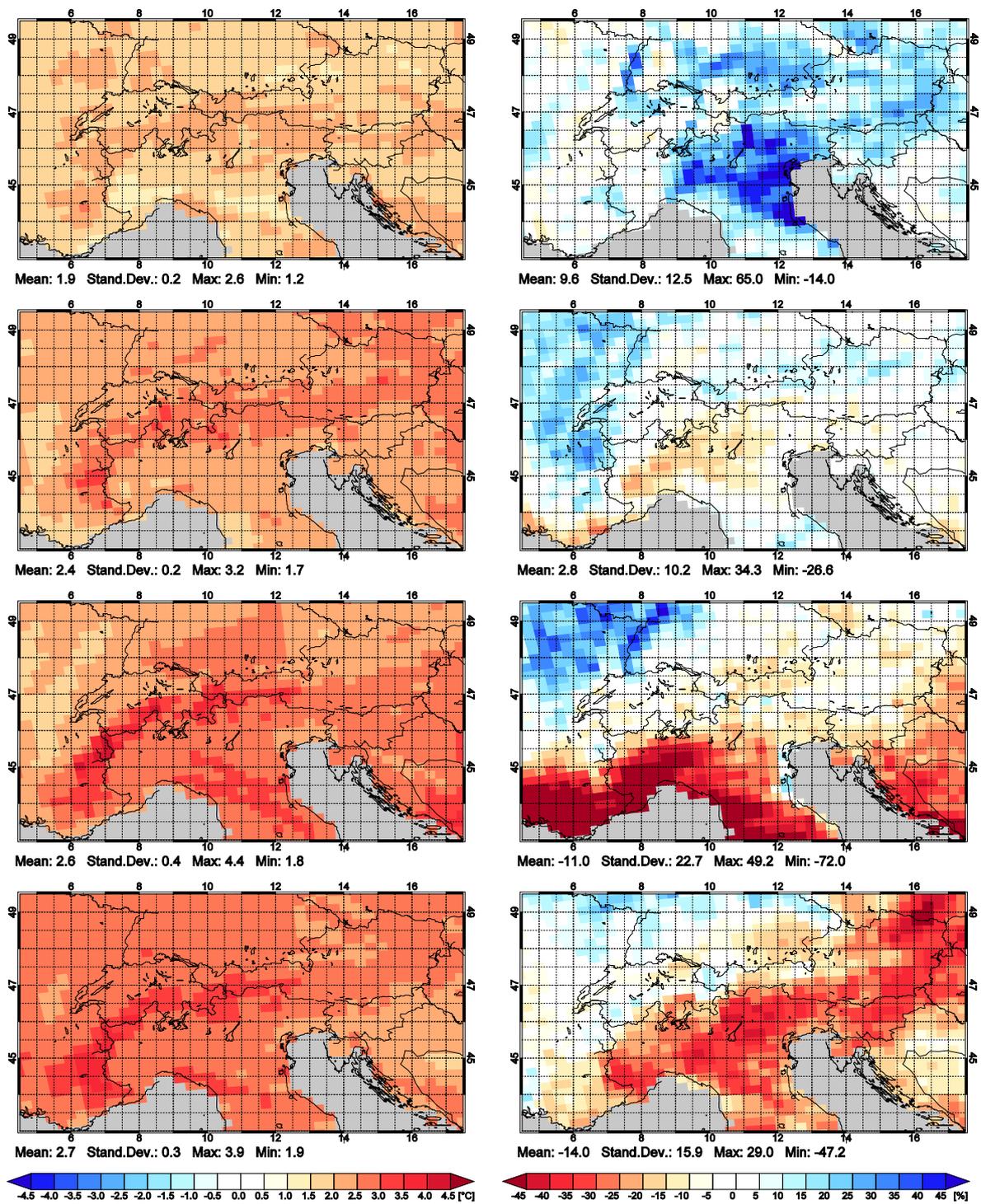


Abb. 3-8: Mittlere saisonale Differenzen zwischen fehlerkorrigierter Klimaszenario- (2041-2050) und Kontroll-Simulation (1981-1990) für die Klimaparameter Temperatur in [°C] (linke Spalte) und Niederschlag in [%] (rechte Spalte); Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA), Herbst (SON) von oben nach unten.

3.2.2. Klimaänderung ausgewählter Trockengefährdungsindizes

Zur Quantifizierung von Trockenheit wurden die beiden Trockengefährdungsindizes *Standardized Precipitation Index (SPI)* und *Aridity Index (AI)* herangezogen. Die Berechnung dieser Indizes ist in Heinrich [2008] ausführlich diskutiert - beim *SPI* handelt es sich um einen reinen Niederschlagsindex und beim *AI* um einen kombinierten Temperatur-Niederschlagsindex.

Für die Berechnung des *SPI* auf saisonaler bzw. jährlicher Basis wurden zuerst die Niederschlagssummen über diese Perioden aus der *Kontroll-Simulation* an die Gammaverteilung angepasst und in weiterer Folge die Indexwerte mit den Niederschlägen aus der *Klimaszenario-Simulation* berechnet. Dadurch schafft man einen Bezug zwischen zukünftig und gegenwärtig simulierten Niederschlägen und die Indexwerte geben schließlich an, um wie viele Standardabweichungen die zukünftig simulierten Niederschläge vom Mittelwert der gegenwärtigen Verteilung abweichen liegen.

In Abb. 3-9 sind die mittleren saisonalen Differenzen zwischen fehlerkorrigierter *Klimaszenario-* und *Kontroll-Simulation* für den *SPI* dargestellt. Die mittleren *SPI* Werte über die gesamte Alpenregion zeigen, konsistent mit der relativen Niederschlagsänderung (vgl. Abb. 3-8), eine Zunahme im Winter (+0.3) und Frühling (+0.1), und eine Abnahme im Sommer (-0.4) und Herbst (-0.4). Die räumlichen Muster weisen wieder eine starke Nord-Süd Trennung im Sommer und Herbst auf, mit trockeneren Bedingungen in den südlichen Regionen und feuchteren in den nördlichen.

In Tab. 3-3 sind die mittleren saisonalen und jährlichen Änderungen des *SPI* für die einzelnen Klimaregionen der Steiermark aufgelistet (vgl. Abb. 3-2). Insgesamt ergeben sich die deutlichsten Änderungen wieder im Winter mit einer Zunahme des *SPI*, und im Herbst mit hohen negativen Werten. Im Winter weisen die weiter südlich gelegenen Klimaregionen höhere *SPI* Werte auf als die nördlichen und im Herbst zeigen alle Regionen eine Niederschlagsabnahme von mehr als einer Standardabweichung. Die Berechnung des *SPI* für das ganze Jahr ergibt ebenfalls geringere Werte für die weiter südlich gelegenen Regionen *Murtal*, *Randgebirge* und *Vorland*.

Zur Berechnung der Klimaänderung des *AI* muss wieder ein Bezug zur Gegenwart hergestellt werden. Dazu werden Mittelwert und Standardabweichung der wöchentlichen Maximaltemperatur bzw. Niederschlagssumme aus der *Kontroll-Simulation* berechnet, um dann in weiterer Folge die aktuellen Werte aus der *Klimaszenario-Simulation* auf diese zu beziehen [vgl., Heinrich, 2008].

	<i>Nordstau</i>	<i>Mürztal</i>	<i>Murtal</i>	<i>Randgebirge</i>	<i>Vorland</i>	<i>Steiermark</i>
Winter	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.5
Frühling	0.3	0.3	-0.0	0.1	0.1	0.1
Sommer	-0.5	-0.4	0.0	0.1	0.1	0.1
Herbst	-1.1	-1.1	-1.7	-1.2	-1.2	-1.3
Jahr	-0.2	-0.3	-0.6	-0.6	-0.8	-0.5

Tab. 3-3: Mittlere saisonale und jährliche relative Differenzen des *SPI* zwischen fehlerkorrigierter Klimaszenario- (2041-2050) und Kontroll-Simulation (1981-1990) für die Steiermark; Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA), Herbst (SON).

	<i>Nordstau</i>	<i>Mürztal</i>	<i>Murtal</i>	<i>Randgebirge</i>	<i>Vorland</i>	<i>Steiermark</i>
Winter	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.5
Frühling	-0.9	-1.0	-1.1	-1.1	-1.0	-1.0
Sommer	-1.1	-1.1	-1.1	-1.2	-1.3	-1.2
Herbst	-2.0	-1.0	-1.3	-1.3	-1.2	-1.2
Jahr	-0.9	-0.9	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0

Tab. 3-4: Mittlere saisonale und jährliche relative Differenzen des *AI* zwischen fehlerkorrigierter Klimaszenario- (2041-2050) und Kontroll-Simulation (1981-1990) für die Steiermark; Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA), Herbst (SON).

In Abb. 3-9 sind die mittleren saisonalen Differenzen zwischen fehlerkorrigierter *Klimaszenario-* und *Kontroll-Simulation* für den *AI* dargestellt. Der *AI* zeigt für das räumliche Mittel über alle Saisonen hinweg negative Werte mit -0.5 im Winter, -0.9 im Frühling und -1.1 im Sommer und Herbst. Die räumliche Verteilung der Indexwerte zeigt eine Trennung zwischen Regionen nördlich und südlich des Alpenhauptkammes im Frühling, Sommer und Herbst, mit trockeneren und wärmeren Verhältnissen in den südlichen Regionen.

In Tab. 3-4 sind die mittleren saisonalen und jährlichen Änderungen des *AI* für die einzelnen Klimaregionen der Steiermark aufgelistet (vgl. Abb. 3-2). Alle Regionen weisen in allen Jahreszeiten negative *AI* Werte auf. Es ergibt sich ein einheitliches Bild mit niedrigeren Indexwerten in den südlichen Klimaregionen *Murtal*, *Randgebirge* und *Vorland* gegenüber den nördlichen *Nordstau* und *Mürztal*.

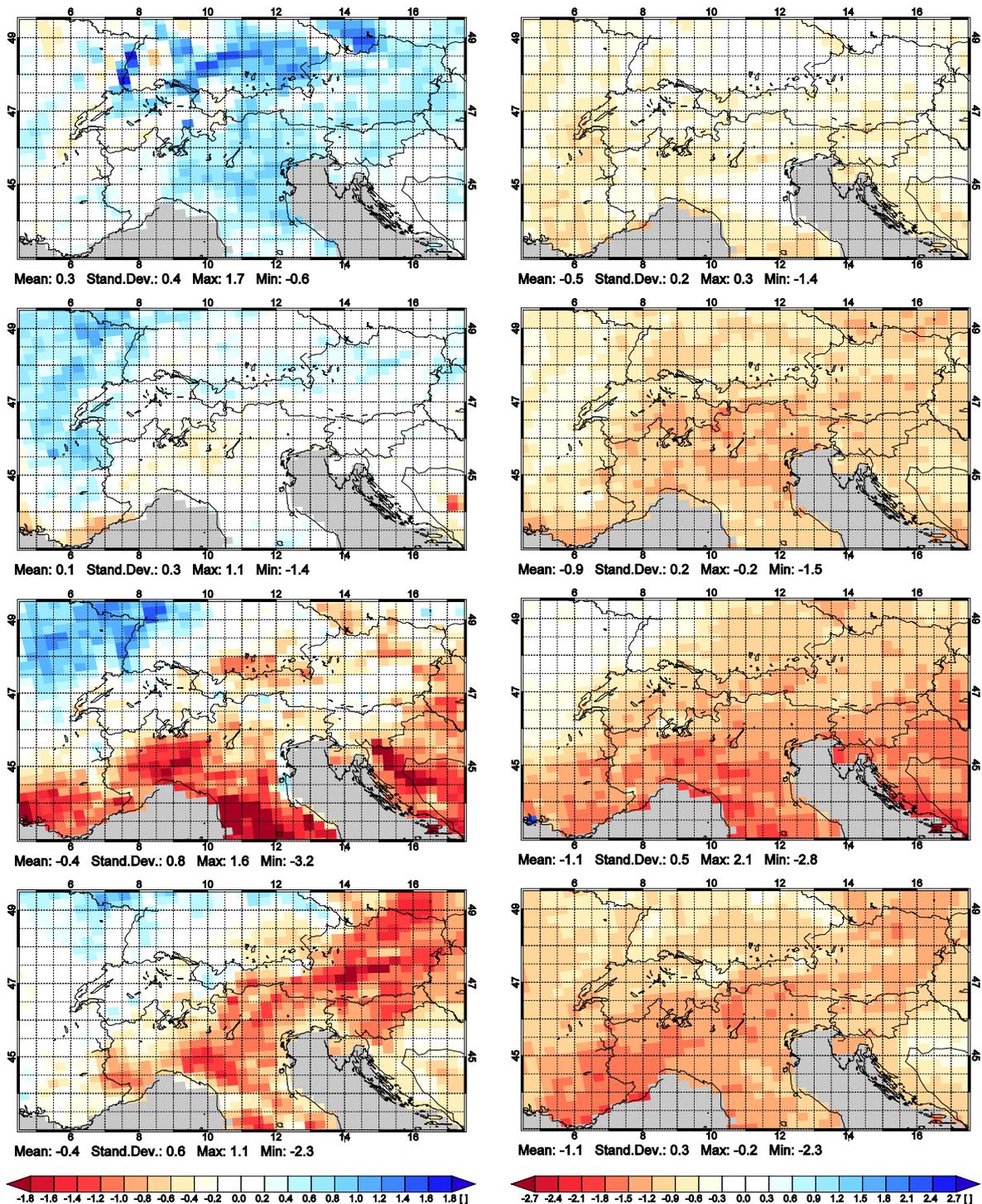


Abb. 3-9: Mittlere saisonale Differenzen zwischen fehlerkorrigierter Klimaszenario- (2041-2050) und Kontroll-Simulation (1981-1990) für die Trockengefährdungsindizes *SPI* (linke Spalte) und *AI* (rechte Spalte); Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA), Herbst (SON) von oben nach unten.

4. RÄUMLICHE MODELLIERUNG DER VERÄNDERUNG DES GRÜNLANDERTRAGES IN DER STEIERMARK AUF BASIS VON BODENWASSERBILANZ UND WASSERSTRESS UNTER EINBEZIEHUNG EINES KLIMAMODELLS

Autoren: A. Schaumberger, K. Buchgraber

4.1. Einleitung und Problemstellung

Eine Veränderung des Klimas kann mittlerweile durch zahlreiche Studien und Untersuchungen belegt werden [vgl. IPCC, 2007]. Ausgehend von langjährigen Trends in der Vergangenheit werden mit Hilfe von Klimamodellen mögliche Szenarien für die Zukunft entwickelt, welche die unter definierten Rahmenbedingungen zu erwartenden Auswirkungen auf verschiedene Lebens- und Wirtschaftsbereiche beschreiben. Die Projektion meteorologischer Parameter wie z.B. Temperatur oder Niederschlag für die Zukunft erfolgt dabei hauptsächlich im globalen bzw. kontinentalen Maßstab. Um jedoch die konkreten Auswirkungen der Klimaveränderung für kleine Regionen wie die Steiermark untersuchen zu können, ist es notwendig, die Daten von einem globalen auf einen regionalen Maßstab zu transformieren. In diesem Projekt wird daher die aus geeigneten Downscaling-Prozessen abgeleitete Klimainformation verwendet und weiterverarbeitet.

Die kontinuierliche Beibehaltung des räumlichen Aspektes der Klimainformation, gleichwohl sie auf einem im Verhältnis zum Klimamodell ganz anderem Maßstabniveau erfolgt, wird durch den Einsatz eines Geographischen Informationssystems (GIS) realisiert. Auf dieser großmaßstäblichen Ebene spielen beispielsweise die räumlich hoch aufgelöste Topographie und davon abgeleitete Höhenabhängigkeiten eine große Rolle, welche hingegen bei der Betrachtung im globalen Maßstab nicht in einem derartigen Detailierungsgrad berücksichtigt werden. Die entsprechende Regionalisierung von Klimamodelldaten ist damit die Voraussetzung für eine regionsspezifische Bewertung des Einflusses von Veränderungen. Im Projekt *AgroClim1* wurde die methodische Grundlage für die Aufbereitung von Klimamodelldaten für die Weiterverarbeitung in auf Basis von Wetterbeobachtungsdaten entwickelten Modellen geschaffen und stellt damit eine wichtige Grundlage für die Bearbeitung in *AgroClim2* dar.

Eine Untersuchung von Klimafolgen wird im vorliegenden Projekt auf die Fragestellungen der landwirtschaftlichen Flächennutzung konzentriert. Die Abschätzung von Erträgen und deren zukünftige Entwicklung unter dem Aspekt geänderter klimatischer Rahmenbedingungen ist Ziel der Arbeit. Die Anforderungen diverser landwirtschaftlicher Kulturen an diese Rahmenbedingungen sind jedoch äußerst unterschiedlich, weshalb als Referenzkultur das Grünland ausgewählt wurde. Wie bereits beim Projekt *AgroClim1* sind sämtliche Modelle auf diese Bewirtschaftungsart abgestimmt.

Das Projekt *AgroClim2* ist als Fortsetzung von *AgroClim1* konzipiert und baut auf dessen methodischen Grundlagen auf. Dieser Projektteil befasst sich mit der räumlichen Modellierung des Grünlandertrages in der Steiermark auf Basis von Bodenwasserbilanz und Wasserstress unter Einbeziehung jener Klimadaten, welche vom Projektpartner Wegener Zentrum aufbereitet wurden. Im Projektbericht *AgroClim1* wurde im Teil III [Schaumberger, 2008] eine ausführliche Darstellung der Referenz-Evapotranspiration vorgenommen – ein wesentlicher Parameter für die Bodenwasserbilanzierung, deren Implementierung ein Schwerpunkt im vorliegenden Projekt ist.

Die Trockengefährdung ist für die Landwirtschaft in der Steiermark ein wichtiger Aspekt des Klimawandels; vor allem im südöstlichen Landesteil ist Wasser während der Vegetationsperiode oft ein limitierender Faktor. Die hier angewandte Methode zur Ertragsbestimmung ist darauf abgestimmt, diesen Mangel statistisch in Beziehung zum Ertrag zu stellen. Im Vergleich der Ergebnisse aus einer vergangenen Periode (1981 bis 1990) mit jenen einer zukünftigen (2041 bis 2050) wird eine relative Änderung der räumlichen Verteilung von Grünlanderträgen beschrieben, die Anhaltspunkte für mögliche Anpassungsstrategien liefern soll. Das Grünland hat sowohl für die steirische Landwirtschaft als auch für die Gesellschaft eine große Bedeutung. Es stellt die Grundfuttersversorgung des Raufutter verzehrenden Viehs sicher, hat eine weitreichende ökologische Funktion und prägt die für den Alpenraum typische Kulturlandschaft. Im folgenden Abschnitt wird diese Bedeutung mit Hilfe einiger Kennzahlen und kartographischer Abbildungen verdeutlicht.

4.1.1. Die Grünlandbewirtschaftung in der Steiermark

Das Grünland nimmt eine außerordentlich wichtige Stellung unter den verschiedenen Landnutzungsformen ein. Vom Tal bis in die Hochlagen prägt Grünland das Bild unserer Kulturlandschaft und bildet die wirtschaftliche Grundlage für rund 19.000 steirische Grünland- und Viehbauern. Hauptsächlich wird Grünlandwirtschaft in Gebieten betrieben, in denen Ackerbau aus topographischen und klimatischen Gründen bzw. ungeeigneten Bodenverhältnissen nicht oder nur noch beschränkt möglich ist. Diese räumliche Einschränkung für die Grünlandbewirtschaftung trifft hauptsächlich auf das Berggebiet zu, das einen Großteil der Fläche einnimmt [Buchgraber und Gindl, 2004].

Die ökologische Bedeutung der Wiesen, Weiden, Almen und Feldfutterflächen zeigt sich besonders im Schutz des Bodens, in der Förderung des Bodenlebens und in der kreislaufbezogenen Aufnahmefähigkeit der Nährstoffe und damit in der Bereitstellung von sauberem Trinkwasser. Auf der rund 240.000 Hektar (ha) großen Dauergrünlandfläche in der Steiermark mit über 300.000 einzelnen Grünlandschlägen, tritt auf Grund der Unterschiede in der Geologie, der Höhenstufen, der Klimaverhältnisse und vor allem in der differenzierten Bewirtschaftung eine enorme pflanzliche und tierische Artenvielfalt in Erscheinung. Für den Menschen und die Umwelt sind auch die hohe Sauerstoffproduktion sowie die Speicherung von Kohlenstoff durch den hohen Humusgehalt auf Grünlandflächen, die über jener von Wald und Ackerkulturen liegt, von großer Wichtigkeit. In Bezug auf Naturgefahren stellt ein mit Grünland bewachsener Hang den besten Schutz gegen Wasser- und Winderosion dar. Das Grünland mit all seinen unterschiedlichen Nutzungsformen kann sich im Alpenraum von den Tälern bis in die alpinen Lagen wie keine andere Kulturart bestens anpassen [Buchgraber und Schaumberger, 2006].

Die hauptsächlich im Berggebiet betriebene Grünlandwirtschaft ist durch kleine Strukturen gekennzeichnet – die durchschnittliche Größe eines Grünlandschlages liegt im Bundesland Steiermark und in Österreich unter einem Hektar. Die überwiegende Grünlandfläche (59 %) wird als Wirtschaftsgrünland genutzt, gefolgt von extensivem Grünland (32 %) und grünlandartigem Feldfutter mit 9 % (Abb. 4-1). Die wichtigste Nutzungsform des Wirtschaftsgrünlandes mit 87.000 ha ist die drei- und mehrschnittige Mähwiese bzw. -weide. Almfutterflächen (63.000 ha) und Hutweiden (17.000 ha) stellen die wichtigsten Typen im extensiven Grünland. Beim Feldfutter ist das Klee gras mit fast 10.000 ha Fläche die mit Abstand bedeutendste Nutzungsform [INVEKOS, 2007].

Beinahe alle landwirtschaftlichen Betriebe in der Steiermark bewirtschaften Grünlandflächen verschiedenster Ausprägung. Besonders hervorzuheben sind jene Betriebe, deren Wirtschaftsgrundlage zu einem bedeutenden Teil von der Grünlandnutzung abhängig ist. Diese „Grünlandbetriebe“ mit 57 % aller Betriebe (ca. 19.000) definieren sich durch einen

Grünlandanteil von mehr als der Hälfte ihrer Betriebsfläche und der Nutzung von Grünland als Wirtschaftsgrünland (wobei der Anteil der Wirtschaftsgrünlandfläche an der Grünlandfläche des Betriebes unbestimmt ist). Der Ackerbau mit 140.000 ha spielt für die steirische Landwirtschaft vor allem im Südosten eine große Rolle. Hier finden sich viele der 12.000 Betriebe (36 % der steirischen Betriebe), welche zwar Grünland bewirtschaften, für welche diese Nutzungsform jedoch nicht die primäre Wirtschaftsgrundlage bildet. In Abb. 4-1 sind die Verteilungen von Betriebsformen und Grünlandnutzungen dargestellt. Daraus kann die große Bedeutung des Grünlandes für die steirische Landwirtschaft klar abgeleitet werden [INVEKOS, 2007].

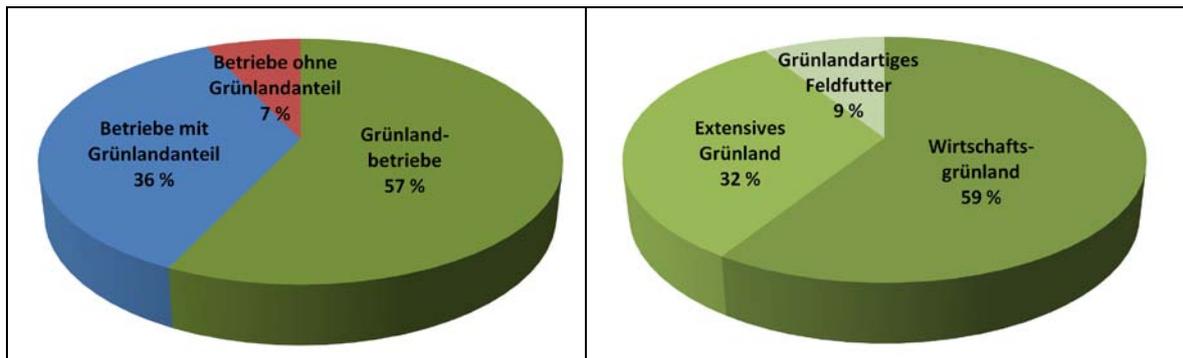


Abb. 4-1: Verteilung von Betriebs- und Grünlandbewirtschaftungstypen in der Steiermark (2007).

Die Beziehung zwischen Klima und Bewirtschaftung ist sehr stark vom räumlichen und zeitlichen Bezug geprägt. Es ist daher für die Beurteilung der Ergebnisse dieses Projektes von großer Bedeutung, auf die räumliche Komponente der Bewirtschaftung einzugehen. Ergänzend zu den numerischen Auswertungen des INVEKOS-Datenbestandes werden daher in den Abb. 4-2, Abb. 4-3 und Abb. 4-4 die Betriebs- und Grünlandnutzungsstrukturen in Verbindung mit den topographischen Rahmenbedingungen kartographisch dargestellt. Abb. 4-2 zeigt die Standorte der landwirtschaftlichen Betriebe entsprechend der Klassifizierung in Abb. 4-1. Die Steiermark ist dabei in drei unterschiedliche Gebiete geteilt.

Das hier dargestellte Tal- und Berggebiet entspricht der nach EU-Verordnung 1698/2005 als „Benachteiligtes Gebiet“ ausgewiesenen Klasse „Berggebiet“. Die hier vorgenommene Unterklassifizierung und Trennung zwischen Berg und Tal basiert auf einer geostatistischen Analyse, in der nicht die absolute Seehöhe, sondern relative Höhenunterschiede im Gelände zur Klassifizierung herangezogen werden, d.h. die Reliefenergie im Vergleich zum Bergland (braun dargestellt) niedriger ist. Das als Flachland ausgewiesene Gebiet entspricht jener Fläche, welche nach EU-Verordnung nicht zum dort definierten Bergland gehört. Aus Abb. 4-2 geht klar hervor, dass die topographischen Gegebenheiten in der Verteilung der Betriebstypen einen maßgeblichen Einfluss haben. Im Berggebiet finden sich fast ausschließlich Grünlandbetriebe, während im Flachland zwar auch Betriebe mit Grünlandflächen zu finden sind, deren Bedeutung als wirtschaftliche Existenzgrundlage jedoch

geringer ist. Neben den Tälern im Alpenhauptkamm findet sich eine massive Konzentration von Grünlandbauern im Übergang zwischen Flachland und Berggebiet.

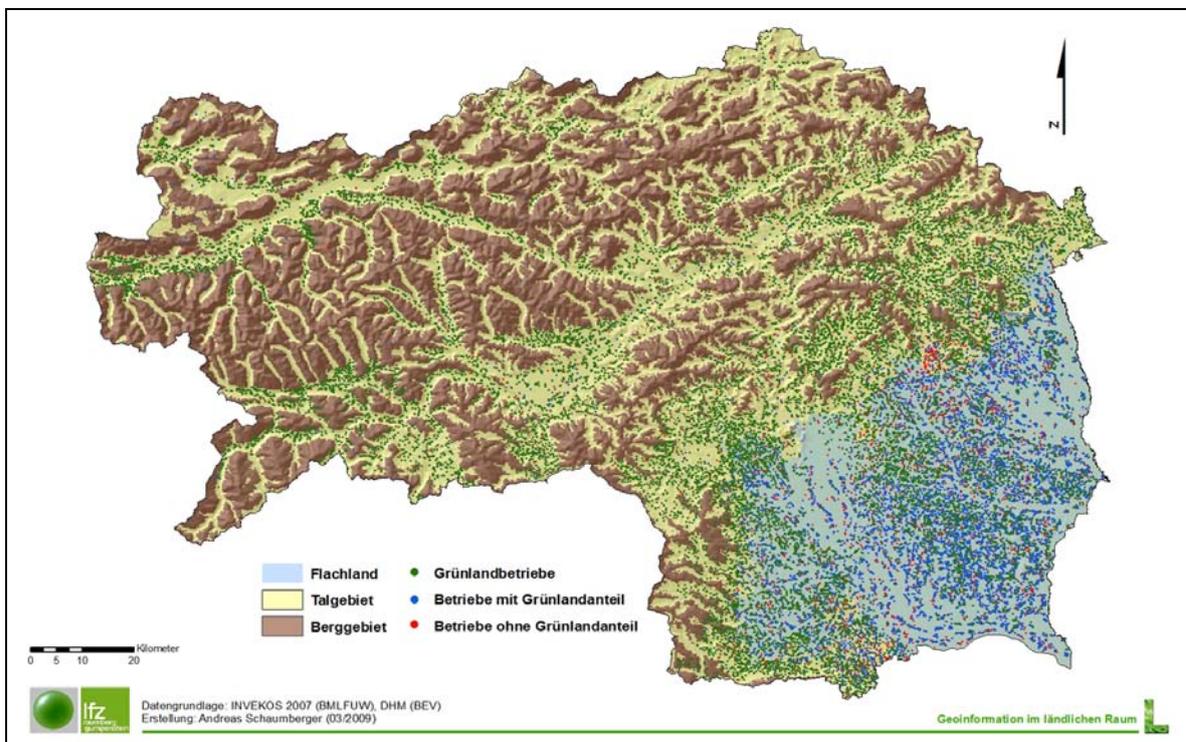


Abb. 4-2: Räumliche Verteilung der landwirtschaftlichen Betriebstypen im Flachland und Berggebiet der Steiermark (2007).

Die Standorte der Betriebe entsprechen naturgemäß der räumlichen Verteilung ihrer Flächen, wie sie in Abb. 4-3 zu sehen sind. Die als Extensives Grünland klassifizierte Flächen finden sich vorwiegend an den Talhängen sowie in kleinen, entlegenen Seitentälern. Feldfutterbau ist hauptsächlich im südlichen, klimatisch begünstigten Gebiet zu finden, wobei eine Häufung im Übergang vom Flachland zum Bergland auffällt, wie sie beispielsweise im Norden des Bezirkes Hartberg zu finden ist. Die Darstellung eines räumlichen Musters der Grünlandintensität ist in Abb. 4-4 zu sehen. Auch hier entspricht das relativ zur Gemeindefläche berechnete Grünland jener Verteilung, die sich bereits in Abb. 4-2 und Abb. 4-3 findet.

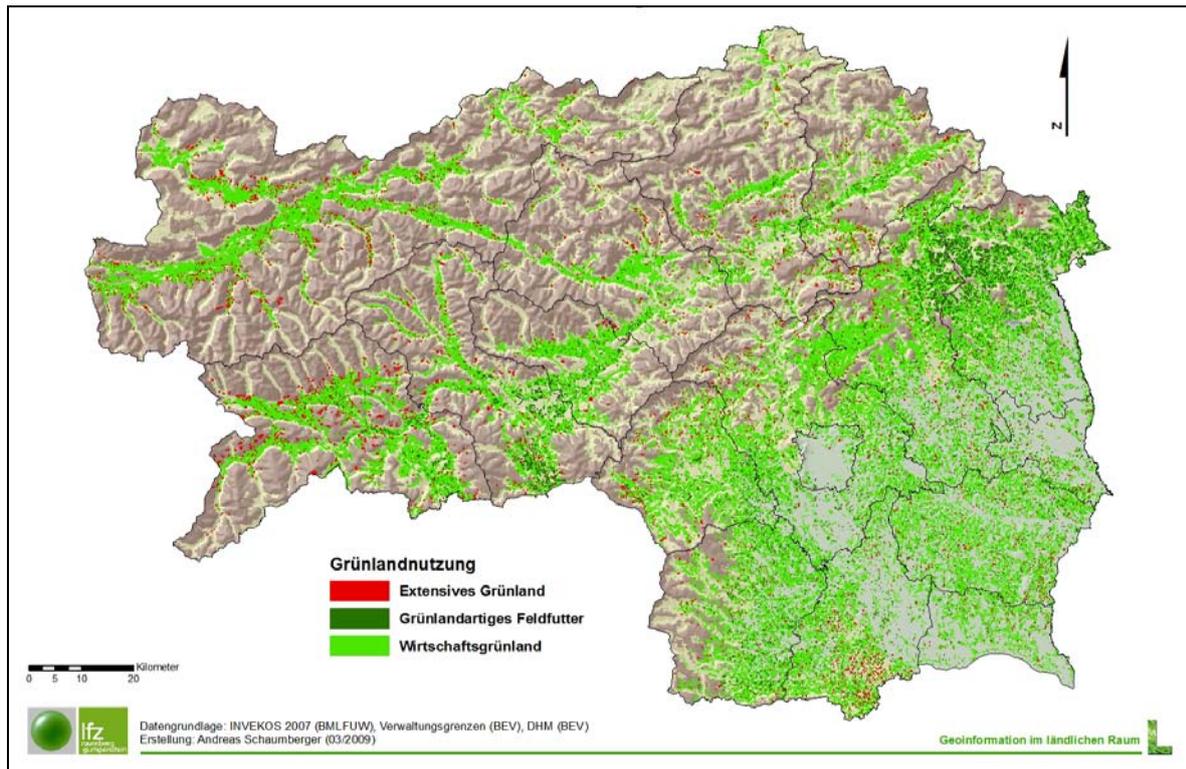


Abb. 4-3: Räumliche Verteilung der Grünlandflächen mit Unterscheidung der Nutzungstypen (2007).

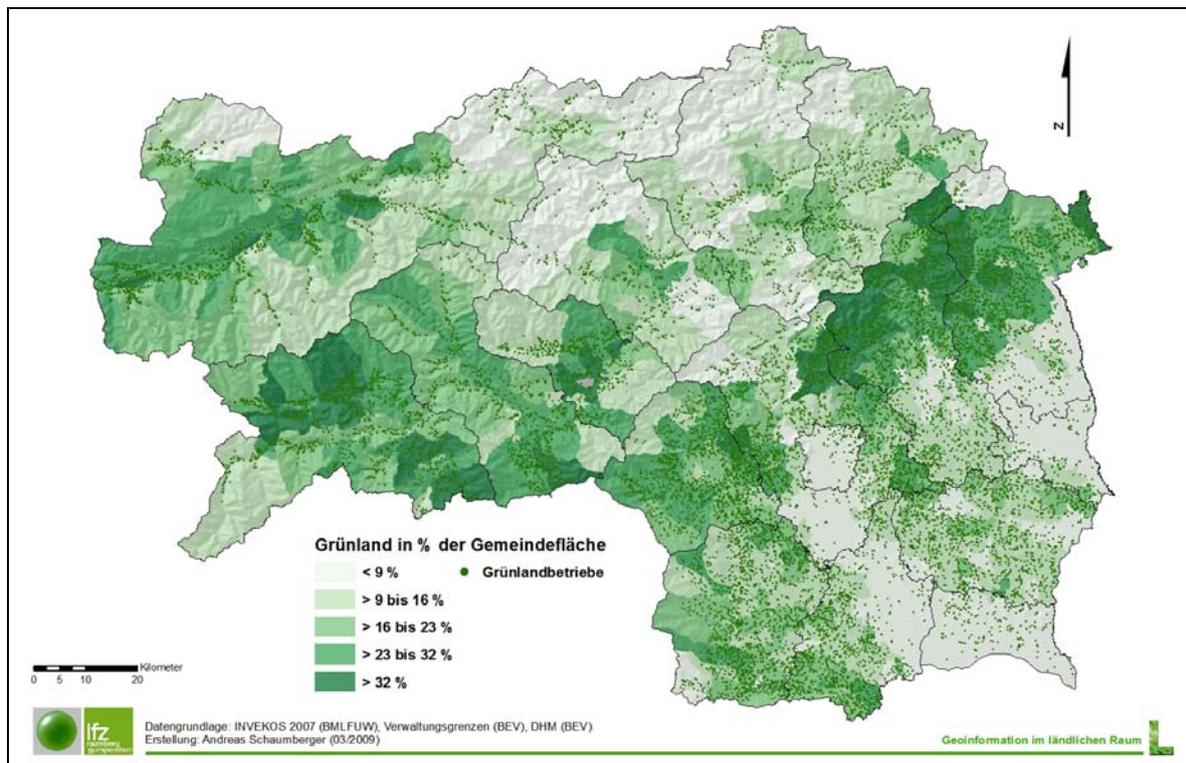


Abb. 4-4: Räumliche Verteilung der Grünlandnutzungsintensität (bezogen auf Gemeindeflächen) und der Grünlandbetriebe in der Steiermark (2007).

Gerade das intensive Grünlandgebiet im Übergang vom Flachland und Berggebiet ist für die Betrachtung hinsichtlich der Auswirkungen klimatischer Veränderungen von besonderer Bedeutung. Im Norden stellt Wasser in der Regel keinen limitierenden Faktor für das Wachstum dar; ganz im Gegensatz zu den südlichen Flächen, wo bereits jetzt das Auftreten von ertragsrelevantem Wasserstress während der Vegetationszeit keine Ausnahme mehr ist. Die Entwicklung des Klimas spielt deshalb gerade in diesem Grenzgebiet mit einem hohen Potential für eine räumliche Verschiebung von natürlichen Rahmenbedingungen eine große Rolle. Diese Veränderungen werden sich möglicherweise auch auf die Konkurrenzverhältnisse landwirtschaftlicher Kulturen (z.B. Grünlandwirtschaft versus Ackerbau) auswirken. Im Norden wird es interessant, wie sich die klimatische Veränderung auf die Bewirtschaftung der Wiesen und Weiden auswirkt. Das Szenario der Verwaltung im Berggebiet spielt bei der zukünftigen Nutzung des Grünlandes außerdem eine nicht zu unterschätzende Rolle.

4.1.2. Modellgrundlage zur Schätzung von Ertragsänderungen

Im vorliegenden Projekt wurden die Klimabedingungen zweier Perioden (1981 bis 1990 und 2041 bis 2050), abgeleitet aus einem Klimamodell, analysiert und mit Hilfe eines einfachen Bodenwasserbilanzmodells nach Allen et al. [1998] auf Wasserstressereignisse hin untersucht. Unter Anwendung des GRAssland statistical Model (GRAM) nach Trnka et al. [2006] wird der auftretende Wasserstress nach Han et al. [2003] für die Schätzung von Grünlanderträgen herangezogen. Das empirisch statistische Modell basiert auf einer umfangreichen Kalibrierung mit langjährigen Grünlandversuchsdaten, die auf 27 Standorten in ganz Österreich erhoben wurden [Schaumberger, 2006].

Der Schwerpunkt der rechnerischen Umsetzung liegt in der räumlichen Modellierung der Bodenwasserbilanz. Unter Berücksichtigung der für diese Fragestellung relevanten Bodenparameter wird die Verdunstung und Tiefenversickerung dem Niederschlag gegenübergestellt und daraus der für das Pflanzenwachstum notwendige Bodenwassergehalt auf Tagesbasis ermittelt. Eine räumliche Bearbeitung im GIS setzt die Abstraktion der Wirklichkeit in Form von einfachen Modellen voraus, welche nur flächendeckend verfügbare Daten einbeziehen können. Die Konsequenz daraus ist eine starke Vereinfachung von komplizierten Vorgängen im Wasserhaushalt. Eine weitere Besonderheit bei der Untersuchung von Grünland ist dessen komplexe Bewirtschaftung – es gibt mehrere Nutzungen pro Jahr, die sich zeitlich unterschiedlich verteilen. Auch hier gilt es, durch eine weitgehende Vereinfachung und dem Treffen von Annahmen die räumliche Modellierung erst zu ermöglichen.

Alle Berechnungen wurden GIS-gestützt und auf Tagesbasis für die Vegetationsperiode der untersuchten Jahre durchgeführt. Dies bedeutet die Erstellung von 7.350 Karten der Steiermark mit 250 Meter Auflösung pro Modellparameter – ein enormer programmier-technischer und rechnerischer Aufwand.

4.2. Material und Methoden

Die in der vorliegenden Arbeit zum Einsatz gelangten Methoden beziehen sich zum einen auf den fachlichen Hintergrund naturwissenschaftlicher Modelle und andererseits auf die Methodik der technischen Umsetzung und Integration in ein Geographisches Informationssystem.

4.2.1. Systemumgebung und Datengrundlage

Eine leistungsfähige Hardware ist die Voraussetzung für die Durchführung aufwendiger Rechenprozeduren. Der Entwicklungsrechner ist mit einem leistungsfähigen Prozessor, ausreichend Arbeitsspeicher und einem Storage-System ausgestattet. Die Implementierung erfolgt mit der objektorientierten Programmiersprache Visual C# im .NET-Framework. Als Entwicklungsumgebung kommt Microsoft Visual Studio zum Einsatz. Als GIS-Software wird ESRI ArcGIS genutzt, wobei hier die Verwendung der Programmbibliothek ArcObjects eine zentrale Rolle spielt und zur Implementierung von GIS-Funktionalität in die Algorithmen eingebunden wird. Die Datenhaltung der Inputdaten erfolgt mit einer zentralen Datenbank im Datenbankmanagementsystem Microsoft SQL Server und der Spatial Extension ArcSDE von ESRI. Die Abspeicherung von Zwischenergebnissen wird filebasiert vorgenommen, wobei die programmierten Methoden nach Möglichkeit die Zwischenergebnisse temporär in den Speicher legen und auf die Daten mit hoher Lesegeschwindigkeit für die weiteren Bearbeitungsschritte zugegriffen werden kann. Diese Vorgehensweise ist in vielen Fällen zwingend notwendig, da dies einerseits die Performance deutlich erhöht und andererseits die physische Ablage enorm großer Datenmengen einschränkt.

Alle verwendeten meteorologischen Parameter, das sind Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind, Globalstrahlung und Niederschlag, entstammen aufbereiteten und regionalisierten Klimamodellergebnissen (vgl. Teil II). Für die beiden Parameter Temperatur und Niederschlag wurde eine Fehlerkorrektur auf Stationsbasis durchgeführt (vgl. Teil II). Für die geostatistische Interpolation von Klimadaten, insbesondere der Temperatur und der Referenz-Evapotranspiration, wird deren enger Zusammenhang mit der Höhe ausgenutzt. Die Anwendung der Höhenabhängigkeit in einer kontinuierlichen Oberfläche wird durch die Einbindung eines digitalen Höhenmodells (DHM) ermöglicht. Zu diesem Zweck reicht eine Auflösung mit 250 Meter aus, da die meteorologischen Daten räumlich dem Stationsnetz der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) und im Fall des Niederschlags zusätzlich den Stationen des Hydrographischen Zentralbüros (HZB) zugeordnet wurden und dieses Netz mit einer durchschnittlichen Nachbarschaftsdistanz von 10 km eine höhere Zielauflösung nicht sinnvoll macht. Die Basisdaten des DHM stammen vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) und wurden durch Resampling aus einem 50-Meter-Modell gerechnet.

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich auf die Fläche des Bundeslandes Steiermark mit einem für eine geostatistische Interpolation notwendigen Randbereich (Bounding Box um die Landesgrenzen). Die Klimadaten wurden räumlich den Koordinaten der Wetterstationen von ZAMG und HZB zugeordnet und verteilen sich wie in Abb. 4-5 dargestellt.

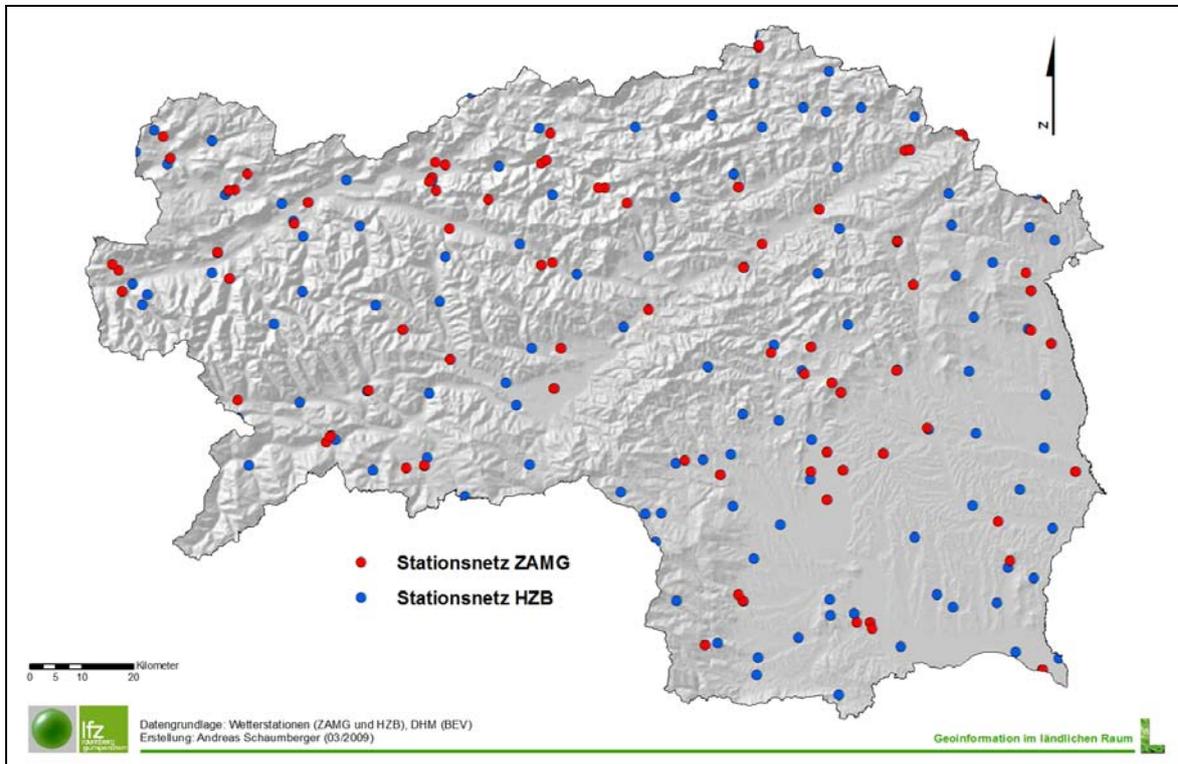


Abb. 4-5: Räumliche Verteilung der auf Wetterstationen bezogenen Interpolationsstützpunkte der Klimadaten (ZAMG: Temperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung und Wind; ZAMG & HZB: Niederschlag).

4.2.2. Überblick und Modellzusammenhang

Für die Schätzung des Grünlandertrages werden verschiedene Modelle benötigt, deren Ablauf hierarchisch und aufeinander abgestimmt erfolgt. In Abb. 4-6 sind die wichtigsten Komponenten schematisch dargestellt – die methodische Beschreibung dazu findet sich in den folgenden Abschnitten. Als Inputdaten werden die Klimadaten, das DHM sowie ein Datensatz zur Beschreibung des Bodens (nutzbare Feldkapazität) einbezogen.

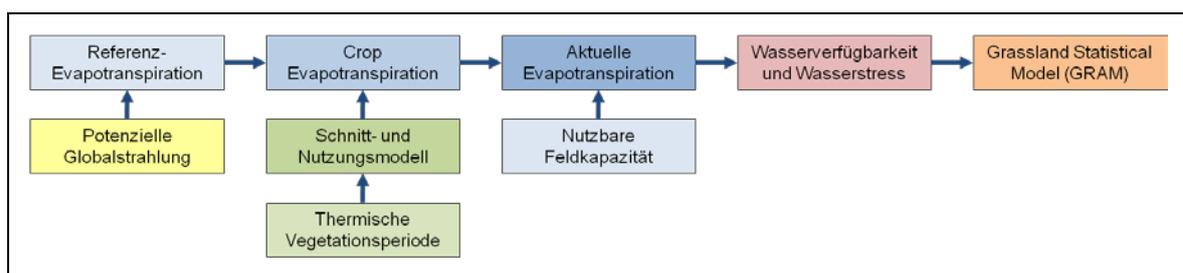


Abb. 4-6: Schematische Darstellung des Programmablaufs mit den Hauptmodellkomponenten.

4.2.3. Modell der potenziellen Globalstrahlung

Die Globalstrahlung ist im Zusammenhang mit der Ertragsmodellierung einer der wichtigsten Parameter. Für deren Berechnung werden direkte Sonnenstrahlung und die auf die Erdoberfläche gerichtete diffuse Himmelstrahlung (Streu- bzw. Reflexstrahlung von Wolken und Luftteilchen) addiert. Sie wird sowohl für die Berechnung der Bodenwasserbilanz im Rahmen der Referenz-Evapotranspiration als auch direkt für das GRASSland statistical Model (GRAM) im Zusammenhang mit der effektiven Globalstrahlung benötigt.

Eine besondere Herausforderung besteht in der geeigneten Aufbereitung für die räumliche Modellierung. Die geostatistische Interpolation zwischen Messstationen genügt nicht, um die Topographie entsprechend berücksichtigen zu können. Insbesondere bei dem Anteil der direkten Strahlung spielt der geometrische Zusammenhang zwischen Sonnenstandswinkel und bestrahlter Oberfläche eine herausragende Rolle. Es ist deshalb notwendig, die auf Wetterstationen gestützte räumliche Interpolation mit einer Information zu kombinieren, welche die durch die Topographie beeinflusste Strahlungsintensität repräsentiert. Dadurch wird eine kontinuierliche Werteoberfläche generiert, welche sowohl wetterbedingte Einflüsse, abgeleitet aus den interpolierten Beobachtungswerten, als auch topographiebedingte Einflüsse durch den in der weiteren Folge beschriebenen Strahlungsfaktor berücksichtigt. Die Berechnung der Globalstrahlung für Oberflächen wird durch die Extension „Spatial Analyst“ mit dem Tool „Solar Radiation“ der GIS-Software ArcGIS unterstützt. Die methodische Grundlage basiert auf einer Arbeit von Fu and Rich [1999]. Unter Einbeziehung eines Digitalen Höhenmodells kann für zu definierende Zeiträume ein Ergebnisrasterdatensatz erzeugt werden, der in den Rasterzellen die jeweilige Summe an Globalstrahlungsenergie für den angegebenen Zeitraum enthält.

Dabei wird für jede Rasterzelle in der Auflösung des zugrundeliegenden DHM die Horizontabschattung ermittelt, die diffuse und direkte Strahlung in Abhängigkeit der topographischen Ausprägung und der Sonnenstandswinkel in 30-Minuten-Abständen gerechnet und miteinander kombiniert. In diesem Projekt wird die Globalstrahlung als Summe für jeden Tag der Vegetationsperiode benötigt. Die Anforderung an technische Ressourcen ist bei einer flächendeckenden Berechnung derart hoch, dass diese nur für jeweils einen charakteristischen Tag des Monats nach Klein [1977] durchgeführt wird. Die Werte für die dazwischen liegenden Tage werden linear interpoliert. Das ArcGIS-Tool bietet grundsätzlich zwei Möglichkeiten, die Globalstrahlung für ein definiertes Gebiet zu ermitteln. Eine Variante bezieht die aus dem DHM abgeleitete Exposition und Neigung jeder Zelle in die Analyse ein, beim zweiten Ansatz werden diese beiden Parameter auf Null gesetzt. Die topographische Abschattung hingegen wird in jedem Fall berücksichtigt. In Abb. 4-7 ist der Unterschied zwischen den Varianten schematisch dargestellt. Die Veränderungen im Einstrahlungswinkel aufgrund der verschiedenen Oberflächenstrukturen führen auch zu unterschiedlichen Ergebnissen in den Strahlungssummen.

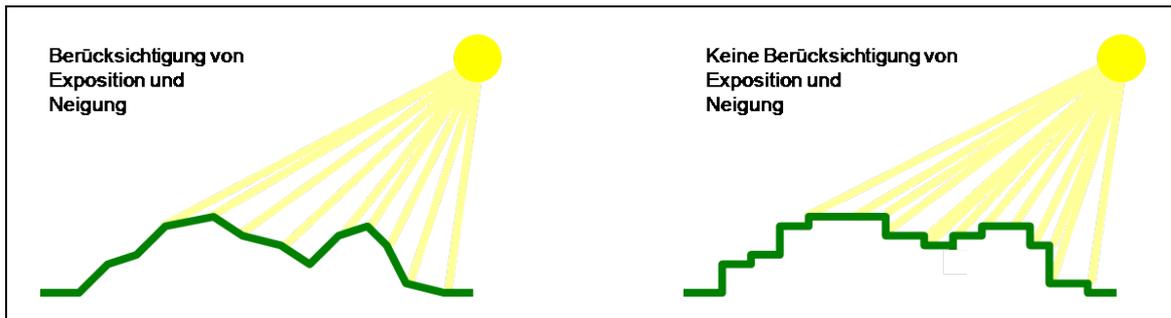


Abb. 4-7: Schema der Berücksichtigung unterschiedlicher Geländeoberflächen.

Die Ergebnisse aus beiden Berechnungsvarianten unterscheiden sich lediglich in ihrer Abhängigkeit von der Topographie. Für die Berechnung des Strahlungsfaktors, also jenes Faktors, der die topographiebedingte Änderung in der Strahlungsinformation repräsentiert, werden diese beiden Datensätze miteinander in Beziehung gesetzt. Der so errechnete Faktor liegt als kontinuierliche Oberfläche vor und kann zusätzlich zur räumlichen Modellierung der aktuellen Globalstrahlung zur Verbesserung der räumlichen Interpolation der Referenz-Evapotranspiration herangezogen werden.

Gegenüber den Berechnungen in *AgroClim1* wurde dieser Ansatz dahingehend weiterentwickelt, dass die Daten mit Berücksichtigung von Exposition und Neigung nicht nur einem Standort (Groß-Enzersdorf) als Normierungselement gegenübergestellt werden, sondern zur Normierung ebenfalls eine kontinuierliche Oberfläche ohne Berücksichtigung von Exposition und Neigung zur Verfügung steht. Dadurch enthält der daraus resultierende Strahlungsfaktor ausschließlich die auf die jeweilige Rasterzelle bezogene topographischen Änderungen und keine sich aus der geographischen Position bzw. Höhenlage ergebenden Abweichungen zwischen Groß-Enzersdorf und der zu errechnenden Rasterzelle.

4.2.4. Modell der Referenz-Evapotranspiration

Die Evapotranspiration beschreibt die Verdunstung auf der mit Vegetation bewachsenen Erdoberfläche und setzt sich aus der Evaporation über offenem Boden und der Transpiration von Pflanzen zusammen. Bei der Berechnung der potentiellen Evapotranspiration einer bewachsenen Oberfläche – diese wird auch als Referenz-Evapotranspiration bezeichnet, da sie immer auf eine bestimmte Vegetationsdecke mit konstanter Albedo und konstantem Verdunstungswiderstand bezogen ist – wird die Betrachtung auf den zeitlich variablen Witterungseinfluss reduziert und vorausgesetzt, dass für die Verdunstung des angenommenen Pflanzenbestandes stets ausreichend Wasser zur Verfügung steht. Die potentielle Evapotranspiration stellt somit jene Wassermenge dar, welche bei unlimitierter Wasserverfügbarkeit verdunsten könnte. Da die Berechnung der Referenz-Evapotranspiration Schwerpunkt in *AgroClim1* war und dort eine detaillierte Beschreibung erfolgte [Schaumberger, 2008], wird hier auf deren methodische Darstellung verzichtet und auf den Abschlussbericht von *AgroClim1* verwiesen.

4.2.5. Modell der Thermischen Vegetationsperiode

Die Vegetationsperiode ist eine von klimatischen Einflüssen geprägte Komponente, die sowohl für Bewirtschaftungsmaßnahmen als auch für die Biomasseentwicklung landwirtschaftlicher Kulturen entscheidend ist. In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze zur Berechnung von Beginn, Verlauf und Ende dieser für das Pflanzenwachstum maßgeblichen Periode. Das in der Literatur am häufigsten zu findende Kriterium, nämlich eine Überschreitung der Tagesmitteltemperatur von 5 °C über eine Dauer von fünf aufeinanderfolgenden Tagen, wird auch in der vorliegenden Arbeit angewandt. Das Ende der Vegetationsperiode ist durch die Umkehrung dieser Anforderung, also die Unterschreitung der Tagesmitteltemperatur von 5 °C über eine Dauer von fünf aufeinanderfolgenden Tagen, definiert. In diesem Zusammenhang muss eingeräumt werden, dass die hier definierten Grenzen der Vegetationsperiode auf der Annahme einer ausschließlichen Temperaturabhängigkeit beruhen und andere signifikante Einflüsse zugunsten einer für die räumliche Implementierung notwendigen Vereinfachung ausgeschlossen werden.

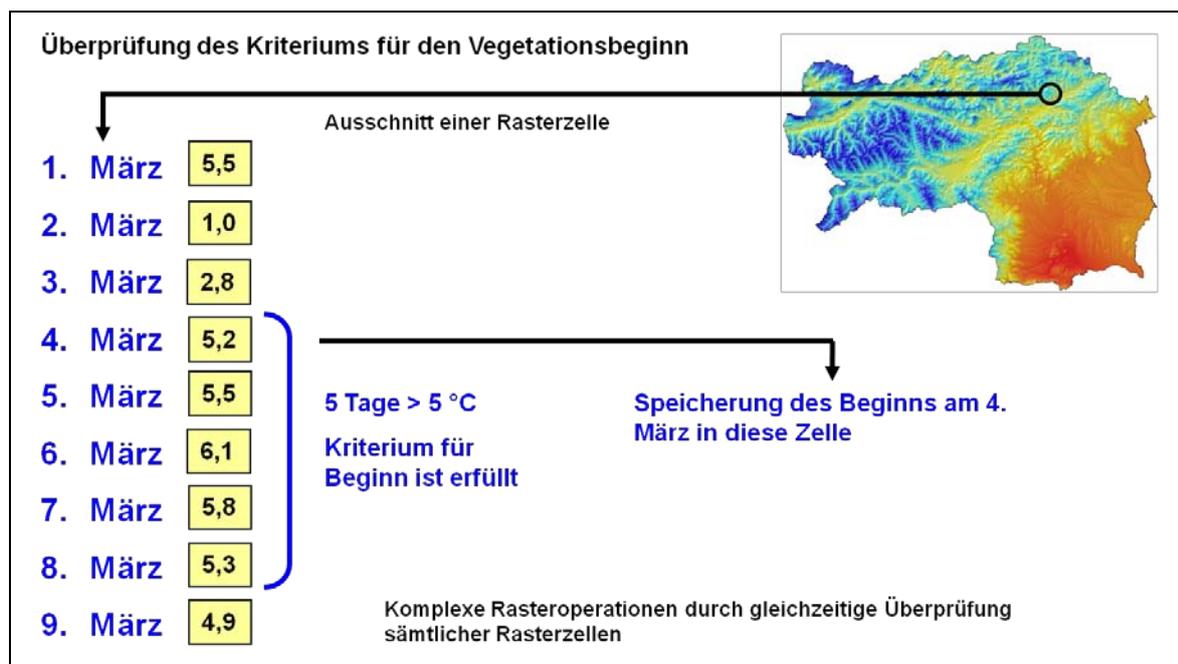


Abb. 4-8: Schematische Darstellung der Rasterzellenbezogenen Überprüfung des Temperaturkriteriums für den Beginn der Vegetationsperiode.

Zunächst werden die Temperaturreasterdaten auf Tagesbasis beginnend mit 1. März eines jeden Jahres erstellt und anschließend mittels Raster-Algebra-Operationen auf die Erfüllung des Temperaturkriteriums geprüft (siehe Abb. 4-8). In einer Schleife mit täglichem Inkrement werden die Temperaturoberflächen in Binärraster codiert, d.h. bei Erfüllung des Temperaturkriteriums nimmt die Rasterzelle den Wert 1 an, ansonsten den Wert 0. Die Binärraster für fünf aufeinanderfolgende Tage werden anschließend addiert und bei jenen Zellen, welche den Wert 5 als Summe aufweisen, also an jedem der fünf Tage den Wert 1 enthalten und damit das Temperaturkriterium erfüllen, wird der erste Tag als Beginn bzw.

Ende in ein Ergebnisraster übertragen. Das Zeitfenster von fünf Tagen wird innerhalb der Schleife um einen Tag nach vor geschoben und neuerlich geprüft bis alle Zellen im Untersuchungsgebiet ein Ergebnis für Beginn bzw. Ende der Vegetationsperiode liefern.

4.2.6. Modell der Schnitthäufigkeit und des Schnittzeitpunktes

Der Zeitpunkt für die Grünlandnutzung hängt sowohl von Standort- als auch Bewirtschaftungsfaktoren ab. Ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Quantität und Qualität des Grünlandertrages wird bei einer Nutzung im Vegetationsstadium „Ähren- und Rispenstadien“ erreicht und hängt von den klimatischen Bedingungen, der Pflanzenbestandszusammensetzung und den Bewirtschaftungsmaßnahmen des Landwirtes ab [Buchgraber und Gindl, 2004]. Eine Modellierung ist aus diesem Grund nur näherungsweise möglich.

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz geht von der potentiell zur Verfügung stehenden Vegetationsdauer aus. Diese wird vereinfacht mit Hilfe des thermischen Vegetationsperiodenmodells beschrieben. Eine Schnittnutzung wird nicht bis zum letztmöglichen Termin vorgenommen, sondern die Grünlandfläche wird in der Regel nach dem letzten Schnitt bis zum Erreichen der Ruheperiode durch eine entsprechende Nachnutzung (Weide) bewirtschaftet. Die zur Verfügung stehende Schnittnutzungszeit wird demzufolge durch die Einführung eines Offsetwertes von 21 Tagen am Ende der Periode verkürzt.

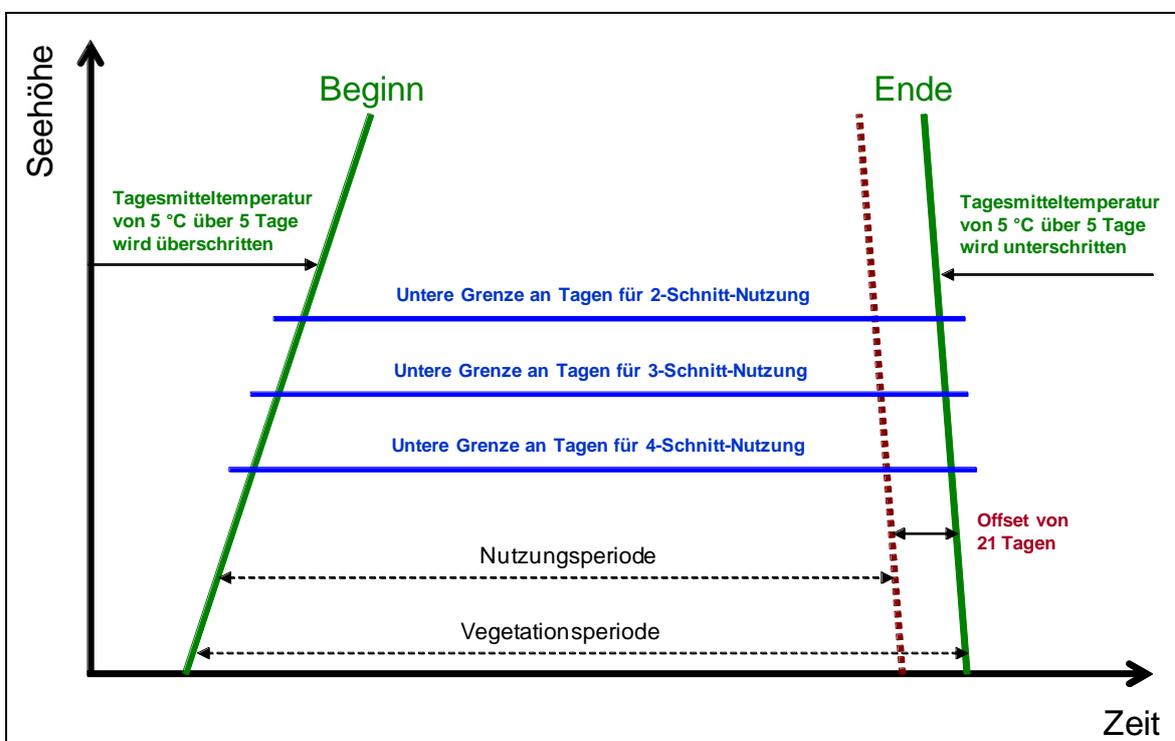


Abb. 4-9: Schematische Darstellung der Modellierung von Vegetations- und Nutzungsperiode.

Jeder Aufwuchs benötigt eine gewisse Zeit des Wachstums bis zur Ernte und mit Zunahme der Schnitthäufigkeit muss auch die potentiell zur Verfügung stehende Vegetationszeit bzw. Nutzungsperiode über eine entsprechende Anzahl an Wachstumstagen verfügen. Durch den engen Zusammenhang von Temperatur und Seehöhe nimmt die Anzahl dieser Tage in höheren Lagen ab. Mit Einführung von Grenzen als minimale Anzahl von Tagen, die ein bestimmtes Nutzungsregime benötigt, kann das Gebiet in Bereiche geteilt werden, in denen theoretisch eine bestimmte Nutzungshäufigkeit auftritt bzw. möglich ist. Abb. 4-9 zeigt diesen Ansatz in schematischer Form. Für die untere Grenze der Vierschnittnutzung werden beispielsweise 200 Tage, für die Dreischnittnutzung 160 Tage und für die Zweischnittnutzung 140 Tage festgelegt.

Am LFZ Raumberg-Gumpenstein werden seit Jahrzehnten viele Fragestellungen mit wissenschaftlichen Exaktversuchen am Feld bearbeitet. Um eine relative Verteilung der Aufwuchszeit einzelner Aufwüchse abschätzen zu können, wurden zahlreiche Einzelversuche hinsichtlich ihrer Schnitttermine analysiert und deren zeitliche Verteilung untersucht. Die daraus ableitbaren Verhältniszahlen beruhen auf Exaktversuchsdaten und sind in der Regel durch die Festlegung von „praxisnahen“ Schnittterminen beeinflusst. Die Verhältniszahlen wurden zur Berechnung theoretischer Schnitttermine in den für eine bestimmte Schnitthäufigkeit definierten Bereich herangezogen. Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass innerhalb eines Nutzungsbereiches der Schnitttermin dynamisch auf die Veränderungen der zur Verfügung stehenden Nutzungsperiode reagieren kann. Das Schema dieses Ansatzes ist in Abb. 4-10 dargestellt.

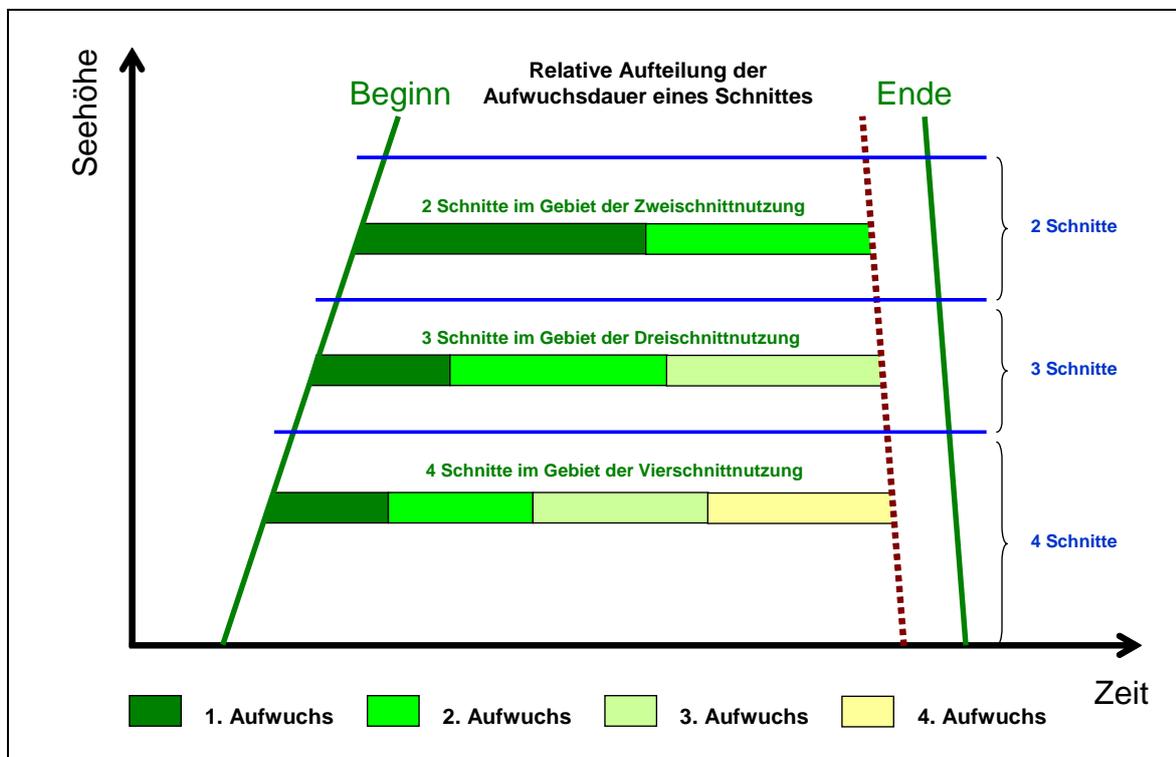


Abb. 4-10: Relative Verteilung der Aufwuchszeiten und daraus ableitbare Schnitttermine.

Die GIS-Implementierung des Modells gestaltet sich so, dass aus dem Vegetationsmodell eine Oberfläche abgeleitet wird, welche in jeder Rasterzelle die Anzahl an verfügbaren Nutzungstagen speichert. Durch Maskierung der einzelnen Nutzungsbereiche (Gebiete der Zwei-, Drei- und Vierschnittnutzungen) kann nach Einbeziehung der Verhältniszahlen für jede Nutzung und jeden Schnitt die Zahl des Tages im Jahresverlauf berechnet und diese in eine Rasterzelle abgelegt werden. Durch Zusammenführen aller Nutzungsgebiete entsteht eine flächendeckende Oberfläche mit den unterschiedlichen Nutzungszeitpunkten.

Das Schnittmodell spielt im Gesamtkonzept der Ertragsmodellierung eine zweifache Rolle. Zum Einen fließt die Information über die Schnitthäufigkeit einer Fläche direkt in das Ertragsmodell ein. Zum Anderen wird die Dauer der einzelnen Aufwüchse für eine näherungsweise Bestimmung der Biomassezunahme bei der Berechnung der Interzeption im Rahmen des Bodenwasserbilanzmodells, welches nachfolgend beschrieben wird, benötigt.

4.2.7. Modell der Bodenwasserbilanz

Das Bodenwasserbilanzmodell stellt das zentrale Modell im Vorfeld des eigentlichen Ertragsmodells (GRAM) dar und wurde nach Allen et al. [1998] zusammengestellt. Die im Zusammenhang mit der Bestimmung von Wasserstress wichtigste Größe, welche aus diesem Modell hervorgeht, ist die aktuelle Evapotranspiration. Im Gegensatz zur Referenz-Evapotranspiration enthält sie Informationen über den Wassereintrag in Form des Niederschlags, über die für den Wasserhaushalt relevanten Bodeneigenschaften und über die Veränderungen der Pflanzendecke (Verlauf der Biomasseentwicklung eines Wirtschaftsgrundlandes). Die aktuelle Evapotranspiration beschreibt also jene Verdunstungsmenge, die aufgrund der tatsächlichen Wasserverhältnisse im Boden stattfindet; bei der Referenz-Evapotranspiration wird von einem wassergesättigtem Zustand ausgegangen. Allen et al. [1998] passen die Referenz-Evapotranspiration an die jeweils zu untersuchende Kulturart mit Hilfe von Faktoren an und transformieren die Referenzwerte in die sogenannte Crop Evapotranspiration.

4.2.7.1. Berechnung der Crop Evapotranspiration

Die Anpassung der Referenz-Evapotranspiration an die Verhältnisse einer genutzten Grünlandfläche ist der erste Schritt für die Bestimmung der aktuellen Evapotranspiration. Allen et al. [1998] geben Faktoren an, die entsprechend den Entwicklungsstadien einer bestimmten Kultur im Verlauf der Vegetationsperiode, die Anpassung der referenzbezogenen Evapotranspiration auf die zu untersuchenden Kulturen ermöglichen und formal durch die Gleichung

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (4-1)$$

beschrieben wird. ET_c ist die Crop Evapotranspiration [mm d^{-1}] der Grünlandfläche, K_c der Pflanzenfaktor (crop coefficient) und ET_0 die potentielle bzw. Referenz-Evapotranspiration [mm d^{-1}] der definierten Grasoberfläche. Für den auf Wirtschaftsgrünland abgestimmten Pflanzenfaktor K_c werden drei Wachstumsphasen unterschieden:

<i>Initialisierungsphase</i>	0.4
<i>Entwicklungsphase</i>	0.4 → 1.2
<i>Späte Phase</i>	0.9

Die Initialisierungsphase beginnt einheitlich mit der Berechnungsperiode am 1. März eines jeden Jahres. Mit dem Beginn der thermischen Vegetationsperiode (vgl. Abschnitt 4.2.5) wird die Entwicklungsphase eingeleitet. Hier nimmt der Pflanzenfaktor linear bis zum Schnitttermin zu und beginnt dann erneut auf dem Level der Initialisierung bis zum nächsten Schnitt. Die Anzahl der Schnitte bestimmt damit auch den Verlauf der Pflanzenfaktor-kurve. Nach dem letzten Schnitt wird der Pflanzenfaktor mit dem der „Späten Phase“ zugeordneten Wert bis zum Ende der Berechnungsperiode am 31. Oktober fortgeschrieben. Durch niedrige Faktorwerte, welche den am Beginn der Entwicklung stehenden Pflanzenbestand abbilden, wird die Evapotranspiration reduziert und bei einem voll entwickelten, vor der Ernte stehendem Grünland erhöht. Die Konsequenz daraus ist ein vermehrter Wasserbedarf in jenen Perioden, in denen die Crop Evapotranspiration hoch ist.

Für ein räumliches Modell der Crop Evapotranspiration ist es notwendig, die täglich gerechnete Oberfläche der Referenz-Evapotranspiration [vgl. Schaumberger, 2008] mit einer Oberfläche des täglichen Pflanzenfaktors zu kombinieren. Abgeleitet wird diese aus dem räumlichen Modell der Schnitthäufigkeit und Schnittzeitpunkte (vgl. Abschnitt 4.2.6).

Neben der Berücksichtigung des Pflanzenbestandes für die Evapotranspiration ist der Boden ein weiterer entscheidender Parameter in der Bodenwasserbilanzierung.

4.2.7.2. Wasserspeicherfähigkeit des Bodens

Die nutzbare Feldkapazität drückt die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens aus und wurde vom Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt mit Hilfe von Pedotransferfunktionen nach Murer et al. [2004] gerechnet und für die Bodenschichten 0 bis 20 cm und 20 bis 40 cm in die vorliegende Arbeit einbezogen. Die Grundlage bilden Kennwerte über Korngrößenverteilung, Humus- und Kalkgehalt, sowie pH-Wert aus der Österreichischen Bodenkartierung in digitaler Form. Die Berechnung bezieht sich auf die mineralischen Bodenformen der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde eine Überprüfung und Verbesserung der bisher verwendeten Pedotransferfunktion vorgenommen [Murer, 2009].

Die Integration in das Bodenwasserbilanzmodell erfolgt in Form von Rasterdatensätzen für die jeweilige Bodenschicht. Die Ergebnisse aus der Bodenwasserbilanzierung, insbesondere die aktuelle Evapotranspiration ist auf jene Fläche eingeschränkt, für die Werte der nutzbaren Feldkapazität zur Verfügung stehen. Diese Limitierung setzt sich über das Ertragsmodell weiter fort und Aussagen über den Grünlandertrag beschränken sich somit auf jene Flächen mit ausgewiesener nutzbarer Feldkapazität.

4.2.7.3. Berechnung der aktuellen Evapotranspiration

Sowohl Crop Evapotranspiration als auch Referenz-Evapotranspiration bilden die Verdunstungsmenge unter standardisierten Bedingungen ab, d.h. es wird ein vollständig wassergesättigter Boden angenommen. In der Realität ist jedoch Wasser oft ein limitierender Faktor, der bei der Berechnung der aktuellen Evapotranspiration berücksichtigt werden muss und die ET_c entsprechend dem Niveau der Wasserknappheit verändert. Nach Allen et al. [1998] wird daher noch ein zusätzlicher Faktor, der Wasserstresskoeffizient K_s angebracht:

$$ET_{c,adj} = ET_0 \cdot K_c \cdot K_s \cdot pf \quad (4-2)$$

$ET_{c,adj}$ ist die aktuellen Evapotranspiration [mm d^{-1}], welche aus der Gewichtung der Referenz-Evapotranspiration ET_0 mit dem Pflanzenfaktor K_c , dem Wasserstresskoeffizienten K_s und einem Proportionalitätsfaktor pf hervorgeht. In Abschnitt 4.2.7.2 wird die Einbeziehung zweier Bodenschichten für die Berücksichtigung der nutzbaren Feldkapazität angeführt. Um sowohl den Wassereintrag als auch die Evapotranspiration für die beiden Bodenschichten mit unterschiedlicher Wasserspeicherfähigkeit getrennt behandeln zu können, ist es notwendig, die Berechnungen auf den Boden von 0 bis 20 cm (Topsoil) und von 20 bis 40 cm (Subsoil) abzustimmen. Der Proportionalitätsfaktor pf dient dazu, die beiden Bodenschichten mit unterschiedlichem Gewicht einzubeziehen. Der Anteil von Topsoil an der Evapotranspiration beträgt in vorliegender Arbeit 60 %, jener von Subsoil 40 %. Die Aufteilung wurde nach Auswertung umfangreicher Datenreihen empirisch festgesetzt und besagt, dass in der obersten Bodenschicht ein Großteil der Verdunstung bzw. die Tiefenversickerung des Wassers in die zweite Bodenschicht stattfindet. Der Wasserentzug aus der zweiten Bodenschicht in Form von Transpiration und Tiefenversickerung spielt ebenfalls eine wichtige Rolle, fällt jedoch im Vergleich zur Bodenschicht Topsoil etwas geringer aus.

Die Berechnung des Wasserstresskoeffizienten K_s ist umfangreich und erfolgt über den Verlauf der Vegetationsperiode kumulativ. Die einzelnen Schritte beziehen sich immer auf zwei unterschiedliche Bodenschichten, die abschließend zu einem gemeinsamen Wert der aktuellen Evapotranspiration zusammengezogen werden. In der nachfolgenden Beschreibung der Arbeitsschritte wird auf diese Trennung nicht eingegangen; die Gleichungen für Topsoil und Subsoil unterscheiden sich nicht voneinander.

Total Available Water (TAW)

Dieser Wert beschreibt das Potential an Wasser, welches für die Pflanzen in der Wurzelzone verfügbar ist. Der Wassergehalt nimmt durch Verdunstung bei fehlendem Wassereintrag in Abhängigkeit des Bodentyps und der Durchwurzelungstiefe ab und kann bei Erreichen des Welkepunkts nicht mehr genutzt werden. Die obere Grenze für das Wasseraufnahmevermögen des Bodens stellt die Feldkapazität dar.

$$TAW = 1000 \cdot aFC \cdot Z_r \quad (4-3)$$

TAW als insgesamt verfügbares Wasser [mm] hängt von der nutzbaren Feldkapazität aFC [$m^3 m^{-3}$] als Differenz zwischen Feldkapazität und Welkepunkt sowie von der Durchwurzelungstiefe Z_r [m] (für jede der beiden Bodenschichten 0.2 m) ab.

Readily Available Water (RAW)

Die theoretische Wasserverfügbarkeit bis zum Welkepunkt wird dadurch eingeschränkt, dass die für die Transpiration erforderliche Wassermenge durch zunehmende Trockenheit nicht schnell genug von den Pflanzen aufgenommen werden kann und sich Wasserstress abzeichnet. Der Schwellwert dafür wird durch den Parameter RAW als Anteil von TAW ausgedrückt:

$$RAW = p \cdot TAW \quad (4-4)$$

$$p = p_T + 0.04 \cdot (5 - ET_c) \quad (4-5)$$

wobei RAW als leicht verfügbares Bodenwasser [mm] mit Hilfe von p als einen an ET_c angepassten Fraktionsfaktor [0-1] von TAW errechnet wird. p_T ist ein auf Grünland abgestimmter Wert nach Allen et al. [1998] für $ET_c \approx 5 \text{ mm d}^{-1}$ und geht mit dem Wert 0.6 in die Gleichung 4-4 ein. Die numerische Annäherung durch eine Anpassung von p unter Einbeziehung von ET_c wird auf den Wertebereich $0.1 \leq p \leq 0.8$ eingeschränkt.

Water Stress Coefficient (K_s)

Der Wasserstresskoeffizient wirkt sich direkt auf die Crop Evapotranspiration aus und reduziert diese bei eingeschränkter Wasserverfügbarkeit; daraus ergibt sich nach Gleichung 4-2 die aktuelle Evapotranspiration. Durch die Berücksichtigung der Bodenwasserabsenkung D_r des Vortages kommt es zu einer kumulativen Fortschreibung der Wasserverhältnisse. Damit ist die kontinuierliche Beschreibung der Entwicklung von Wasserstress über eine ganze Vegetationsperiode möglich. Die Gleichung hat die Form

$$K_s = \frac{TAW - D_{r(i-1)}}{TAW - RAW} \quad (4-6)$$

wobei K_s als Wasserstresskoeffizient [0-1] aus den in 4-3 und 4-4 entwickelten Werten TAW und RAW gebildet wird. Die Einbeziehung der Bodenwasserabsenkung D_r [mm] bezieht sich auf den Wert des Vortages (i-1). Die Initialisierung am Beginn der Vegetationsperiode wird mit 0 angenommen, dies entspricht einem ausreichend mit Wasser gesättigtem Boden, wie er in der Regel nach einem Winter mit ausreichend Niederschlägen besteht.

Die durch einen abnehmenden Wert von K_s zum Ausdruck kommende Verknappung des Bodenwassers ist relativ zur Feldkapazität zu betrachten. Beim Zustand der Feldkapazität beträgt die Bodenwasserabsenkung D_r 0 und erhöht sich mit zunehmender Austrocknung bis zum Wert von RAW ohne Auswirkung auf K_s . Trockenstress tritt erst dann auf, wenn RAW überschritten wird. Ab diesem Zeitpunkt nimmt K_s beginnend beim Wert 1 ab und erreicht 0, wenn D_r beim Wert von TAW angelangt ist. Damit kommt es bei Anwendung eines $K_s < 1$ in der Gleichung 4-2 zu einer Reduzierung der ET_c .

Root Zone Depletion (D_r) – Bodenwasserabsenkung

Dieser Parameter beschreibt die tägliche Wasserbilanz für die jeweilige Bodenschicht. Dem Wassereintrag in Form von Niederschlag (im Fall der oberen Bodenschicht) bzw. Tiefenversickerung (aus der ersten in die zweite Bodenschicht) steht der Wasseraustrag in Form von Verdunstung bzw. Tiefenversickerung in untere, nicht durchwurzelte Bodenschichten gegenüber. Durch die Berücksichtigung des Vortages zur Errechnung des aktuellen Tages wird eine Entwicklung der Bodenwasserabsenkung beschrieben. Die Gleichung für die Bodenschicht Topsoil *top* hat die Form:

$$D_{r,top,i} = D_{r,top,i-1} - (P_i - I_i) + ET_{c,top,i} + DP_{top,i} \quad (4-7)$$

für Subsoil *sub* die Form:

$$D_{r,sub,i} = D_{r,sub,i-1} - DP_{top,i} + ET_{c,sub,i} + DP_{sub,i} \quad (4-8)$$

D_r ist die Bodenwasserabsenkung [mm] am Tag i bzw. am Vortag ($i-1$). Der Wassereintrag wird ausgedrückt als Niederschlag P [mm] am Tag i in der Gleichung 4-7 und DP_{top} [mm] am Tag i in der Gleichung 4-8. Bilanziert wird gegen die Crop Evapotranspiration ET_c [mm] und die Tiefenversickerung DP [mm]. Der Wertebereich von D_r geht von 0 bei vollständiger Sättigung (Feldkapazität) und nimmt bis zum Maximalwert von TAW zu.

Der Niederschlag P wird abzüglich der Interzeption I [mm] in die Gleichung 4-7 integriert. Dazu wird eine stark vereinfachte Annahme getroffen, nämlich dass die Interzeption mit Zunahme der Blattmasse eines Grünlandbestandes vom Beginn des Aufwuchses mit dem Wert 0.5 mm bis zu dessen Schnitt mit 2.0 mm die Niederschlagsmenge linear reduziert. Für diese lineare Zunahme wird der täglich gerechnete Pflanzenfaktor K_c herangezogen (vgl. Abschnitt 4.2.7.1) und auf den Wertebereich der Interzeption angewendet. Daraus ergibt sich:

$$I_i = 1.875 \cdot K_{c,i} - 0.25 \quad (4-9)$$

Wenn die Niederschlagsmenge eines Tages den Wert von $0.2 ET_0$ unterschreitet, wird angenommen, dass diese sofort verdunstet und daher P für diesen Tag mit 0 in die Gleichung 4-7 geht. Allen et al. [1998] berücksichtigen in der Gleichung 4-7 auch den Oberflächenabfluss und den Kapillarhub. Diese Parameter werden in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt, wären jedoch bei zukünftigen Verbesserungen und Erweiterungen der Bodenwasserbilanzierung ein wichtiger Beitrag.

Deep Percolation (DP) – Tiefenversickerung

Wenn der Wassergehalt in der Bodenschicht die Feldkapazität erreicht, der Boden also gesättigt ist, versickert das überschüssige Wasser in tiefere Schichten bzw. fließt an der Oberfläche ab. Die Tiefenversickerung DP wird für Topsoil (0 - 20 cm) und Subsoil (20 – 40 cm) wie folgt gerechnet:

$$DP_{top,i} = (P_i - I_i) - ET_{c,top,i} - D_{r,top,i-1} \quad (4-10)$$

$$DP_{sub,i} = DP_{top,i} - ET_{c,sub,i} - D_{r,sub,i-1} \quad (4-11)$$

Die Tiefenversickerung DP [mm] weist nur dann Werte > 0 auf, wenn die Feldkapazität überschritten wird. Solange die Feldkapazität nicht erreicht und damit auch $D_r > 0$ ist, findet kein Wasserabfluss aus der jeweiligen Bodenschicht statt. Wird der Wert von RAW erreicht, reduziert sich die Crop Evapotranspiration ET_c in den Gleichungen 4-10 bzw. 4-11 um den Faktor K_s und wird daraus folgend als $ET_{c,adj}$ berücksichtigt.

Die Referenz-Evapotranspiration bezieht sich auf eine standardisierte Oberfläche und wird daher von den Nutzungen eines Wirtschaftsgrünlandes, ausgedrückt durch den Verlauf des Pflanzenfaktors (Crop Coefficient), nicht beeinflusst. In allen Perioden, in denen kein Wasserstress auftritt, sind die Werte der aktuellen Evapotranspiration ident mit jenen der Crop Evapotranspiration, da keine Reduzierung durch den Wasserstresskoeffizienten K_s stattfindet. Ergibt sich zwischen diesen beiden Werten eine Kluft, d.h. tritt Wasserstress auf, so kann aus der Größe der Abweichung der Wasserstress quantifiziert werden. In der Regel wird dieser als Verhältniszahl ($ET_{c,adj}/ET_c$) angegeben.

4.2.8. GRassland Statistical Model (GRAM)

Die Ertragsberechnung beruht auf einem statistischen Modell nach Trnka et al. [2006], das mit seit dem Jahr 2002 erhobenen Daten aus Ertragsmessungen an 27 in ganz Österreich verteilten Standorten kalibriert wurde [Schaumberger, 2009]. Den Erträgen stehen die Ergebnisse aus der Bodenwasserbilanzierung und den dafür zugrundeliegenden meteorologischen Parametern gegenüber. Die Berechnung der Wasserverfügbarkeit baut auf dem Verhältnis von Crop Evapotranspiration und aktueller Evapotranspiration auf. GRAM benötigt dazu nach Han et al. [2003] zwei zeitbezogene Faktoren, welche dieses Verhältnis über unterschiedlich lange Perioden berücksichtigen. Der langfristige Wasserverfügbarkeitsfaktor W_L ist definiert durch

$$W_L = \frac{ET_{c,adj,SE}}{ET_{c,SE}} \quad (4-12)$$

wobei $ET_{c,adj,SE}$ die vom Beginn der Vegetationsperiode (vgl. Abschnitt 4.2.5) akkumulierte aktuelle Evapotranspiration [mm] und $ET_{c,SE}$ die akkumulierte Crop Evapotranspiration [mm] ist. Neben einer langfristigen wird auf gleiche Weise eine kurzfristige Wasserverfügbarkeit W_S bestimmt:

$$W_S = \frac{ET_{c,adj,W}}{ET_{c,W}} \quad (4-13)$$

$ET_{c,adj,W}$ stellt hier ebenfalls eine akkumulierte aktuelle Evapotranspiration [mm] dar, so wie auch $ET_{c,W}$ die akkumulierte Crop Evapotranspiration [mm]. Allerdings werden hier nur die letzten 6 Tage berücksichtigt.

Im Zusammenziehen des lang- und kurzfristigen Faktors zu einem gemeinsamen Parameter wird die für das Pflanzenwachstum auf einer Grünlandfläche gegebene Wasserverfügbarkeit W_A als Funktion von W_L und W_S in der Form

$$W_A = [CW_L^M + (1-C)W_S^M]^{\frac{1}{M}} \quad (4-14)$$

beschrieben. C und M sind empirische Koeffizienten, die sich aus der Analyse des Zusammenhangs zwischen W_A und dem wie folgt definierten Wachstumsfaktor g_s ergeben:

$$g_s = \exp^{\alpha} \exp^{\beta W_A^{\gamma}} \quad (4-15)$$

Eine Kalibrierung der Modellkoeffizienten mit bestmöglicher Anpassung des Wachstumsfaktors g_s aus den Daten für mehrere Standorte und Jahre ergibt folgende Werte:

C	0.45
M	3.0
α	-3.0
β	-3.0
γ	2.5

Die Bestimmung des Wachstumsfaktors g_s ist in der vorliegenden Arbeit das Ziel der gesamten Bodenwasserbilanzrechnung. Temperatur und Globalstrahlung sind neben den Bewirtschaftungsfaktoren die treibenden Kräfte des Pflanzenwachstums, vorausgesetzt, dass genügend Bodenwasser zur Verfügung steht. GRAM bezieht den limitierenden Faktor Wasser in Form des Wachstumsfaktors g_s bei der Akkumulation von täglicher Temperatur T [°C] und Globalstrahlung R_s [MJ m⁻² d⁻¹] wie folgt ein:

$$T_s = \int_{t_0}^{t_n} T \cdot g_s \cdot dt \quad (4-16)$$

$$G_s = \int_{t_0}^{t_n} R_s \cdot g_s \cdot dt \quad (4-17)$$

Die daraus resultierende effektive Temperatur T_e und effektive Globalstrahlung G_e sind die um den Wachstumsfaktor g_s verminderten täglichen Temperatur- und Strahlungswerte, die über den Zeitraum t_0 bis t_n aufsummiert werden. Die beiden Werte werden als Prädiktoren in die Ertragsgleichung einbezogen, wobei die Anwendung dieser Gleichung bzw. die Schätzung des Ertrages aufwuchsbezogen erfolgt. Im Fall des ersten Aufwuchses ist t_0 der Beginn der Vegetationsperiode und t_n der Zeitpunkt für den ersten Schnitt; der zweite Aufwuchs beginnt bei t_0 mit dem Schnitt des Ersten und bei t_n mit Schnitt des zweiten Aufwuchses, usw.

4.2.9. Technische Aspekte der Implementierung

Im Gegensatz zu standortbezogenen Berechnungen ist der Ressourcenbedarf für eine räumliche Umsetzung mit GIS unvergleichlich höher. Vor allem dann, wenn über lange Zeiträume die Zwischenergebnisse auf Tagesbasis zu ermitteln sind, ist der Anspruch an performantes Laufzeitverhalten der Algorithmen sowie die Speicherung in geeignete Datenstrukturen besonders wichtig. Im vorliegenden Projekt wird das Untersuchungsgebiet, das Bundesland Steiermark, mit einer Bodenauflösung von 250 x 250 Metern analysiert, d.h. jeder Rechenschritt manipuliert 434.016 Werte – das ist die Anzahl an Rasterzellen für eine einzelne kontinuierliche Rasteroberfläche.

Der Untersuchungszeitraum umfasst drei Dekaden, deren Werte auf Tagesbasis zu verrechnen sind: 1981 bis 1990 mit korrigierten Werten (Hindcast ERA), 1981 bis 1990 mit Klimamodelldaten (Kontrollsimulation EH5) und 2041 bis 2050 ebenfalls mit Klimamodelldaten (Klimaszenario-Simulation EH5). Grundsätzlich wurde nur der Zeitraum 1. März bis 31. Oktober untersucht – dies entspricht näherungsweise der Vegetationsperiode mit 245 Tagen.

Ein Beispiel für die Berechnung der Temperaturoberflächen soll die Anforderungen an entsprechende Soft- und Hardware verdeutlichen. Insgesamt müssen für drei Dekaden 7.350 Tage berechnet werden. Die Temperatur wird mittels Georegression berechnet [vgl. Schaumberger, 2007], d.h. es entstehen insgesamt 7.590 Temperaturkarten der Steiermark (höhenabhängige Monatsraster und Interpolationsraster der Residuen auf Tagesbasis). Dies entspricht einer Manipulation von insgesamt rund 3,2 Milliarden Einzeldaten. Die Implementierung erfolgte mit einem leistungsfähigen Standard-PC und benötigte allein für die Temperatur rund 80 Stunden Rechenzeit. Die Berechnung der Temperatur ist vergleichsweise einfach und nur eine kleine Komponente im Gesamtsystem.

Die methodische Beschreibung im Abschnitt 4.2 zeigt alle zu berechnenden Parameter, die sich natürlich nicht auf die jeweiligen Einzelwerte beziehen, sondern im Hintergrund immer den gesamten Raster des Untersuchungsgebietes (mit 434.016 Einzelwerten) repräsentieren. Die hier durchgeführte Implementierung mit C# in der Entwicklungsumgebung MS Visual Studio 2008 bindet für alle GIS-Operationen (z.B. geostatistische Interpolationen, Map-Algebra-Funktionen) die Programmbibliothek ArcObjects von ESRI ein. Das Design des Programms entspricht objektorientierten Grundsätzen und ist modular konstruiert.

Die in der Folge dargestellten Ergebnisse zeigen lediglich einzelne Beispielkarten sowie Zeitreihen an bestimmten Punkten. Für die Zeitreihenbildung werden alle Rasterdaten eines untersuchten Parameters Tag für Tag in den Speicher geladen und der Wert jener Rasterzellen extrahiert, welche mit den definierten Punkten eine Schnittmenge bilden. Dieser zeitliche Verlauf eines Parameters bezieht sich zwar nur auf einzelne Zellen, zeigen jedoch die Entwicklung und den Zusammenhang mit anderen Daten.

4.3. Ergebnisse und Diskussion

Die Standorte für die Evaluierung der Ergebnisse in Form von Zeitreihen wurden so ausgewählt, dass die wichtigsten klimatischen Gebiete abgedeckt werden. Gumpenstein wurde als repräsentative Station im Bergland gewählt, da das Ennstal zum Einen ein typisches Grünlandgebiet ist und zum Anderen die Wasserversorgung hier nur äußerst selten einen limitierenden Faktor für das Wachstum darstellt. Die anderen drei Stationen (siehe Abb. 4-11) befinden sich im Flachland und decken räumlich jenen Bereich ab, der im Zuge der klimatischen Veränderungen mit großer Wahrscheinlichkeit von Wasserstress betroffen sein wird. Im Raum Piber und Kirchberg/Walde wird Grünland intensiv genutzt, in und um Hatzendorf spielt Grünland eine eher untergeordnete Rolle, allerdings können hier die klimatisch bedingten Veränderungen in der Oststeiermark gut gezeigt werden.

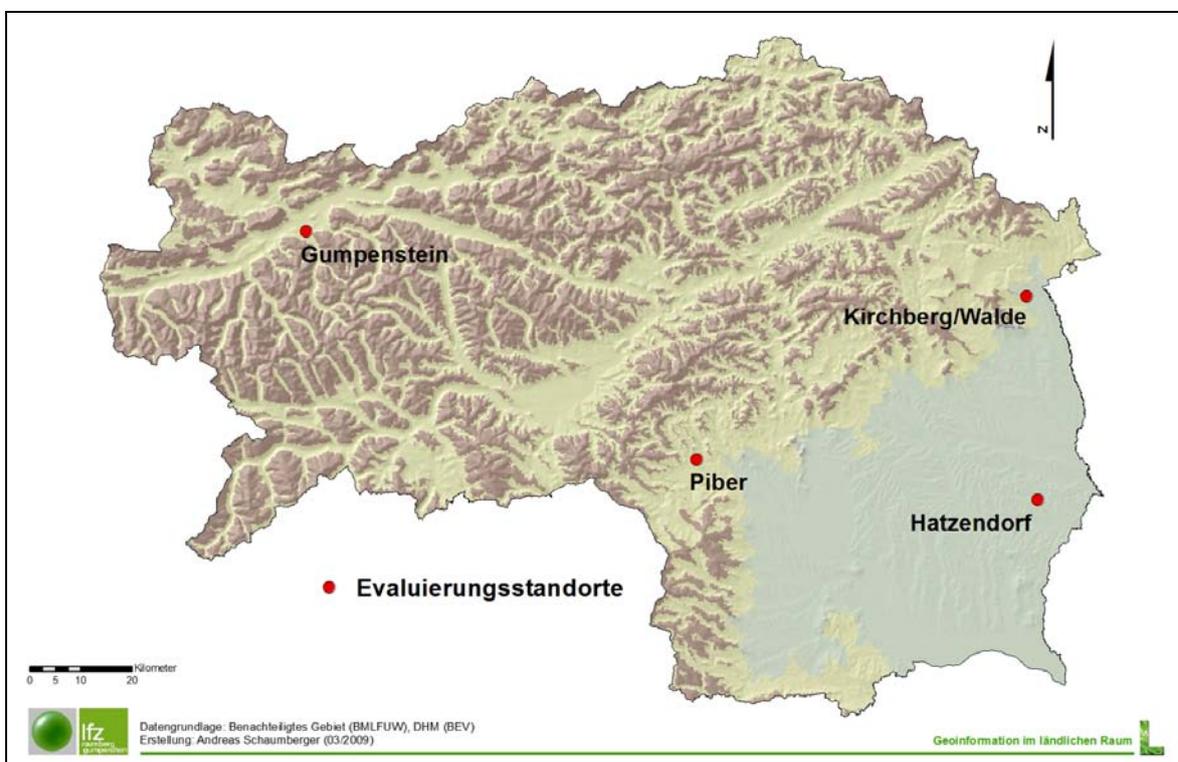


Abb. 4-11: Ausgewählte Standorte für die Evaluierung der Ergebnisse.

Die Ergebnisse beziehen sich auf die in Abschnitt 4.2 dargestellten Arbeitsschritte, wobei kartographische Darstellungen beispielhaft ausgewählt wurden.

4.3.1. Repräsentation der Topographie durch den Globalstrahlungsfaktor

Die verhältnismäßige Gegenüberstellung der zwei in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Ansätze zur Berechnung der potenziellen Globalstrahlung liefert die durch die topographische Variabilität hervorgerufenen Änderungswerte. Abb. 4-12 zeigt die Ergebnisse der beiden

Varianten am Beispiel der Tagessumme für den 16. März. Die Darstellung bezieht sich auf ein Gebiet (Ausschnitt im steirischen Ennstal) mit hoher Reliefenergie, an dem die Unterschiede gut wahrgenommen werden können.

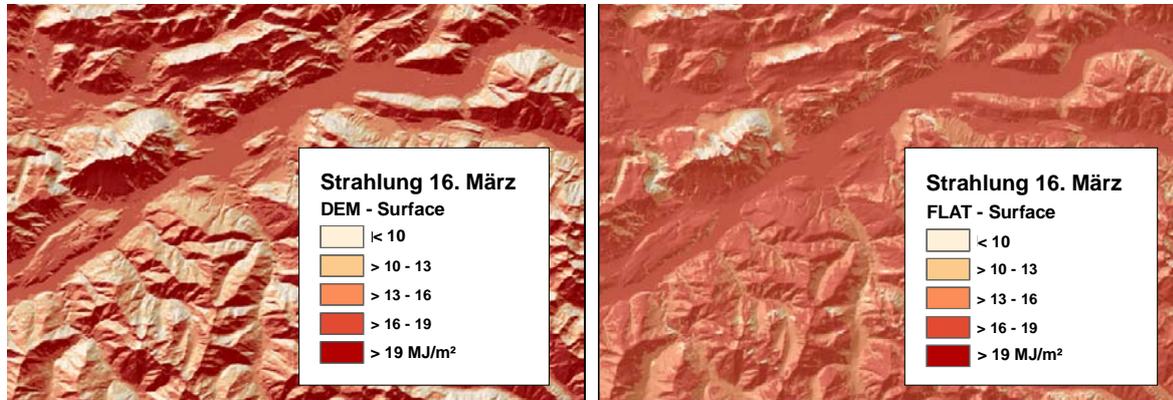


Abb. 4-12: Strahlungsraster mit und ohne Berücksichtigung von Exposition und Neigung.

Besonders die im Frühjahr annähernd orthogonal zur Einstrahlung ausgerichteten Flächen (steile, nach Süden exponierte Hanglagen) zeigen deutlich höhere Werte, wenn Exposition und Neigung Berücksichtigung finden. Diese Änderungen finden im Strahlungsfaktorraster (siehe Abb. 4-13) ihre quantitative Entsprechung und können als kontinuierliche Wertebereiche zur wesentlichen Verbesserung der stationsbasierten, geostatistischen Interpolationsoberfläche für die aktuelle Globalstrahlung bzw. für die Berechnung der Referenz-Evapotranspiration herangezogen werden.

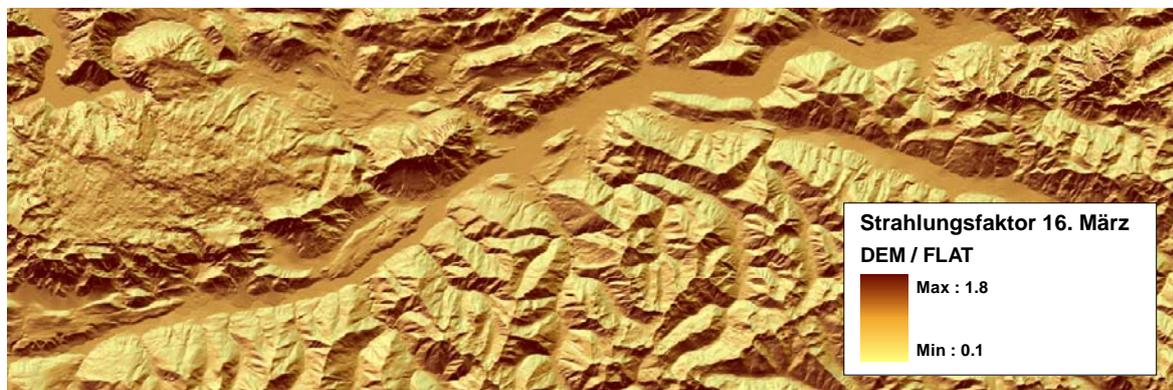


Abb. 4-13: Rasterdaten der topographiebedingten Änderung in den Strahlungswerten.

4.3.2. Referenz-Evapotranspiration

Die Referenz-Evapotranspiration (ET_0) bildet die Grundlage für die weitere Berechnung der Bodenwasserverhältnisse – sie beschreibt lediglich den von Temperatur, Strahlung, Wind und Luftfeuchtigkeit beeinflussten Wasserentzug. Da von einem wassergesättigtem Boden ausgegangen wird, gibt dieser Parameter ausschließlich die klimatische Situation wieder. Bei Wassersättigung im Boden kann die Pflanze auf die aktuelle atmosphärische

Situation mit Verdunstung reagieren, ohne durch einen eventuell fehlenden Wassernachschub in Wasserstress zu geraten. Die Referenz-Evapotranspiration ist als klimatischer Parameter zu interpretieren und gibt nur die theoretische Obergrenze des Verdunstungswertes vor. Aus diesem Grund eignet sie sich besonders dafür, Veränderungen des Klimas nicht nur mit Hilfe von Einzelparametern, sondern als Aggregation bzw. Ergebnis von Wechselwirkungen mehrere Parameter zu beschreiben.

Für die repräsentative Beschreibung der klimatischen Entwicklung mit Hilfe der Referenz-Evapotranspiration wurden die auf Tagesbasis errechneten Werte zu einem Dekaden- und in weiterer Folge zu einem Monatsmittelwert zusammengeführt. Die Änderung (Δ) zwischen Kontroll-Simulation (EH5 für 1981 bis 1990) und Klimaszenario-Simulation (EH5 für 2041 bis 2050) wurde dafür auf die Hindcast-Simulation (ERA für 1981 bis 1990) angebracht. Abb. 4-14 zeigt beispielhaft die durchschnittliche räumliche Verteilung der Referenz-Evapotranspiration für den Monat Mai in der Periode 1981 bis 1990, Abb. 4-15 die Ergebnisse für die zukünftige Periode 2041 bis 2050.

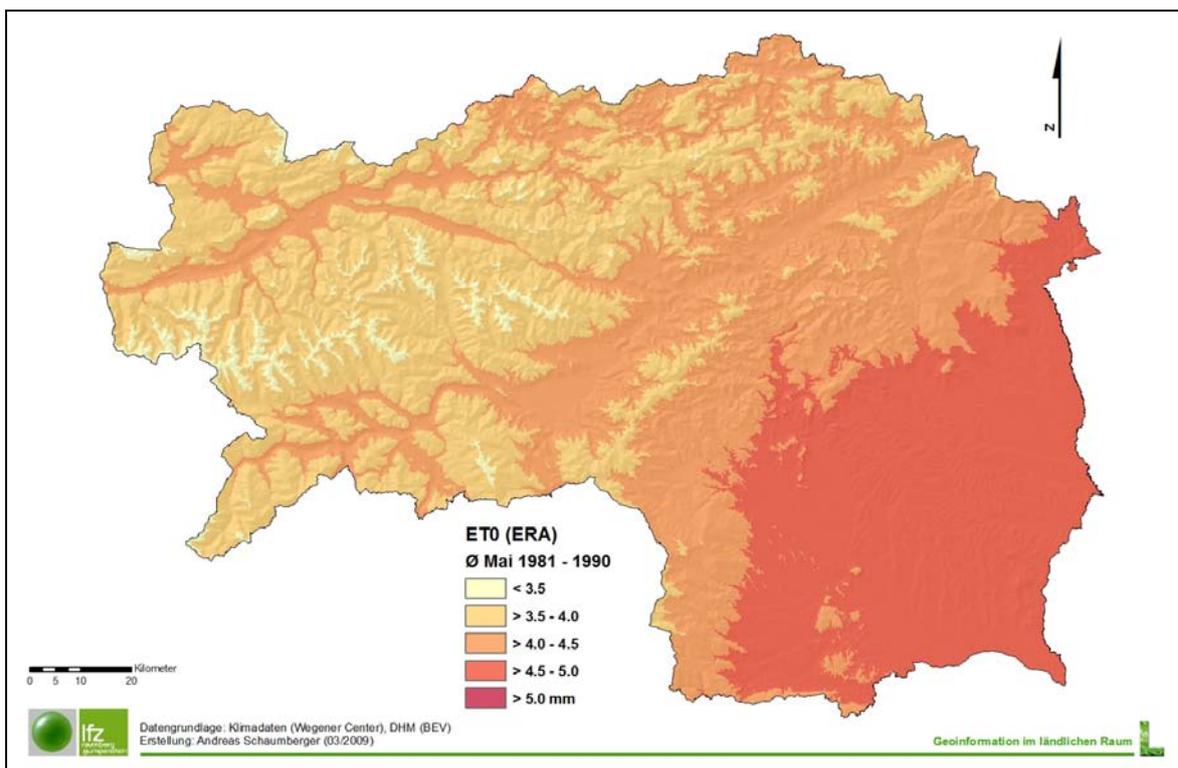


Abb. 4-14: Räumliche Verteilung der Referenz-Evapotranspiration im Mai der Dekade 1980.

Der erste Aufwuchs im intensiv genutzten Grünland trägt entscheidend zum Jahresertrag bei. Deshalb sind die klimatischen Bedingungen im Monat Mai von besonderem Interesse. In Abb. 4-14 hebt sich das Flachland im Südosten des Landes deutlich vom Bergland ab. Hier sind die Werte der Referenz-Evapotranspiration aufgrund des höheren Wärme- und Strahlungseintrages vergleichsweise hoch. Die Ergebnisse für die zukünftige Dekade 2040 in Abb. 4-15 zeigen eine generelle Erhöhung der Referenz-Evapotranspiration – besonders fällt hier die Ausbreitung des höheren Verdunstungs-Niveaus vom Flachland auf die Tal-

bereiche des angrenzenden Berggebietes auf. Aber auch in den höheren Lagen der Talränder im Bergland zeigt sich eine Zunahme der Referenz-Evapotranspiration.

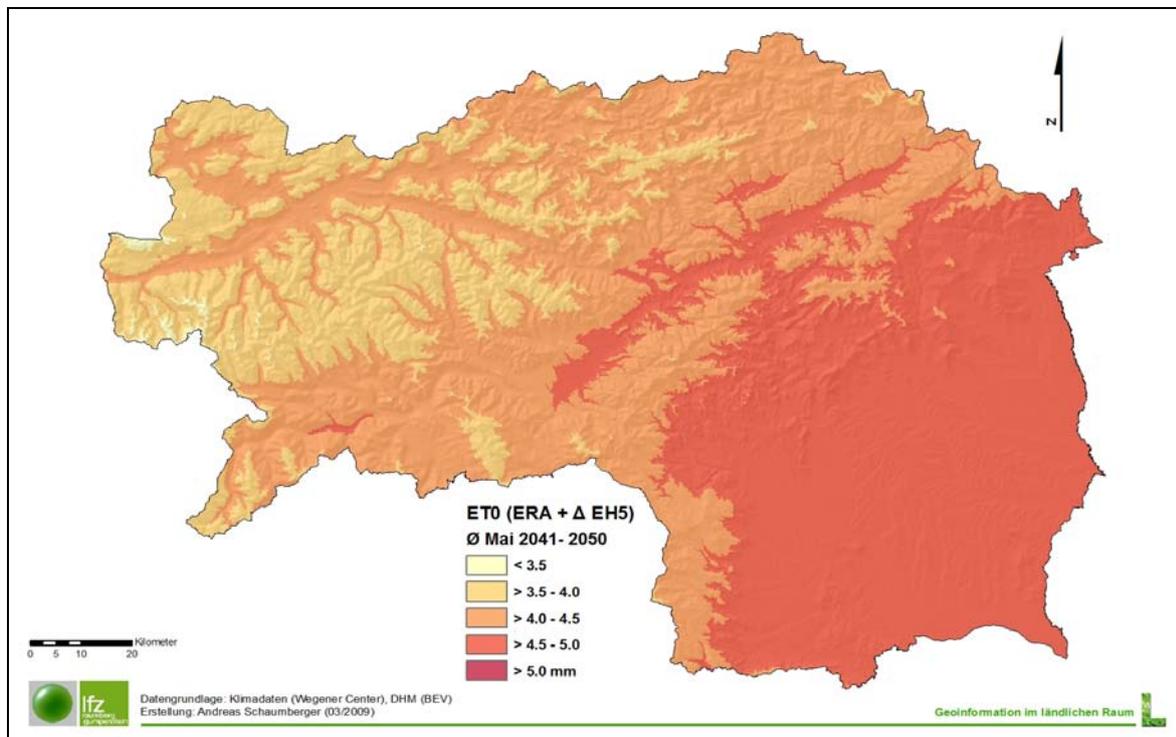


Abb. 4-15: Räumliche Verteilung der Referenz-Evapotranspiration im Mai der Dekade 2040.

Neben den klimatischen Bedingungen im Frühjahr ist die Situation während des Sommers für mehrschnittig genutztes Grünland ebenfalls entscheidend. In den Abb. 4-16 und Abb. 4-17 wird die räumliche Verteilung der mittleren Referenz-Evapotranspirationswerte für den Monat August dargestellt.

Naturgemäß sind die Werte im Vergleich zum Mai generell höher, wobei der mittlere Anstieg in der Dekade 2040 im Flachland darauf hindeutet, dass es im Fall von unzureichenden Niederschlägen zu deutlichem Wasserstress und damit zu Ertragseinbußen führen wird. Das Ausbleiben von Sommerniederschlägen in diesen Gebieten kann zu Ertragsminderungen bis zur Hälfte des Jahresertrages führen. Trockenheitsbedingte Schädigungen am Pflanzenbestand führen unter Umständen zum Totalausfall einzelner Aufwüchse, wirken sich jedoch auch auf die Regeneration des Bestandes aus – Folgeschäden sind daher nicht zu unterschätzen.

Zur Verdeutlichung der Unterschiede zwischen den beiden betrachteten Dekaden sind die Differenzwerte in den Abb. 4-18 und Abb. 4-19 gesondert dargestellt. In beiden Monaten ist eine überproportionale Erhöhung der Referenz-Evapotranspiration im Bergland zu beobachten, die vor allem im August bis in hohe Lage hinaufreicht.

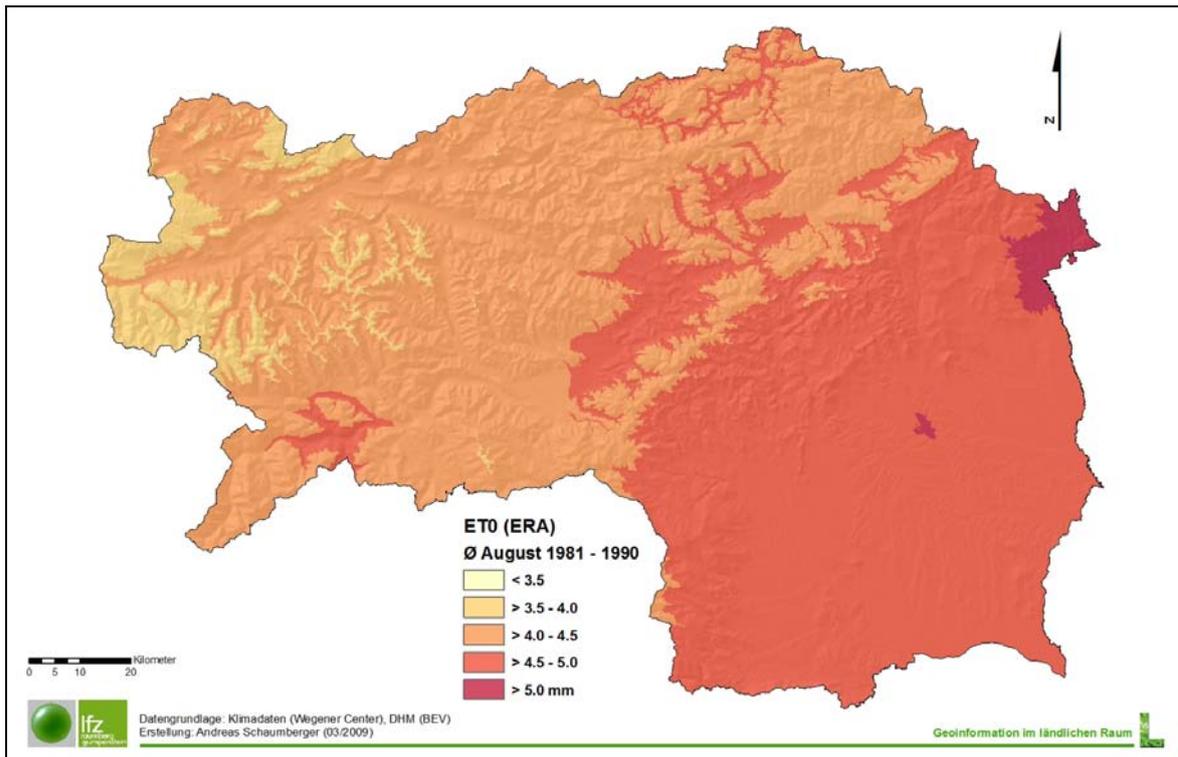


Abb. 4-16: Räumliche Verteilung der Referenz-Evapotranspiration im August der Dekade 1980.

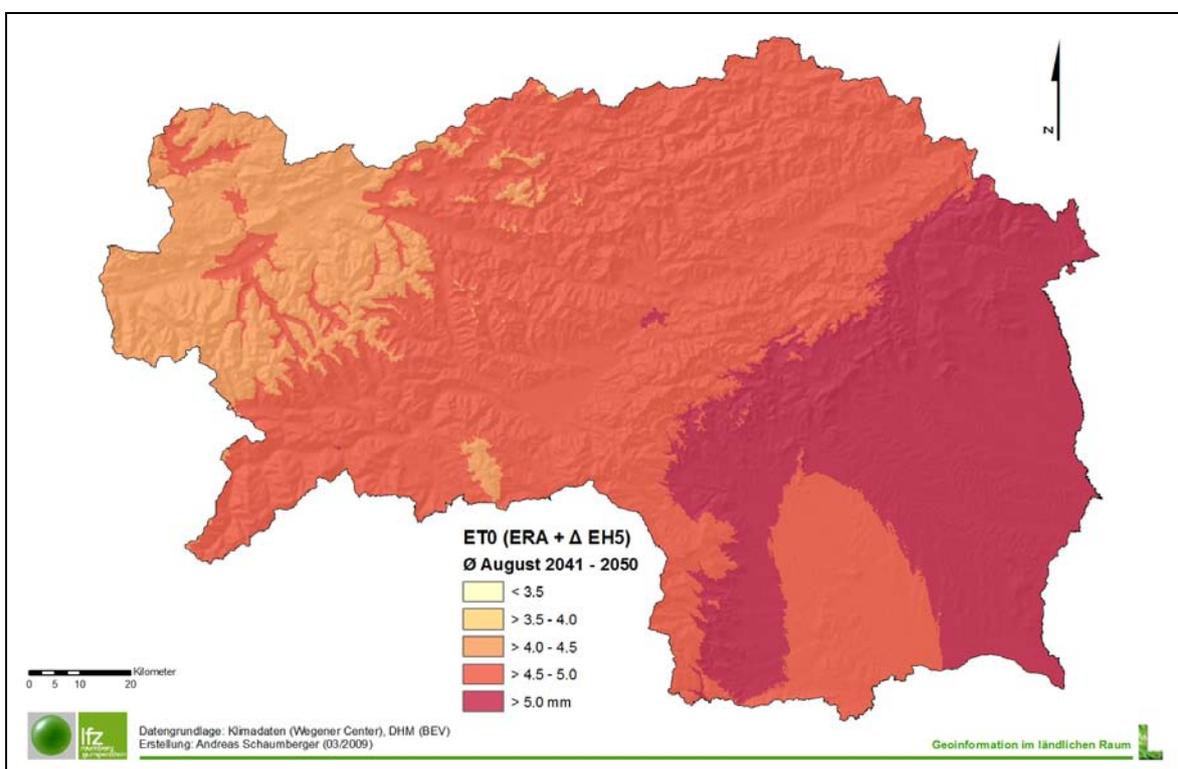


Abb. 4-17: Räumliche Verteilung der Referenz-Evapotranspiration im August der Dekade 2040.

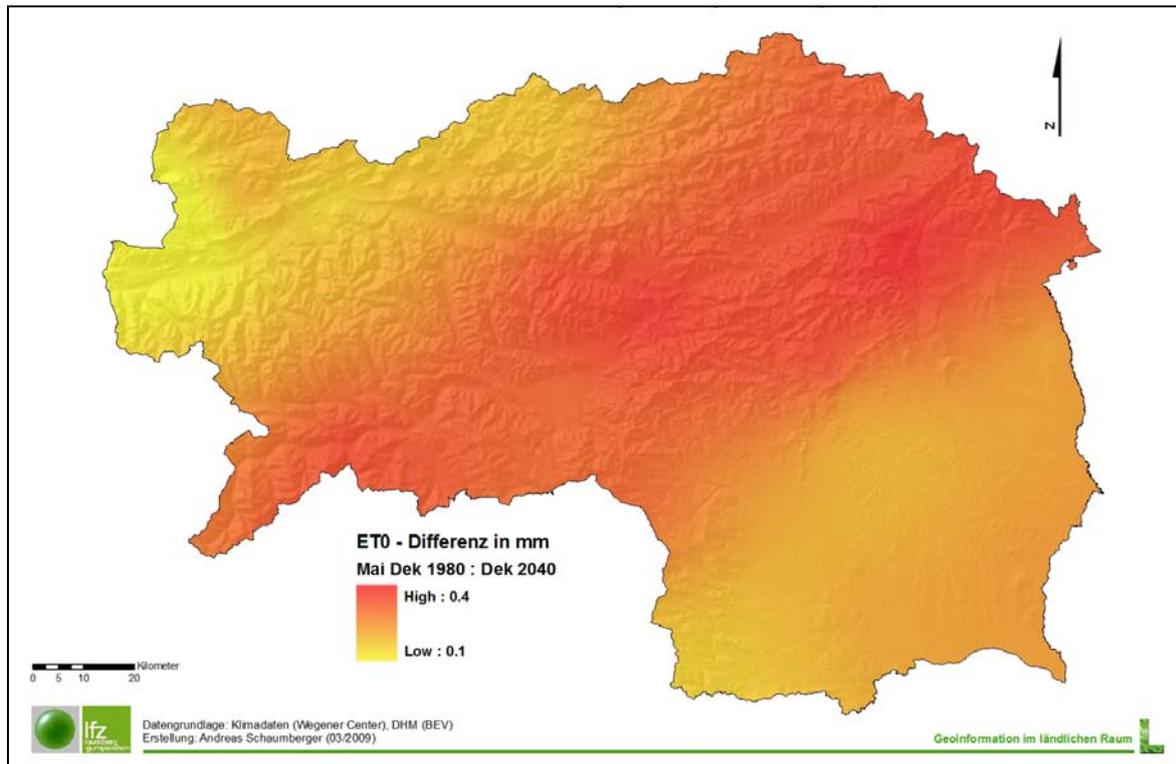


Abb. 4-18: Differenzen der Referenz-Evapotranspiration im Mai der Dekaden 1980 und 2040.

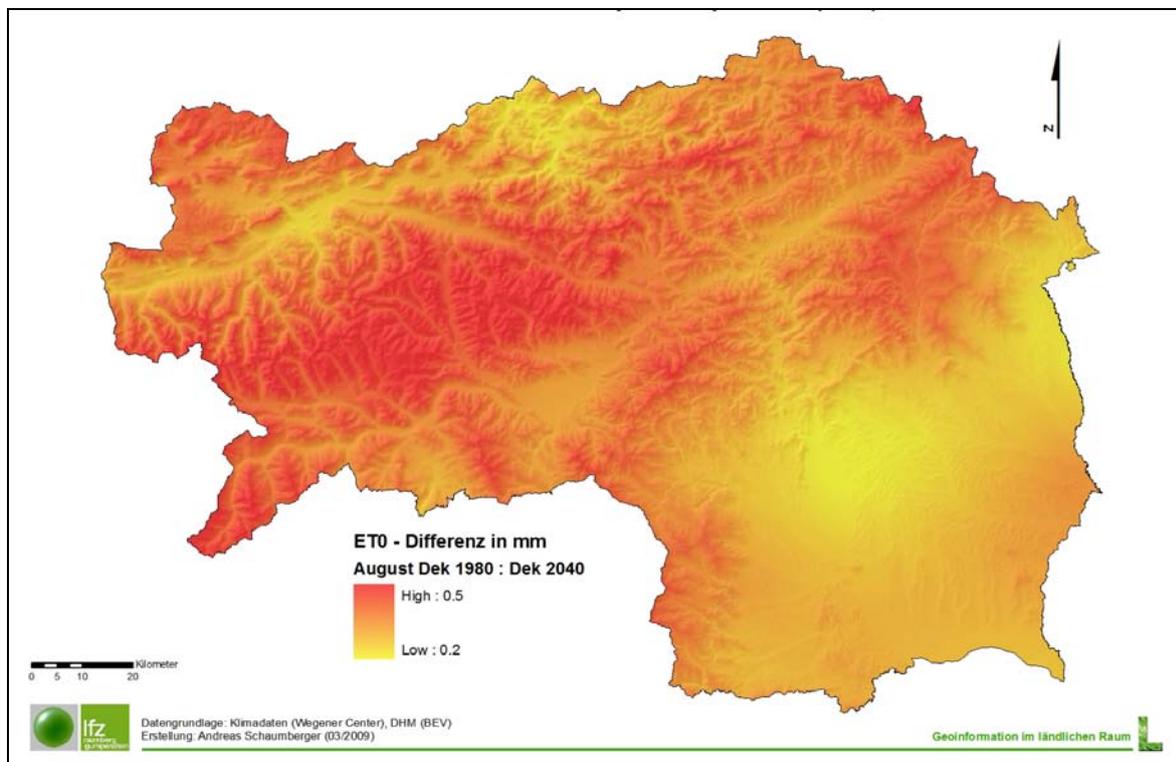


Abb. 4-19: Differenzen der Referenz-Evapotranspiration im August der Dekaden 1980 und 2040.

4.3.3. Analyse der Thermischen Vegetationsperiode

Die Vegetationsperiode stellt den natürlichen zeitlichen Rahmen für das Wachstum dar. Das frühe oder späte Einsetzen der phenologischen Phase des Ergrünens der Wiesen im Frühjahr ist maßgeblich dafür verantwortlich wie viele Aufwüchse der Grünlandwirt auf seinen Flächen erwirtschaften kann. Die Entwicklung des Klimas in den zukünftigen Perioden betrifft insbesondere den Temperaturanstieg [vgl. IPCC, 2007] und deshalb auch räumliche und zeitliche Veränderungen der Vegetationsperiode. In der vorliegenden Arbeit werden die Grenzen der Vegetationsperiode mit Hilfe der Temperatur bestimmt. Am Beispiel der Standorte Gumpenstein (Abb. 4-20) und Kirchberg/Walde (Abb. 4-21) wird die Temperaturänderung im Dekadenmittel 1980 und 2040 dargestellt.

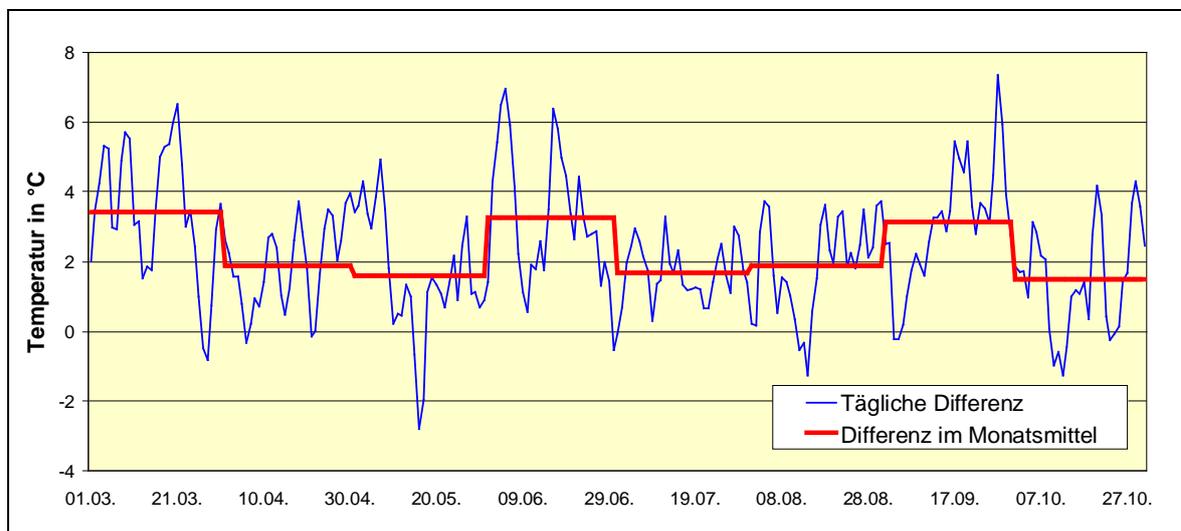


Abb. 4-20: Differenz der mittleren Temperatur von Dekade 1980 und 2040 in Gumpenstein.

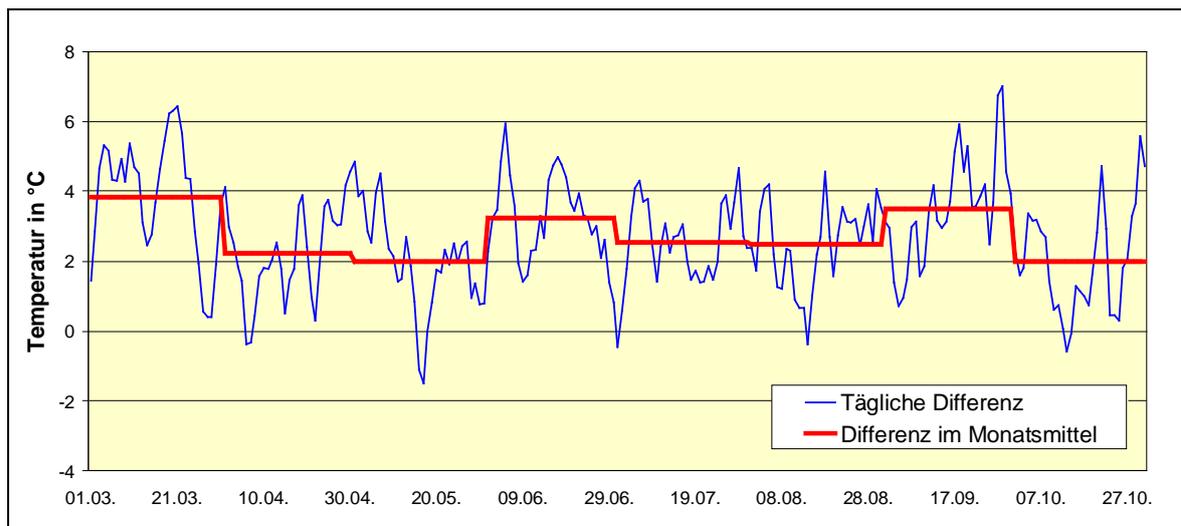


Abb. 4-21: Differenz der mittleren Temperatur von Dekade 1980 und 2040 in Kirchberg/Walde.

Die beispielhaft dargestellte Temperaturveränderung wirkt sich auch auf die Bestimmung der Vegetationsperiode aus und bringt deutliche räumliche und zeitliche Verschiebungen.

Die Abb. 4-22 und Abb. 4-23 zeigen die Veränderungen des thermischen Vegetationsbeginns bezogen auf kontinuierliche Temperaturoberflächen auf Tagesbasis, wobei die täglichen Temperaturdaten innerhalb einer Dekade gemittelt und anschließend mittels Georegression räumlich interpoliert wurden.

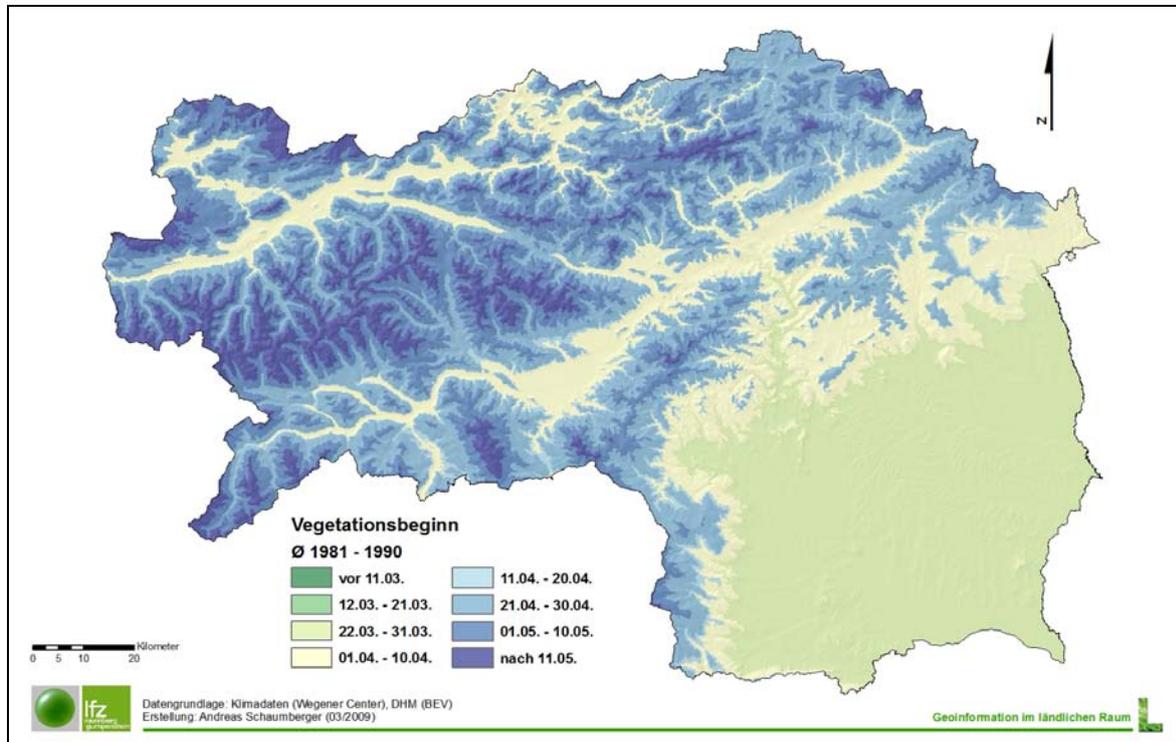


Abb. 4-22: Beginn der Thermischen Vegetationsperiode in der Dekade 1980.

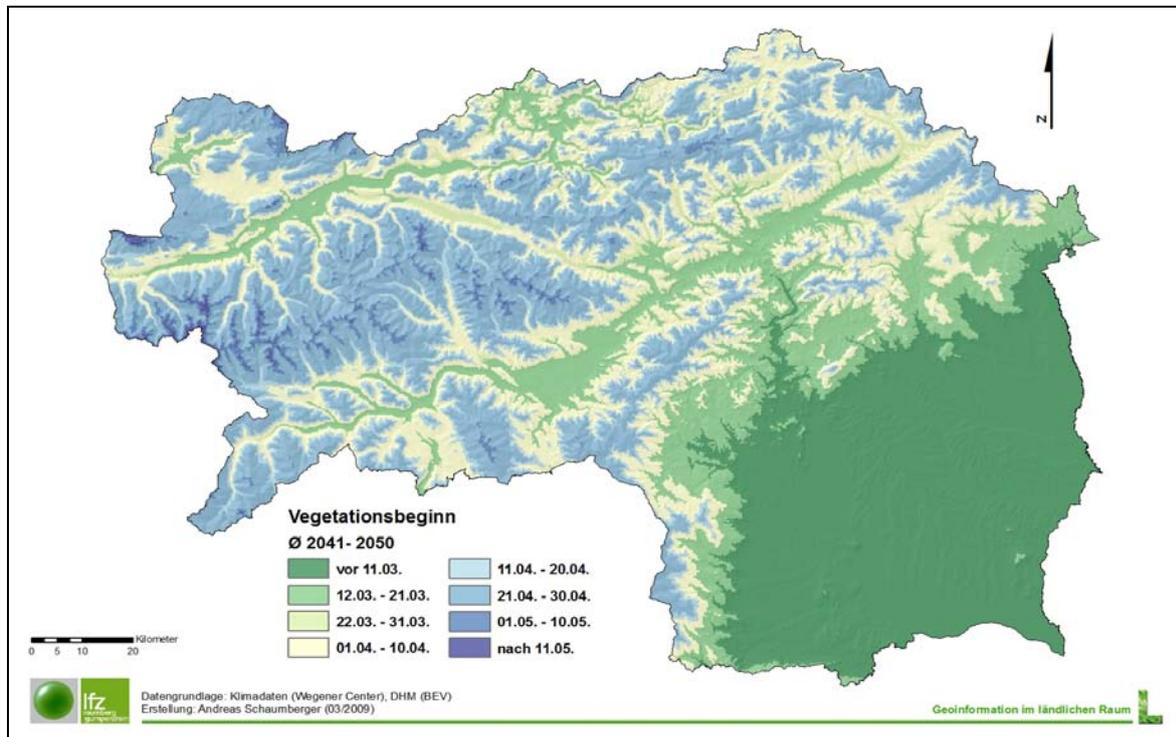


Abb. 4-23: Beginn der Thermischen Vegetationsperiode in der Dekade 2040.

Grundsätzlich wird bei diesem Ansatz die Schneebedeckung vernachlässigt und führt daher vor allem im Hochgebirge zu Verschiebungen, welche hier nicht abgebildet werden und in Hinblick auf die räumliche Verteilung der Grünlandflächen (siehe Abb. 4-3) auch nicht relevant sind.

Nicht nur in der Süd-, Ost- und Weststeiermark, sondern auch in den größeren Tallagen wird der frühere Vegetationsbeginn zu einer besseren Ausnutzung der Winterfeuchte führen und auch zu höheren Erträgen beim ersten Aufwuchs, der in den Gunstlagen (Vegetationsbeginn vor 11. März) auch früher zur Ernte kommen wird. Die Winterungen werden auch kräftiger bestocken (Winterweizen, Roggen, Triticale) oder schon frühzeitig einen kräftigen Bestand (Raps) zeigen. Die Anbauzeit für die Sommerfrüchte wird sich vorverlegen. Die Obst- und Weinkulturen treiben früher aus und sind dann auch mehr von Spätfrösten gefährdet. Die dadurch längere Vegetationsperiode verkürzt die Winterperiode in diesen günstigen Lagen – in den Berglagen hängt das wohl von der Schneelage, die etwas in den Spätwinter fallen wird, ab, wann hier die Bearbeitbarkeit der Felder und Wiesen bzw. die Bestoßung der Weiden erfolgen kann.

Eine ähnliche Entwicklung ist auch beim Vegetationsende zu beobachten, wobei das deutlich spätere Vegetationsende in der gesamten Steiermark auch die höheren Lagen betrifft (siehe Abb. 4-24 und Abb. 4-25).

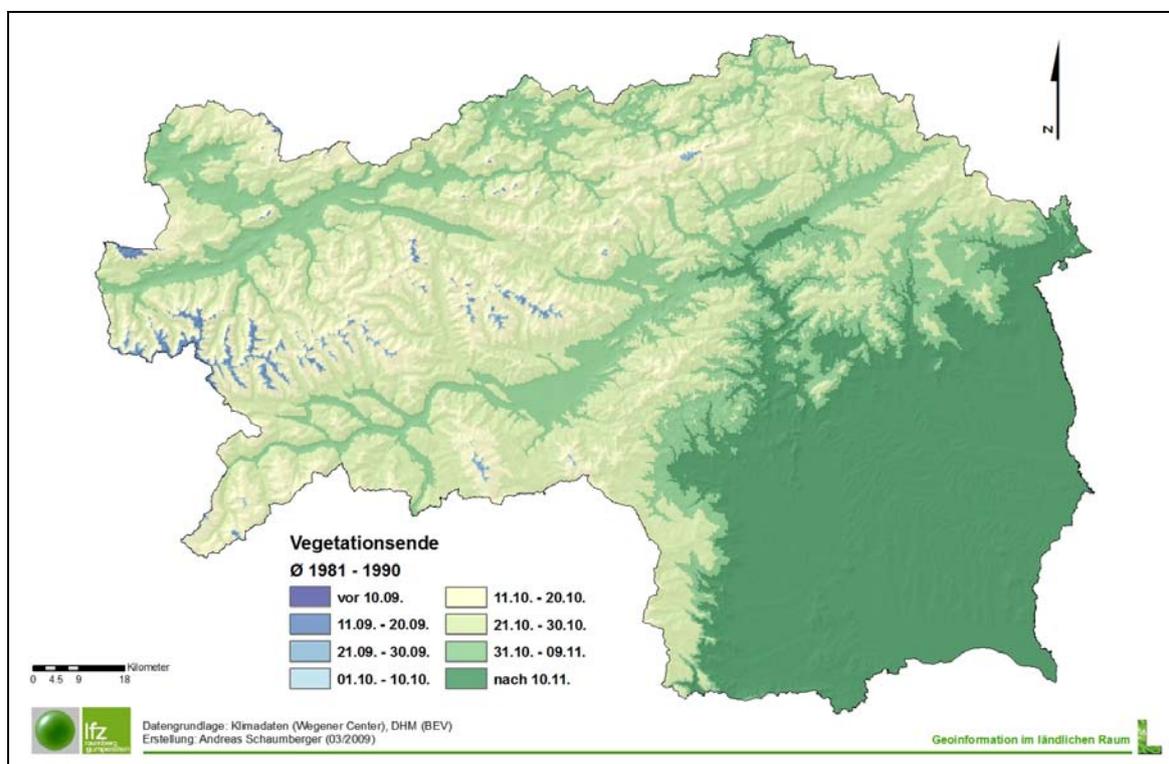


Abb. 4-24: Ende der Thermischen Vegetationsperiode in der Dekade 1980.

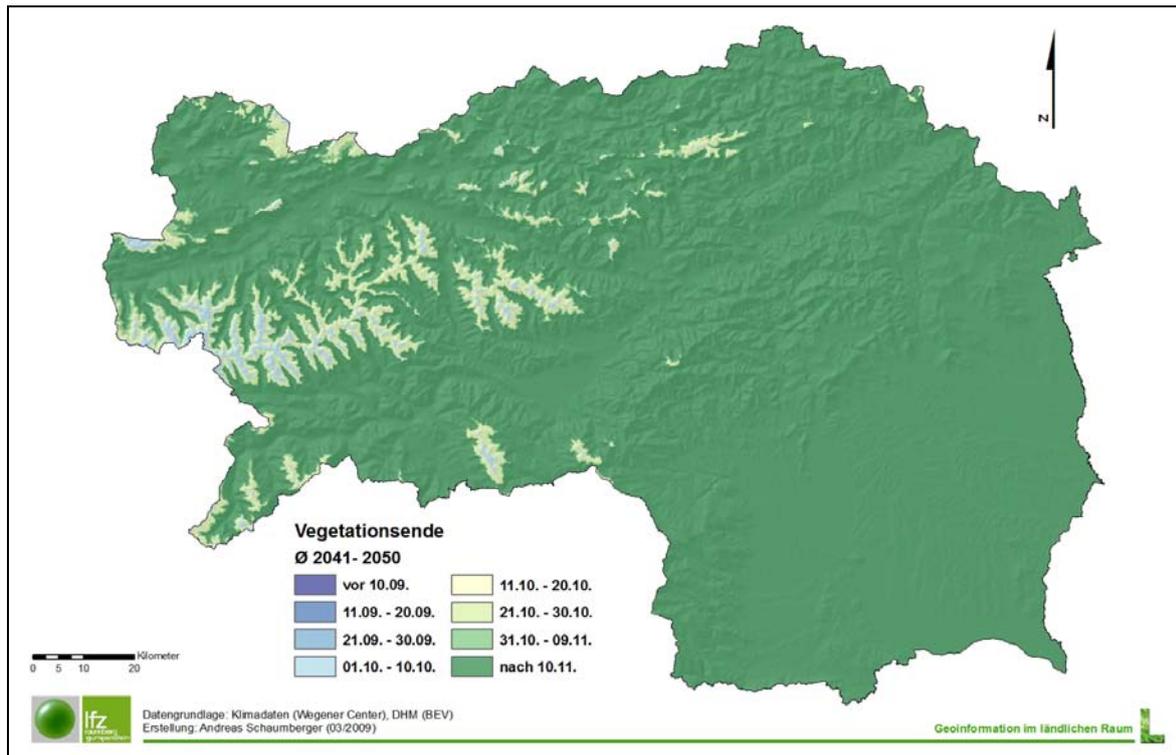


Abb. 4-25: Ende der Thermischen Vegetationsperiode in der Dekade 2040.

Das spätere Vegetationsende wird dazu führen, dass die Winterungen nicht mehr so früh (Mitte August Raps; Mitte September Wintergerste, Winterroggen, Triticale; Mitte Oktober Winterweizen), sondern doch um eine Woche bis 10 Tage später zum Anbau gelangen werden. Beim Grünland wird sich vor allem die Weideperiode um etwa 14 Tage in den besseren Lagen verlängern, in den höheren Lagen wird zwar die Temperatur ausreichen, jedoch werden die Böden und die Nährstoffversorgung zu keinem erträglichen Wachstum führen.

Früher Beginn und spätes Ende der Vegetationsperiode in zukünftigen Dekaden wirken sich auf die Dauer der Vegetationsperiode aus. Steht mehr Zeit und damit mehr Energie in Form von Wärme und Strahlung für das Wachstum zur Verfügung, erhöhen sich die Erträge bzw. kommt es zu einer räumlichen Verschiebung des Standortpotenzials für verschiedene landwirtschaftliche Kulturen. Voraussetzung dafür ist allerdings eine ausreichende bzw. auf die jeweilige Kulturart abgestimmte Wasserversorgung. Fehlt diese, tritt Wasserstress auf – das Wachstum stagniert und führt bei anhaltenden bzw. zunehmenden Stressbedingungen zu Schädigungen der Pflanzen. Somit profitieren Standorte, an denen Wasser kein limitierender Faktor ist, von der längeren Vegetationsperiode und die Erträge werden zunehmen. In Gebieten mit Wasserknappheit führt der hohe Energieeintrag über längere Zeiträume zu Trockenheit und damit zu Ertragsminderungen bzw. -ausfällen.

Verändern sich die Standortbedingungen auf Wiesen und Weiden nachhaltig, wird eine entsprechende Anpassung der Arten- bzw. Sortenzusammensetzung notwendig werden. Die Pflanzenbestände werden sich dahingehend verändern, dass neue, trockenresistentere

Arten in die Mischungen Einzug halten. Glatthafer, Knautgras, Wiesenschwingel, aber auch die Luzerne werden in die Höhenlagen vordringen.

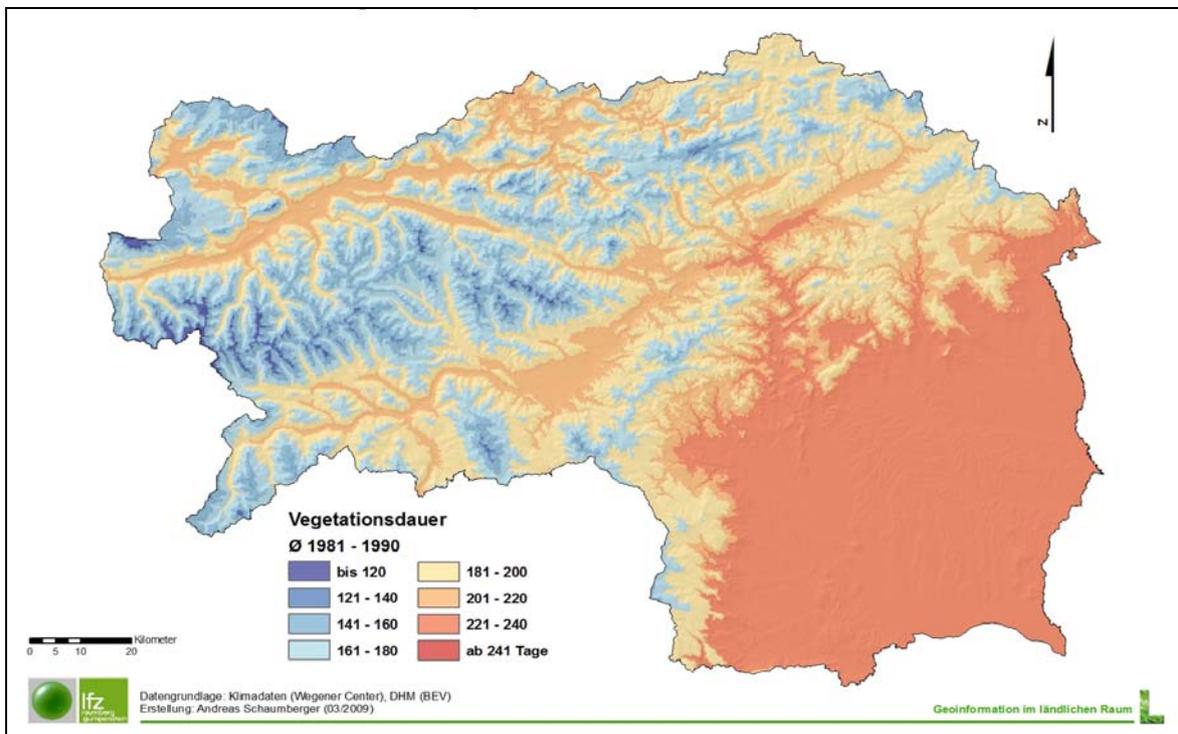


Abb. 4-26: Dauer der Thermischen Vegetationsperiode in der Dekade 1980.

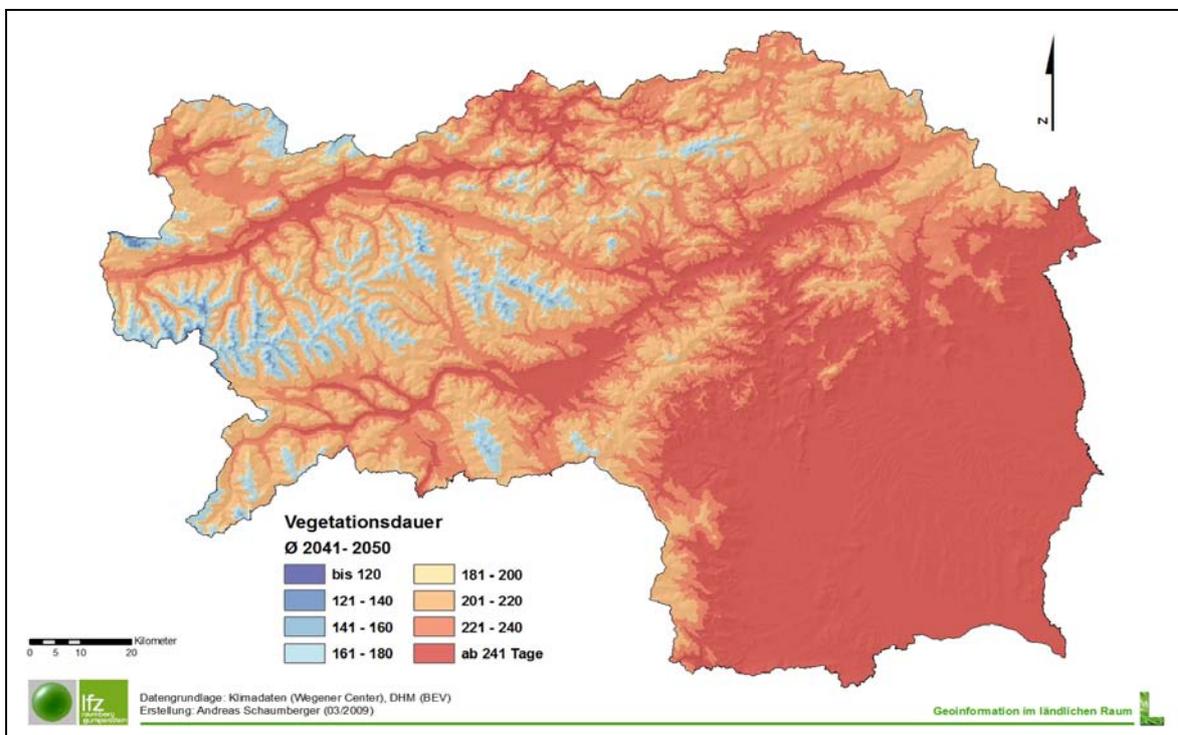


Abb. 4-27: Dauer der Thermischen Vegetationsperiode in der Dekade 2040.

4.3.4. Schnitthäufigkeit und Schnittzeitpunkt

Veränderungen der Vegetationsdauer wirken sich auch auf das Grünlandmanagement aus. Im vorliegenden Projekt wird daraus eine der wichtigsten Bewirtschaftungsmaßnahmen des Grünlandes abgeleitet – die Schnittfrequenz. Das Näherungsmodell kann die individuelle Bewirtschaftungsgestaltung eines Landwirtes nicht berücksichtigen und orientiert sich daher an objektivierbaren Parametern, die in diesem Fall aus den klimatischen Standortbedingungen abgeleitet werden.

Aus der Schnittanzahl werden in weiterer Folge die Schnitttermine abgeleitet (vgl. Abschnitt 4.2.6). Dieser Schnittzeitpunkt ist für die Ertragsrechnung besonders wichtig, da die Akkumulation von Temperatur und Strahlung (vgl. Abschnitt 4.2.8) aufwuchsbezogen vorgenommen wird. Die Berechnung des Ertrages erfolgt nach GRAM (vgl. Abschnitt 4.2.8) für jedes Jahr der beiden Dekaden und daher können die Schnittfrequenzen und -termine auch nicht von den in den Abb. 4-28 und Abb. 4-29 dargestellten Durchschnittswerten abgeleitet werden, sondern müssen jährlich neu berechnet werden. Die hier dargestellte räumliche Verteilung der Schnitte dient lediglich der Visualisierung von Änderungen zwischen den Dekaden 1980 und 2040.

Sind in den Jahren 1981 bis 1990 noch viele Gebiete mit Dreischnittnutzung klassifiziert, ändert sich dies in den Jahren 2041 bis 2050 zugunsten einer Vierschnittnutzung in Entsprechung der zunehmenden Vegetationsperiodenlänge.

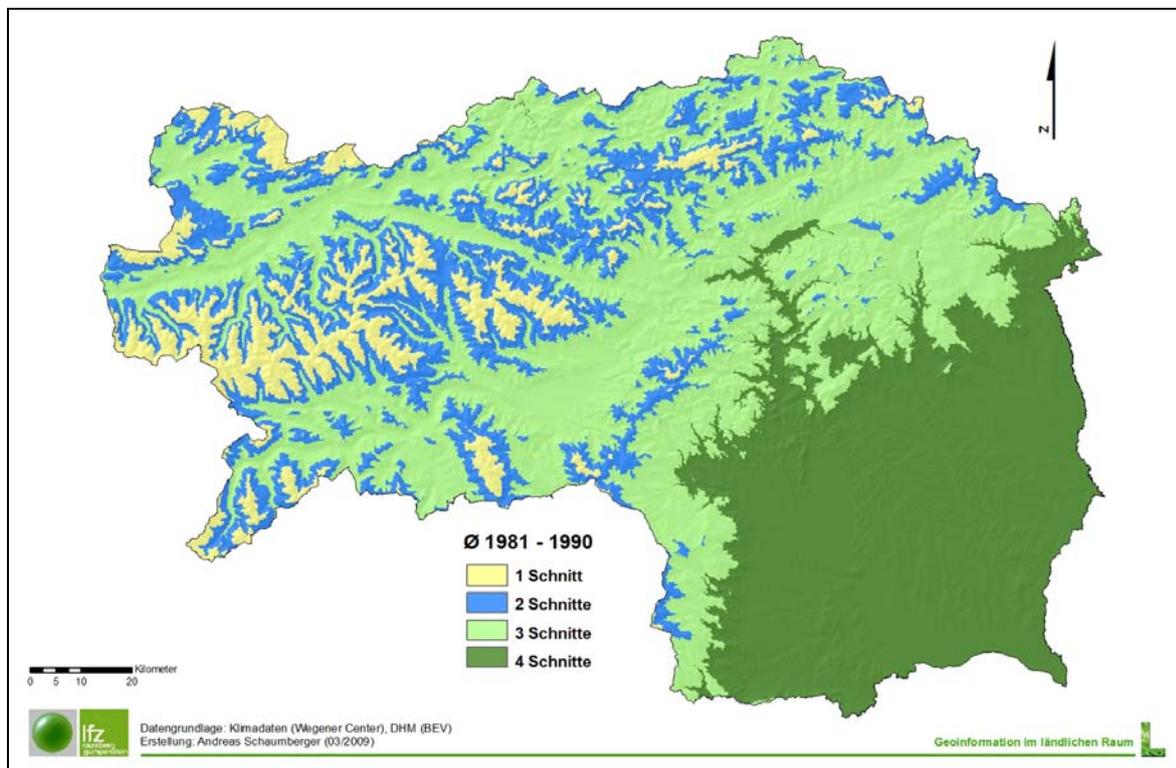


Abb. 4-28: Aus der mittleren Thermischen Vegetationsperiode der Dekade 1980 abgeleitete durchschnittliche Schnittanzahl in der Steiermark.

Die Schnittanzahl wird nur auf guten Böden mit einer ausreichenden Nährstoffversorgung angehoben werden. In den trockenen und heißen Lagen wird das Sommerloch dazu führen, dass oftmals ein Schnitt überhaupt ausfällt, womöglich auch die weiteren Aufwüchse ausbleiben. Die „Frühjahrsschnitte“ werden zu den Wichtigsten, die in den Sommermonaten Anfallenden sind eine „Draufgabe“, mit denen der Grünland- und Viehbauer in den warmen und trockenen Lagen nicht mehr unbedingt rechnen kann. Diese Landwirte müssen sich nicht nur für die Wintermonate sondern auch für das Sommerloch und den Spätsommer Vorräte anlegen, um die Tiere ausreichend versorgen zu können.

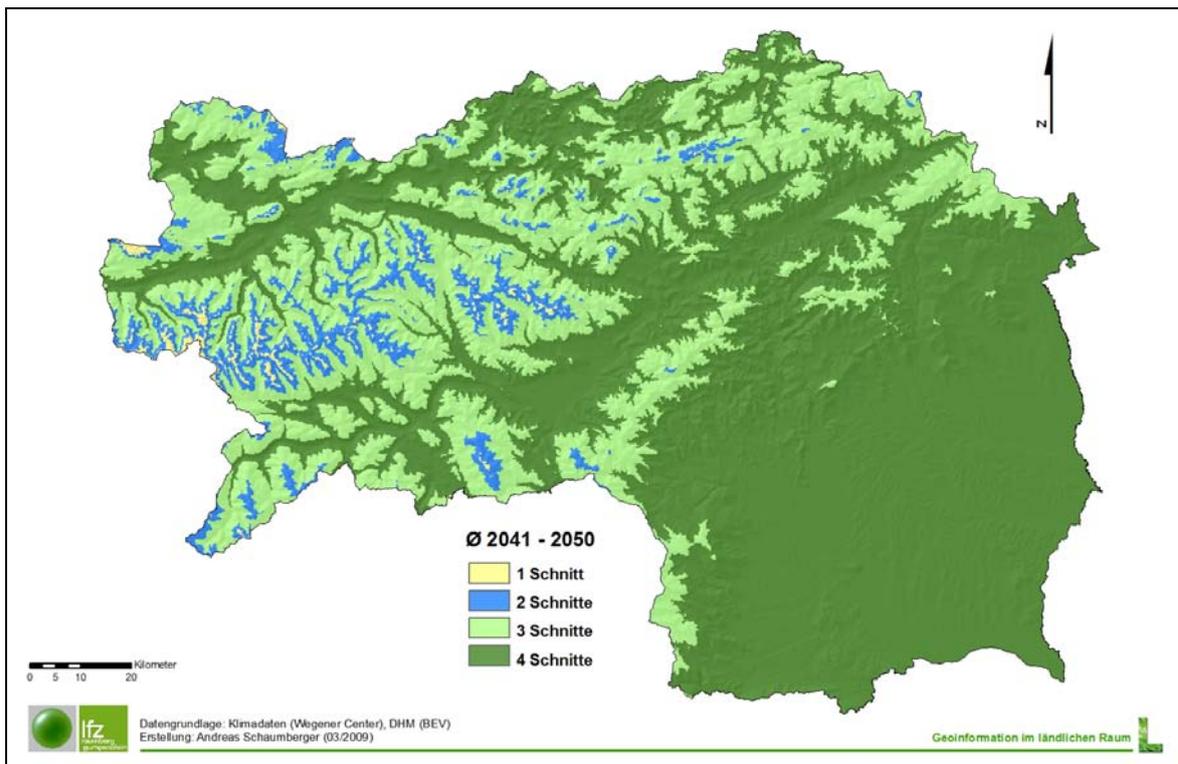


Abb. 4-29: Aus der mittleren Thermischen Vegetationsperiode der Dekade 2040 abgeleitete durchschnittliche Schnittanzahl in der Steiermark.

Das vorliegende Modell berücksichtigt für die Ertragsermittlung lediglich Zwei-, Drei- und Vierschnittnutzung. Die in den beiden Abbildungen dargestellte Einschnittnutzung ist lediglich der Vollständigkeit halber angeführt und für die Berechnung der Rasteroberfläche notwendig. Abgesehen davon, dass nicht die gesamte Fläche der Steiermark mit Grünland bewirtschaftet wird, resultiert auch die Angabe der Schnitte im Hochgebirge der technischen Anforderung einer kontinuierlichen Rasteroberfläche. Relevanz hat dieses Ergebnis natürlich nur für die in Abb. 4-3 dargestellten Grünlandflächen.

4.3.5. Bodenwasserbilanz

Zur Abbildung des Einflusses der Wasserversorgung auf die Erträge im Grünland ist die Berechnung der Bodenwasserbilanz eine wichtige Voraussetzung. Die Implementierung in einem GIS und damit eine flächendeckende Analyse erfordert einen möglichst einfachen Ansatz, der gewährleistet, dass alle Modellparameter als Geodatenätze verfügbar sind. Neben dem Klima spielt der Boden eine zentrale Rolle und hier wiederum der Parameter „nutzbare Feldkapazität“. Der von Murer [2009] erstellte Datenbestand beschränkt die räumliche Ausdehnung der Bodenwasserbilanzergebnisse auf jene Zellen, in denen die nutzbare Feldkapazität vorhanden ist (vgl. Abb. 4-30).

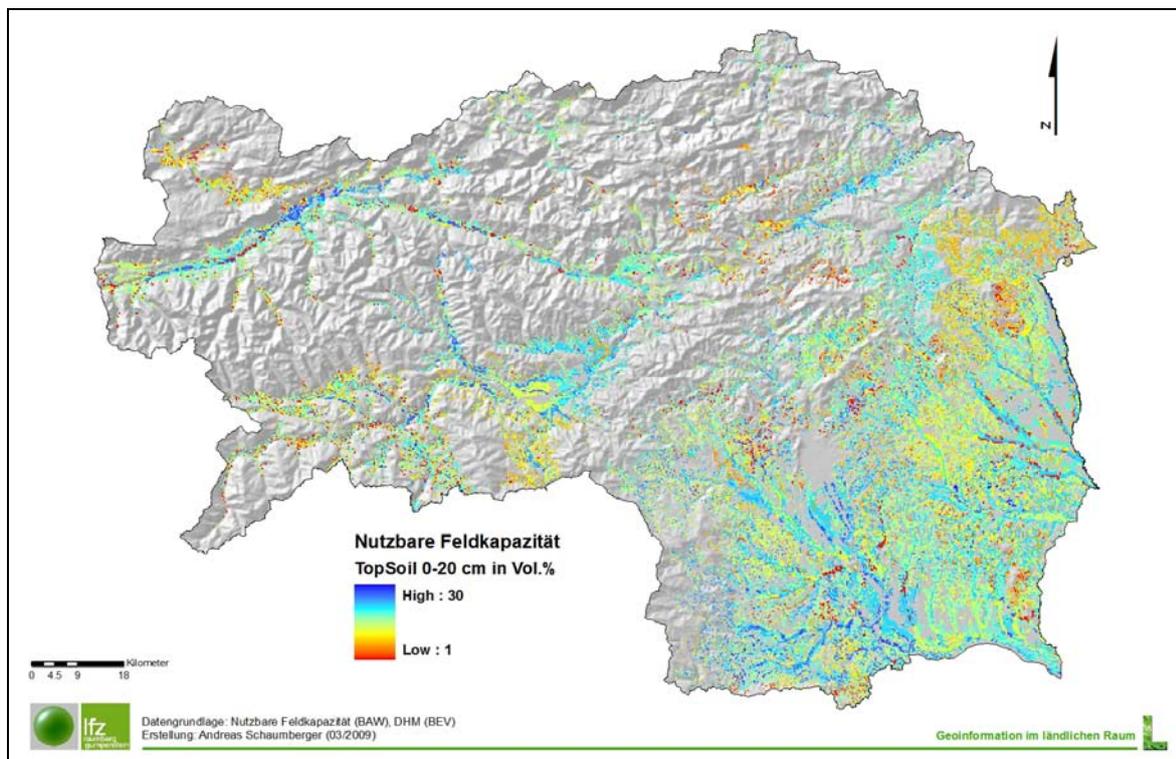


Abb. 4-30: Nutzbare Feldkapazität (Oberboden: 0 - 20 cm) für landwirtschaftlich genutzte Flächen.

4.3.5.1. Crop Evapotranspiration

Die Anpassung der Referenz-Evapotranspiration auf eine Grünlandnutzung wird wesentlich von der Schnittfrequenz und den Schnittterminen bestimmt. Dazu wird ein Pflanzenfaktor (crop coefficient) errechnet und auf die Referenz-Evapotranspiration angebracht.

In Abb. 4-31 werden der Jahresverlauf beider Evapotranspirationswerte sowie des Pflanzenfaktors unter der Annahme einer Dreischnittnutzung dargestellt. Die lineare Zunahme des Pflanzenfaktors ist eine modellhafte Annäherung an die Biomassezunahme vom Beginn des Aufwuchses bis zu dessen Schnitt – je mehr Biomasse, desto mehr Verdunstung.

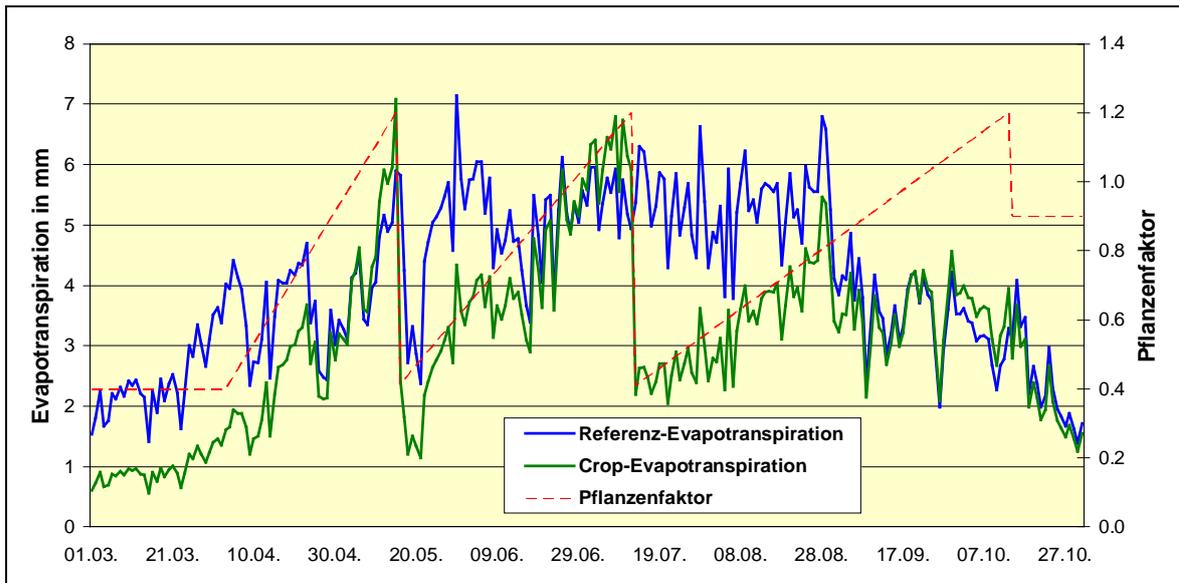


Abb. 4-31: Zusammenhang von Evapotranspiration und Pflanzenfaktor.

Wie diese Abbildung zeigt, wird durch die Anpassung der Referenz-Evapotranspiration an die Grünlandnutzung (Schnitthäufigkeit und Schnittzeitpunkte) die Bodenwasserbilanzrechnung signifikant beeinflusst. Einer möglichst realitätsnahen Beschreibung der Nutzung kommt demgemäß eine sehr große Bedeutung zu. Das Verbesserungspotenzial ist hier besonders hoch, bedarf allerdings einer intensiven weiterführenden Forschung. Für räumliche Anwendungen ist es zwingend notwendig, die Nutzungsparameter aus Standortfaktoren abzuleiten – dazu gibt es jedoch auch in der internationalen Agrarforschung kaum Ansätze.

Die räumliche Implementierung im vorliegenden Projekt erfordert die tägliche Berechnung der Referenz-Evapotranspiration in Form von kontinuierlichen Oberflächen. Ebenso muss der Pflanzenfaktor in Form von täglichen Rasteroberflächen zur Verfügung stehen. In Abb. 4-31 ist der Verlauf dieses Faktors sehr einfach nachzuvollziehen – die Umsetzung als kontinuierliche Oberfläche erfordert allerdings eine komplexe und äußerst rechenintensive Raster-Algebra-Operation. Die Rasteroberfläche des Pflanzenfaktors für den 30. Juni 1985 in Abb. 4-32 zeigt beispielhaft die unterschiedlichen Entwicklungszustände des Pflanzenbestandes in Abhängigkeit der Schnittfrequenz. Die Anforderung an diese täglichen Ergebnisse besteht darin, dass für jede einzelne Zelle der Verlauf über die Vegetationsperiode der in Abb. 4-31 dargestellten Kurve entspricht – natürlich abhängig von Schnittfrequenz und Schnittzeitpunkt, welche für jede Zelle individuell festgelegt ist.

Die farbliche Darstellung in Abb. 4-32 ist willkürlich gewählt und zeigt keinen Verlauf – die Differenzierung erfolgte qualitativ, um die unterschiedlichen Wertebereiche möglichst differenziert zu visualisieren und damit den methodischen Hintergrund zur Berechnung des Pflanzenfaktors mit dessen räumlicher Ausprägung zu veranschaulichen.

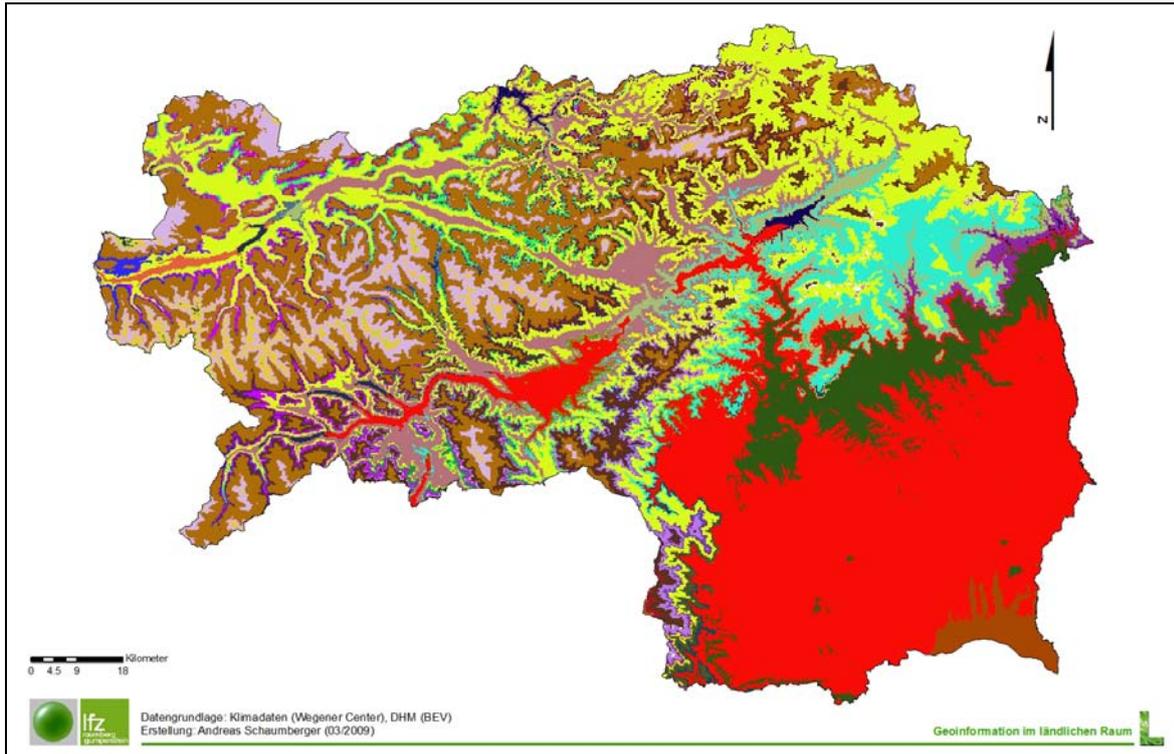


Abb. 4-32: Beispiel einer Pflanzenfaktor-Rasteroberfläche für den 30. Juni 1985 (EH5).

4.3.5.2. Aktuelle Evapotranspiration

Im Gegensatz zur Referenz- bzw. Crop Evapotranspiration bezieht die aktuelle Evapotranspiration den Wassereintrag in Form des Niederschlags sowie die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens (nutzbare Feldkapazität) mit ein. Die reale oder aktuelle Verdunstung wird nicht nur stichtagsbezogen ermittelt, sondern berücksichtigt die historische Entwicklung der Bodenwasserverhältnisse im Laufe einer Vegetationsperiode. Zu Beginn des Wachstums wird die Annahme einer vollständigen Wassersättigung getroffen (Wirkung der Winterfeuchte).

Auf der „Positiv-Seite“ der Bodenwasserbilanz steht der Niederschlag. Ausreichender Niederschlag begünstigt bei hoher Evapotranspiration das Wachstum, fehlt der Wassereintrag führt das in diesen Gebieten jedoch zu Wasserstress und damit zu Ertragseinbußen. Da eine Mittelwertbildung des Niederschlags und damit eine Glättung der Werte die Bilanz massiv beeinflussen würde, muss die Bilanzierung für jeden Tag der beiden Dekaden 1980 und 2040 gerechnet werden. Um jedoch eine Abschätzung der Veränderung in zukünftigen Dekaden vornehmen zu können, werden über die jeweilige Dekade Monatsmittelwerte an den Evaluierungsstandorten in Abb. 4-33 dargestellt. Für alle Standorte gilt eine generelle Niederschlagsabnahme in den Sommermonaten, insbesondere im Herbst. In Gumpenstein ist die Differenz jedoch bei weitem nicht so stark wie in den südlicheren Standorten ausgeprägt – der Niederschlag in der Vegetationsperiode (März bis Oktober) nimmt hier um 6 % ab, in Kirchberg/Walde sind es hingegen 19 %, in Piber und Hatzdorf 16 %.

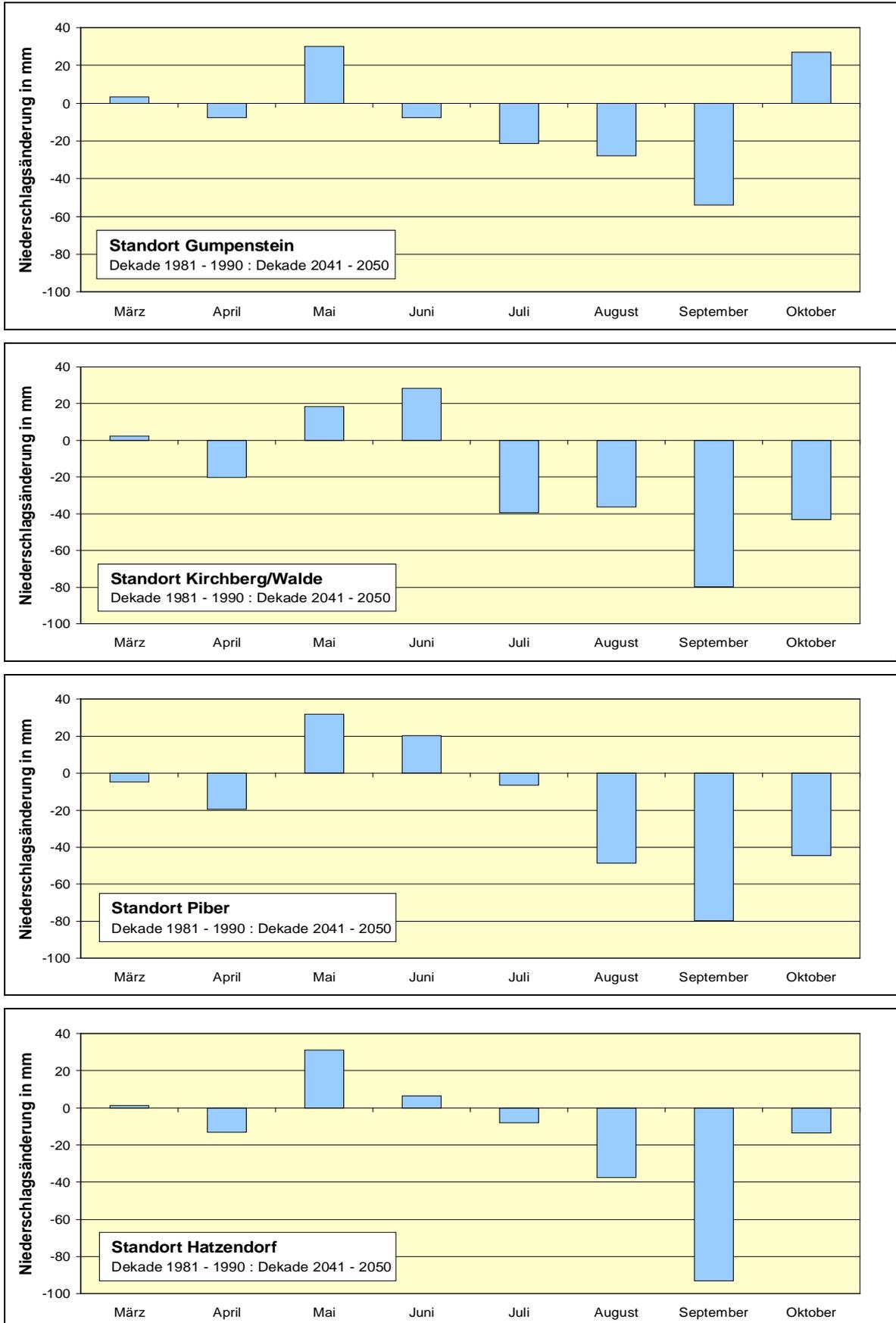


Abb. 4-33: Änderung der mittleren Monatsniederschlagssumme der Dekaden 1980 und 2040.

Bis zum Juni sind die Niederschlagsverhältnisse an allen vier Standorten ausgeglichen, dies bedeutet keine wesentliche Beeinträchtigung für den ersten Aufwuchs. Die nachfolgenden Schnitte sind jedoch stark von der fehlenden Wassernachlieferung betroffen. Die Höhe des Wasserstress hängt im Wesentlichen von der Höhe der Evapotranspiration ab. Auch hier muss ein Anstieg für die zukünftigen Dekaden erwartet werden. Als Beispiel ist der Verlauf von Dekadenmittelwerten am Standort Kirchberg/Walde in Abb. 4-34 dargestellt. Die durchschnittliche Änderung beträgt im Mittel + 0.3 mm. Das Zusammentreffen von höherer Evapotranspiration und abnehmenden Niederschlägen in den Monaten Juli bis Oktober erhöht die Wahrscheinlichkeit von Wasserstress. Bei der Betrachtung der Monatsmitteldifferenz in Abb. 4-34 fällt auf, dass die Erhöhung über die ganze Vegetationsperiode einigermäßen gleich verteilt ist.

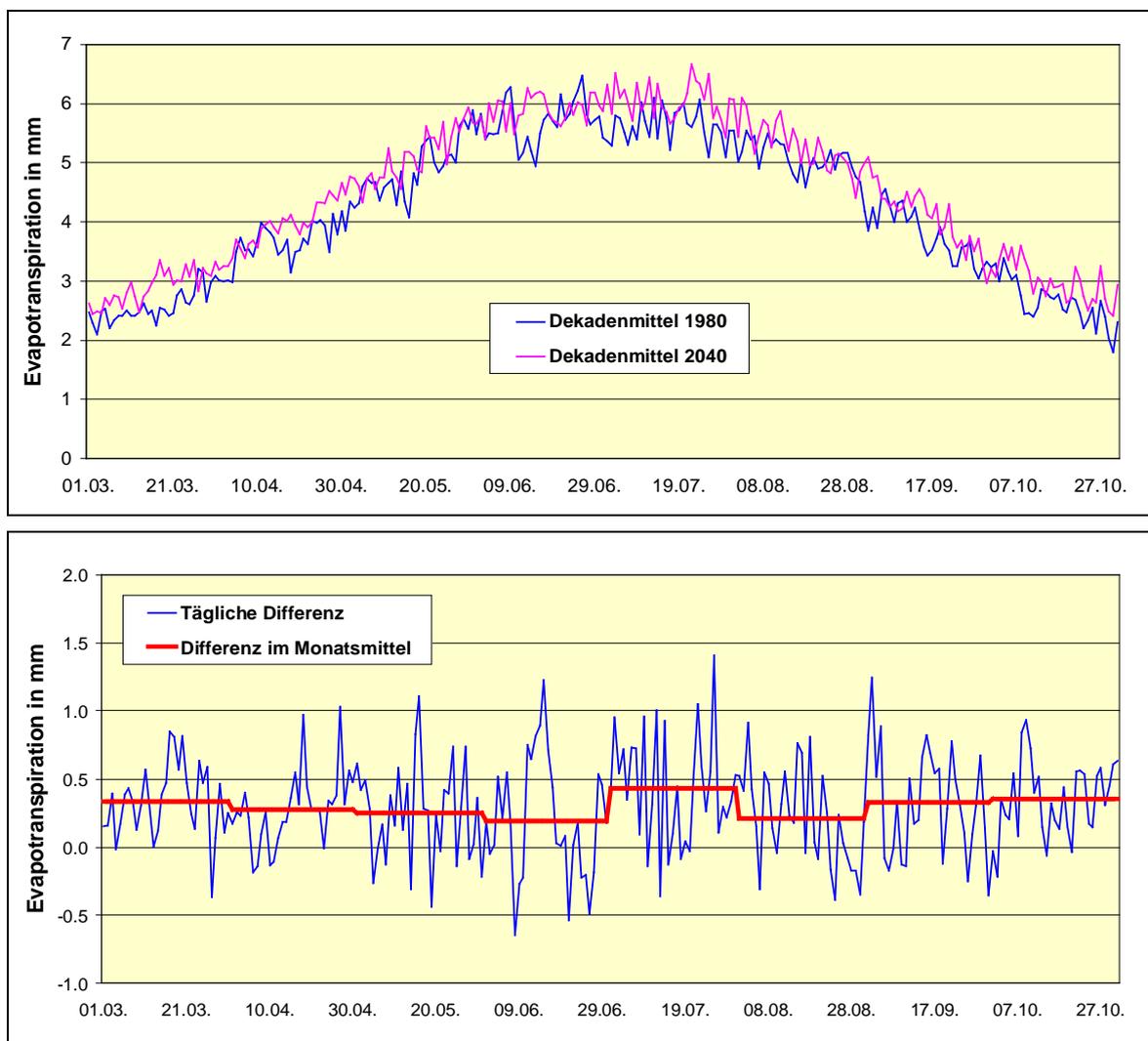


Abb. 4-34: Mittlere Referenz-Evapotranspiration am Standort Kirchberg/Walde im Dekadenvergleich 1980 und 2040.

Welche meteorologischen Parameter sind nun für diese Erhöhung verantwortlich? Am Beispiel des Standortes Kirchberg/Walde werden die jeweiligen Änderungssignale dargestellt.

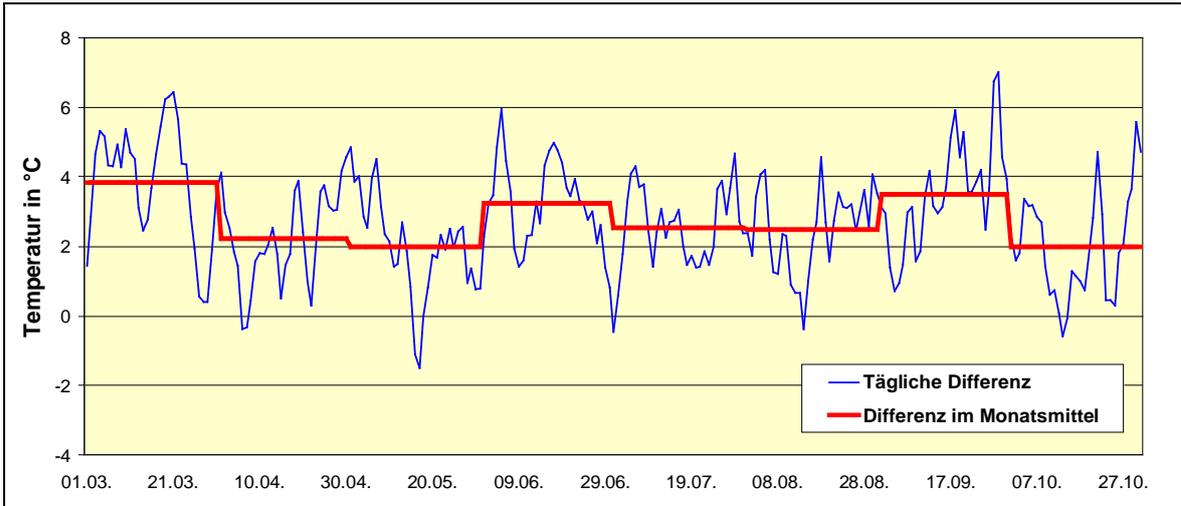


Abb. 4-35: Änderung der mittleren Temperatur der Dekaden 1980 und 2040.

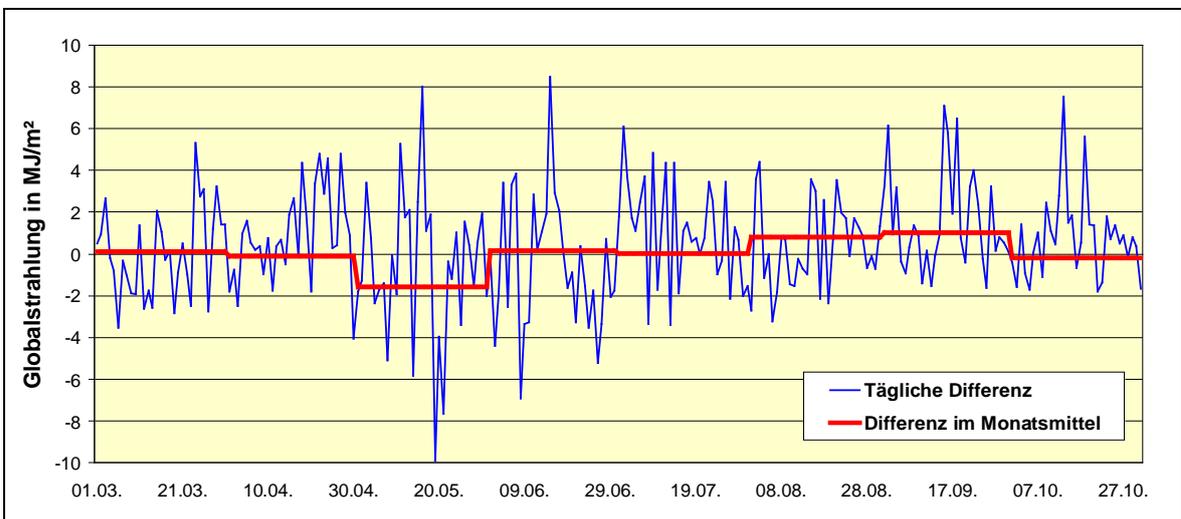


Abb. 4-36: Änderung der mittleren Globalstrahlung der Dekaden 1980 und 2040.

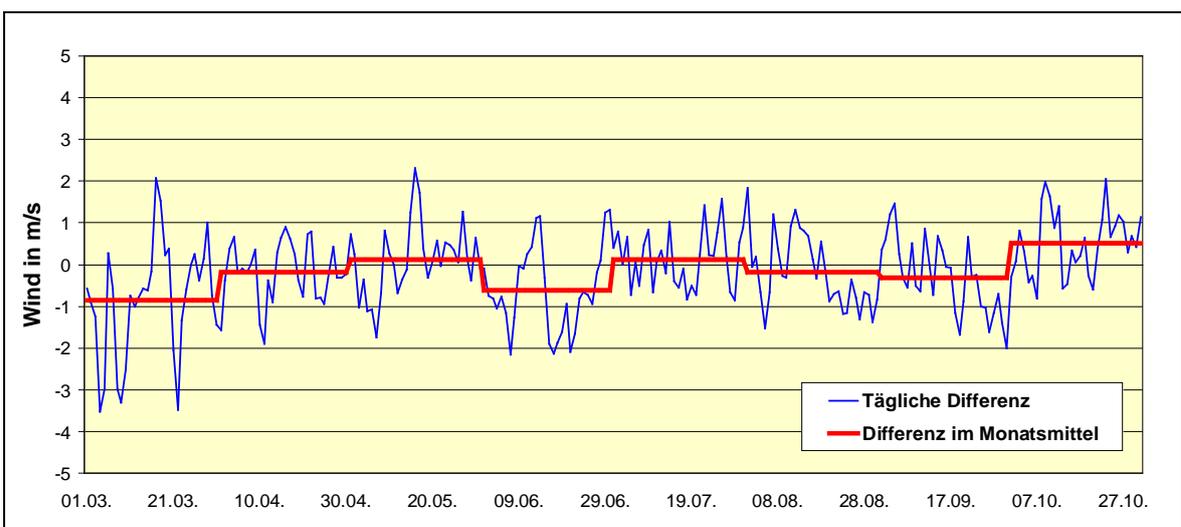


Abb. 4-37: Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit der Dekaden 1980 und 2040.

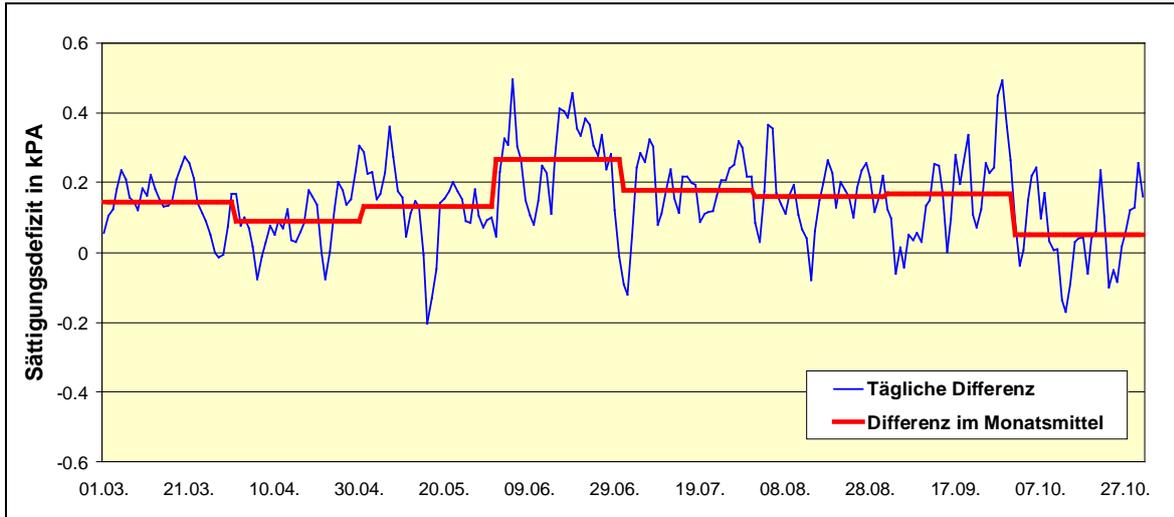


Abb. 4-38: Änderung des mittleren Sättigungsdefizits der Dekaden 1980 und 2040.

Aus den Abb. 4-35 bis Abb. 4-38 geht klar hervor, dass die Erhöhung der Referenz-Evapotranspiration in der Dekade 2040 hauptsächlich auf die Temperaturzunahme von $+2.7\text{ °C}$ im Mittel über die Vegetationsperiode zurückzuführen ist. Die Globalstrahlung mit einem mittleren Anstieg von $+0.4\text{ MJ/m}^2$, der Wind mit einem leichten Rückgang von -0.2 m/s sowie das Sättigungsdefizit mit $+0.1\text{ kPA}$ spielen eine untergeordnete Rolle. Bei allen Parametern gibt es keine signifikanten jahreszeitlich bedingten Abweichungen – dies schlägt sich auch in einer relativ gleichmäßigen Zunahme der Referenz-Evapotranspiration über die gesamte Vegetationsperiode nieder.

Das Verhältnis zwischen Crop Evapotranspiration und Aktueller Evapotranspiration, d.h. zwischen jenem Betrag, der aufgrund der atmosphärischen Situation verdunsten müsste und jenem, der aufgrund der Wasserverhältnisse im Boden verdunsten kann, ist die Grundlage für die Bewertung von wasserstressbedingten Ertragsveränderungen. In den Abb. 4-39 bis Abb. 4-42 werden die Verläufe beider Parameter über die Vegetationsperiode exemplarisch für die Jahre 1986 und 2044 an den vier Evaluierungsstandorten gezeigt. Es handelt sich hier nicht um Mittelwerte, sondern um Tageswerte aus der Kontroll-Simulation (EH5 für 1986) und Klimaszenario-Simulation (EH5 für 2044) – die Interpretation der dargestellten Ergebnisse beschränkt sich daher auf eine beispielhafte Visualisierung der in Abschnitt 4.2.7.3 beschriebenen Methodik.

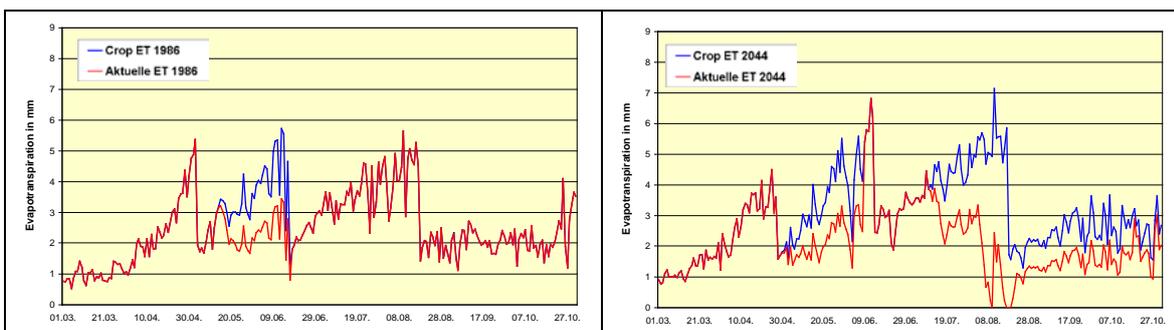


Abb. 4-39: Verlauf der Evapotranspiration am Standort Gumpenstein im Jahr 1986 und 2044.

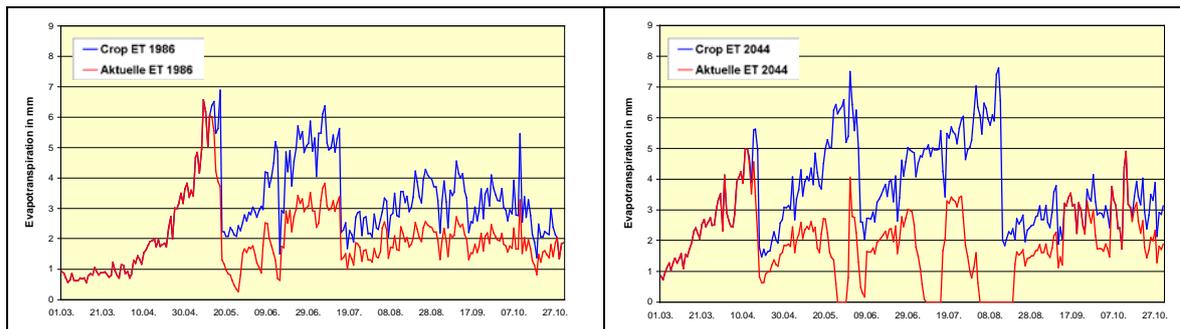


Abb. 4-40: Verlauf der Evapotranspiration am Standort Piber im Jahr 1986 und 2044.

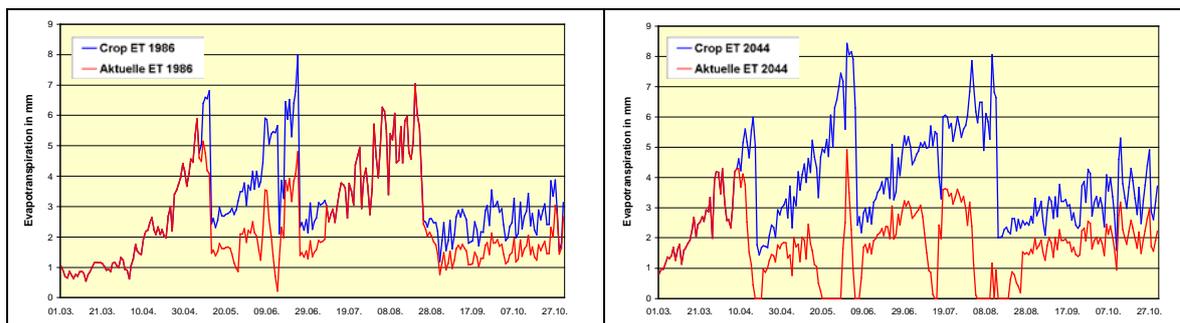


Abb. 4-41: Verlauf der Evapotranspiration am Standort Kirchberg/Walde im Jahr 1986 und 2044.

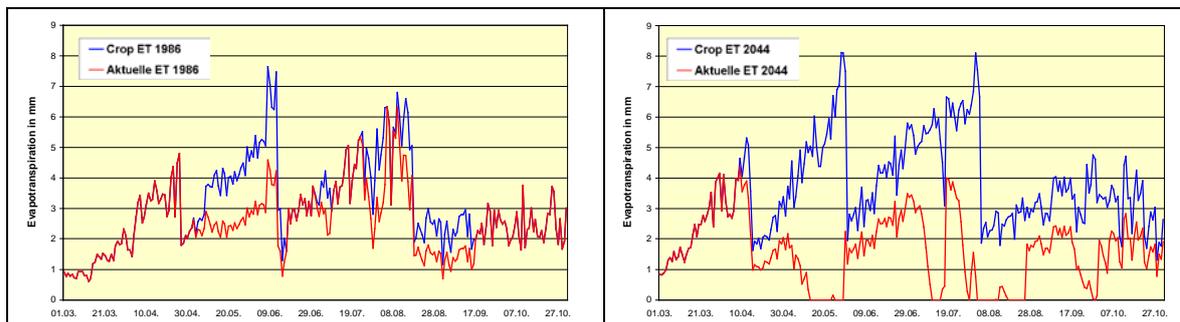


Abb. 4-42: Verlauf der Evapotranspiration am Standort Hatzendorf im Jahr 1986 und 2044.

Da für die oben dargestellten Ergebnisse eine Dekadenmittelwertbildung und damit eine repräsentative Beschreibung der Änderung von Evapotranspirationsverläufe nicht möglich ist, beziehen sich die errechneten Werte auf die Jahre 1986 und 2044. Ein Trend der Zunahme von „klaffenden“ Kurven der beiden Evapotranspirationswerte in der Dekade 2040 und damit ein erhöhtes Risiko von wasserstressbedingten Beeinträchtigungen des Wachstums kann jedoch eindeutig beobachtet werden.

4.3.6. Veränderung der Wachstumsbedingungen im Grünland

Wie im Abschnitt 4.2.8 dargestellt, wird das Verhältnis von Crop und Aktueller Evapotranspiration im Wasserverfügbarkeitsfaktor W_A zum Ausdruck gebracht. Dabei wird sowohl die langfristige, als auch die kurzfristige Entwicklung der Bodenfeuchte bzw. des

Wasserstress berücksichtigt. Der daraus entwickelte Growth Supporting Factor ist jener Wert, welcher auf die Akkumulation von Temperatur und Globalstrahlung wirkt und damit das Wachstumspotenzial hinsichtlich der Wasserversorgung charakterisiert. Für die vier Evaluierungsstandorte wurde dieser Wert über die beiden Dekaden 1980 und 2040 gemittelt und in den Abb. 4-43 bis Abb. 4-46 visualisiert.

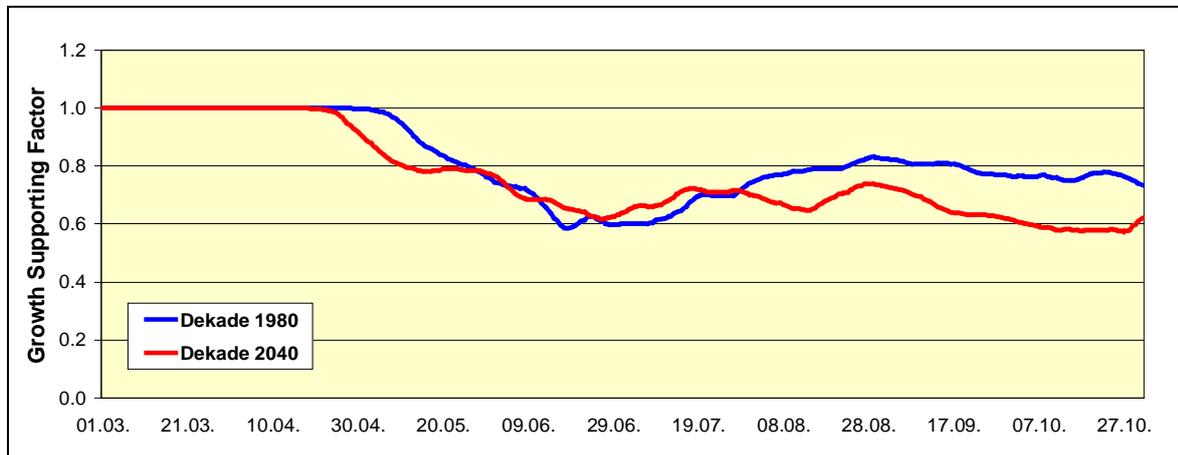


Abb. 4-43: Growth Supporting Factor am Standort Gumpenstein für die Dekaden 1980 und 2040.

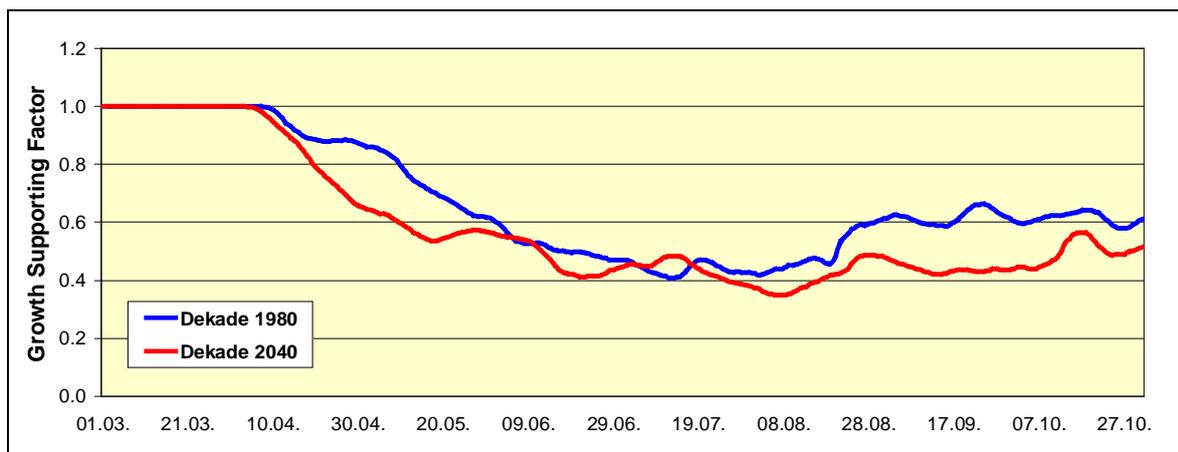


Abb. 4-44 Growth Supporting Factor am Standort Piber für die Dekaden 1980 und 2040.

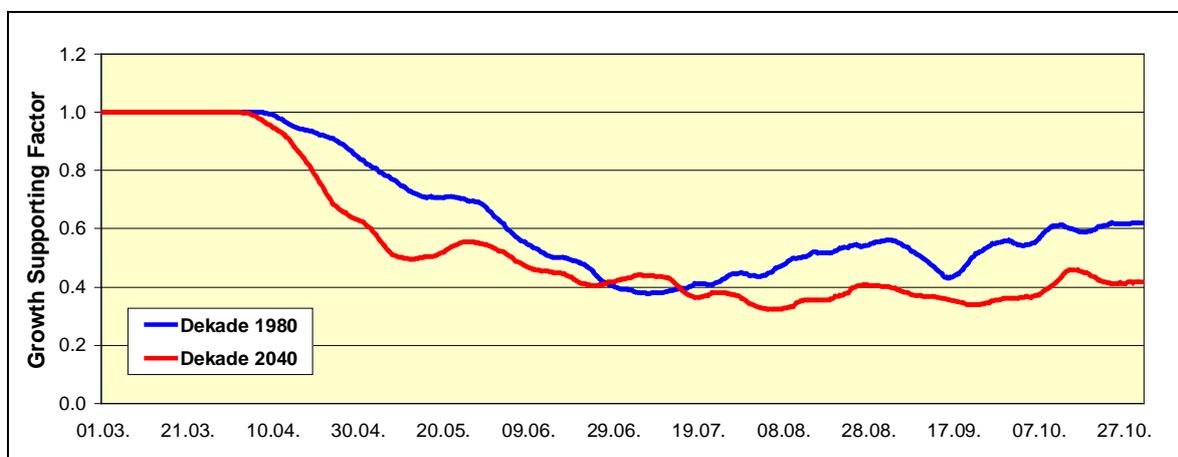


Abb. 4-45: Growth Supporting Factor am Standort Kirchberg/Walde für die Dekaden 1980 und 2040.

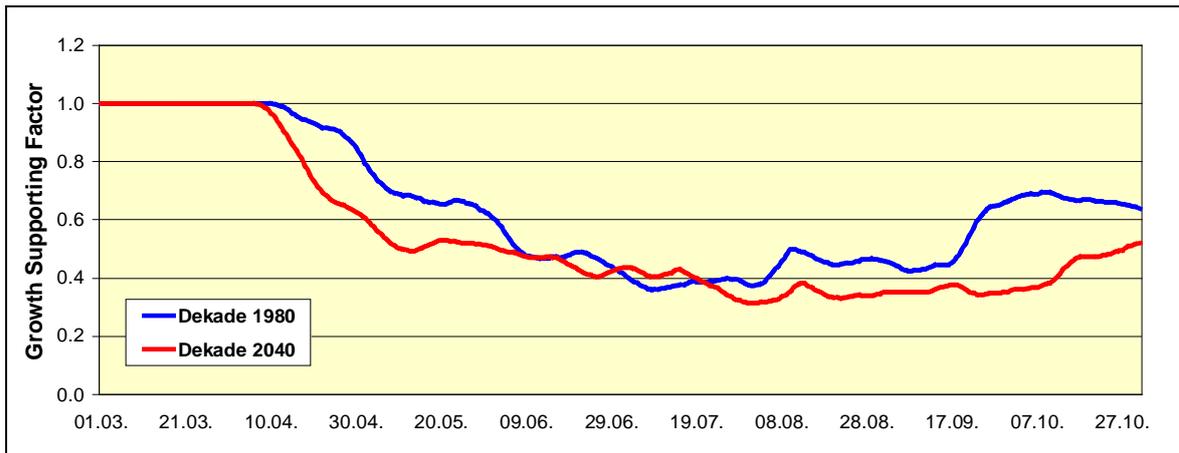


Abb. 4-46: Growth Supporting Factor am Standort Hatzendorf für die Dekaden 1980 und 2040

Der Growth Supporting Factor verläuft an allen Standorten ähnlich: Im Frühjahr ist für die Dekade 2040 ein vergleichsweise stärkerer Abfall der Werte zu beobachten. Vergleicht man dazu die mittleren Niederschlagswerte aus der Abb. 4-33, erklärt sich die früher und intensiver einsetzende Wasserknappheit aus der Niederschlagsverminderung im April. Der Abschwung erholt sich aufgrund der Niederschlagszunahme im Mai und Juni, allerdings ist hier das Niveau der Evapotranspiration schon dermaßen hoch, dass diese geringfügige Zunahme keine vollständige Erholung mehr bewirken kann. In den Sommermonaten kommt es zu einem weiteren und stärkeren Niederschlagsrückgang, der besonders im Herbst dazu führt, dass sich der Growth Supporting Factor der Dekade 2040 generell unterhalb des Werteverlaufs der Dekade 1980 bewegt.

Für die Grünlandwirtschaft bedeutet dies, dass in der Wachstumsperiode für den ersten und ertragsstärksten Aufwuchs eine Verminderung der Wasserversorgung früher einsetzt, jedoch durch das höhere Energieeintragsniveau (vgl. Abb. 4-34) auch mehr Ertrag entsteht. Das Verhältnis von Ertragssteigerung aufgrund der höheren Temperatur und der Wachstumsbeeinträchtigung durch fehlende Niederschläge wurde nicht untersucht und deshalb kann auch nicht genau beschrieben werden, inwieweit sich deren Wechselbeziehungen auf den Ertrag auswirken. Wie sich eine Verschlechterung der Wachstumsbedingungen (niedriger Growth Supporting Factor) auf den Ertrag durchschlägt, hängt entscheidend vom Wertenniveau ab. In Gumpenstein ist die Beeinträchtigung vergleichsweise niedrig, in Piber, Kirchberg/Walde und Hatzendorf bedenklich hoch. In der zweiten Jahreshälfte wird es zu einer deutlichen Reduktion der Erträge kommen – dies wirkt sich besonders auf den dritten und vierten Aufwuchs aus.

4.3.7. Ertragsentwicklung im Grünland

Aus den Ergebnissen im vorliegenden Projekt kann grundsätzlich folgendes festgestellt werden: In jenen Gebieten, in denen das Niederschlagsniveau schon jetzt niedrig ist und auch in den Sommermonaten bereits hohe Temperatursummen erreicht werden, wirkt sich

der Niederschlagsrückgang mit gleichzeitigem Anstieg der Evapotranspiration negativ auf den Jahresertrag aus. In Gebieten mit hohem Niederschlagsniveau können aufgrund der Temperaturzunahme und der vergleichsweise geringeren Niederschlagsrückgänge höhere Erträge als bisher erwirtschaftet werden.

Die Ertragsermittlung beruht auf einem hoch signifikanten Einfluss der Temperatur und Globalstrahlung auf das Wachstum. Die effektive Temperatur und effektive Globalstrahlung ist eine aufgrund der Wasserverfügbarkeit reduzierte Summe der beiden Parameter, deren Berechnung auf Tagesbasis über die Dauer der einzelnen Aufwüchse akkumuliert wird (vgl. Abschnitt 4.2.8).

Analog zu den Auswertungen in den Abb. 4-39 bis Abb. 4-42 wird in den nachfolgenden Abbildungen der vierte Aufwuchs der Jahre 1986 und 2044 als Ergebnis der räumlichen Modellierung dargestellt. Auch hier ist wieder zu beachten, dass es sich um keine Dekadenmittelwerte handelt – die Visualisierungen zeigen das Prinzip und einen globalen Trend, der in den einzelnen Jahren mehr oder minder stark ausgeprägt ist.

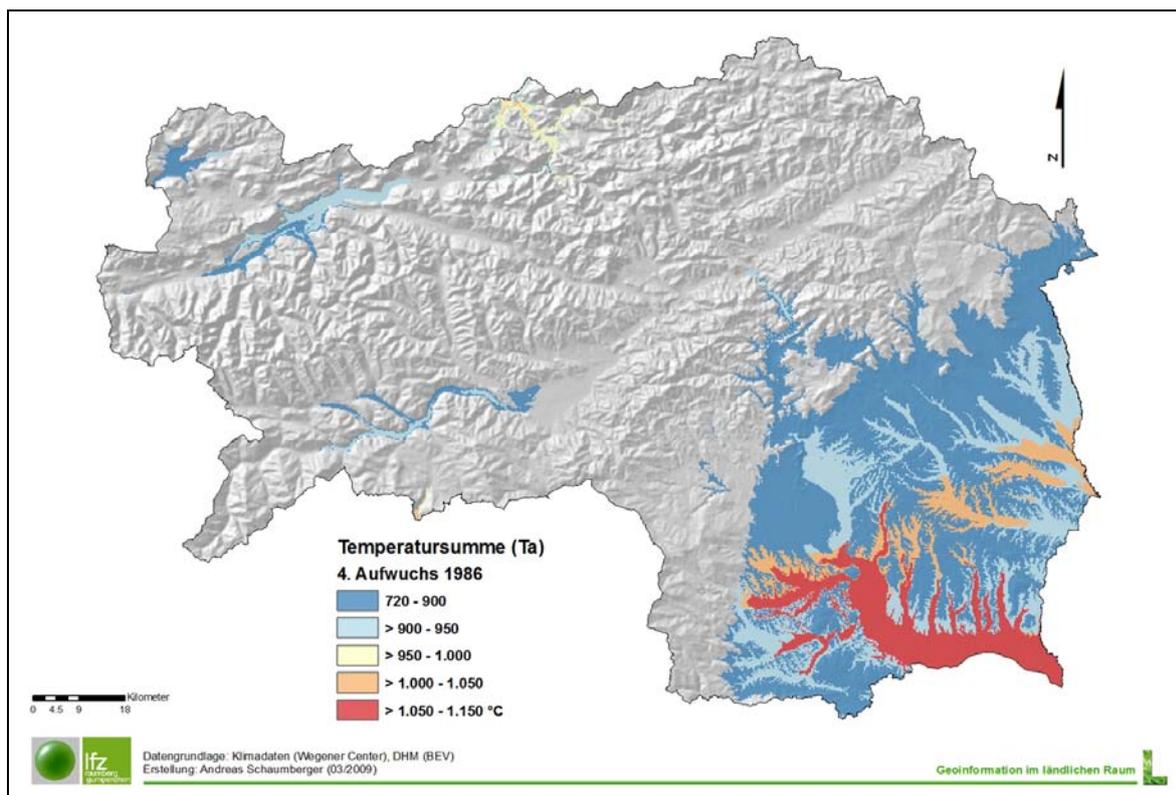


Abb. 4-47: Temperatursumme für den 4. Aufwuchs des Jahres 1986.

Für die Darstellung in Abb. 4-47 werden die einzelnen Temperaturoberflächen auf Tagesbasis für die nach Abschnitt 4.2.6 ermittelte Dauer des 4. Aufwuchses im Jahr 1986 akkumuliert. Die Abbildung zeigt jene Gebiete, in denen in diesem Jahr eine nach dem Schnittmodell errechnete Vierschnittnutzung erfolgte. Die Temperatursumme erreicht dabei in den südlichen Gebieten Werte bis über 1.000 °C.

Die effektive Temperatursumme in Abb. 4-48, bezogen auf den gleichen Zeitraum, zeigt gegenüber der Temperatursumme in Abb. 4-47 etwas verminderte Werte. Dies resultiert aus der um den Growth Supporting Factor reduzierten täglichen Temperatur, wenn dieser einen Betrag kleiner 1 aufweist.

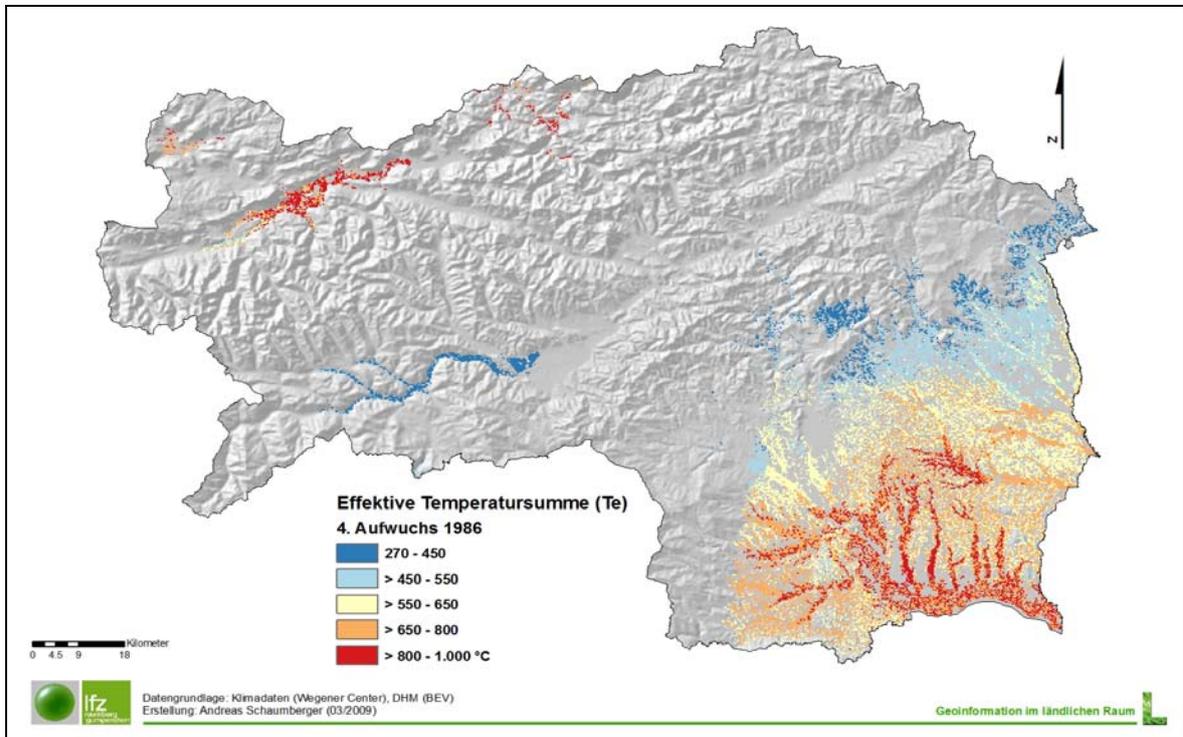


Abb. 4-48: Effektive Temperatursumme für den 4. Aufwuchs des Jahres 1986.

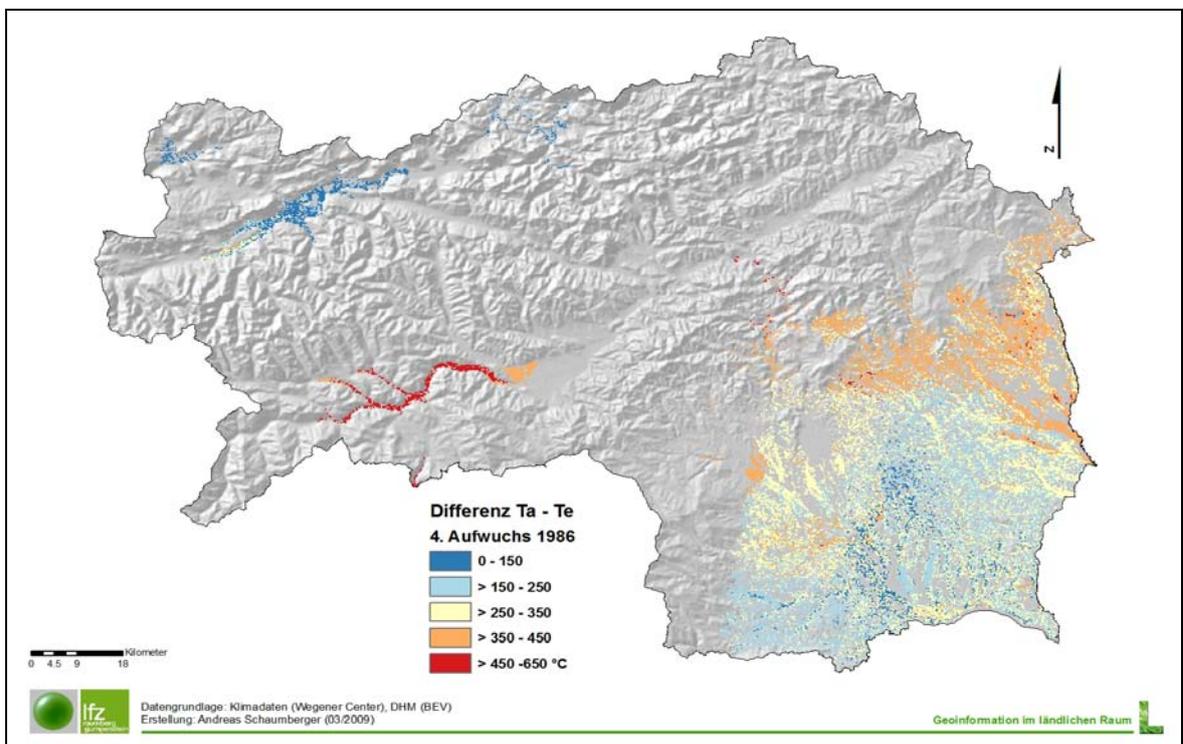


Abb. 4-49: Reduktion durch den Growth Supporting Factor für den 4. Aufwuchs des Jahres 1986.

Die in Abb. 4-49 dargestellte Differenz, die sich aus dem Einfluss des Growth Supporting Factors ergibt, stellt indirekt das Wirkungsmaß für die Ertragsbestimmung dar. Die Verminderung der sich aus den Wasserverhältnissen ergebenden Temperatursumme ist in der Süd- und Oststeiermark in diesem Jahr für den 4. Aufwuchs eher gering und lässt daher den Schluss zu, dass es hier keine massiven Ertragsminderungen gab. Deutlich höhere Werte zeigt der Raum Murau bis Judenburg – der Wasserstress war hier im Jahr 1986 am höchsten. Dem Jahr 1986 steht eine exemplarische Auswertung für das Jahr 2044 gegenüber. In Abb. 4-50 wird zunächst die Temperatursumme wiederum für den 4. Aufwuchs dargestellt. Hier fällt besonders die Ausdehnung der Vierschnittflächen gegenüber jenen im Jahr 1986 auf. Dies entspricht auch dem aus den Dekadenmittelwerten errechneten Schnittmodell (vgl. Abb. 4-29). Die Temperatursummen sind in allen Gebieten deutlich über jenen des Vergleichsjahres 1986 – dies liegt zum einen an der generellen Temperaturzunahme, aber auch an der längeren Vegetationsperiode (vgl. Abb. 4-27) und den somit ausgedehnteren Aufwuchszeiten.

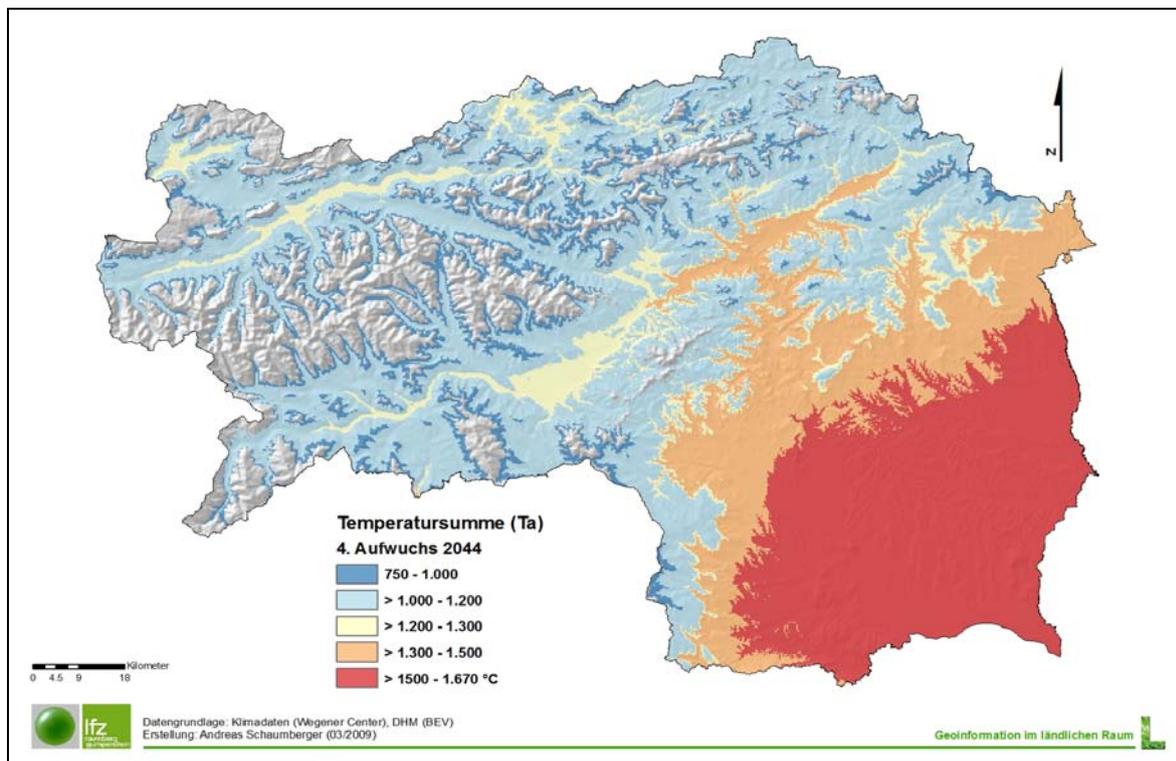


Abb. 4-50: Temperatursumme für den 4. Aufwuchs des Jahres 2044.

Die effektive Temperatur, wie sie in Abb. 4-51 dargestellt ist, zeigt deutliche Abschlüsse, die im Südosten eine enorme Reduktion erkennen lassen und in der Differenzdarstellung (vgl. Abb. 4-52) quantifiziert werden. Der 4. Aufwuchs im Jahr 2044 ist demnach durch Ertragseinbrüche im betroffenen Gebiet stark gefährdet bzw. die Wahrscheinlichkeit eines Totalausfalls liegt hier sehr hoch. Im Übergang vom Flachland zum Berggebiet ist die Verminderung der Temperatursumme ebenfalls noch sehr hoch, in den Tälern des Berglandes hingegen werden sich die vergleichsweise geringen Beeinträchtigungen ertragsmäßig kaum auswirken.

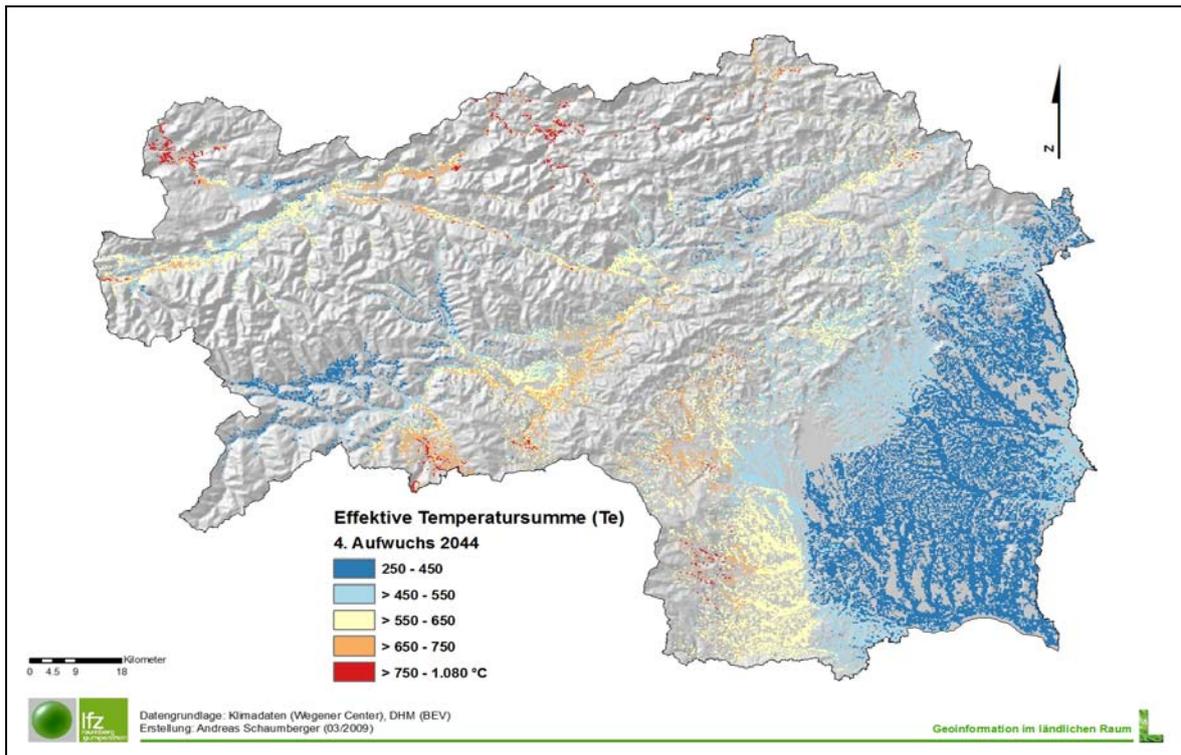


Abb. 4-51: Effektive Temperatursumme für den 4. Aufwuchs des Jahres 2044.

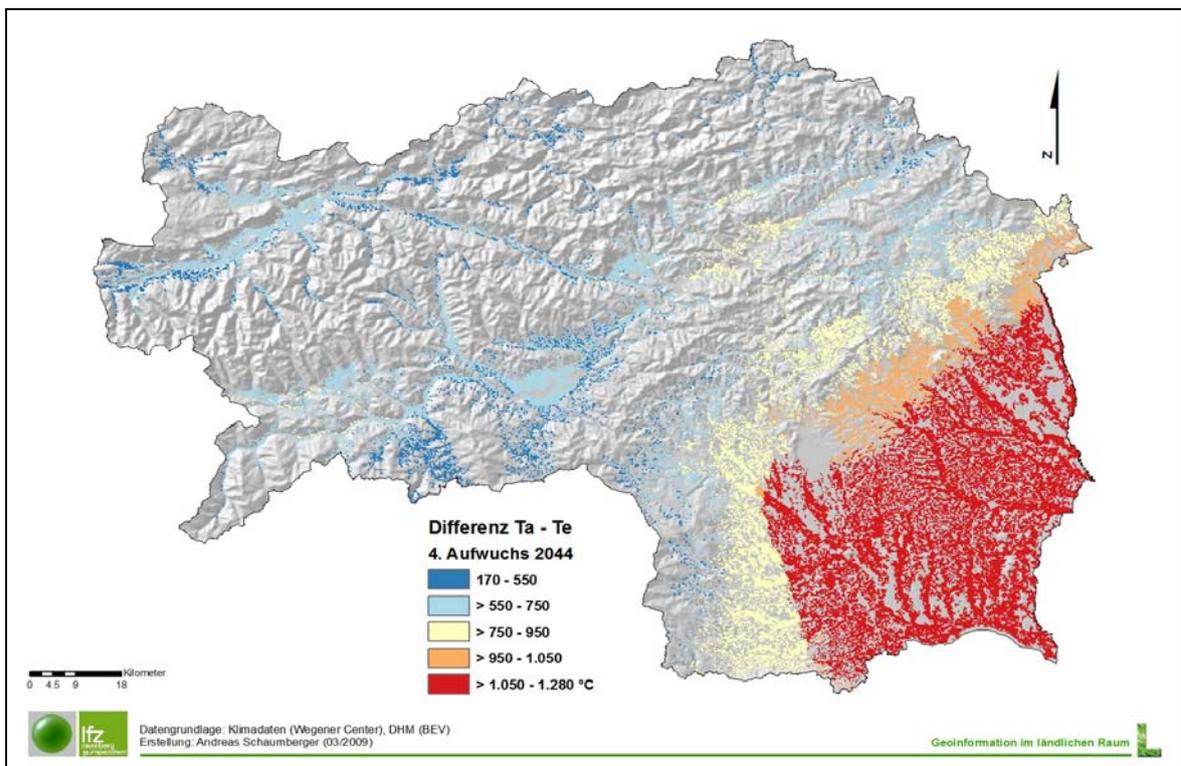


Abb. 4-52: Reduktion durch den Growth Supporting Factor für den 4. Aufwuchs des Jahres 2044.

Dieses Beispiel zeigt anhand des 4. Aufwuchses konkreter Jahre die methodische Vorgehensweise im Fall der Temperatur und gibt näherungsweise den Trend hinsichtlich der Ertragsentwicklung in der späten Phase der Nutzungsperiode wieder.

Zur Vervollständigung des Bildes über die Ertragssituation in diesen Jahren wird in Abb. 4-53 und Abb. 4-54 der Jahresertrag der beiden vorgestellten Jahre gezeigt.

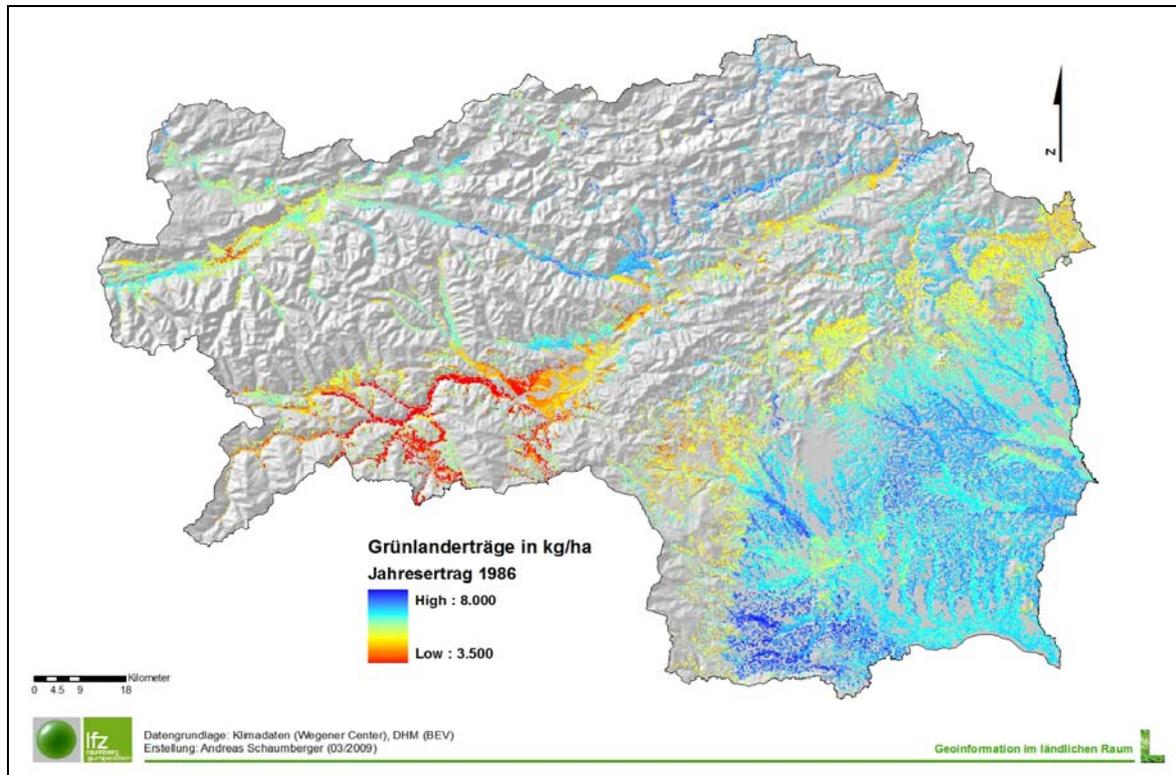


Abb. 4-53: Jahresbruttoertrag im Grünland für das Jahr 1986.

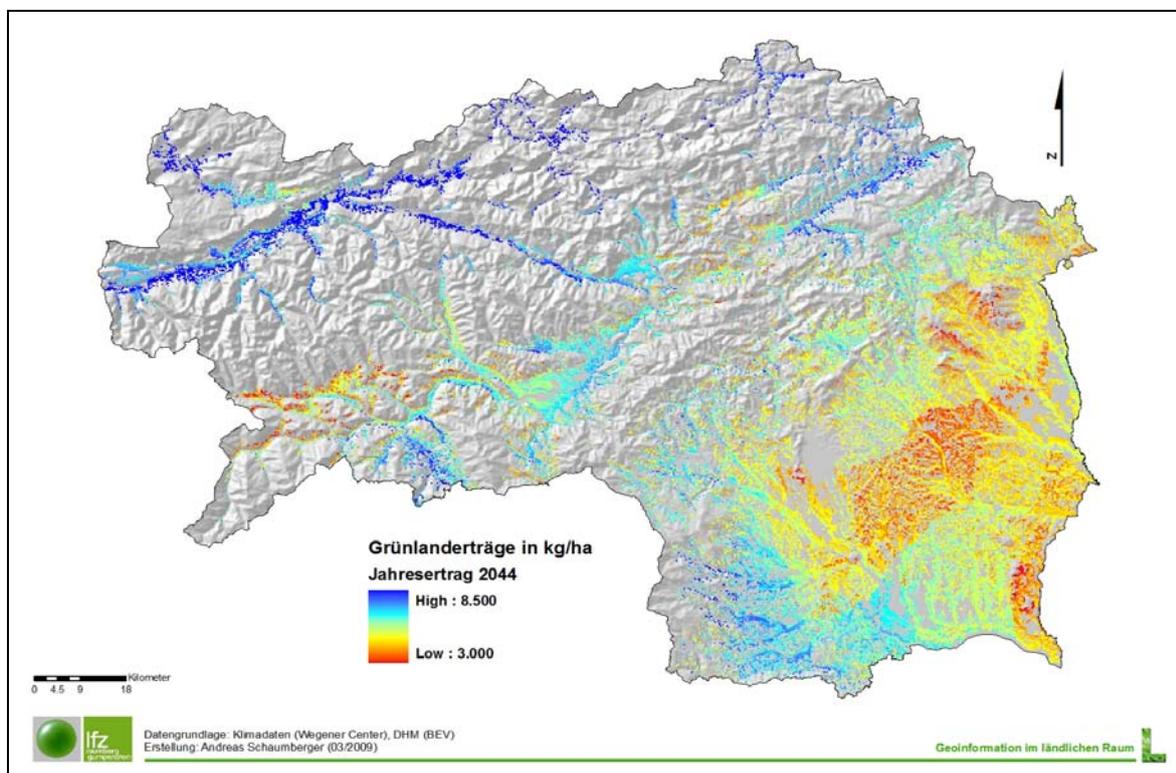


Abb. 4-54: Jahresbruttoertrag im Grünland für das Jahr 2044.

Die Verteilung der Erträge im Jahr 1986 zeigt höhere Werte in den Gunstlagen des Flachlandes und etwas geringere in den Tälern des Berglandes bzw. im Übergang zwischen Flach- und Bergland. In Murau/Judenburg gab es in diesem Jahr eine außergewöhnlich große Beeinträchtigung durch eine schlechte Wasserverfügbarkeit. Das Jahr 2044 zeigt deutliche Einbrüche im Süden und eine Ertragszunahme im Norden.

Für die Untersuchungen in den beiden Jahren wurden Simulationsdaten herangezogen – dies muss bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden. Außerdem ist die Verwendung von Tagesdaten eines Klimasimulationsmodells problematisch und hier nur deshalb vorgenommen worden, da eine Mittelwertbildung nicht möglich ist. Die Ertrags-schätzung wird mit Hilfe einer multiplen Regressionsgleichung vorgenommen, welche sich auf eine umfangreiche Kalibrierung mit Ertragsdaten aus Grünlandexaktversuchen auf 27 über ganz Österreich verteilten Versuchsstandorten und einem Versuchszeitraum von 2002 bis 2007 stützt. Als Prädiktoren werden Aufwuchs, effektive Temperatur und Globalstrahlung, Düngungsklasse (im vorliegenden Modell wird einheitlich Gülledüngung angenommen), Schnitt sowie Temperatur- und Globalstrahlungssumme herangezogen [Schaumberger, 2009].

Für das Endergebnis, nämlich die räumliche Darstellung möglicher Ertragsänderungen im Grünland, werden die Jahreserträge der beiden Dekaden zu einem Mittelwert für die Jahre 1981 bis 1990 und 2041 bis 2050 zusammengezogen und daraus die sich ergebende Änderung ermittelt. Dieses Ergebnis ist in Abb. 4-55 dargestellt.

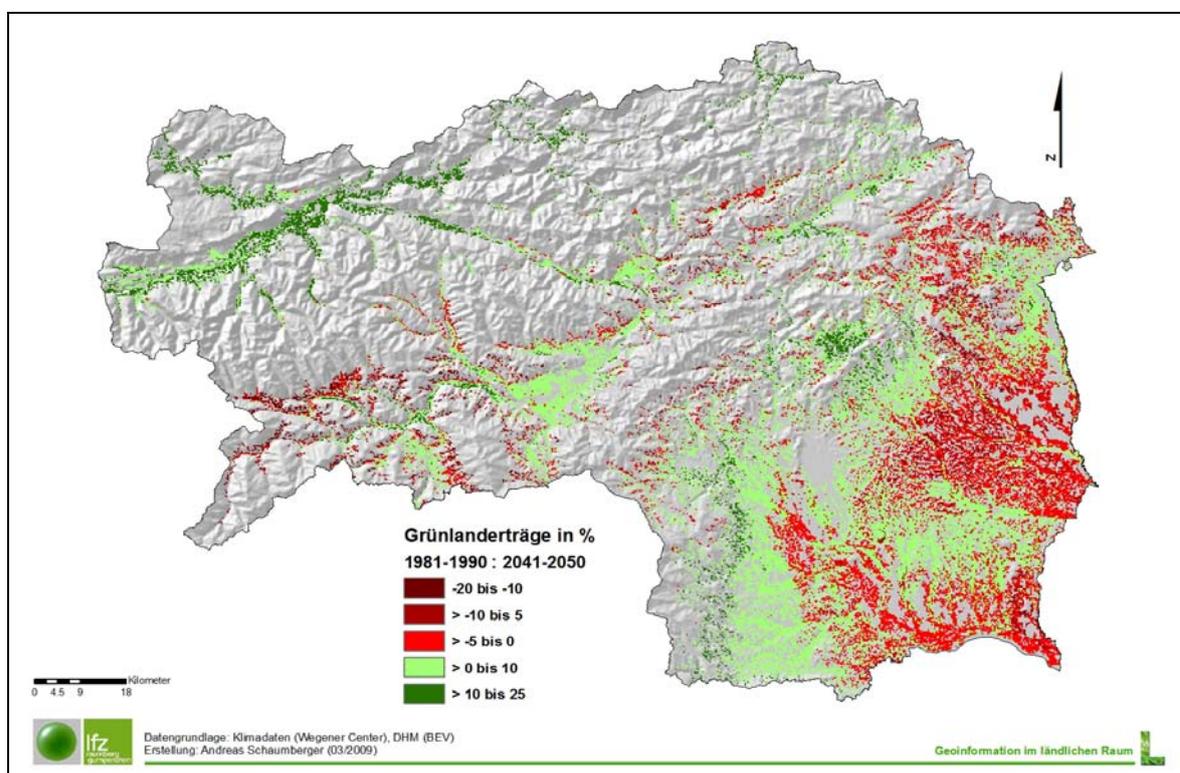


Abb. 4-55: Relative Änderungen des Jahresbruttoertrages im Grünland im Vergleich der Dekaden 1980 und 2040 in der Steiermark.

In der südlichen Steiermark bzw. im Murtal wird es zu einer Ertragsabnahme kommen. Besonders im intensiv genutzten Grünlandgebiet im Raum Hartberg wird sich dies auf viele Grünlandflächen auswirken. Im Steirischen Salzkammergut, dem Enns- und Paltental wird es hingegen zu einer Ertragssteigerung kommen, da eine außergewöhnlich Limitierung der Wasserverfügbarkeit nicht zu befürchten ist und gleichzeitig eine signifikante Temperaturzunahme erwartet wird. Die Temperaturzunahme hat außerdem eine Auswirkung auf die Dauer der Vegetationsperiode – die Verlängerung im Berggebiet schafft zusätzliches Potenzial für eine Mehrschnittnutzung. Eine effektive Grünlandbewirtschaftung in den heutigen Gunstlagen wird sich zeitlich auf das Frühjahr (1. und 2. Aufwuchs) konzentrieren und die Grünlandwirte müssen mit einer Ausweitung des „Sommerlochs“ und dem weitgehenden Ausbleiben einer Erholungsphase im September/Oktober rechnen.

4.4. Zusammenfassung und Ausblick

Grünland ist durch eine komplexe Bewirtschaftung gekennzeichnet – die Zusammensetzung des Pflanzenbestandes variiert sehr stark, die Nutzung reicht von extensiven Flächen mit Ein- bzw. Zweischnittnutzung bis hin zur Drei- und Mehrschnittnutzung auf intensiv bewirtschafteten Parzellen. Bewirtschaftungsmaßnahmen können für die ganze Steiermark nicht exakt der Realität entsprechend abgebildet werden, da hier nicht nur objektivierbare Standortfaktoren, sondern auch individuelle Managementmaßnahmen der einzelnen Landwirte eine große Rolle spielen (z.B. Pflegemaßnahmen). Schnittfrequenz und damit die Wuchsdauer einzelner Aufwüchse sind naturgemäß ertragsrelevant und wurden in dieser Arbeit durch Näherungsmodelle, abgeleitet aus klimatisch bedingten Standortfaktoren (z.B. aus der Dauer der thermischen Vegetationsperiode), beschrieben. Der Schwerpunkt für die Abschätzung der Ertragsentwicklung im Grünland wurde daher auf die Veränderungen der Wasserverfügbarkeit gelegt. Mit Hilfe eines einfachen, für die Umsetzung in einem Geographischen Informationssystem geeigneten Bodenwasserbilanzmodell wurde die Wasserstresssituation einer zukünftigen Periode (2041 bis 2050) im Vergleich zur Vergangenheit (1981 bis 1990) basierend auf Klimaszenario-Simulationen räumlich analysiert.

Die Evapotranspiration spielt im Wasserhaushalt eine besondere Rolle, da mit diesem Wert die bodennahen atmosphärischen Bedingungen beschrieben werden. Hier zeigt sich eine Zunahme über die ganze Vegetationsperiode, welche auch deutlich bei der Temperatur beobachtet werden kann. Die andere Seite der Bilanz, also der Wassereintrag in Form von Niederschlag, ist entscheidend dafür, wie sich die erhöhte Verdunstung auf das Grünland auswirken wird. Stichprobenartige Untersuchungen an mehreren Standorten in der Steiermark haben gezeigt, dass der Niederschlag im Frühjahr etwas abnimmt und von Mai bis Juni wieder leicht zunimmt. Allerdings wird es in der gesamten Steiermark während des Sommers zu merklichen Rückgängen kommen, die im September und teilweise auch noch im Oktober enorm sind (in der Obersteiermark wesentlich schwächer ausgeprägt als im Süden). Für das Grünland heißt das, dass im Frühjahr das Wachstum überproportional hoch sein wird, da nach dem Winter von wassergesättigten Böden ausgegangen werden kann (Winterfeuchte) und gleichzeitig der Energieeintrag in Form von Wärme und Strahlung zunehmen wird. Solange das Bodenwasser nicht oder nur unwesentlich limitiert ist und eine hohe Verdunstung die Verwertung dieser Energie durch die Pflanzen erlaubt, wird dies das Wachstum begünstigen. Im Sommer und Herbst wird es allerdings zu Ertragsrückgängen kommen, die in jenen Gebieten besonders stark sein werden, in denen eine geringe Bodenaufgabe gegeben ist, die süd exponiert sind und das Wasserdefizit hoch ist. Bei anhaltendem Wasserstress kann es zudem zu einer Schädigung des Pflanzenbestandes kommen, welcher Folgeschäden nach sich zieht und kompensierende Grünlandpflegemaßnahmen notwendig macht. Räumlich betrachtet wird die Grünlandwirtschaft in der Süd- und Oststeiermark unter diesem „Sommerloch“ zu leiden haben, aber auch das Murtal

wird davon betroffen sein. Das Salzkammergut und das Enns- und Paltental werden von den höheren Temperaturen und einer längeren Vegetationsperiode profitieren und mehr Ertrag erwirtschaften, da es hier zwar auch zu einem Niederschlagsrückgang im Sommer kommt, jedoch relativ gesehen wesentlich geringer ausfallen wird.

Durch den Temperaturanstieg wird vor allem die Süd- und Oststeiermark insbesondere in den Sommermonaten Juli und August mit Hitzeperioden zu kämpfen haben. In den inneralpinen Tallagen wird es aber auch in der Mur- und Mürzfurche vermehrt zu Hitzetagen kommen. Bei Getreide und Raps kann dies zu einer „rascheren“ Notreife und bei Mais und Kürbis zur schnelleren Abreife und damit zu Ertragseinbrüchen führen. Einhergehend mit den höheren Temperaturen sind auch vermehrt Probleme mit Pilzkrankheiten zu erwarten, welche sich viel rascher ausbreiten und sich so auch auf die Reife auswirken werden. In den höheren Lagen werden hingegen die wärmeren Temperaturen das raue Klima mildern.

Das Grünland kann bei heißen Temperaturen und einem einhergehenden Wassermangel, insbesondere an Südhängen und auf seichtgründigen Böden, „ausbrennen“. In extremen Jahren ist ein Wachstumsstillstand in Trockenperioden durchaus wahrscheinlich und kann in weiterer Folge auch zur Zerstörung der Grasnarbe führen. Treten häufiger derartig trockene und heiße Sommer auf, so wird sich das Grünland aus diesen Gebieten zurückziehen. Fettwiesen wandeln sich in Trockenrasen. Der Feldfutterbau insbesondere Luzernegras könnte hier auf den ackerfähigen Grünlandflächen verstärkt Einzug halten. In den südlichen Landesteilen wird beim häufigen Auftreten von extrem trockenen Sommerperioden die traditionelle Grünlandwirtschaft nur mit großen Anstrengungen aufrechtzuerhalten sein, die Rationen für die Rinder könnten dann vorwiegend aus Silomais und Feldfutter bestehen bzw. könnte die Anzahl an rinderhaltenden Betrieben stark sinken.

In den raueren und milden Lagen wird es im Sommer gute Bedingungen für die Silage- und Trockenfutterproduktion geben. Die Erträge werden auf kristallinen Böden in den Höhenstufen leicht zunehmen, auf Kalkuntergrund und südexponierten Flächen werden wir aber auch hier das Sommerloch verspüren. Die Almen, sofern sie nicht zugewachsen sind, werden eine längere Auftriebsperiode haben, allerdings kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Erträge bei diesen Bodenaufgaben und dem Nährstoffversorgungsgrad steigen werden. Es wird zwar etwas früher aufgetrieben werden, jedoch in Ermangelung an Weidefutter werden im Spätsommer wieder eher die Talweiden aufgesucht werden. Der Silomaisanbau wird sein Anbaugebiet in den besten Berglagen erweitern, sofern nicht der Maiswurzelbohrer auch hier in die Fruchtfolgestaltung massiv eingreift.

Die Abreife von Wein- und Obstsorten werden in den trockenen und heißen Sommermonaten oftmals rascher erfolgen. Der Zuckergehalt beim Wein wird, sofern die Blattmasse nicht zu früh geschädigt wird, höhere Klosterneuburger Grade erreichen. Beim Apfel kann der Säuregehalt allerdings unter den gewohnten Werten zu liegen kommen; die Haltbarkeit könnte dadurch gestört sein. Bei allen Kulturen, insbesondere bei den Saatgutmischungen für das Grünland und beim Feldfutter werden neue, angepasste Sorten mit einer gewissen Resistenz gegen Trockenheit und verstärkten Krankheitsdruck zum Einsatz kommen.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Der erste Teil des Projektes *AgroClim2* beschäftigte sich mit der Entwicklung von Trockengefährdungsindizes, welche auf der nettopotentiellen Evapotranspiration beruhen. Die nettopotentielle Evapotranspiration wurde gewählt, da sie als guter Indikator für Trockenheit angenommen werden kann. Diese Indikatoren wurden mit landwirtschaftlichen Ertragsdaten korreliert und gezeigt, dass etwa mehrmähdige Wiesen in der Untersteiermark werden generell sensitiver auf Klimaänderung reagieren als in der Obersteiermark. Die erklärbare Variabilität des Ertrages liegt in der Obersteiermark zwischen 9 % und 21.2 %, in der Untersteiermark zwischen 15.21 % und 38.44 %.

Ein weiterer Teil von *AgroClim2* widmete sich der zukünftigen Entwicklung von Trockengefährdung mit besonderem Fokus auf das Bundesland Steiermark anhand ausgewählter Trockengefährdungsindizes. Als Zukunftsszenario diente eine hochaufgelöste Klimasimulation, welche anhand des mesoskaligen Modelles MM5 im Rahmen des Projektes "Research for Climate Protection: Model Run Evaluation (**reclip:more**)" durchgeführt wurde. Um den Modellfehler zwischen simulierten und beobachteten Daten zu verringern, wurden zunächst die zur Berechnung der Indizes benötigten Klimaparameter Temperatur und Niederschlag einer Fehlerkorrektur unterzogen. Mit Hilfe der fehlerkorrigierten Modelldaten wurden zukünftige Szenarien von Trockengefährdungsindizes berechnet und gezeigt, dass es durch großflächige Temperaturzunahme und regionale Niederschlagsabnahme im gesamten Alpenraum in Zukunft zu größerer Trockengefährdung kommen wird.

Detailliertere Untersuchungen zeigen, dass durch den Temperaturanstieg vor allem die Süd- und Oststeiermark, insbesondere in den Sommermonaten Juli und August, mit extremen Hitzeperioden mit über 35 °C zu kämpfen haben wird. In den inneralpinen Tallagen wird es auch in der Mur- und Mürzfurche zu extremen Hitzetagen kommen. In den höheren Lagen werden die wärmeren Temperaturen das raue Klima mildern.

Das Grünland könnte bei den heißen Temperaturen und dem damit einhergehenden Wassermangel – insbesondere an Südhängen auf seichtgründigen Böden „ausbrennen“. In extremen Jahren kann es dann zum Wachstumsstillstand und zur Zerstörung der Grasnarbe kommen. In den südlichsten Landesteilen wird die traditionelle Grünlandwirtschaft verschwinden, die Rationen für die Rinder werden aus Silomais und Feldfutter bestehen, oder es werden die letzten Rinderbetriebe die Tore schließen. In den raueren und den milden Lagen wird es im Sommer gute Bedingungen für die Silage- und Trockenfutterproduktion geben. Die Erträge werden auf kristallinen Böden in den Höhenstufen leicht zunehmen, auf

Kalkuntergrund und südexponierten Flächen werden wir auch hier das Sommerloch verspüren.

Bei Getreide und Raps kann es zur „rascheren“ Notreife und bei Mais und Kürbis zur raschen Abreife mit enormen Ertragseinbrüchen kommen. Die Abreife von Wein- und Obstsorten wird in den trockenen und heißen Sommermonaten oftmals rascher erfolgen. Der Zuckergehalt beim Wein wird, sofern die Blattmasse nicht zu früh geschädigt wird, höhere Klosterneuburger Grade erreichen. Beim Apfel kann der Säuregehalt allerdings unter den gewohnten Werten zu liegen kommen und die Haltbarkeit könnte dadurch gestört sein. Der Silomaisanbau wird sein Anbaugebiet in den besten Berglagen erweitern, sofern nicht der Maiswurzelbohrer in die Fruchtfolengestaltung eingreift. Einhergehend mit den höheren Temperaturen sind auch Pilzkrankheiten zu sehen, die sich viel rascher ausbreiten werden.

Abschließend sei neben den oben beschriebenen Problemkreisen angemerkt, dass durch geeignete Anpassungsmaßnahmen und Einsatz neuer Kulturen auch neue Chancen und Ertragsgewinne entstehen können. Bei allen Kulturen werden jedenfalls angepasste Sorten mit einer gewissen Resistenz gegen Trockenheit und verstärkten Krankheitsdruck zum Einsatz kommen. Auf diesem Gebiet ist in den nächsten Jahren intensive Forschungsarbeit von Nöten.

Danksagung: Dieses Projekt wurde vom Zukunftsfonds des Landes Steiermark gefördert. Meteorologische Daten von Messstationen wurden von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) und dem Hydrographischen Dienst in Österreich (HZB) bereitgestellt und landwirtschaftliche Ertragsdaten von der Bundesanstalt Statistik Austria. Die verwendete Klimasimulation wurde innerhalb des österreichischen Projektes „Research for Climate Protection: Model Run Evaluation (reclip:more)“ durchgeführt.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- Alcamo, J., J. Moreno, B. Nováky, M. Bindi, R. Corobov, R. Devoy, C. Giannakopoulos, E. Martin, J. Olesen, and A. Shvidenko (2007), Europe. In *Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M. L. Parry, O.F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Seiten 541–580. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Allen, G. A., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith (1998), Crop Evapotranspiration – guidelines for Computing Crop Water Requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper No 56, FAO, Rome, 300.
- Auer, I., R. Böhm, A. Jurkovic, W. Lipa, A. Orlik, R. Potzmann, W. Schöner, M. Ungersböck, Ch. Matulla, K. Briffa, P. Jones, D. Efthymiadis, M. Brunetti, T. Nanni, M. Maugeri, L. Mercali, O. Mestre, J. M. Moisselin, M. Begert, G. Müller-Westermeier, V. Kveton, O. Bochnicek, P. Stastny, M. Lapin, S. Szalai, T. Szentimrey, T. Cegnar, M. Dolinar, M. Gajic-Capka, K. Zaninovic, Z. Majstorovic, E. Nieplova (2007), HISTALP – **H**istorical **I**nstrumental **C**limatological **S**urface **T**ime Series of the Greater **A**lpine **R**egion, *International Journal of Climatology*, 27, pp. 17-46.
- Bayer, J. (2006), Das C# 2005 Codebook, Addison-Wesley Verlag, München, 1022.
- Boé, J., L. Terray, F. Habets, and E. Martin (2008), Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies, *Int. Journal of Climat.*, 27, pp. 1643-1655, DOI: 10.1002/joc.1602.
- Buchgraber, K., und G. Gindl (2004), Zeitgemäße Grünlandbewirtschaftung, 2. Auflage, Leopold Stocker Verlag, 192.
- Buchgraber, K., und A. Schaumberger, (2006), Grünlandbewirtschaftung in Österreich, Online-Fachzeitschrift des BMLFUW Jahrgang 2006, BMLFUW, 1-7.
- Burke, R. (2003), Getting to know ArcObjects – Programming ArcGIS with VBA, ESRI Press, Redlands, California, 422.
- Dettinger, M. D., D. R. Cayan, M. K. Meyer, and A. E. Jeton (2004), Simulated hydrologic responses to climate variations and change in the Merced, Carson, and American river basins, Sierra Nevada, California, 1900–2099, *Climatic Change*, 62, pp. 283—317.
- Doberenz, W., und T. Gewinnus (2006), Datenbankprogrammierung mit Visual C# 2005 – Grundlagen, Rezepte und Anwendungsbeispiele, Microsoft Press Deutschland, 1040.
- Dudhia, J. (2003), A Nonhydrostatic Version of the Penn State - NCAR Mesoscale Model: Validation Tests and Simulation of an Atlantic Cyclone and Cold Front, *Mon. Wea. Rev.*, 121, 1493–1513.
- ESRI (2004), ArcGIS Desktop Developer Guide, ESRI Press, Redlands, California, 335.

- Fu, P., and P.M. Rich, (1999), Design and Implementation of the Solar Analyst: an Arc-View Extension for Modeling Solar Radiation at Landscape Scales, <http://gis.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/-papers/pap867/p867.htm> (31.03.2009).
- Giorgi, F., and L. O. Mearns (1999), Introduction to special section: Regional climate modeling revisited, *J. Geophys. Res.* 104, pp. 6335—6352.
- Gobiet, A., H. Truhetz, and A. Riegler (2006), A climate scenario for the Alpine region, reclip:more project year 3, *WegCenter progress report*, Wegener Center for Climate and Global Change, Univ. of Graz, Austria.
(<http://www.-wegcenter.at/reloclim/publikationen>).
- Gobiet, A., G. Heinrich, H. Truhetz, and A. Schaumberger (2008a), Landwirtschaftliche Ertragsentwicklung und Trockengefährdung unter geänderten Klimabedingungen in der Steiermark – AgroClim1, *Projektbericht*, Wegener Center for Climate and Global Change, Univ. of Graz, Austria.
- Gobiet, A., A. A. Dalla-Via, F. Prettenhaler, and H. Truhetz (2008b), A Climate Change Scenario for Southern and Eastern Styria and Potential Impacts on Water Availability *Beiträge zur Hydrogeologie*, 56 (2007/08), 63-68.
- Haylock, M. R., N. Hofsta, A. M. G. Klein Tank, E. J. Klok, P. D. Jones, and M. New. (2008), A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation for 1950-2006, *J. Geophys. Res.*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD-010201.
- Han, D., P. O'Kiely, and D. SUN (2003), Application of Water-stress Models to estimate the Herbage Dry Matter Yield of a Permanent Grassland Pasture Sward Regrowth, *Bio-systems Engineering* 84 (1), 101-111.
- Heinrich, G. (2008), Klimawandel und Trockengefährdung in der Landwirtschaft: Eine Analyse für die Steiermark, *Wissenschaftlicher Bericht Nr. 20-2008*, Wegener Zentrum für Klima und globalen Wandel, Graz, Österreich, ISBN-13 978-3-9502308-8-8.
- Hewitt, C. D., and D. J. Griggs (2004), Ensembles-Based predictions of climate changes and their impacts, *Eos Trans. AGU*, 85, 566.
- INVEKOS (2007), INVEKOS-Datenpool des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- IPCC (2007), Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change, Fourth Assessment Report, Summary for Policymakers, <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg2.htm> (31.03.2009).
- Klein, S. A. (1977), Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces, *Solar Energy*, Vol. 19, Pergamon Press 1977, 325-329.
- Leggett J., R. J. Swart (1992), Emission scenarios for IPCC: an update, In *Climate Change 1992: the supplementary report to the IPCC scientific assessment edited by J.T. Houghton, B.A. Callander and S.K. Varney*, Seiten 75–95, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Loibl, W., A. Beck, M. Dorninge, F. Formayer, A. Gobiet, and W. Schöner, (2007) rec-
lip:more – Research for Climate Protection: Model Run Evaluation. *Final Report*, Aus-
trian Research Centers, Seibersdorf, Wien.
- Middleton, N., and D. S. G. Thomas (1992), *World Atlas of Desertification*, 69 pp., Ed-
ward Arnold, a division of Hodder and Stoughton Limited, Kent
- Mitchell, A. (1999), *The ESRI Guide to GIS Analysis. Volume 1: Geographic Patterns &
Relationships*, ESRI Press, Redlands, California, 186.
- Murer, E. (2009), Überprüfung und Verbesserung der Pedotransferfunktion zur Ermittlung
der Wasserspeicherfähigkeit im Boden, Abschlussbericht Zl. 888-384/113/08 Tö, 54 S.,
Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt,
Petzenkirchen.
- Murer, E., J. Wagenhofer, F. Aigner, und M. Pfeffer, (2004), Die nutzbare Feldkapazität
der mineralischen Böden der landwirtschaftlichen Nutzfläche Österreichs, Schriftenrei-
he BAW, 20, 72-78.
- Petzold, C. (2005), *Microsoft Windows Forms-Programmierung mit Visual C# 2005*,
Microsoft Press Deutschland, 385 S.
- Roeckner E., G. Baeuml, L. Bonaventura, R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hage-
mann, I. Kirchner, L. Kornblüh, E. Manzini, A. Rhodin, U. Schlese, U. Schulzweida, .
A. Tompkins (2003), *The Atmospheric General Circulation Model ECHAM5 Part 1:
Model Description, Report (349)*, Max Planck Institut für Meteorologie (MPI), Ham-
burg.
- Schaumberger, A. (2006), Implementierung des Trockenschadenmodells in einem GIS als
Grundlage für die praktische Anwendung, Bericht über das 2. Klimaseminar zum The-
ma "Klimaforschung für die Grünlandwirtschaft", HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 41-
77.
- Schaumberger, A. (2007), GIS zur Bestimmung von Grünlanderträgen - Implementierung
eines Ertragmodells, Master Thesis, Zentrum für Geoinformatik, Universität Salzburg,
103.
- Schaumberger, A. (2008), Applikation von Klimamodelldaten für eine hoch aufgelöste
räumliche Modellierung der potentiellen Evapotranspiration als Indikator für Trocken-
heit: Eine Analyse für die Steiermark, In Abschlussbericht AgroClim1: Landwirtschaft-
liche Ertragsentwicklung und Trockengefährdung unter geänderten Klimabedingungen
in der Steiermark, Amt der Stmk. Landesregierung, Fachabteilung 10A, Teil III, 81-134.
- Schaumberger, A. (2009), Räumliche Modellierung von Grünlanderträgen unter Berück-
sichtigung von Witterungseinflüssen, Veröffentlichungen des LFZ Raumberg-
Gumpenstein. In Druck.
- Schaumberger, A., J. Eitzinger, and H. Formayer (2008), Räumliche Modellierung der po-
tentiellen Evapotranspiration. In: *Strobl, J., T. Blaschke und G. Griesebner (Eds.): An-
gewandte Geoinformatik 2008*, Beiträge zum 20. AGIT-Symposium 2008. Wichmann
Verlag, Heidelberg, 626-635.
- Schwichtenberg, H. (2006), *Microsoft .net 2.0 Crashkurs*, 2. Auflage, Microsoft Press
Deutschland, 529.

- Sharp, J. (2006), Microsoft Visual C# 2005 Schritt für Schritt, Microsoft Press Deutschland, 600 S.
- Solomon, S., D. Qin, M. Maning, R. B. Alley, T. Berntsen, N. L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidtaisong, J. M. Gregory, G. C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B. J. Hoskins, F. Joss, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Sommerville, T. F. Stocker, P. Whetton, R. A. Wood, and D. Wratt (2007), In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. and Miller, H. L. (eds.)], Technical Summary, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Tomlinson, R. (2003), *Thinking about GIS. Geographic Information System Planning for Managers*, ESRI Press, Redlands, California, 283 S.
- Trnka, M., J. Eitzinger, G. Gruszczynski, K. Buchgraber, R. Resch, and A. Schaumberger (2006), A simple statistical model for predicting herbage production from permanent grassland, *Grass and Forage Science* 61 (3), 253-271.
- Uppala, S., Kållesberg, P., A. Hernandez, Saarinen S., Fiorino, M., X. Li, K. Onogi, U. Andrea, and V., Da Costa Bechthold (2004), ERA-40: ECMWF 45-years reanalysis of the global atmosphere and surface conditions 1957-2002. ECMWF Newsletter (101), ECMWF.
- Wood, A. W., L. R. Leung, V. Sridhar, and D. P. Lettenmaier (2004), Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs, *Climatic Change*, 62, pp. 189—216.
- ZAMG (2003), *Meldungen zu Unwetter und Witterungsbedingten Schäden in der Wirtschaft im Jahr 2003*. Meldung, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, Österreich. Erhältlich unter <http://www.zamg.ac.at/>.
- Zeiler, M. (1999): *Modeling our World – The ESRI Guide to Geodatabase Design*. ESRI Press, Redlands, California, 199.
- Zeiler, M. (2001): *Exploring ArcObjects. Vol. I – Applications and Cartography*, ESRI Press, Redlands, California, 725.
- Zeiler, M. (2001): *Exploring ArcObjects. Vol. II – Geographic Data Management*, ESRI Press, Redlands, California, 725.