

Räumliche Analyse klimabedingter Veränderungen im Wasserhaushalt landwirtschaftlicher Kulturen

A. Schaumberger¹, G. Heinrich² und A. Gobiet²

1. Einleitung und Problemstellung

Eine Veränderung des Klimas kann mittlerweile durch zahlreiche Studien und Untersuchungen belegt werden (vgl. IPCC, 2007). Mit Hilfe von Klimamodellen werden 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 Regionen wie zum Beispiel die Steiermark untersuchen zu können, ist es notwendig, die Daten von einem globalen auf einen regionalen Maßstab zu transformieren, was mit Hilfe eines regionalen Klimamodells realisiert wurde. Zur weiteren Verfeinerung auf lokaler Ebene wird ein Geographisches Informationssystem (GIS) eingesetzt. Auf dieser großmaßstäblichen Ebene spielen beispielsweise die räumlich hoch aufgelöste Topographie und davon abgeleitete Höhenabhängigkeiten eine große Rolle.

Die Untersuchung von Klimafolgen wird in der vorliegenden Arbeit auf die Fragestellungen der landwirtschaftlichen Flächennutzung konzentriert. Die Anforderungen diverser landwirtschaftlicher Kulturen an klimatische Rahmenbedingungen sind jedoch äußerst unterschiedlich, weshalb als Referenzkultur das Grünland ausgewählt wurde. Gegenstand der Untersuchung ist damit eine an die Grünlandnutzung angepasste räumliche Modellierung von Bodenwasserbilanz und Wasserstress unter Einbeziehung von Klimaszenariodaten.

Die Trockengefährdung ist für die Landwirtschaft in der Steiermark, dem Untersuchungsgebiet dieser Arbeit, ein wichtiger Aspekt des Klimawandels; vor allem im südöstlichen Landesteil ist Wasser während der Vegetationsperiode oft ein limitierender Faktor. Im Vergleich von Klimaszenariodaten aus einer vergangenen Periode (1981 bis 1990) mit jenen einer zukünftigen (2041 bis 2050) wird eine relative Änderung der räumlichen Verteilung von Bodenwasserverhältnissen beschrieben, die Anhaltspunkte für mögliche Anpassungsstrategien liefern können.

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 Einschrän-

¹ Mag. Andreas Schaumberger, MSc (GIS), Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Referat für Geoinformation im ländlichen Raum, Altdorfing 11, A-8952 Irdning, andreas.schaumberger@raumberg-gumpenstein.at

² Mag. Georg Heinrich, Dr. Andreas Gobiet, Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel und Institut für Geophysik, Astrophysik und Meteorologie, Universität Graz, Leechgasse 25, A-8010 Graz

kung für die Grünlandbewirtschaftung trifft hauptsächlich auf das Berggebiet zu, das einen Großteil der Fläche einnimmt (Buchgraber und Gindl, 2004). 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 %. (INVEKOS, 2007).

Abbildung 1 zeigt die Standorte der landwirtschaftlichen Betriebe entsprechend ihrer Klassifizierung. 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 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 *Abbildung 1* 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.

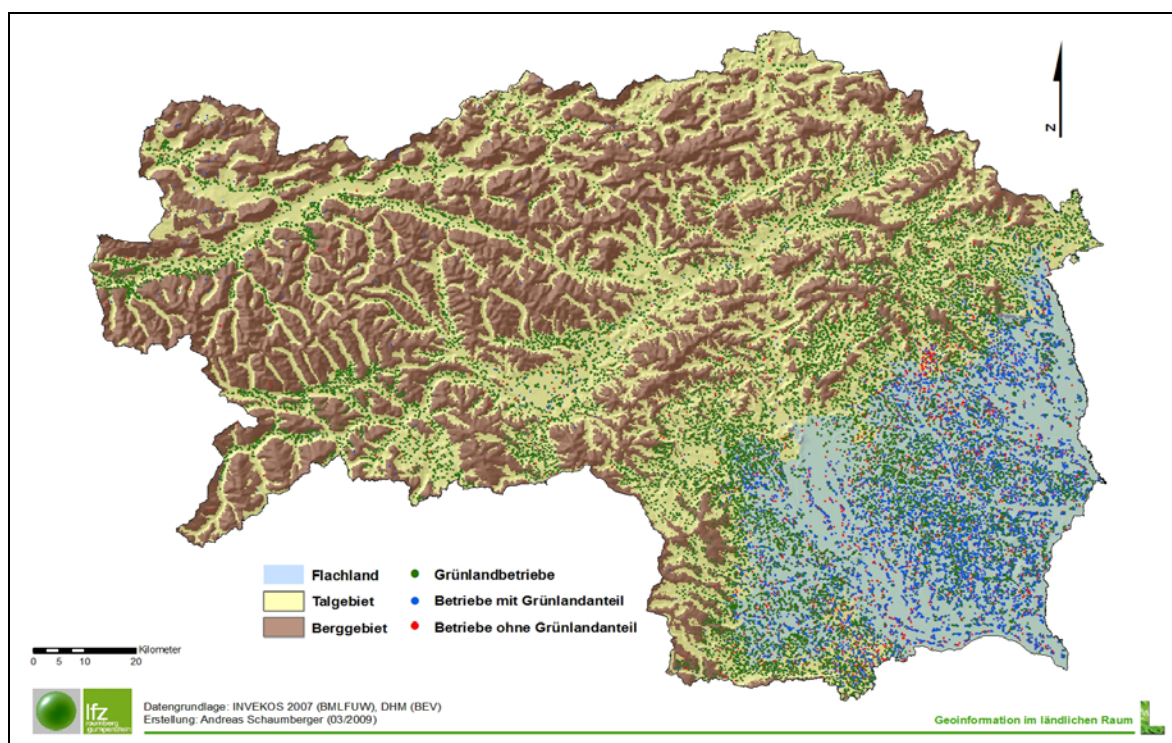


Abbildung 1: Räumliche Verteilung der landwirtschaftlichen Betriebstypen im Flachland und Berggebiet der Steiermark (2007)

Die Standorte der Betriebe entsprechen naturgemäß der räumlichen Verteilung ihrer Flächen, wie sie in *Abbildung 2* relativ zur Gemeindefläche zu sehen sind.

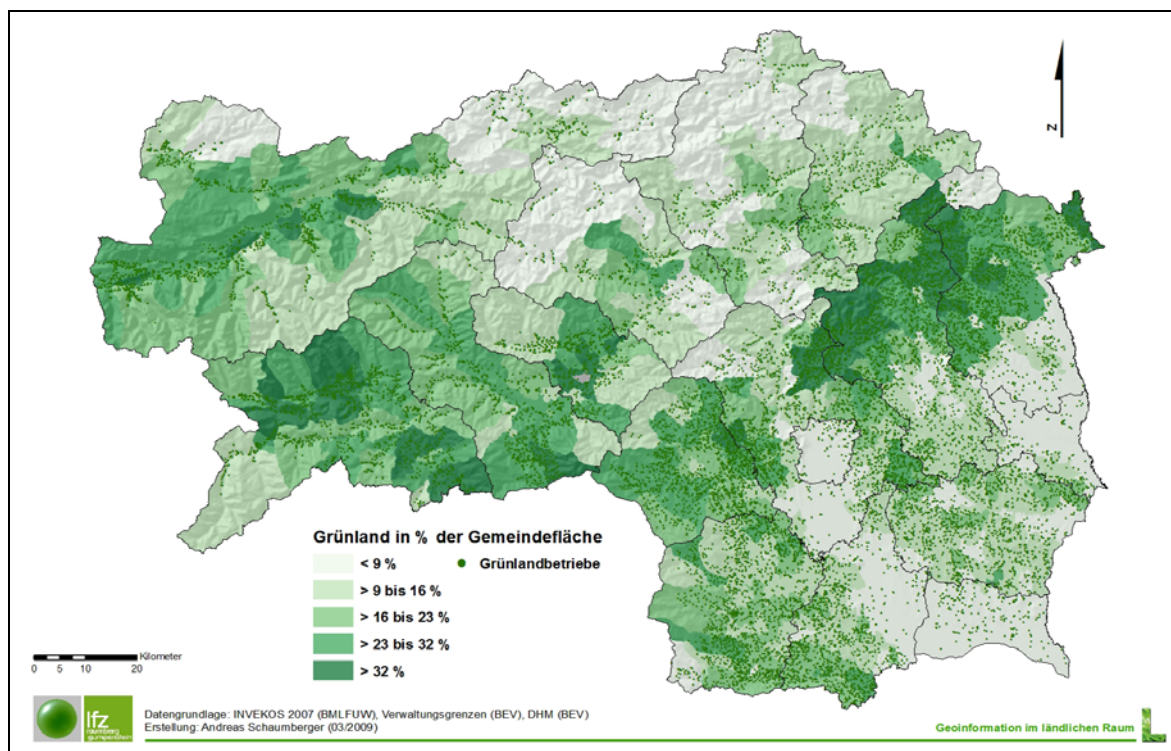


Abbildung 2: Räumliche Verteilung der Grünlandnutzungsintensität (bezogen auf Gemeindeflächen) und der Grünlandbetriebe in der Steiermark (2007)

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.

2. Material und Methoden

2.1. Systemumgebung

Eine leistungsfähige Hardware ist die Voraussetzung für die Durchführung der aufwendigen 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 file-basiert 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.

2.2. Datengrundlage aus Klimasimulationen

Die heutzutage verwendeten globalen Zirkulationsmodelle (sog. GCMs) sind gut in der Lage, das Klimasystem auf globaler bis kontinentaler Skala 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 (sog. 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 wirksamer Prozesse zu erreichen (z.B. Giorgi und Mearns, 1999). Die meisten regionalen Klimamodelle werden heutzutage typischerweise mit einer horizontalen Gitterweite 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 grob aufgelösten 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). 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 quantitativen Abschätzungen gibt (Gobiet *et al.*, 2008). 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 des regionalen Modells 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:** Die Randbedingungen des regionalen Modells sind dem globalen Klimamodell *ECHAM5*, basierend gemessenen Treibhausgaskonzentrationen entnommen. Die Simulation wurde für die vergangene Dekade 1981-1990 durchgeführt und dient als Vergleichsbasis zur *Klimaszenario-Simulation*.

Aus der Differenz zwischen Ergebnissen der Klimaszenario- und der Kontroll-Simulation lässt sich der Klimawandel ableiten wobei sich gröbere Modellfehler durch die Differenzbildung aufheben. Zusätzliche Fehlerkorrekturen wurden mit Hilfe von empirisch-statistischen Methoden durchgeführt, was die Qualität der Ergebnisse stark verbessert (Themeßl und Gobiet, 2008)

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 *Abbildung 3* dargestellt.

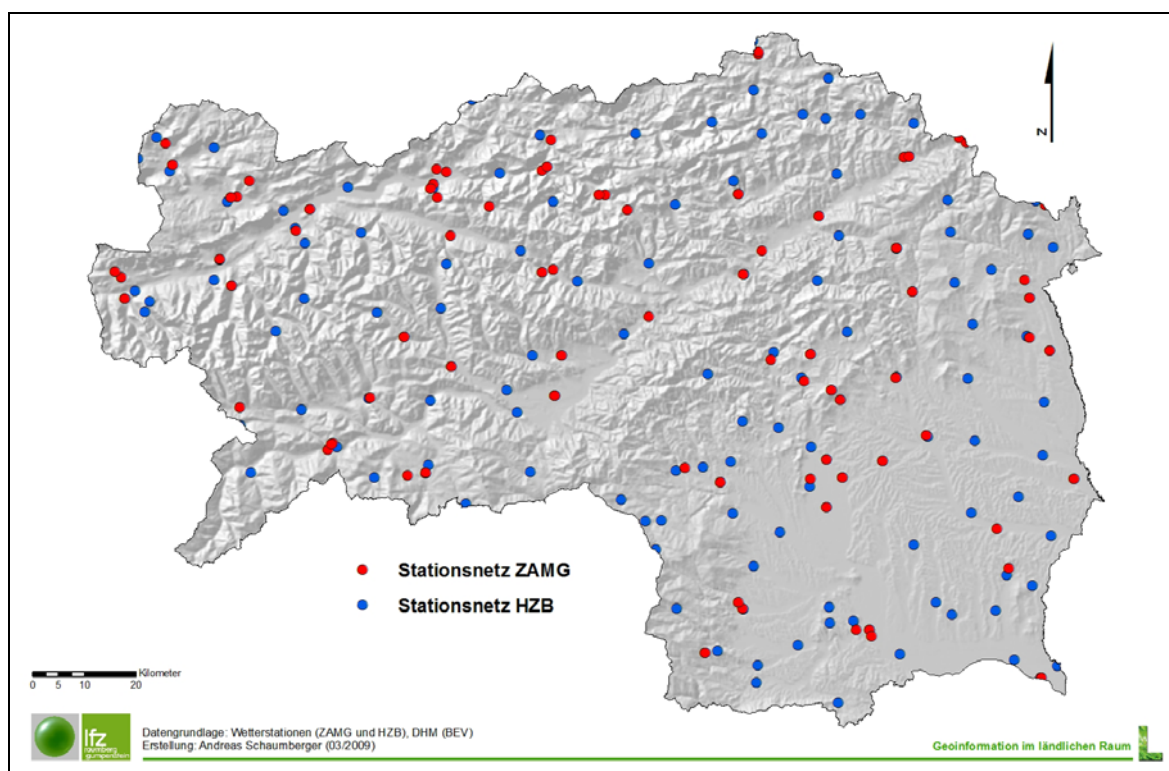


Abbildung 3: Räumliche Verteilung der auf Wetterstationen bezogenen Interpolationsstützpunkte der Klimadaten (ZAMG: Temperatur, Luftfeuchte, Strahlung und Wind; ZAMG & HZB: Niederschlag)

Alle verwendeten meteorologischen Parameter, das sind Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind, Globalstrahlung und Niederschlag, stammen aus den korrigierten Klimaszenario-Simulationen. Für die geostatistische Interpolation, 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 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.

2.3. Modellgrundlagen zur Berechnung des ertragsrelevanten Wasserhaushalts

Die Klimabedingungen der zwei Untersuchungsperioden (1981 bis 1990 und 2041 bis 2050) werden 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) zur Schätzung von Grünlanderträgen und damit zur Untersuchung von konkreten Auswirkungen der Klimaveränderung herangezogen. Das empirisch statistische Modell basiert auf einer umfangreichen Kalibrierung mit langjährigen Grünlandversuchsdaten (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. Für die Umsetzung werden verschiedene Modelle benötigt, deren Ablauf hierarchisch und aufeinander abgestimmt erfolgt. In *Abbildung 4* sind die wichtigsten Komponenten schematisch dargestellt. Als Inputdaten werden die Klimadaten, das DHM sowie ein Datensatz zur Beschreibung des Bodens (nutzbare Feldkapazität) einbezogen.

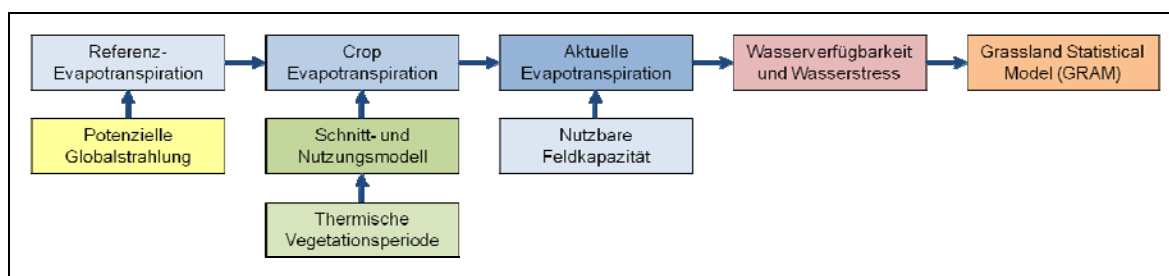


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Programmablaufs mit den Hauptmodellkomponenten

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. Dafür werden Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Globalstrahlung und Wind nach dem Modell von Allen *et al.* (1998) verwendet.

Zwischen Referenz-Evapotranspiration und Seehöhe besteht ein linearer Zusammenhang, der im Hinblick auf die geostatistische Interpolation wie folgt genutzt werden kann: Man ermittelt zunächst die Gleichung der Regressionsgeraden mit der potentiellen Evapotranspiration als abhängiger sowie der Seehöhe als unabhängiger Variablen für die Mittelwerte eines Monats. Anschließend werden die täglichen Residuen an den Messstationen berechnet, also die Differenz zwischen den jeweiligen Messwerten und jenen Werten, welche man aufgrund des Regressionsmodells erhält. Damit entsteht ein flächendeckender Datensatz der interpolierten Residuen. Diese Residuen werden im Anschluss mittels Ordinary Kriging interpoliert und zum Raster des höhenabhängigen Anteils der potentiellen Evapotranspiration addiert (Schaumberger *et al.*, 2008). Diese Methode findet in der räumlichen Modellierung meteorologischer Information breite Anwendung (Dobesch *et al.*, 2007) und wird in der Literatur als *Georegression* (Blöschl und Merz, 2002), *Elevationally Detrended Ordinary Kriging* (Li *et al.*, 2003) oder *Simple Kriging with Varying Local Means* (Goovaerts, 1997) beschrieben.

2.5. Modell der potenziellen Globalstrahlung

Die Globalstrahlung ist im Zusammenhang mit der Ertragsmodellierung einer der wichtigsten Parameter und wird für die Verbesserung der räumlichen Interpolation der Referenz-Evapotranspiration benötigt. 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. 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 *Abbildung 5* ist der Unterschied zwischen den Varianten schematisch dargestellt. Die Veränderungen im Einstrahlungswinkel aufgrund der verschiedenen Oberflächenstruktur führen auch zu unterschiedlichen Ergebnissen in den Strahlungssummen.

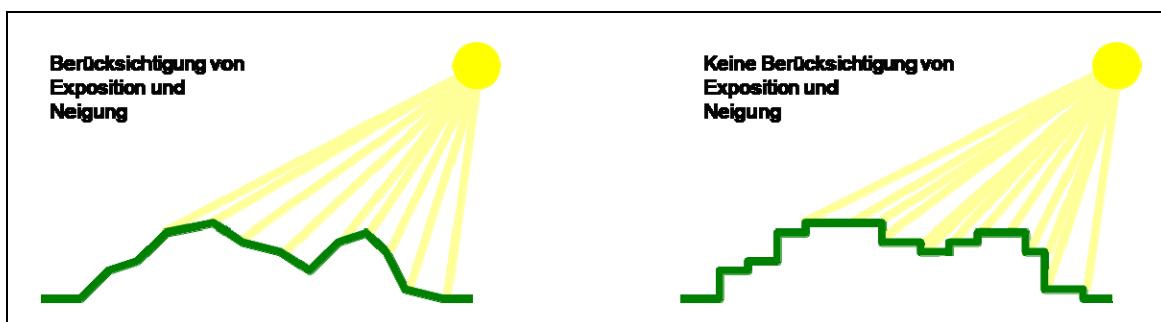


Abbildung 5: Schema der Berücksichtigung unterschiedlicher Geländeoberflächen

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.

2.6. 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.

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. 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 Ergebnistraster 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.

2.7. 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. Jeder Aufwuchs benötigt eine gewisse Zeit des Wachstums bis zur Ernte und mit Zunahme der Schnittfrequenz 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. 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.

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.

2.8. Modell der Bodenwasserbilanz

Das Bodenwasserbilanzmodell stellt das zentrale Modell im Vorfeld des eigentlichen Ertragmodells (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 Wirtschaftsgrünlandes). Die aktuelle Evapotranspiration beschreibt also jene Verdunstungsmenge, die aufgrund der tatsächlichen Wasserverhältnisse im Boden stattfindet; bei der Referenz-Evapotranspiration wird hingegen von einem wassergesättigtem Zustand ausgegangen.

2.8.1. Crop Evapotranspiration

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. Diese Faktoren entsprechen den Entwicklungsstadien einer bestimmten Kultur im Verlauf der Vegetationsperiode. Beginnend mit 0.4 als Initialisierungsphase wird der Wert bis zur Schnittnutzung auf 1.2 erhöht und nimmt am Ende der Nutzungsperiode um 0.3 ab. Die Crop Evapotranspiration wird auf Tagebasis mit

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (2.8-1)$$

ermittelt. ET_c ist die Crop Evapotranspiration [mm d^{-1}] der Grünlandfläche, K_c der Pflanzenfaktor (crop coefficient) und ET_0 die Referenz-Evapotranspiration [mm d^{-1}]. *Abbildung 6* zeigt beispielhaft den Verlauf dieser Werte in einer Vegetationsperiode.

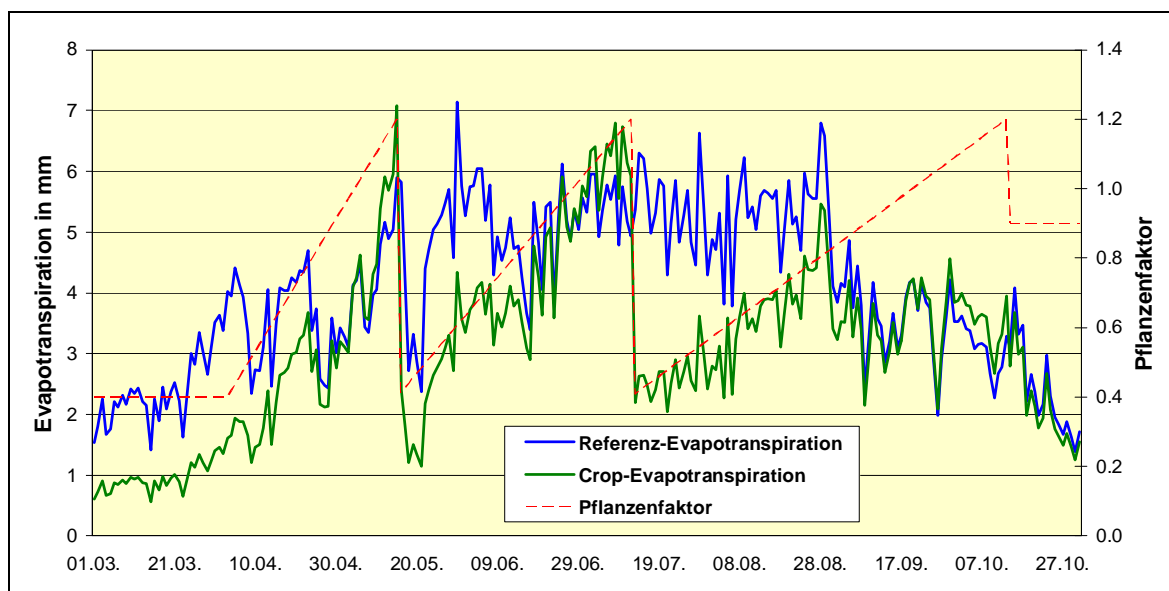


Abbildung 6: Zusammenhang von Evapotranspiration und Pflanzenfaktor

Die räumliche Implementierung 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 *Abbildung 6* ist der Verlauf dieses Faktors sehr einfach nachzuvollziehen – die Umsetzung als kontinuier-

liche Oberfläche erfordert allerdings eine komplexe und äußerst rechenintensive Raster-Algebra-Operation. Die Rasteroberfläche des Pflanzenfaktors für den 30. Juni 1985 in *Abbildung 7* zeigt beispielhaft die unterschiedlichen Entwicklungszustände des Pflanzenbestandes in Abhängigkeit der Schnitffrequenz. Die Anforderung an diese täglichen Ergebnisse besteht darin, dass für jede einzelne Zelle der Verlauf über die Vegetationsperiode der in *Abbildung 6* dargestellten Kurve entspricht – natürlich abhängig von Schnitffrequenz und Schnittzeitpunkt, welche für jede Zelle individuell festgelegt ist.

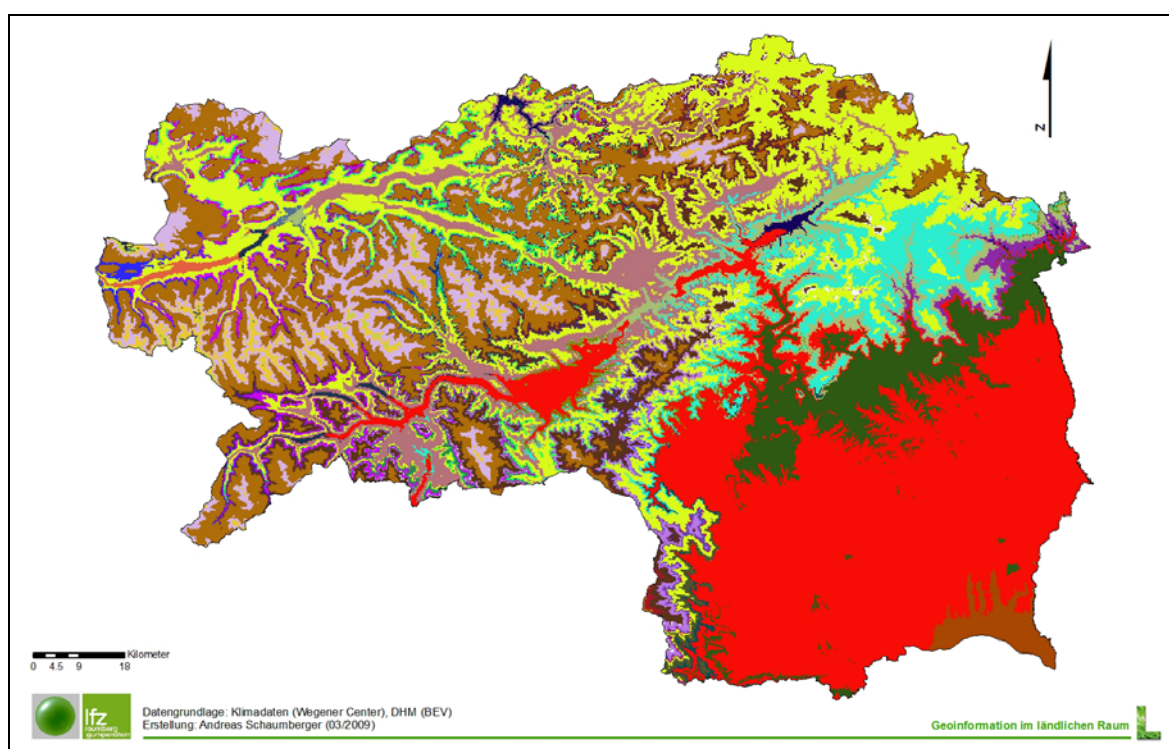


Abbildung 7: Beispiel einer Pflanzenfaktor-Rasteroberfläche für den 30. Juni 1985 (EH5)

2.8.2. *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. 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, d.h. die Ergebnisse sind auf jene Fläche eingeschränkt, für die Werte der nutzbaren Feldkapazität zur Verfügung stehen. Die Integration in das Bodenwasserbilanzmodell erfolgt in Form von Rasterdatensätzen.

2.8.3. *Aktuelle 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:

$$ET_{c,adj} = ET_0 \cdot K_c \cdot K_s \quad (2.8-2)$$

$ET_{c,adj}$ ist die aktuellen Evapotranspiration [mm d^{-1}], welche aus der Gewichtung der Referenz-Evapotranspiration ET_0 mit dem Pflanzenfaktor K_c und dem Wasserstresskoeffizienten K_s resultiert. Die Berechnung von K_s ist umfangreich und erfolgt über den Verlauf der Vegetationsperiode kumulativ. Im Rahmen des Wasserspeichervermögen des Bodens mit Einbeziehung der Tiefenversickerung wird die Bodenwasserabsenkung ermittelt. Je mehr Wasser dem Boden entzogen wird, desto höher ist die Bodenwasserabsenkung, die nur dann wieder zurückgeht, wenn Wassereintrag in Form von Niederschlag erfolgt.

2.9. 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 zahlreichen Ertragsmessungen kalibriert wurde (Schaumberger, 2007). 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 berücksichtigt das akkumulierte Verhältnis vom Vegetationsbeginn weg, der kurzfristige Wasserstress nur jenes der letzten 6 Tage.

Im Zusammenziehen des lang- und kurzfristigen Faktors zu einem gemeinsamen Parameter wird die gegebene Wasserverfügbarkeit auf einer Grünlandfläche beschrieben und zu einem Growth Supporting Factor weiter verarbeitet. 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 Growth Supporting Factors bei der Akkumulation von täglicher Temperatur und Globalstrahlung ein. Die daraus resultierende effektive Temperatur und effektive Globalstrahlung sind die um den Growth Supporting Factor verminderten täglichen Temperatur- und Strahlungswerte, die über den Zeitraum eines Grünlandaufwuchses akkumuliert werden. Die beiden Werte werden als Prädiktoren in eine empirische multiple Regressionsgleichung für die Abschätzung des Grünlandertrages einbezogen.

2.10. 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 einer 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 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, zeigt jedoch die Entwicklung und den Zusammenhang mit anderen Daten.

3. Ergebnisse und Diskussion

Die zwei Standorte für die Evaluierung der Ergebnisse in Form von Zeitreihen wurden so ausgewählt, dass die wichtigsten klimatischen Gebiete mit einem hohen Anteil an Grünlandbewirtschaftung abgedeckt werden. Gumpenstein (Bezirk Liezen) 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 zweite Stationen Kirchberg/Walde (Bezirk Hartberg) befindet sich im Übergang von Flachland zum Bergland und deckt räumlich jenen Bereich ab, der im Zuge der klimatischen Veränderungen mit großer Wahrscheinlichkeit von Wasserstress betroffen sein wird. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die in Abschnitt 2 beschriebenen Modelle, wobei kartographische Darstellungen beispielhaft ausgewählt wurden.

3.1. Repräsentation der Topographie durch den Globalstrahlungsfaktor

Die verhältnismäßige Gegenüberstellung der zwei in Abschnitt 2.5 beschriebenen Ansätze zur Berechnung der potenziellen Globalstrahlung liefert die durch die topographische Variabilität hervorgerufenen Änderungswerte. *Abbildung 8* 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.

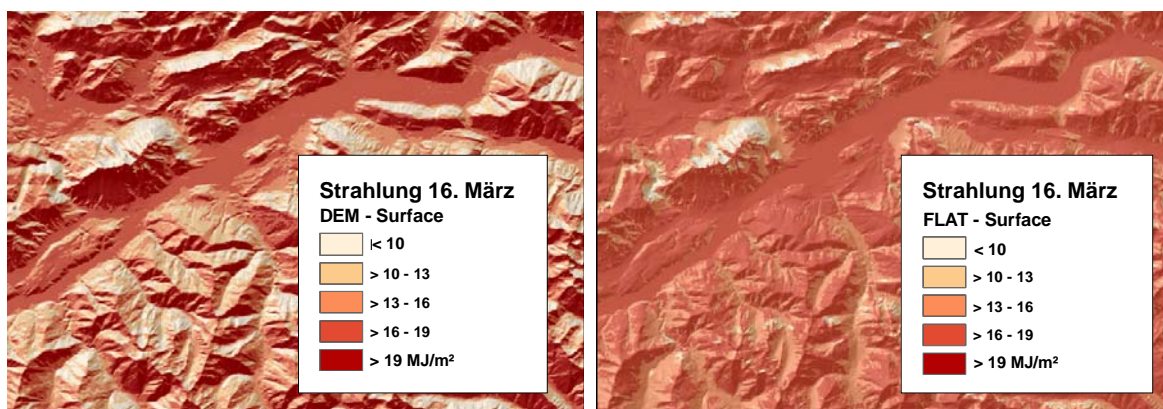


Abbildung 8: Strahlungsraster mit und ohne Berücksichtigung von Exposition und Neigung

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 *Abbildung 9*) ihre quantitative Entsprechung und können als kontinuierliche Wertebereiche zur wesentlichen Verbesserung der stationsbasierten, geostatistischen Interpolationsoberfläche der Referenz-Evapotranspiration herangezogen werden.

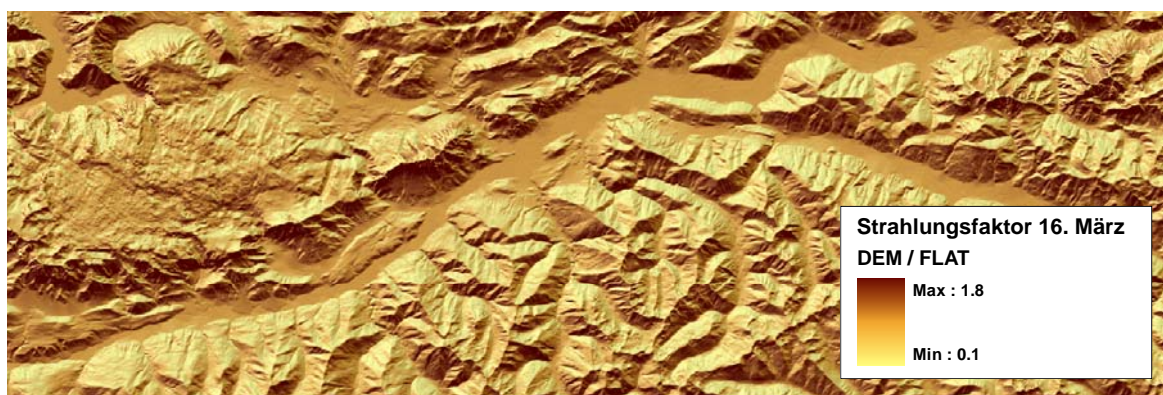


Abbildung 9: Rasterdaten der topographiebedingten Änderung in den Strahlungswerten

3.2. Referenz-Evapotranspiration

Da von einem wassergesättigten Boden ausgegangen wird, gibt die Referenz-Evapotranspiration 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. *Abbildung 10* zeigt beispielhaft die durchschnittliche räumliche Verteilung der Referenz-Evapotranspiration für den Monat August in der Periode 1981 bis 1990), *Abbildung 11* die Ergebnisse für die zukünftige Periode 2041 bis 2050.

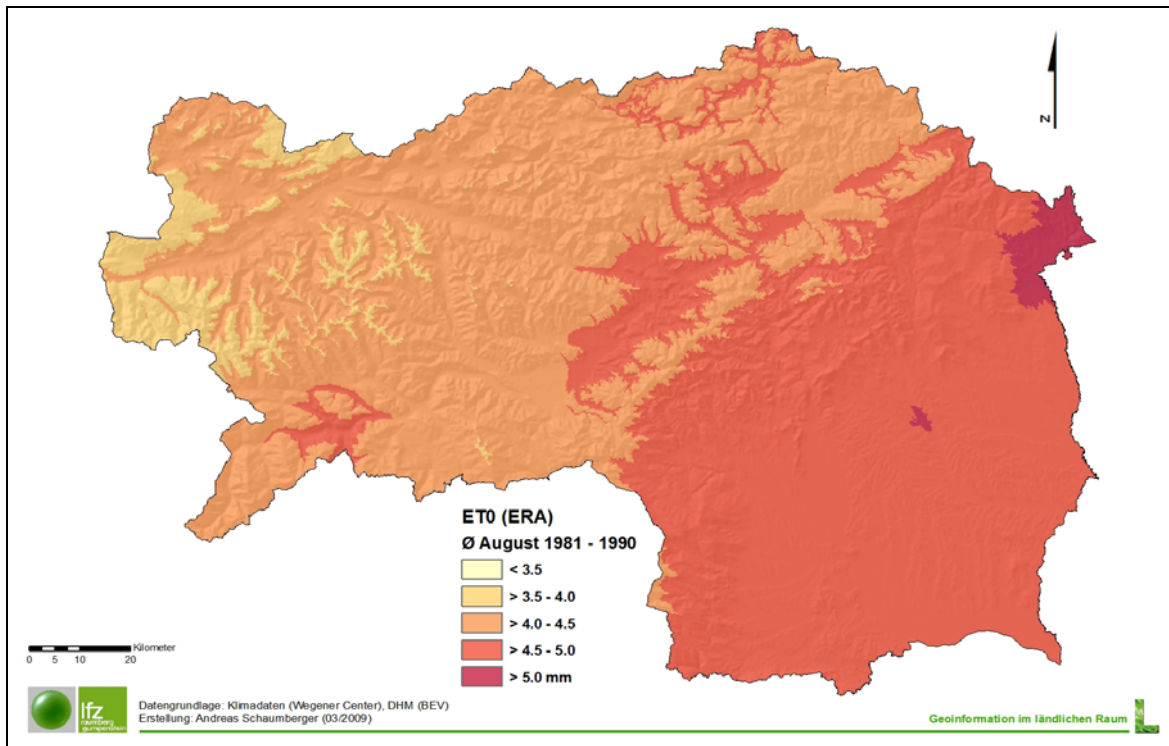


Abbildung 10: Räumliche Verteilung der Referenz-Evapotranspiration im August der Dekade 1980

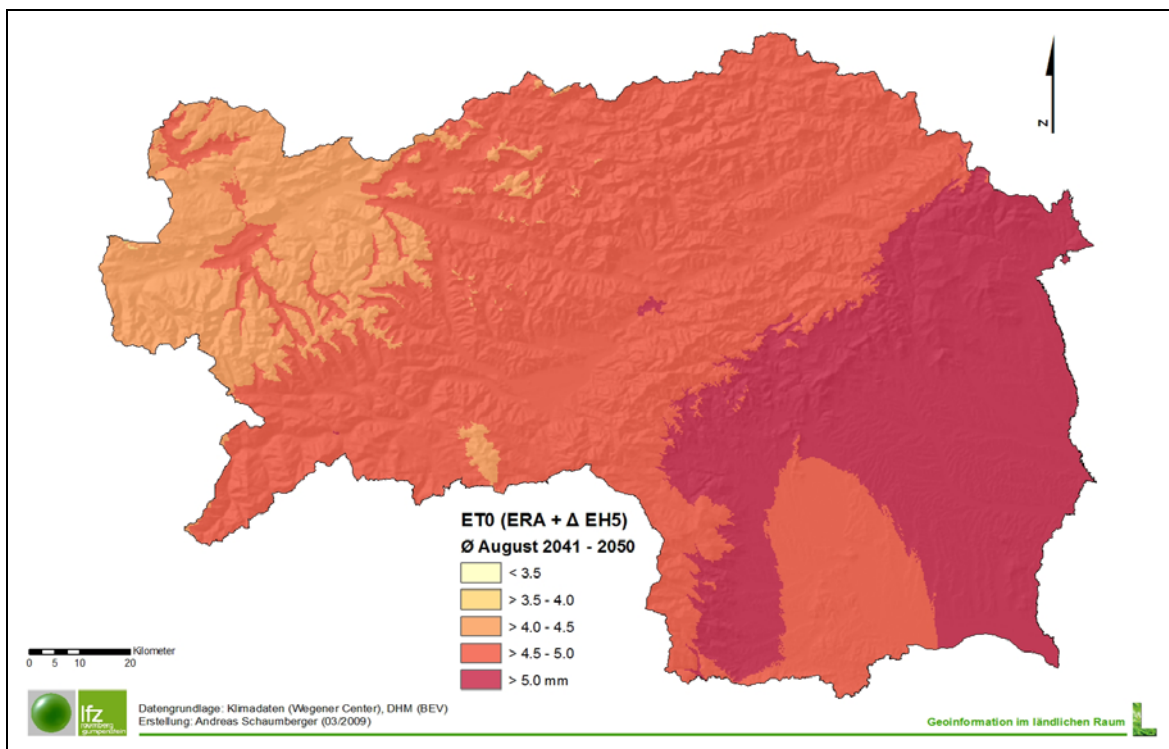


Abbildung 11: Räumliche Verteilung der Referenz-Evapotranspiration im August der Dekade 2040

In *Abbildung 10* 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 *Abbildung 11* zeigen eine generelle Erhöhung der Referenz-Evapotranspiration – besonders fällt hier die Ausbreitung des höheren Verdunstungs-Niveaus vom Flachland auf das angrenzenden Berggebiet auf.

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 *Abbildung 12* gesondert dargestellt. Im Bergland ist eine überproportionale Erhöhung der Referenz-Evapotranspiration zu beobachten, die im August bis in hohe Lage hinaufreicht.

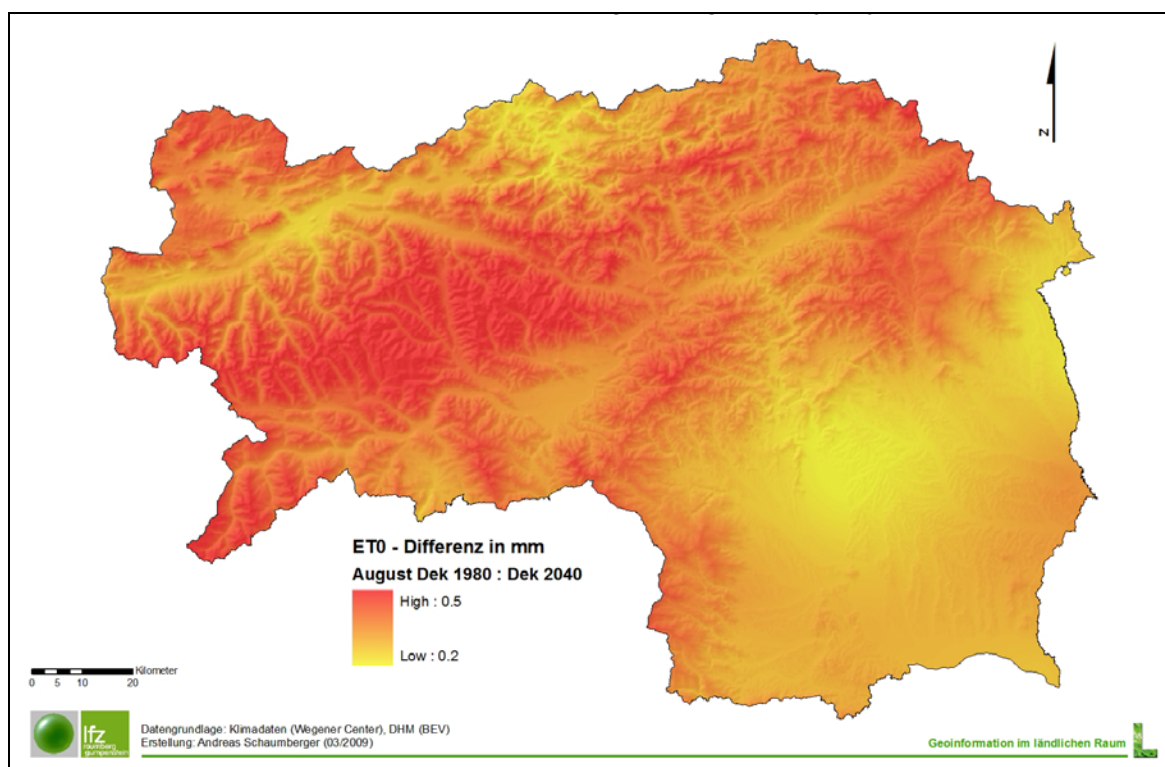


Abbildung 12: Differenzen der Referenz-Evapotranspiration im August der Dekaden 1980 und 2040

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 Ergrünerens 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 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 (Abbildung 13) und Kirchberg/Walde (Abbildung 14) wird die Temperaturänderung im Dekadenmittel 1980 und 2040 dargestellt.

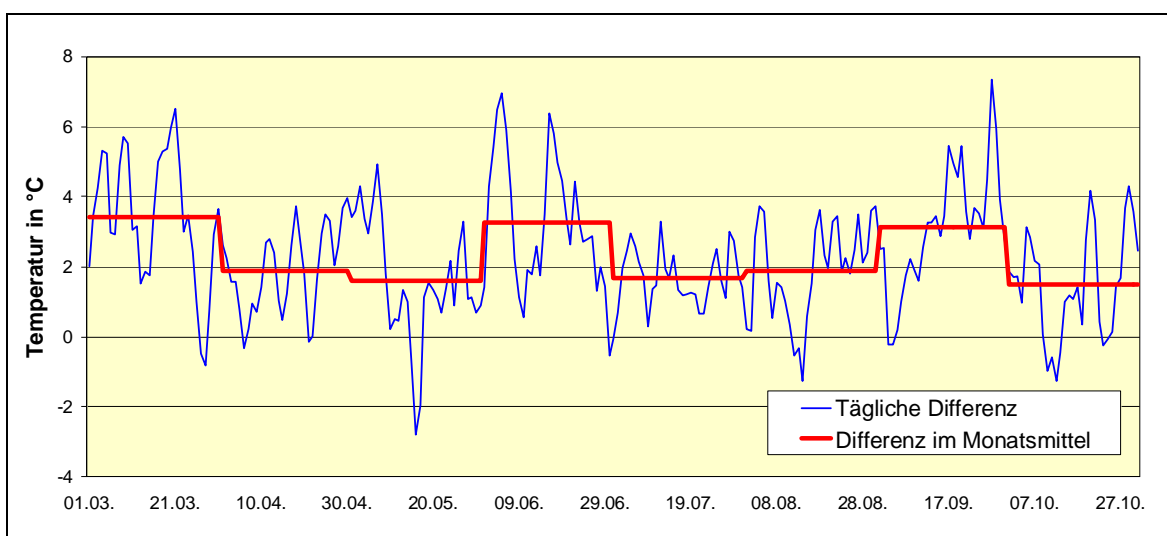


Abbildung 13: Differenz der mittleren Temperatur von Dekade 1980 und 2040 in Gumpenstein

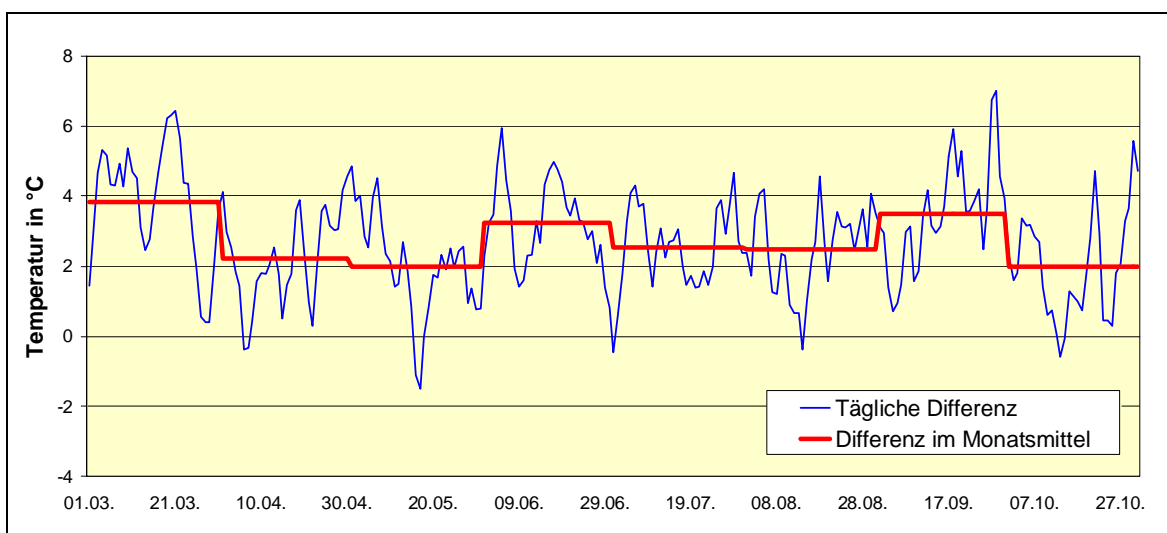


Abbildung 14: Differenz der mittleren Temperatur von Dekade 1980 und 2040 in Kirchberg/Walde

Die beispielhaft dargestellte Temperaturveränderung wirkt sich auch auf die Bestimmung der Vegetationsperiode aus und bringt deutliche räumliche und zeitliche Verschiebungen. Die Abbildungen 15 und 16 zeigen die Veränderungen der Vegetationsdauer bezogen auf kontinuierliche Temperaturoberflächen auf Tagesbasis, wobei die täglichen Temperaturdaten innerhalb einer Dekade gemittelt und anschließend mittels Georegression räumlich interpoliert wurden. 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 Gebie-

ten 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.

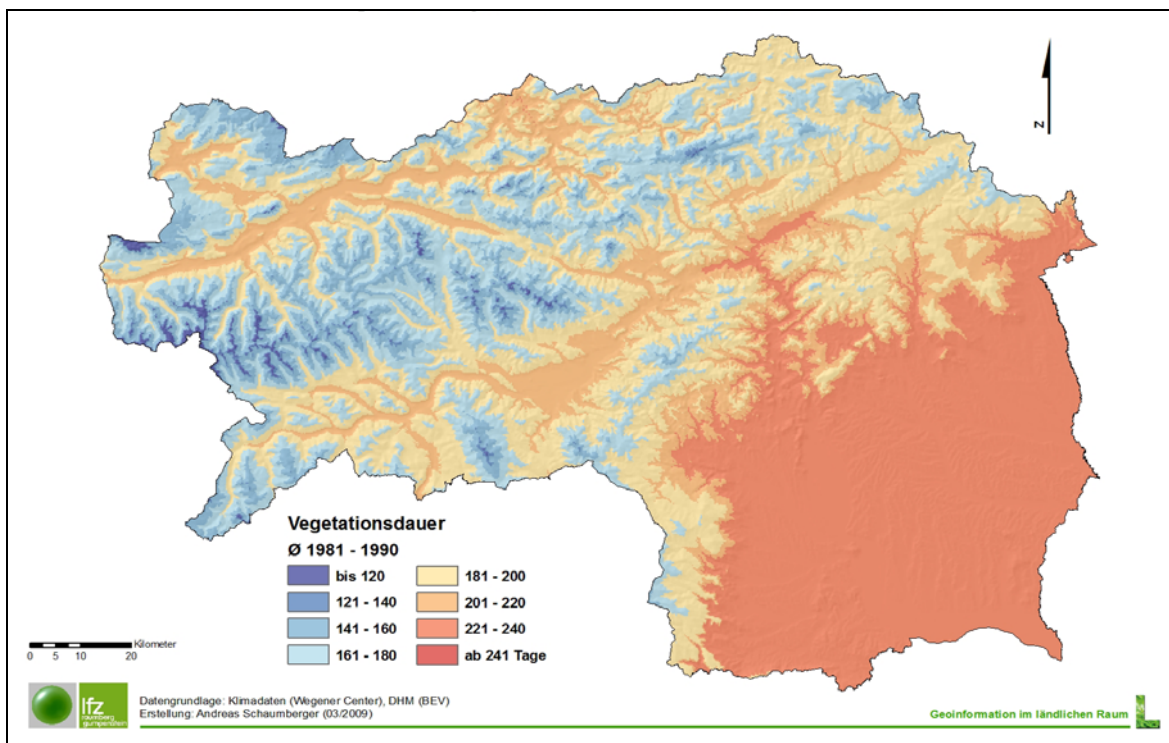


Abbildung 15: Dauer der Thermischen Vegetationsperiode in der Dekade 1980

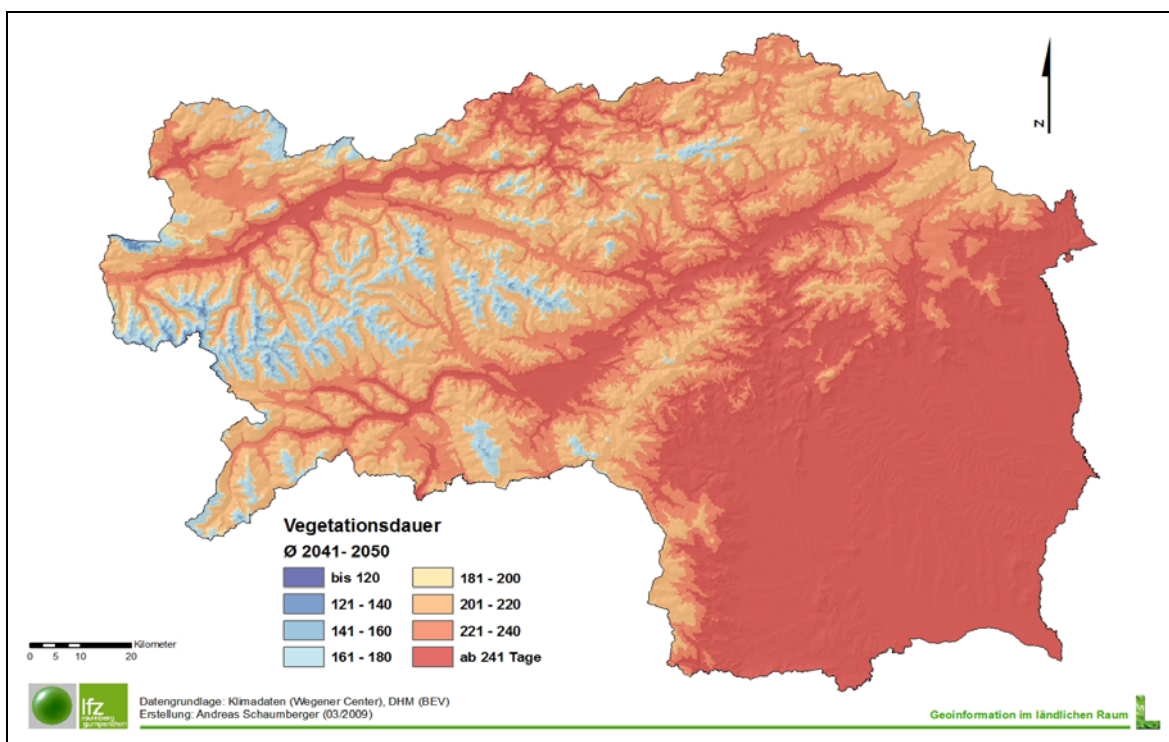


Abbildung 16: Dauer der Thermischen Vegetationsperiode in der Dekade 2040

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 (siehe *Abbildungen 17* und *18*).

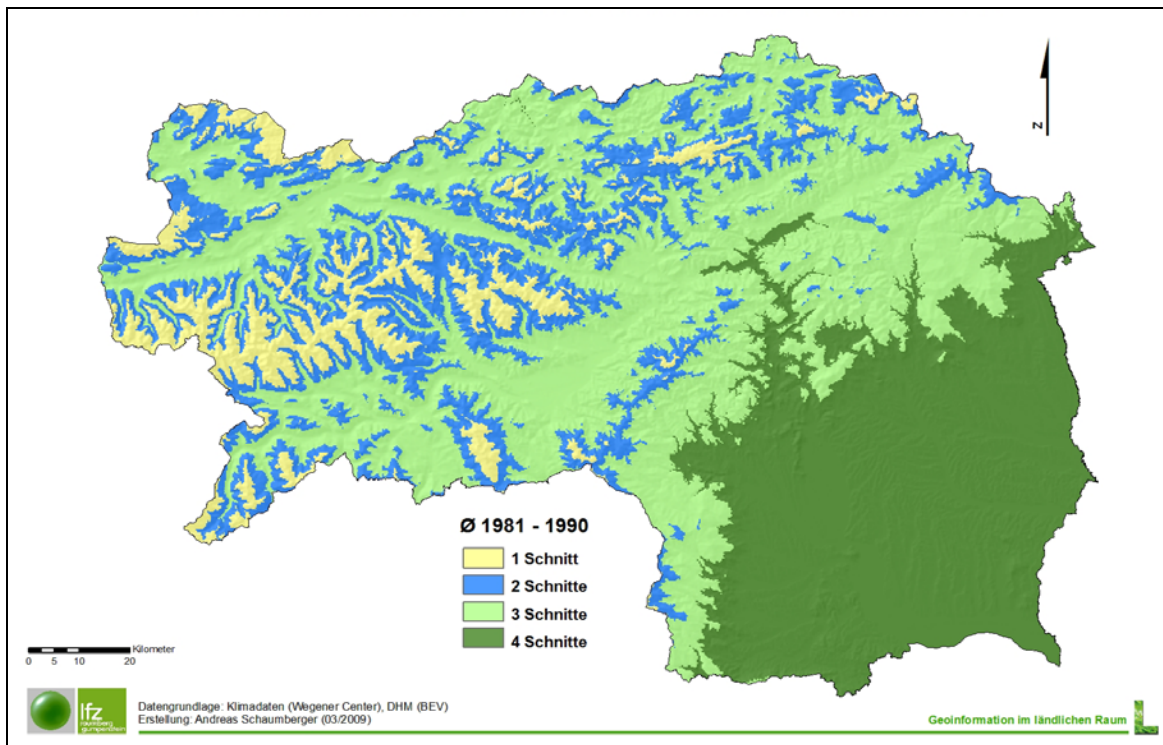


Abbildung 17: Durchschnittliche Schnittanzahl der Dekade 1980

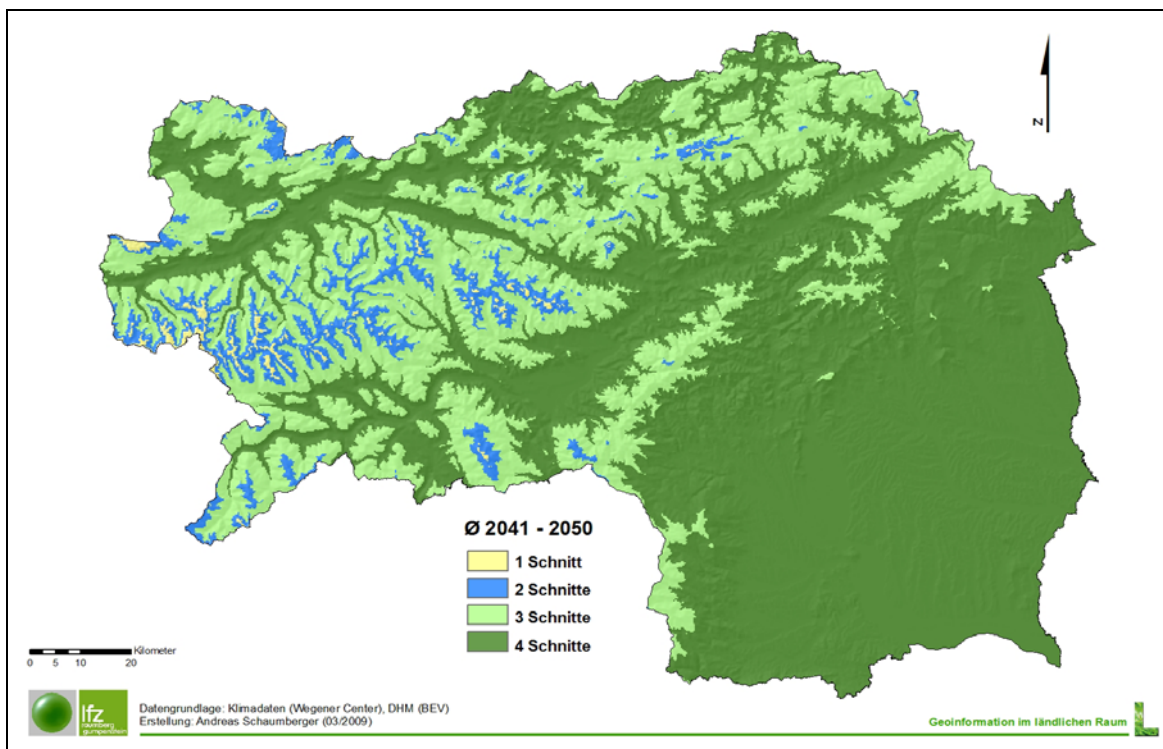


Abbildung 18: Durchschnittliche Schnittanzahl der Dekade 2040

Das Nahrungsmmodell kann die individuelle Bewirtschaftungsgestaltung eines Landwirtes nicht beruckichtigen und orientiert sich daher an objektivierbaren Parametern, die in diesem Fall aus den klimatischen Standortbedingungen abgeleitet werden. 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 Vegetationsperiodenlange. Relevanz haben diese Rasterdaten natürlich nur für die Grünlandflächen im Flachland und in den Tälern des Berggebietes.

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 Geodatensatze verfügbar sind.

3.5.1. Wasserverfügbarkeit und aktuelle Evapotranspiration

Im Gegensatz zur Referenz- bzw. Crop Evapotranspiration bezieht die aktuelle Evapotranspiration den Wassereintrag in Form des Niederschlags sowie die Wasserspeicherkapazität des Bodens (nutzbare Feldkapazität) mit ein. Die reale oder aktuelle Verdunstung wird nicht nur stichtagsbezogen ermittelt, sondern beruckichtigt 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 Ertragseinbuen. Um eine Abschätzung der Veränderung in zukünftigen Dekaden vornehmen zu können, werden über die jeweilige Dekade Monatsmittelwerte an den Evaluierungsstandorten in *Abbildung 19* und *20* dargestellt. Für beide Standorte gilt eine generelle Niederschlagsabnahme in den Sommermonaten. In Gumpenstein ist die Differenz jedoch bei weitem nicht so stark wie am Standort Kirchberg/Walde ausgeprägt – der Niederschlag in der Vegetationsperiode (März bis Oktober) nimmt hier um 6 % ab, in Kirchberg/Walde sind es hingegen 19 %.

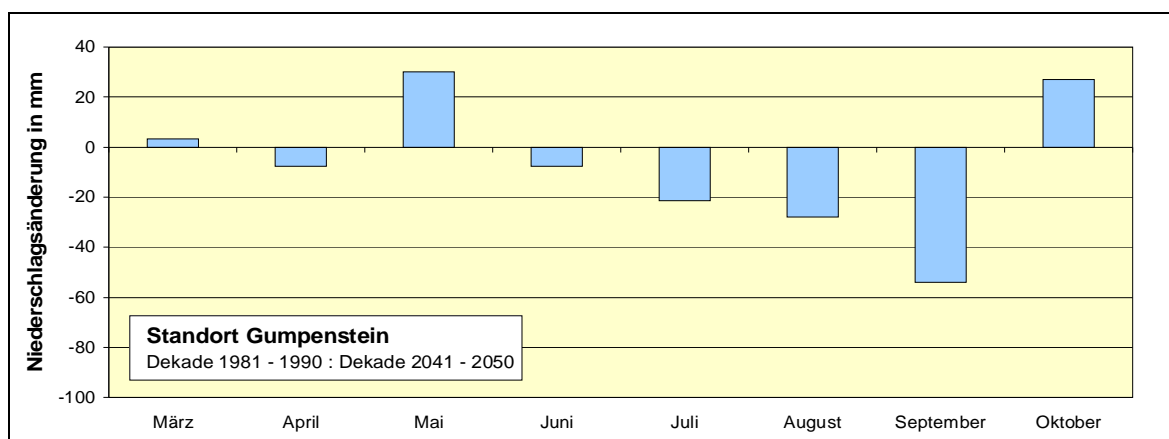


Abbildung 19: Änderung der mittleren Monatsniederschlagssumme der Dekaden 1980 und 2040

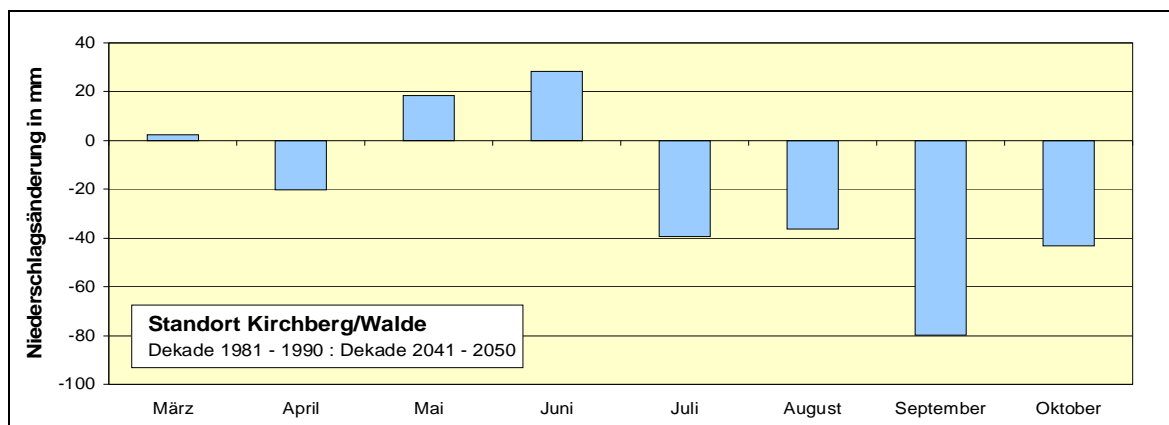


Abbildung 20: Änderung der mittleren Monatsniederschlagssumme der Dekaden 1980 und 2040

Bis zum Juni sind die Niederschlagsverhältnisse an beiden 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 Wasserstresses 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 *Abbildung 21* dargestellt. Die durchschnittliche Änderung beträgt im Mittel + 0.3 mm pro Tag. 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 *Abbildung 21* fällt auf, dass die Erhöhung über die ganze Vegetationsperiode einigermaßen gleich verteilt ist. *Abbildung 14* zeigt mit der signifikanten Temperaturerhöhung von + 2.7 °C im Mittel über die Vegetationsperiode eine der wesentlichen Ursachen für den Anstieg der Referenz-Evapotranspiration.

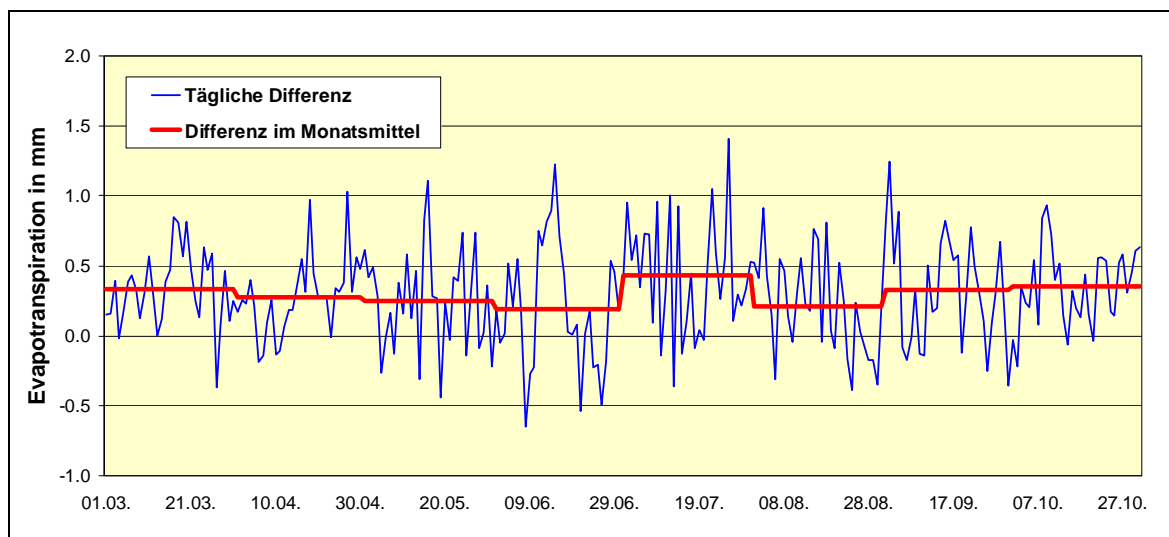


Abbildung 21: Mittlere Änderung der Referenz-Evapotranspiration am Standort Kirchberg/Walde im Dekadenvergleich 1980 und 2040 [mm pro Tag]

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 Grund-

lage für die Bewertung von wasserstressbedingten Ertragsveränderungen. In den *Abbildungen 22* und *23* werden die Verläufe beider Parameter über die Vegetationsperiode exemplarisch für die Jahre 1986 und 2044 gezeigt. Es handelt sich hier nicht um Mittelwerte, sondern um Tageswerte aus der Kontroll-Simulation (EH5 für 1986) und Klimaszenario-Simulation (EH5 für 2044).

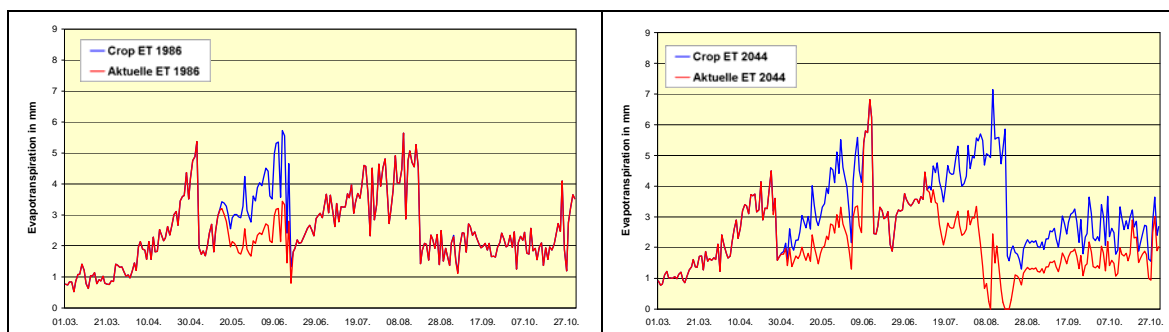


Abbildung 22: Verlauf der Evapotranspiration am Standort Gumpenstein im Jahr 1986 und 2044

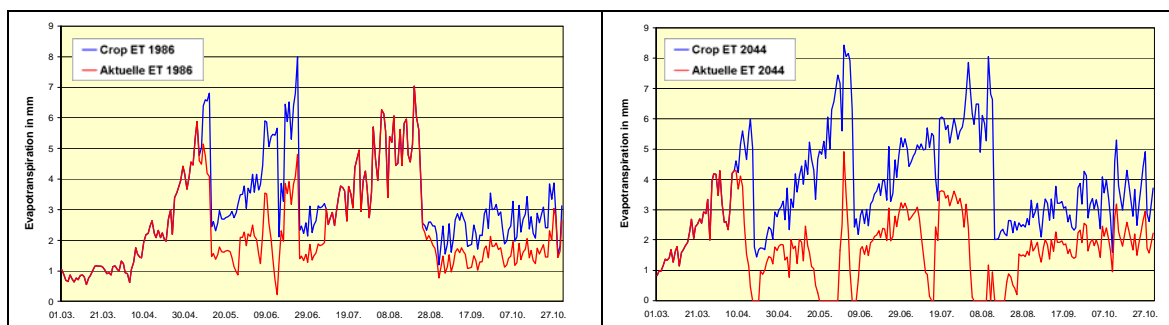


Abbildung 23: Verlauf der Evapotranspiration am Standort Kirchberg/Walde im Jahr 1986 und 2044

Da die oben dargestellten Ergebnisse keine klimatologischen Mittelwerte darstellen, sind sie lediglich als Beispiel eines jeweils typischen Jahres aus den zwei Dekaden zu interpretieren. Auf ihren klimatologischer Effekt anhand von Dekaden-Mittelwerten wird später eingegangen. Die Tendenz zur Zunahme von „klaffenden“ Kurven der beiden Evapotranspirationswerte in der Dekade 2040 und damit ein erhöhtes Risiko von wasserstressbedingten Beeinträchtigungen des Wachstums kann jedoch anhand dieses Beispiels gut demonstriert werden.

3.6. Veränderung der Wachstumsbedingungen im Grünland

Wie im Abschnitt 2.9 dargestellt, wird das Verhältnis von Crop und Aktueller Evapotranspiration in Form eines Wasserverfügbarkeitsfaktors zum Ausdruck gebracht. Dabei wird sowohl die langfristige, als auch die kurzfristige Entwicklung der Bodenfeuchte bzw. des Wasserstresses 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 beiden Evaluierungsstandorte wurde dieser Wert über die beiden Dekaden 1980 und 2040 gemittelt und in den *Abbildungen 24* und *25* visualisiert.

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 den *Abbildungen 19* und *20*, 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.

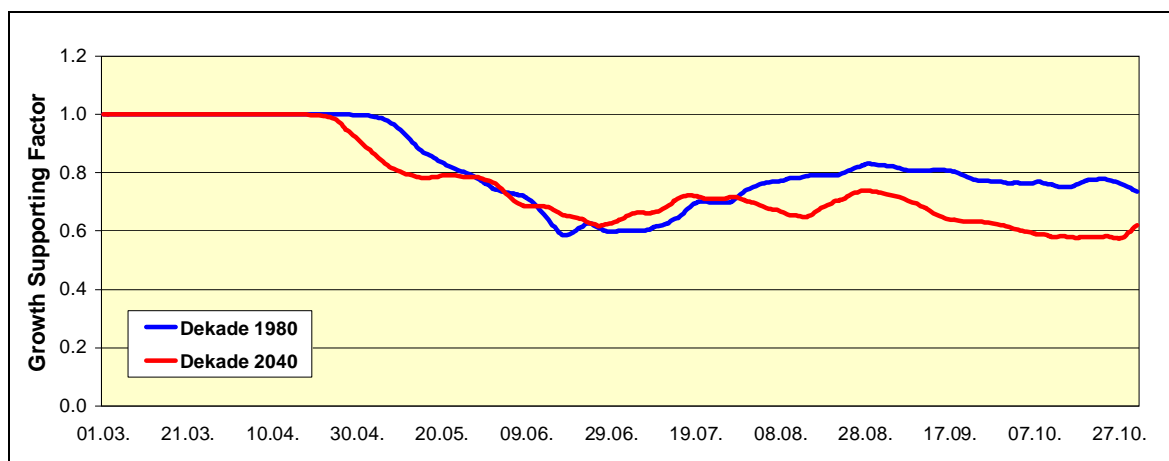


Abbildung 24: Growth Supporting Factor am Standort Gumpenstein für die Dekaden 1980 und 2040

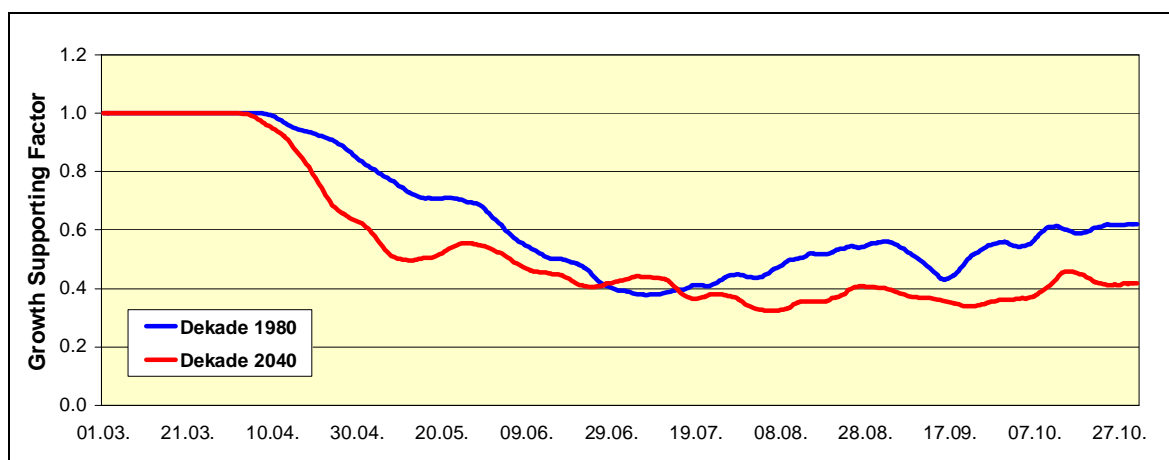


Abbildung 25: Growth Supporting Factor am Standort Kirchberg/Walde für die Dekaden 1980 und 2040

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. *Abbildung 21*) 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 Kirchberg/Walde bedenklich hoch. In der zweiten Jahreshälfte wird es zu einer deut-

lichen Reduktion der Erträge kommen – dies wirkt sich besonders auf den dritten und vierten Aufwuchs aus.

3.7. Ertragsentwicklung im Grünland

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit 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.

Für das Endergebnis, nämlich die räumliche Darstellung möglicher Ertragsänderungen im Grünland, werden die errechneten 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 (siehe *Abbildung 26*).

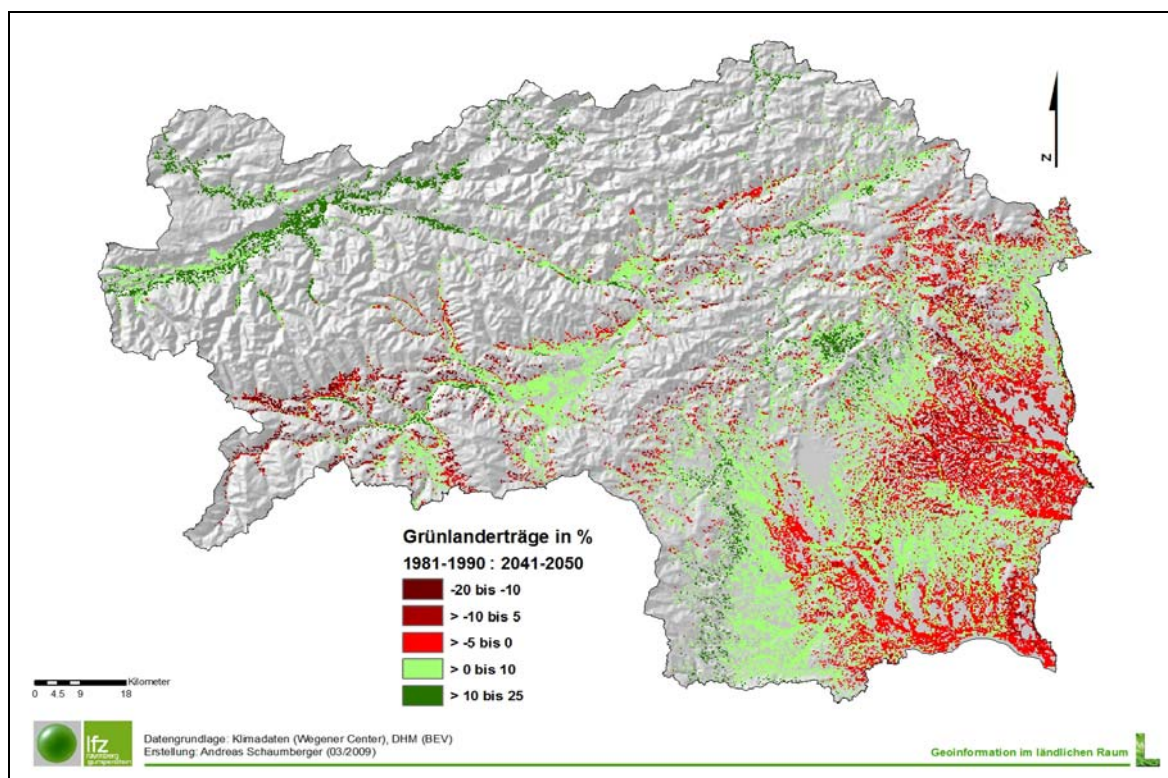


Abbildung 26: Relative Änderungen des Jahresbruttoertrages im Grünland im Vergleich der Dekaden 1980 und 2040 in der Steiermark

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 Auswir-

kung auf die Dauer der Vegetationsperiode – die Verlängerung im Berggebiet schafft zusätzliches Potenzial für eine Mehrschnittnutzung.

4. Schlussfolgerungen aus Sicht der GIS-Implementierung

Klimabedingte Veränderungen werden unweigerlich auf uns zukommen und die landwirtschaftliche Produktion wird sich darauf einstellen müssen. Anpassungsstrategien auf regionaler Ebene sind nur dann effektiv und effizient, wenn Informationen über die Art der Veränderung, aber auch über deren zeitliche und räumliche Entwicklung verfügbar sind. Klimamodelle helfen dabei, den Blick in eine mögliche Zukunft zu richten. Die große Herausforderung dabei ist die Ableitung von Szenarien aus dem globalen Klimazusammenhang für regionale Untersuchungen – also vom GCM zum RCM zu gelangen. Dies ist das Fachgebiet der Klimaforscher.

Wo kann GIS nun ansetzen? Für die Bearbeitung meteorologischer Fragestellung und deren räumliche Modellierung wird immer öfter GIS eingesetzt. Die verwendeten Daten sind meist historische Messdaten, die in einem Klimastationsnetz erhoben werden und von dort mit geeigneten geostatistischen Methoden in räumliche Oberflächenmodelle überführt werden. In der vorliegenden Arbeit werden Klimaszenariodaten räumlich den Stationen eines Klimabeobachtungsnetzwerkes zugeordnet und mit Hilfe von GIS-Applikationen in gleicher Weise und nach denselben Methoden wie Messdaten verarbeitet. Auch mit diesen Daten entstehen kontinuierliche Oberflächen, die jedoch gegenüber den regionalen Klimamodellen auf einer weitaus höher aufgelösten Skala operieren. Feine topographische Charakteristika werden eingebracht, aber auch vertikale, verschiedene themenübergreifende Analysen ermöglicht – eine in GIS-Applikationen übliche Vorgehensweise der Verschnidung von Informationen unterschiedlicher Layer.

Die hohe Auflösung – in der vorliegenden Arbeit wurde ein etwa 16.000 km² großes Gebiet in 250-Meter-Auflösung abgebildet – bringt natürlich auch Nachteile mit sich, die sich besonders hinsichtlich des Ressourcenbedarfs äußern. Das Rasterdatenmodell mit der relativ einfachen Umsetzung von Raster-Algebra-Operationen ist für klimatische Fragestellungen die erste Wahl, da beinahe alle Daten als Oberflächen verarbeitet werden müssen. Allerdings sind diese Oberflächen in den meisten Fällen auf Tagesbasis zu erstellen und dies bedeutet einen enormen Rechen- und Speicheraufwand, wenn es sich um die Untersuchung für mehrere Jahre handelt. Im Gegensatz zum Wetter spricht man beim Klima immer von langfristigen Entwicklungen, daraus folgt, dass bei der GIS-gestützten Applikation von Klimaszenarien auch immer eine ganze Reihe von Jahren verarbeitet werden müssen, um daraus entsprechende Mittelwerte generieren zu können. Der programmiertechnische Einsatz von GIS-Funktionalität ist damit obligatorisch – eine manuelle Bedienung von GIS-Benutzeroberflächen ist nicht möglich, wenn viele tausende Rasterdatensätze erzeugt werden müssen.

Die wichtigste Erfahrung, welche im Zuge der Programmierung dieser Arbeit gewonnen werden konnte, ist die Erkenntnis, dass eine streng objektorientierte und modulare Strukturierung der Programme entscheidend ist. Nicht nur der Übersichtlichkeit wegen, sondern auch hinsichtlich Performance sind klare Schnittstellendefinitionen und eine bestmögliche Nutzung von temporärem Speicher entscheidend. Bei der Ablage von Zwischen- und Endergebnissen in den Strukturen einer File Geodatabase stößt man zwar auf keine Limitie-

rungen hinsichtlich der Dateigröße, hat jedoch erhebliche Probleme beim Lese- und Schreibzugriff über die Benutzeroberfläche (z.B. ArcCatalog), wenn die Anzahl der Rasterdatensätze einige tausend beträgt. Die Frage der „Portionierung“, also wie viele Tagesraster in einer File Geodatabase gespeichert werden sollen (z.B. jahrweise, dekadenweise) sollte bereits bei der Programmierung berücksichtigt werden.

5. Zusammenfassung

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, deren Wasserdefizit hoch ist. Bei anhaltendem Wasserstress kann es zudem zu einer Schädigung des Pflanzenbestandes kommen, welcher Folgeschäden nach sich zieht und kompensierende Grünlandpfllegemaßnahmen notwendig machen. 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 Tempera-



turen 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.

6. Literaturverzeichnis

- 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 S.
- Blöschl, G. und R. Merz (2002): Methoden der hydrologischen Regionalisierung im Zusammenhang mit der Niederschlag-Abflussmodellierung. Wiener Mitteilungen Wasser - Abwasser - Gewässer 164 (2002), 149-178.
- Buchgraber, K. und G. Gindl (2004): Zeitgemäße Grünlandbewirtschaftung. 2. Auflage. Leopold Stocker Verlag, 192 S.
- 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.
- Fu, P. and P.M. Rich (1999): Design and Implementation of the Solar Analyst: an ArcView 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., A. A. Dalla-Via, F. Prettenhaler, and H. Truhetz (2008): A Climate Change Scenario for Southern and Eastern Styria and Potential Impacts on Water Availability *Beiträge zur Hydrogeologie*, 56 (2007/08), 63-68.
- 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>).
- Goovaerts, P. (1997): Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Applied Geostatistics Series, Oxford University Press, New York, Oxford, 483 S.
- 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. *Biosystems Engineering* 84 (1), 101-111.
- Hewitt, C. D., and D. J. Griggs (2004): Ensembles-Based predictions of climate changes and their impacts, *Eos Trans. AGU*, 85, 566.
- 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).
- 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. Cal-



- lander and S.K. Varney, Seiten 75–95, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Li, S., D.G. Tarboton and M. McKee (2003): GIS-based temperature interpolation for distributed modelling of reference evapotranspiration. Poster, AGU Hydrology Days 2003, March 31 – April 2, 2003, Colorado State University, 2 S.
- Loibl, W., A. Beck, M. Dorninge, F. Formayer, A. Gobiet, and W. Schöner (2007): reclip:more – Research for Climate Protection: Model Run Evaluation. Final Report, Austrian Research Centers, Seibersdorf, Wien.
- Murer, E., J. Wagenhofer, F. Aigner und M. Pfeffer (2004): Die nutzbare Feldkapazität der mineralischen Böden der landwirtschaftlichen Nutzfläche Österreichs. Schriftenreihe BAW, 20, 72-78.
- Roeckner E., G. Baeuml, L. Bonaventura, R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, 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), Hamburg.
- Schaumberger, A. (2006): Implementierung des Trockenschadenmodells in einem GIS als Grundlage für die praktische Anwendung. Bericht über das 2. Klimaseminar zum Thema "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 S.
- Schaumberger, A., J. Eitzinger und H. Formayer (2008): Räumliche Modellierung der potentiellen Evapotranspiration. In: Strobl, J., T. Blaschke und G. Griesebner (Eds.): Angewandte Geoinformatik 2008, Beiträge zum 20. AGIT-Symposium 2008. Wichmann Verlag, Heidelberg, 626-635.
- 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.
- Themeßl, M., A. Gobiet (2008), Evaluation of empirical-statistical error correction of daily precipitation from a regional climate model in the Alpine Region, 8th Annual Meeting of the EMS / 7th ECAC, Amsterdam, Netherlands, September 2008
- Trnka, M., J. Eitzinger, G. Gruszynski, 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., P. Källesberg, A. Hernandez, S. Saarinen, M. Fiorino, 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.



7. Quellenverzeichnis

- Bayer, J. (2006): Das C# 2005 Codebook. Addison-Wesley Verlag, München, 1022 S.
- Burke, R. (2003): Getting to know ArcObjects – Programming ArcGIS with VBA. ESRI Press, Redlands, California, 422 S.
- Dobrenz, W. und T. Gewinnus (2006): Datenbankprogrammierung mit Visual C# 2005 – Grundlagen, Rezepte und Anwendungsbeispiele. Microsoft Press Deutschland, 1040 S.
- ESRI (2004): ArcGIS Desktop Developer Guide, ESRI Press, Redlands, California, 335 S.
- INVEKOS (2007): INVEKOS-Datenpool des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- Mitchell, A. (1999): The ESRI Guide to GIS Analysis. Volume 1: Geographic Patterns & Relationships. ESRI Press, Redlands, California, 186 S.
- Petzold, C. (2005): Microsoft Windows Forms-Programmierung mit Visual C# 2005. Microsoft Press Deutschland, 385 S.
- Schwichtenberg, H. (2006): Microsoft .net 2.0 Crashkurs. 2. Auflage, Microsoft Press Deutschland, 529 S.
- Sharp, J. (2006): Microsoft Visual C# 2005 Schritt für Schritt. Microsoft Press Deutschland, 600 S.
- Tomlinson, R. (2003): Thinking about GIS. Geographic Information System Planning for Managers. ESRI Press, Redlands, California, 283 S.
- Zeiler, M. (1999): Modeling our World – The ESRI Guide to Geodatabase Design. ESRI Press, Redlands, California, 199 S.
- Zeiler, M. (2001): Exploring ArcObjects. Vol. I – Applications and Cartography. ESRI Press, Redlands, California, 725 S.
- Zeiler, M. (2001): Exploring ArcObjects. Vol. II – Geographic Data Management. ESRI Press, Redlands, California, 725 S.