

Forschungsbericht

Räumliche Modellierung von Grünlanderträgen unter Berücksichtigung von Witterungseinflüssen

Andreas Schaumberger
Erich M. Pötsch
Karl Buchgraber



www.raumberg-gumpenstein.at

Forschungsbericht

zum Projekt GT Hartberg (Projekt Nr. 100082)

Räumliche Modellierung von Grünlanderträgen unter Berücksichtigung von Witterungseinflüssen

Spatial Modelling of Grassland Yield
in Consideration of Weather Impact

Andreas Schaumberger

Erich M. Pötsch

Karl Buchgraber

Projektpartner:

Österreichische Hagelversicherung

LFS Kirchberg am Walde

Bundesamt für Wasserwirtschaft

Universität für Bodenkultur

Mendel University of Agriculture and Forestry in Brno

Impressum

Herausgeber

Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft
Raumberg-Gumpenstein, A-8952 Irdning
des Bundesministeriums für Land- und
Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

Direktor

Prof. Mag. Dr. Albert SONNLEITNER

Leiter für Forschung und Innovation

Mag. Dr. Anton HAUSLEITNER

Für den Inhalt verantwortlich

die Autoren

Redaktion und Satz

Andreas Schaumberger

Druck, Verlag und © 2010

Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft
Raumberg-Gumpenstein, A-8952 Irdning

Dieses Forschungsprojekt wurde vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft finanziert.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 1 Einleitung und Problemstellung | 7 |
| 1.1 Einflussfaktoren auf den Ertrag im Grünland | 8 |
| 1.2 Methodik der Ertragsbestimmung | 10 |
| 1.3 Vorarbeiten und Projektumfeld | 11 |
| 1.4 Zielsetzung und Lösungsansätze | 12 |
| 2 Material und Methoden | 17 |
| 2.1 Systemumgebung | 17 |
| 2.2 Datengrundlage für die Implementierung | 17 |
| 2.2.1 Digitales Höhenmodell..... | 18 |
| 2.2.2 Meteorologische Messdaten..... | 18 |
| 2.3 Rasterdatenmodell..... | 20 |
| 2.4 Untersuchungsgebiet und -zeitraum..... | 21 |
| 2.5 Beschreibung der implementierten Modelle | 22 |
| 2.5.1 Räumliche Modellierung der Globalstrahlung | 22 |
| 2.5.2 Räumliche Modellierung der Referenz-Evapotranspiration | 26 |
| 2.5.2.1 Berechnung der Referenz-Evapotranspiration | 28 |
| 2.5.2.2 Berechnung der Globalstrahlung und Strahlungsbilanz..... | 29 |
| 2.5.2.3 Schätzung der Referenz-Evapotranspiration..... | 31 |
| 2.5.2.4 Räumliche Interpolation der Referenz-Evapotranspiration..... | 31 |
| 2.5.3 Räumliche Modellierung der Vegetationsperiode..... | 33 |
| 2.5.3.1 Räumliche Interpolation der Temperatur | 34 |
| 2.5.3.2 Berechnung der thermischen Vegetationsperiode..... | 35 |
| 2.5.4 Räumliche Modellierung der Schneebedeckung..... | 37 |
| 2.5.4.1 Berechnung der täglichen Schneemenge..... | 39 |
| 2.5.4.2 Berechnung der täglichen Schmelzwassermenge | 41 |
| 2.5.4.3 Berechnung der Schneeakkumulation..... | 42 |
| 2.5.5 Modellierung von Schnitthäufigkeit und Aufwuchsdauer | 43 |

| | |
|--|-----------|
| 2.5.6 Modellierung der Bodenwasserbilanz..... | 47 |
| 2.5.6.1 Berechnung der Crop-Evapotranspiration..... | 47 |
| 2.5.6.2 Wasserspeicherfähigkeit des Bodens | 49 |
| 2.5.6.3 Berechnung der aktuellen Evapotranspiration | 49 |
| 2.5.6.4 Berechnung der aktuellen Evapotranspiration ohne Pflanzenfaktor..... | 54 |
| 2.5.7 Grassland Statistical Model (GRAM)..... | 57 |
| 2.5.7.1 Analyse der Wetterdatenbasis an den Versuchstationen | 57 |
| 2.5.7.2 Wasserverfügbarkeit und Wachstumsfaktor | 60 |
| 2.5.7.3 Effektive Temperatur und effektive Globalstrahlung | 62 |
| 2.6 Ertragshebung zur Ergebnisvalidierung..... | 64 |
| 3 Implementierung..... | 67 |
| 3.1 Objektorientierte Programmierung mit Visual C#..... | 67 |
| 3.1.1 Auswahl grundlegender objektorientierter Konzepte | 67 |
| 3.1.2 C# und das .NET-Framework | 70 |
| 3.2 Softwareentwicklung mit ArcObjects | 72 |
| 3.3 Systemstruktur..... | 74 |
| 3.4 Programmablauf..... | 76 |
| 3.5 Datenzugriff | 77 |
| 3.6 Berechnung von Regressionen..... | 80 |
| 3.7 Beispielanwendung für Raster-Algebra | 84 |
| 3.8 Bildung von Zeitreihen zur Validierung | 90 |
| 3.9 Hinweise zur Implementierung der räumlichen Modelle..... | 92 |
| 4 Ergebnisse und Diskussion | 93 |
| 4.1 Räumliches Modell der Referenz-Evapotranspiration..... | 93 |
| 4.2 Räumliches Modell der Vegetationsperiode | 98 |
| 4.3 Räumliches Modell der Schneebedeckung | 102 |
| 4.4 Räumliches Modell der Schnitthäufigkeit und Aufwuchsdauer..... | 107 |
| 4.4 Räumliches Modell der Bodenwasserbilanz | 110 |
| 4.5 Kalibrierung und Verifizierung von GRAM..... | 116 |

| | |
|--|------------|
| 4.5.1 Datenaufbereitung zur Modellkalibrierung..... | 118 |
| 4.5.2 Modellverifizierung..... | 119 |
| 4.6 Räumliche Modellierung der Grünlandertragsschätzungen..... | 127 |
| 4.6.1 Datengrundlage für die räumliche Ertragsschätzung | 127 |
| 4.6.2 Ergebnisse der räumlichen Ertragsschätzung..... | 132 |
| 4.7 Evaluierung der Ergebnisse aus der räumlichen Ertragsschätzung | 138 |
| 4.7.1 Praxiserhebungen zur Modellevaluierung..... | 138 |
| 4.7.2 Auswahl der Modellparameter | 139 |
| 4.7.3 Einfluss der modellierten Aufwuchsdauer auf die Ergebnisse..... | 142 |
| 4.7.4 Statistische Auswertung der Ergebnisse | 144 |
| 4.7.5 Ausgewählte Evaluierungsbeispiele für die Ergebnisse im GIS | 155 |
| 5 Zusammenfassung und Ausblick | 157 |
| 6 Literaturverzeichnis..... | 163 |

1 Einleitung und Problemstellung

Das Grünland zählt in Österreich zu einer der wichtigsten landwirtschaftlichen Kulturarten. Besonders im benachteiligten Berggebiet mit knapp 70 % der Fläche spielt diese Form der Landbewirtschaftung eine herausragende Rolle. Das Dauergrünland sowie der Feldfutterbau mit rund 1,56 Millionen Hektar (ha) bedeckt ca. 55 % der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche Österreichs (BMLFUW, 2008).

Die Art der Bewirtschaftung hängt im Wesentlichen von naturbedingten Faktoren (Klima, Wetter, Bodenverhältnisse, Topographie), von der Entfernung zum Hof und von der geometrischen Form der Grünlandflächen ab (Buchgraber und Gindl, 2004). Sie reicht vom extensiven Grünland (Almen, Bergmähder, Hutweiden, einmähdige Wiesen und Streuwiesen) über intensives Wirtschaftsgrünland (mehrmähdige Wiesen, Kulturweiden) bis hin zum Feldfutterbau (Klee-, Klee gras- und Reingrasbestände) (BMLFUW, 2008). *Abbildung 1* zeigt eine Übersicht über die prozentuale Verteilung der einzelnen Bewirtschaftungstypen.

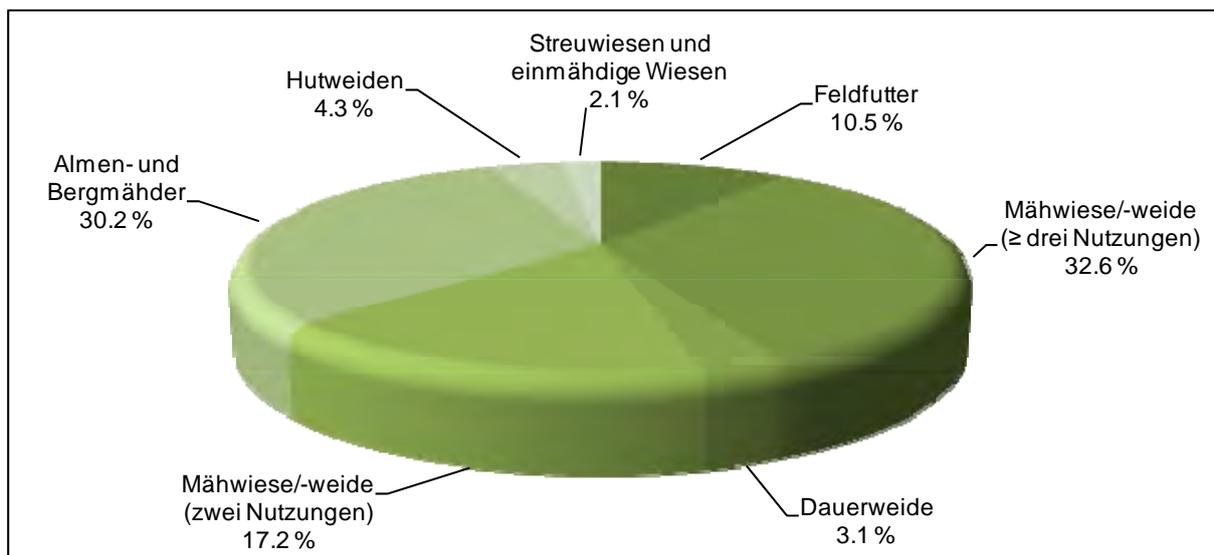


Abbildung 1: Verteilung der Grünfutterflächenanteile nach Bewirtschaftungsart (BMLFUW, 2008)

Das Grünland bildet die wichtigste Komponente in der Futtermittelration des Raufutter verzehrenden Viehs in über der Hälfte der landwirtschaftlichen Betriebe; im Berggebiet sind rund 70 % der Betriebe auf die Grünlandbewirtschaftung angewiesen. Neben dem Ertrag aus Wiesen und Weiden für die Tierfütterung ist das Grünland ein wesentliches Element der Kulturlandschaft. Die Erhaltung eines abwechslungsreichen und offenen Landschaftsbildes ist insbesondere in vielen vom Tourismus geprägten Gebieten des Alpenraumes von großer Bedeutung. Auch die alternative Nutzung der Grünlandbiomasse zur Stoff- und Energiegewinnung wird zunehmend zu einem wichtigen Aspekt der Landnutzung (Pötsch, 2007). Der Ertrag im Wirtschaftsgrünland beträgt rund 6,9 t Trockenmasse (TM) pro ha und Jahr, das sind in Summe rund 6,2 Millionen t TM/Jahr. Diese Flächen liefern rund 72 % des gesamten Grundfutterbe-

darfs und sind deshalb für die Viehwirtschaft maßgeblich (BMLFUW, 2008). Wirtschaftsgrünland ist hauptsächlich in den Gunstlagen des Alpenvorlandes zu finden, durchzieht aber auch die Täler des Alpenhauptkamms.

Abbildung 2 zeigt die räumliche Verteilung mit einer Klassifizierung nach Wirtschaftsgrünland, Feldfutter und extensiv genutzten Flächen. Grünland findet sich grundsätzlich überall dort, wo aus natürlichen und/oder produktionstechnischen Gründen Ackerbau nicht oder kaum betrieben wird (Buchgraber und Gindl, 2004).

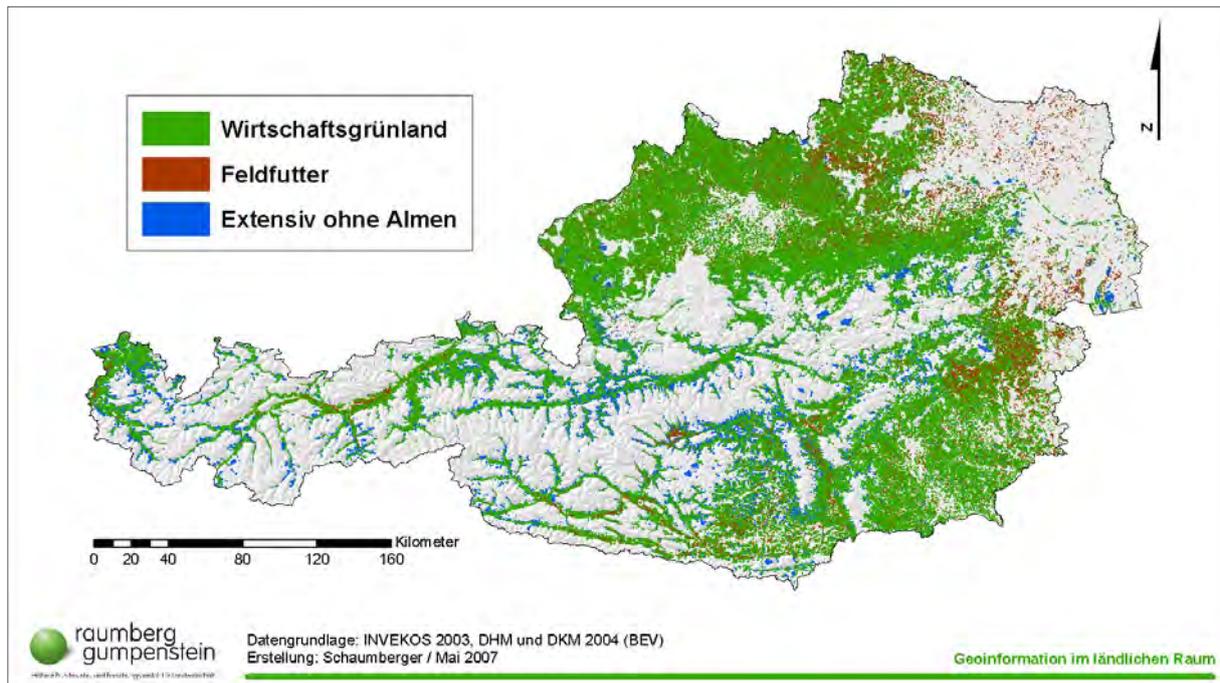


Abbildung 2: Räumliche Verteilung des österreichischen Grünlandes

1.1 Einflussfaktoren auf den Ertrag im Grünland

Die Ertragsleistung im Grünland und letztlich auch die Qualität dieser Erträge hängen von zwei Faktoren ab, die mehrfach zusammenwirken. Zunächst müssen die *Standortfaktoren* berücksichtigt werden, auf die in der Regel kaum Einfluss genommen werden kann. Dazu gehören die klimatischen Bedingungen einer Region, die hauptsächlich in der Vegetationsperiode auftretenden Wetterverhältnisse sowie die Qualität und die Eigenschaften des Bodens. Nicht zuletzt spielen die topographischen Bedingungen wie Seehöhe, Exposition und Hangneigung eine entscheidende Rolle (Pötsch und Resch, 2005).

Dem gegenüber stehen die *Bewirtschaftungsmaßnahmen*, durch die der Landwirt erheblichen Einfluss auf Ertrag und Qualität nehmen kann. Hier sind Düngung und Nutzung die entscheidenden Maßnahmen, welche, wenn sie aufeinander abgestimmt werden, einen nachhaltigen und den umweltökologischen Erfordernissen angepassten Ertrag bestimmen. Um Übernutzung und/oder Überdüngung zu vermeiden, sollten Häufigkeit und Art der Nutzung auf das

Düngungsniveau und die Art der Düngung angepasst sein. Auch sind der Nutzungs- und Düngungszeitpunkt in Hinblick auf eine zufrieden stellende Futterqualität von großer Bedeutung (Pötsch und Resch, 2005).

Alle diese Faktoren bestimmen gemeinsam die Zusammensetzung des Pflanzenbestandes (Gräser, Kräuter und Leguminosen) und damit auch die Quantität und Qualität des Grünlandertrages, die der Landwirt durch Maßnahmen der Bestandesführung (Pflege, Über- und Nachsaat, Regulierung) noch zusätzlich beeinflussen kann (Pötsch und Resch, 2005).

Eine große Herausforderung nicht nur für die österreichische Landwirtschaft stellt der Klimawandel dar. Durch den zunehmenden Ausstoß an Treibhausgasen, allen voran Kohlendioxid, und der damit verbundenen globalen Erwärmung muss auch in unseren Breiten mit einer starken Zunahme an Dürreperioden gerechnet werden. Bereits 2002 und insbesondere 2003 führte eine lang anhaltende Trockenheit vor allem im Osten und Süden Österreichs zu massiven Ertragsrückgängen bzw. -ausfällen.

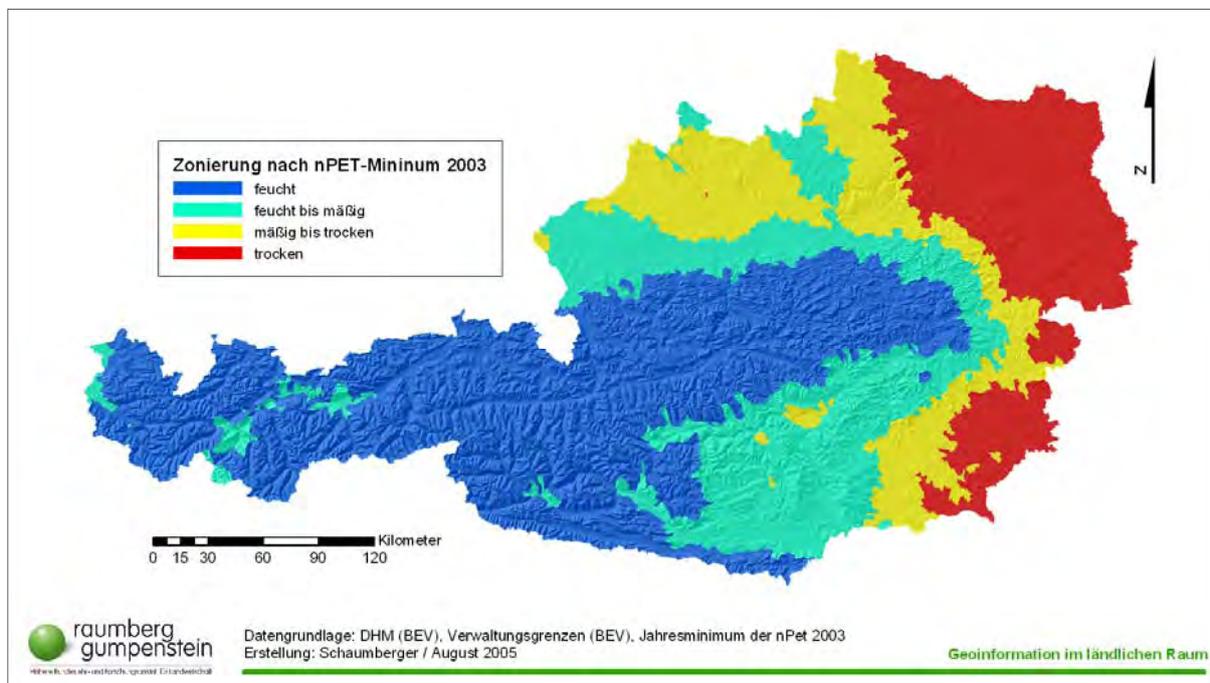


Abbildung 3: Zonierung der potenziellen Wasserverfügbarkeit für Grünland im Jahr 2003

Abbildung 3 zeigt Zonen der Wasserverfügbarkeit nach einer Berechnung des Jahresminimums aus der akkumulierten Differenz von Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration auf Tagesbasis (nettopotenzielle Evapotranspiration) im Jahr 2003. Diese Einteilung in Zonen gibt in etwa Auskunft darüber, in welchen Gebieten Österreichs bei Trockenheit mit negativen Konsequenzen für die Landwirtschaft gerechnet werden muss.

Wie der aktuelle UNO-Klimabericht 2007 zeigt, sind die Durchschnittstemperaturen der Nordhemisphäre in den letzten 50 Jahren so stark angestiegen wie noch in keiner anderen 50-Jahr-Periode der letzten 1300 Jahre davor. Für die nächsten beiden Dekaden ist mit einer

Erwärmung um 0,2 °C pro Dekade zu rechnen und wird selbst im Fall der Einhaltung des Emissionsniveaus aus dem Jahr 2000 trotzdem noch 0,1 °C erreichen. Am Ende des 21. Jahrhunderts wird die Erwärmung im Vergleich zur Periode 1980 bis 1999 bei optimistischem Szenario zwischen 1,1 und 2,9 °C und nach pessimistischer Prognose zwischen 2,4 und 6,4 °C betragen (IPCC, 2007b).

Die Auswirkungen aufgrund der Klimaveränderung sind vielfältig und in den mittleren Breiten mit einer Ausdehnung der trockengefährdeten Gebiete im Flachland verbunden. Das Auftreten von Extremereignissen wird häufiger werden. Die Zunahme an Trockenperioden und durch Starkniederschläge bedingte Überflutungen wird zu massiven Ertragseinbußen führen. In den Bergregionen kommt es zum Abschmelzen der Gletscher und im Winter zu einem Rückgang der Schneedecke (IPCC, 2007a). Eine Temperaturzunahme um 1 bis 2 °C wirkt sich auf die Dauer der Schneedecke in etwa 1500 m Seehöhe mit einer Reduzierung um 20 bis 40 Tage aus. Dies bedeutet für die Landwirtschaft, dass mit einem früheren Austrocknen des Bodens und damit einer unzureichenden Wasserversorgung bei Vegetationsbeginn zu rechnen ist (Kromp-Kolb, 2003).

Standortfaktoren, die Veränderungen des Klimas und eine sehr differenzierte Bewirtschaftung macht die Bestimmung von Grünlanderträgen zu einem schwierigen Thema. Die verschiedenen Einflüsse weisen zahlreiche wechselseitige Abhängigkeiten auf und sind deshalb nur schwer nach Prioritäten zu ordnen. Vor allem die Bewirtschaftungsmaßnahmen werden durch das individuelle Management eines Landwirtes viel stärker gestaltet, als dies aus objektiven, dem Standort zuzuordnenden Parametern abgeleitet werden kann. Allerdings fällt bei der Untersuchung der Einflussfaktoren auf, dass viele einen massiven Raumbezug aufweisen und deshalb der Einsatz eines Geographischen Informationssystems (GIS) zur Analyse von Zusammenhängen außerordentlich sinnvoll erscheint. Daraus ergibt sich die Frage, ob und wie eine raumzeitliche Betrachtung einer derart komplexen Problemstellung möglich ist.

1.2 Methodik der Ertragsbestimmung

Zur Bestimmung des Ertrages im Grünland werden Methoden eingesetzt, welche sich hauptsächlich in ihrer Genauigkeit und Präzision unterscheiden. Für objektive Vergleiche muss genau gearbeitet bzw. gemessen und damit viel Zeit und Kosten aufgewendet werden. Für eine Schätzung reicht es, die jeweilige Fläche in Augenschein zu nehmen und mit entsprechendem Fachwissen zu beurteilen. Für großräumige Anwendungen, wenn beispielsweise der Ertrag eines ganzen Bundeslandes mit vielen hunderttausend Einzelparzellen ermittelt werden soll, kommt man nicht umhin, Modelle einzusetzen. Dies ist auch jener Ansatz, der in vorliegender Arbeit verfolgt und weiter vertieft wird.

Eine räumliche Bearbeitung im GIS setzt die Abstraktion der Wirklichkeit in Form von Modellen voraus, um die wesentlichen Untersuchungsparameter von jenen zu trennen, welche sich nur schwer oder gar nicht in Datenmodelle transferieren lassen. Das Modell an sich wird

als Mittel zur Entwicklung und Interpretation der wissenschaftlichen Beschreibung eines Phänomens eingesetzt, wenngleich die empirische Wirklichkeit aufgrund von notwendigen Annäherungen und Vereinfachungen nur ungenau beschrieben wird. Meist konzentriert sich ein Modell auf Aspekte eines empirischen Phänomens und versucht damit die Wirklichkeit bestmöglich zu repräsentieren. Dies impliziert, dass die im Modell verwendeten Propositionen nicht vollständig sein können und daher ein Modell stets offen und ergänzungsfähig ist. Allerdings muss das Modell trotz Ungenauigkeit, Inkonsistenz und Aspekthaftigkeit in der Lage sein, eine gewünschte Funktion zu erfüllen und damit einen Bezug zur empirischen Wirklichkeit herzustellen. Dieser Bezug hängt ganz wesentlich von den zu einem bestimmten Zeitpunkt verfügbaren Informationen und Daten ab (Bailer-Jones, 2000).

Im Kontext der Bestimmung von Grünlanderträgen geht es darum, Modelle in ihrer Komplexität so anzupassen, dass zum einen eine raumzeitliche Repräsentation der einzelnen Modellpropositionen möglich ist und zum anderen der Bezug zur Wirklichkeit gewahrt bleibt. Das heißt, die Modellergebnisse müssen unter Berücksichtigung einer gewissen Toleranz gemessene und damit „wahre“ Werte abbilden.

Die im Modell selbst begründeten Eigenschaften der Unvollständigkeit und Vereinfachung führen dazu, dass nur durch konsequente Weiterentwicklung und Verbesserung eine immer größere Annäherung an die empirische Wirklichkeit stattfinden kann. Das vorliegende Projekt sollte als Grundlage für weitere Anstrengungen verstanden werden, die sich mit einer regionalisierten Abschätzung von Grünlanderträgen befassen. Da die Datenbasis für diese Anwendung laufend erweitert wird (Wetterbeobachtung der ZAMG bzw. Ertragsdatenerhebungen im Rahmen des Projektes 100080 – „Stoffflüsse, Futtererträge und Biodiversität bei differenzierter Grünlandbewirtschaftung in Österreich“), können durch zukünftige Neukalibrierungen des Modells weitere Verbesserungen erreicht werden. Aus diesem Grund wurde besonders Wert darauf gelegt, ein System zu implementieren, das den Aufwand der Kalibrierung lediglich auf die Aufbereitung der neuen Modellinputdaten reduziert.

1.3 Vorarbeiten und Projektumfeld

Die Entwicklung von Modellen zur Ertragsschätzung bildet einen wichtigen Schwerpunkt in der landwirtschaftlichen Forschung. Sie dienen als Grundlage für statistische Auswertungen über Ertragspotenziale und deren Veränderungen, aber auch zur Unterstützung markt- und agrarpolitischer Entscheidungen, vor allem auch in Hinblick auf die nicht-agrarische Nutzung (Stichwort „Biomasse zur Energiegewinnung“). Ebenso stehen die Konsequenzen der mit dem Klimawandel einhergehenden Ertragseinbußen im Mittelpunkt des Interesses. Die große Bedeutung dieses Themenbereichs belegen zahlreiche nationale und internationale Forschungsprojekte, welche sich unter anderem auch den Grünlanderträgen widmen.

Die vorliegende Arbeit baut auf den Ergebnissen des Projektes BAL 2953 „Entwicklung eines Modells für die konkrete Ermittlung von Trockenschäden in den einzelnen Grünlandregionen

Österreichs“ (Laufzeit 2002 bis 2005) auf, an dem bereits intensiv die Problemstellung zur Bestimmung von Grünlanderträgen unter dem Einfluss von Trockenperioden bearbeitet wurde. Im Rahmen dieses Projektes (Buchgraber *et al.*, 2006) und in Kooperation mit dem Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur (Kromp-Kolb *et al.*, 2005) wurde in einem ersten Ansatz auch mit einer räumlichen Umsetzung der entwickelten Modelle gearbeitet (Schaumberger, 2005). Die Fortführung im vorliegenden, zweijährigen Projekt dient hauptsächlich dem Zweck der Entwicklung einer effizienten Implementierung und der damit möglichen explorativen Modellweiterentwicklung und -verbesserung.

1.4 Zielsetzung und Lösungsansätze

Das Zusammenspiel mehrerer Modelle, die jeweils für sich einen Aspekt der Wirklichkeit aufgreifen, trägt dazu bei, eine möglichst gute Annäherung der Modellergebnisse an die realen Ertragsverhältnisse im Grünland zu realisieren. Die naturwissenschaftlichen Grundlagen für die zum Pflanzenwachstum relevanten Fachbereiche müssen in ein Gesamtsystem integriert werden, wobei für eine räumliche Umsetzung noch zusätzlich geprüft werden muss, inwieweit sich einzelne Systemelemente dafür eignen. Mit Hilfe von GIS und der hier üblichen Trennung von Themen in einzelne Datenschichten, deren Gemeinsamkeit in der räumlichen Lage und Ausdehnung liegt, kann die notwendige Interdisziplinarität optimal verwirklicht werden.

Die Beschreibung der Einflussfaktoren auf den Grünlandertrag liefert Ansätze dafür, welche Inputparameter das Modell benötigt. Die Standortbedingungen, das Klima und die Wetterverhältnisse können relativ gut abgebildet werden. Schwieriger wird es bei der Beschreibung der Bodenverhältnisse und der aus den Wetterdaten abgeleiteten Modelle, wie z.B. die Abgrenzung der Vegetationsperiode als jenen Zeitraum, der zum Wachstum grundsätzlich zur Verfügung steht.

Die zweite große Gruppe der Einflussfaktoren umfasst die Bewirtschaftung. Sie kann nur bedingt modelliert und näherungsweise abgebildet werden, wenn gewisse Abhängigkeiten aus den Standortbedingungen ableitbar sind. Beispielsweise kann die Pflanzenbestandszusammensetzung auf Grund nicht zu generalisierender Pflegemaßnahmen auch nicht räumlich interpretiert werden, es sei denn, man begibt sich vor Ort und begutachtet die Fläche. Die Häufigkeit der Schnittnutzung und die Düngermenge sind ebenfalls nur indirekt und bestenfalls auf das regionale Umfeld generalisiert zu beschreiben.

Die hier angeführten Voraussetzungen und Problembereiche der Modellimplementierung sind natürlich nicht vollständig erläutert – sie sollen lediglich zu der in der vorliegenden Arbeit zentralen Zielsetzung hinführen. Ziel ist die Schaffung eines Informationssystems, das nach anerkannten Methoden und Werkzeugen der Geoinformatik eine effektive und effiziente Umsetzung von naturwissenschaftlichen Modellen zur Bestimmung des Grünlandertrages ermög-

licht und dabei insbesondere die explorative Modellerweiterung und -verbesserung unterstützt. Aus dieser Zielformulierung sind wichtige technische Anforderungen abzuleiten:

- Implementierung ressourcenschonender Algorithmen hinsichtlich Speicherbedarf, Laufzeitverhalten und Benutzereingriff
- Programmstruktur nach objektorientierten Grundsätzen (System aus miteinander kooperierenden Objekten, Polymorphie, Vererbung, usw.)
- Konsequente Kapselung von Programmlogik mit wohldefinierten Schnittstellen
- Unabhängigkeit von einer Standard-GIS-Oberfläche, jedoch Einbeziehung von GIS-Objektbibliotheken und damit die Verwendung von Standardmethoden
- Konsequente Fehler- und Ausnahmebehandlung
- Kapselung von Deklaration und Initialisierung sämtlicher Variablen, die dem optimierten Datenzugriff, dem objektübergreifenden Datenaustausch und der persistenten Speicherung dienen

Bei der genauen Betrachtung dieser Anforderungen wird klar, dass es sich um ein System handeln muss, welches auf jede Erweiterung und auf die Anpassung an neue Erkenntnisse problemlos reagieren kann. Als Lösungsansatz zur Erfüllung der gesetzten Ziele ist deshalb die Entwicklung einer eigenständigen Software im objektorientierten Modell die erste Wahl, zudem auch GIS-Softwarebibliotheken diese Vorgehensweise optimal unterstützen.

Neben den technischen Aspekten spielt natürlich die fachliche Komponente der angewandten Methoden und Modelle eine herausragende Rolle. Dabei ist besonders auf das Spannungsfeld zwischen Vereinfachung und ausreichender Komplexität der eingesetzten Modelle hinzuweisen. Eine räumliche Implementierung erfordert aufgrund der im Gegensatz zu punktuellen Berechnungen oft nicht zur Verfügung stehenden raumbezogenen Geodaten möglichst einfache Ansätze, die jedoch mindestens jenen Grad an Komplexität aufweisen, welcher die reale Situation zumindest näherungsweise beschreiben kann.

Für die Bestimmung der Grünlanderträge werden mehrere Modelle eingesetzt, die hierarchisch aufeinander abgestimmt sein müssen und im Programmcode durch die Abgrenzung in Programmpakete bzw. Namensräume ihre Entsprechung finden. Alle zu einem bestimmten Subsystem gehörenden Programmteile sind hier zusammenzufassen und können verändert werden, ohne damit weitere Systemkomponenten zu tangieren. Exakt definierte Schnittstellen dienen dazu, sich nicht mit der Programmlogik einer bestimmten Methode auseinandersetzen zu müssen und deren Inhalt als so genannte „Black Box“ zu betrachten. Für den Nutzer ist es lediglich wichtig zu wissen, welche Werte übergeben werden müssen und welche Ergebnisse von der angewandten Methode zu erwarten sind.

Als Inputdaten gelangen nur georeferenzierte Wetterdaten und ein Digitales Höhenmodell (DHM) in das System, alle weiteren Berechnungen folgen der hierarchischen Struktur. Die

Abkopplung von einer GIS-Oberfläche macht hier Sinn, da keine manuellen Eingriffe in die Berechnungsroutinen notwendig sind und gleichzeitig die Performance verbessert werden kann. Mit diesen Systemvoraussetzungen ist der Nutzer nicht nur für Modellveränderungen gewappnet, sondern kann auch relativ mühelos Zeiträume und räumliche Ausdehnung durch eine entsprechende Anpassung der wenigen Inputdaten ändern. Beispielsweise war der Einsatz dieses Systems im EU-Projekt „Climate Change and Variability: Impact on Central and Eastern Europe“ (<http://www.clavier-eu.org>) möglich und kann ohne neuerliche Implementierung eingesetzt werden. Die in diesem Fall notwendige Einbeziehung von Klimamodelldaten ist ebenso unproblematisch, wie die Anwendung auf verschiedene Testgebiete.

Die Validierung einzelner Komponenten und Ergebnisse bildet einen wichtigen Teil der Modellierung. Diese wurde jedoch hauptsächlich an den Standorten der Grünlandversuche durchgeführt. Zur qualitativen Prüfung der räumlichen Implementierung sind Daten notwendig, welche zwischen den Kalibrierungspunkten, also zwischen den Versuchsstandorten liegen. Die Erhebung dieser Daten ist äußerst schwierig und wurde experimentell für das Jahr 2006 im Raum Hartberg durchgeführt.

Eine detaillierte Beschreibung der implementierten Modelle wird im Rahmen dieser Arbeit nur bedingt vorgenommen, da sie als eine Weiterentwicklung der bereits in Schaumberger (2005) dokumentierten Arbeit gesehen werden muss und lediglich dort erfolgt, wo auf eine signifikante Erweiterung (z.B. Vegetationsperiode und Schneebedeckung) Bezug genommen wird. Die Implementierung nach den erläuterten Zielsetzungen dieser Arbeit steht eindeutig im Vordergrund und stellt die wichtigste Abgrenzung zu den bereits durchgeführten Vorarbeiten dar.

In den folgenden Kapiteln werden verschiedenste Systemkomponenten und die Informationsflüsse zwischen ihnen thematisiert. Zum besseren Verständnis ist es notwendig, vorab den Blick auf das Gesamtsystem in *Abbildung 4* zu lenken, um die wichtigsten Zusammenhänge verstehen und richtig einordnen zu können.

Die einzelnen Komponenten werden in *Abbildung 4* durch Informationsflüsse verbunden, die gemäß ihrer Funktion voneinander unterschieden werden können. Es wird dabei auf die anfangs beschriebenen Einflussfaktoren und deren Problematik Bezug genommen. Während Standortfaktoren relativ gut abgebildet werden können, sind die Bewirtschaftungsfaktoren kritisch zu betrachten. Sowohl standort- als auch bewirtschaftungsrelevante Informationen finden Eingang in das eigentliche Ertragsmodell. Die Klassifizierung der Informationsströme in *Abbildung 4* dient der Zuordnung von Problembereichen und den davon betroffenen Komponenten im Gesamtbild des Systems.

In *Abbildung 4* wurden teilweise Begriffe eingeführt, die zum allgemeinen Verständnis einer Erklärung bedürfen. Im Folgenden wird jede Komponente kurz beschrieben, um deren Aufgabe klarzustellen.

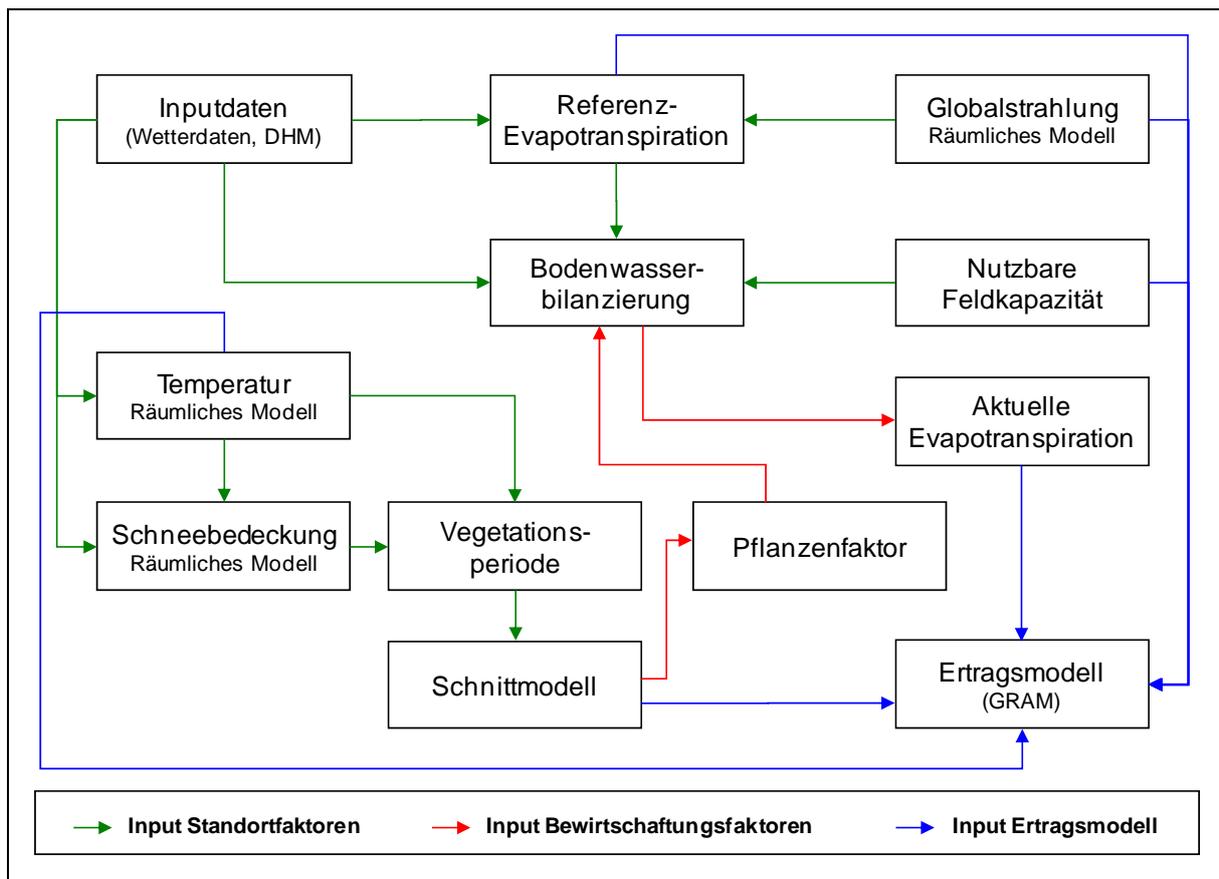


Abbildung 4: Modellkomponenten und deren Abhängigkeiten

Inputdaten: Dabei handelt es sich einerseits um Wetterdaten, welche auf Messungen an georeferenzierten Wetterstationen beruhen und andererseits um ein DHM in einer Auflösung von 250 Meter.

Referenz-Evapotranspiration: Dieser Wert beschreibt die Verdunstungsmenge in mm auf einer hypothetischen Referenzoberfläche mit ausreichender Wasserversorgung. Diese Oberfläche ist durch Grasbedeckung mit einer angenommenen Schnittlänge von 12 cm, einem aerodynamischen Widerstandsbeiwert von 70 s m^{-1} und einem Albedowert von 0,23 charakterisiert (Allen *et al.*, 1998). Der Verdunstungswert setzt sich aus der Evaporation (Verdunstung auf unbewachsenem Boden) und der Transpiration (Verdunstung durch Pflanzen) zusammen.

Globalstrahlung: Sie ist jene Energiemenge, die in Form von direkter Sonnenstrahlung und diffuser Himmelsstrahlung auf die Erde gelangt. Das räumliche Modell beschreibt die Variabilität dieser Größe in Rücksicht auf topographische Aspekte.

Bodenwasserbilanz: Der Wassereintrag in den Boden in Form von Niederschlägen und dessen Entzug durch Abfluss, Versickerung und Evapotranspiration wird bilanziert.

Nutzbare Feldkapazität: Sie spielt in der Bodenwasserbilanzierung eine große Rolle, da sie die Eigenschaft des Bodens als Puffer zwischen Wassereintrag und -entzug wiedergibt. Das

unterschiedliche Speichervermögen von Böden, also jene Eigenschaft, das Wasser entgegen der Schwerkraft in den oberen Bodenschichten zu halten, wird besonders in Trockenperioden zu einem Schlüsselfaktor für das Pflanzenwachstum.

Temperatur: Die Temperatur wird ausgehend von den Messstationen mittels höhenabhängiger Interpolation als kontinuierliche Oberfläche für die verschiedenen weiteren Analysen zur Verfügung gestellt.

Schneebedeckung: Das räumliche Modell beschreibt die Schneebedeckung auf Tagesbasis in Form einer kontinuierlichen Oberfläche des Wasseräquivalents des Schnees.

Vegetationsperiode: Mit dem Erreichen entsprechender Temperaturen und einer schneefreien Oberfläche beginnt das Pflanzenwachstum und geht mit dem Sinken der Temperaturen im Herbst wieder in die Ruheperiode über.

Schnittmodell: Jeder Grünlandaufwuchs benötigt bis zur Ernte eine gewisse Zeit und die relative Verteilung auf die an einem Standort zur Verfügung stehende Vegetationsdauer ergibt eine grobe Annäherung der dort möglichen Schnitzzahl. Allerdings wird nicht auf die standortangepasste tatsächliche Bewirtschaftungsform (intensiv vs. extensiv) eingegangen.

Pflanzenfaktor: Abgeleitet aus dem Schnittmodell stellt der Pflanzenfaktor die theoretische Wuchshöhe der Grünlandpflanzen dar und beeinflusst damit die Bodenwasserbilanzierung einerseits beim Wassereintrag durch den Interzeptionswert (Niederschlagswasser, das an der Pflanzenoberfläche verdunstet, ohne in den Boden zu gelangen) und andererseits beim Wasserentzug durch die vermehrte Transpiration bei Zunahme der Biomasse.

Aktuelle Evapotranspiration: Im Gegensatz zur Referenzverdunstung, welche die durch meteorologische Parameter begründete „Soll“-Verdunstung bei ausreichender Wasserversorgung beschreibt, spielt der von Niederschlag und nutzbarer Feldkapazität beeinflusste Bodenwasserhaushalt eine wichtige Rolle. Die aktuelle Verdunstung kann damit aus dem für Grünlandpflanzen relevanten Bodenhorizont abgeleitet werden.

Ertragsmodell: Im Zuge der Vorarbeiten zu diesem Projekt wurde ein statistisches Modell (Grassland Statistical Model – GRAM) von Trnka *et al.* (2006) erarbeitet, welches die Ergebnisse aus den verschiedenen hier vorgestellten Modellen heranzieht und eine Berechnung des Grünlandertrages, insbesondere in Trockenstresssituationen, ermöglicht. Die Berücksichtigung neuer Beobachtungsdaten und einer darauf basierten neuerlichen Kalibrierung des Modells mit einer Überarbeitung der Modellparameter ist ein wesentlicher Schwerpunkt dieser Arbeit.

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. Zunächst wird die dafür notwendige Systemumgebung erläutert und auf die wichtigsten Inputdaten eingegangen.

2.1 Systemumgebung

Eine leistungsfähige Hardware ist die Voraussetzung für die Durchführung aufwendiger Rechenprozeduren. Der Entwicklungsrechner ist mit einem leistungsfähigen Prozessor, ausreichendem Arbeitsspeicher und einem Storage-System ausgestattet. Zum Datenbankserver mit ähnlicher Systemkonfiguration besteht eine direkte Verbindung, die auf den Schreib- und Leszugriff großer Datenmengen ausgerichtet ist. Beide Rechner laufen mit dem Betriebssystem Microsoft Windows Server 2003.

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 Programm-bibliothek ArcObjects eine zentrale Rolle spielt und zur Implementierung von GIS-Funktionalität in die Algorithmen eingebunden wird. Die komplette Loslösung von der ArcGIS-Oberfläche bringt bei den vielen sehr rechenintensiven Prozeduren einen signifikanten Performancegewinn.

Die Datenhaltung der Inputdaten erfolgt mit einer zentralen Datenbank im Datenbankmanagementsystem Microsoft SQL Server und der Spatial Extension ArcSDE von ESRI. Die Speicherung von Zwischenergebnissen wird filebasiert vorgenommen, wobei die programmierten Methoden nach Möglichkeit die Zwischenergebnisse temporär in den Speicher legen und so auf die Daten für die weiteren Bearbeitungsschritte mit hoher Lesegeschwindigkeit 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 verhindert.

2.2 Datengrundlage für die Implementierung

Das konzipierte System ist dadurch gekennzeichnet, dass nur wenige Datensätze als Input für die verwendeten Modelle einfließen. Dies erleichtert die im Vorfeld notwendige Aufbereitung der Datengrundlage. Allerdings muss darauf geachtet werden, dass sämtliche Daten für die Integration in ein GIS und damit für eine räumliche Implementierung geeignet sind.

2.2.1 Digitales Höhenmodell

Für die Interpolation von Wetterdaten, 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 meteorologische Daten in der Regel kein dichtes Messstellennetz aufweisen. Die Basisdaten dafür stammen vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) und wurden durch Resampling aus einem 50-Meter-Modell gerechnet.

Als Methode wird dazu die bilineare Interpolation verwendet, welche für kontinuierliche Daten mit beabsichtigter Glättung gut geeignet ist. Dabei wird der Durchschnittswert der nächstliegenden Zellwerte mit Distanzgewichtung in den Wert der neuen Zelle überführt (Bartelme, 2000, 153f).

2.2.2 Meteorologische Messdaten

Der wichtigste Input in das System sind die verschiedenen meteorologischen Parameter. Diese sind Temperatur, relative Luftfeuchte, Wind, Globalstrahlung und Niederschlag. Um von den implementierten Algorithmen ordnungsgemäß übernommen zu werden, sind diese Daten in einer Tabelle mit standardisierten Attributnamen und einer Anpassung der für die Verarbeitung vorgesehenen Einheiten aufzubereiten. Dabei ist auch eine Georeferenzierung der Messstationen als Voraussetzung für geostatistische Interpolationen vorzunehmen.

Als Geographisches Bezugssystem wird für sämtliche Geodaten die Lambert-Projektion verwendet (Lambert Conformal Conic). Mit dieser winkeltreuen Schnittkegelprojektion wird eine für ganz Österreich vertretbare Verzerrung erreicht und deshalb grundsätzlich bei der Betrachtung des gesamten Bundesgebietes verwendet. Alle Oberflächenraster, die von den georeferenzierten Wetterstationen abgeleitet werden, beziehen sich stets auf dieses Raumbezugssystem. Zum Zweck der Standardisierung gilt dies auch dann, wenn nur Teile Österreichs untersucht werden und eine andere Projektion bessere Abbildungsergebnisse liefern würde.

Die Berechnung der kontinuierlichen Temperatur-, Niederschlags- und Evapotranspirationsoberflächen auf Tagesbasis setzt zumindest täglich gemessene Stationswerte voraus. Für die Einbeziehung von Temperatur, relativer Luftfeuchte, Wind und Globalstrahlung in die Referenz-Evapotranspiration wurden Daten der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), für den Niederschlag im Bodenwasserbilanzmodell eine Kombination aus Messungen der ZAMG und des Hydrographischen Zentralbüros (HZB) herangezogen.

Abbildung 5 zeigt die räumliche Verteilung der Messstationen für alle in die Interpolationen einbezogenen meteorologischen Daten. Für alle stationsbezogenen Implementierungen wurde das gesamte Bundesgebiet herangezogen. Im Schnitt können täglich ca. 260 Stationen für Temperatur, relative Luftfeuchte, Wind und mit Einschränkung die Globalstrahlung (ZAMG) und ca. 1180 Stationen für den Niederschlag (ZAMG und HZB) verwendet werden.

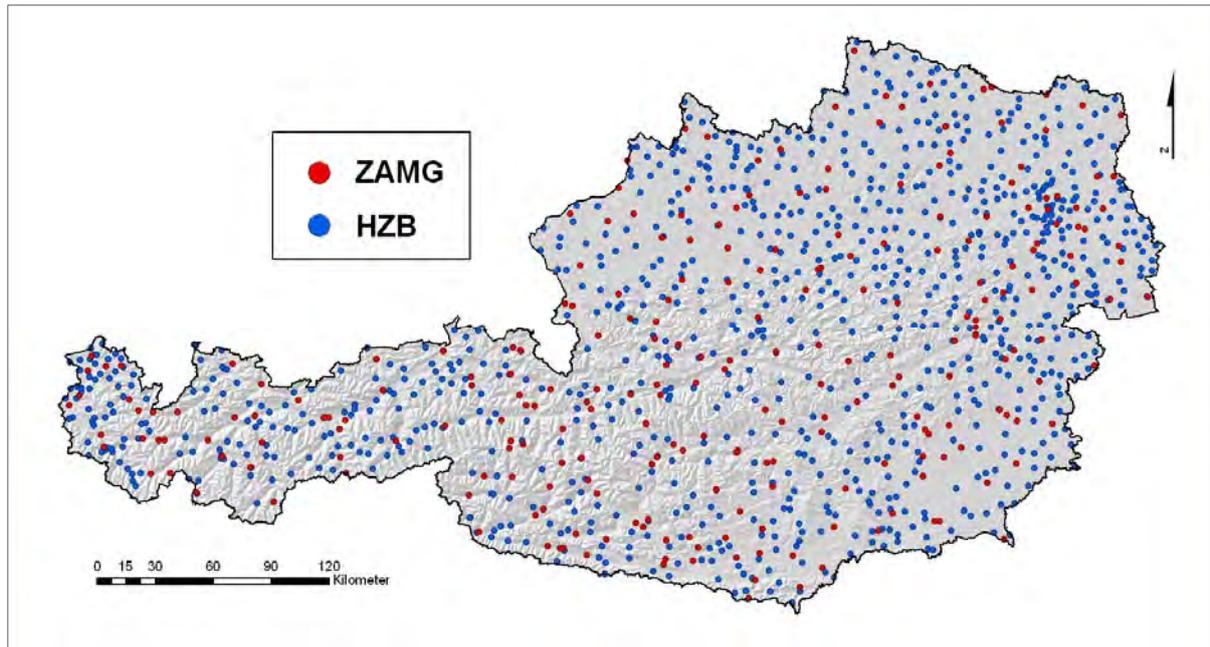


Abbildung 5: Räumliche Verteilung der Messstationen

Eine Nachbarschaftsanalyse der Stützpunkte des ZAMG-Messnetzes mit 257 Stationen ergibt folgende Werte:

| | |
|--|----------|
| <i>Mean Nearest Neighbor Distance</i> | 10.289 m |
| <i>Standard Deviation of Nearest Neighbor Distance</i> | 5.548 m |
| <i>Nearest Neighbor Index</i> | 0,84 |

Die Werte zeigen eine statistisch signifikante zufällige Verteilung (Z-Test: -4,97), welche eine gute Voraussetzung für die Temperaturinterpolation darstellt. Der mittlere Abstand zwischen den Messpunkten ist mit über 10.000 Meter zwar relativ hoch, Interpolationsfehler werden jedoch durch die hier angewandte Methode der höhenabhängigen Interpolation (Georegression) minimiert.

Die Verteilung des Niederschlags weist nicht wie die Temperatur diesen ausgeprägten Zusammenhang mit der Höhe auf, vielmehr wird die Niederschlagsmenge von Stau- und Föhn-effekten beeinflusst (Häckel, 2005, 151). Ein möglichst dichtes Netz an Niederschlagsmessstellen, welche die räumliche Variabilität näherungsweise abbilden, kann dazu beitragen, die Interpolationsfehler so gering wie möglich zu halten.

Die Verteilung der Kombination von ZAMG- und HZB-Stationen mit insgesamt 1182 Messstellen weist folgende Charakteristika auf:

| | |
|--|---------|
| <i>Mean Nearest Neighbor Distance</i> | 4.790 m |
| <i>Standard Deviation of Nearest Neighbor Distance</i> | 2.038 m |
| <i>Nearest Neighbor Index</i> | 0,82 |

Die mittleren Abstände zwischen den Stationen werden bei Einbeziehung der HZB-Messungen deutlich verringert. Auch hier weist die Verteilung eine statistisch signifikante Zufälligkeit auf (Z-Test: -11,90). Diese Erhöhung der Messdichte ist für die kritische Niederschlagsinterpolation eine entscheidende Maßnahme, wobei auch damit die kleinräumigen Unterschiede in der Niederschlagsverteilung nicht vollständig abgebildet werden können.

Hinsichtlich der vertikalen Verteilung ergibt sich bei 1182 Stationen ein Wertebereich von 115 bis 3105 Meter Seehöhe mit einem Mittelwert von 681 Meter und einer Standardabweichung von 442. Der Median liegt bei 580 Meter. Für die Bildung von Interpolationsoberflächen spielt die vertikale Verteilung nur eine untergeordnete Rolle, zudem bei der Temperatur die Höhe explizit berücksichtigt wird.

2.3 Rasterdatenmodell

Ausgehend von der Datengrundlage, die im Fall der Wetterstationen diskrete Objekte darstellen, sind die weiteren Basisdaten sowie alle daraus entwickelten Ergebnisse kontinuierliche Oberflächen. Das adäquate Datenmodell im GIS zur Repräsentation derartiger Inhalte stellt das Rasterdatenmodell dar.

„The continuous field view represents the real world as a finite number of variables, each one defined at every possible position.“ (Longley et al., 2005, 72). Bei der modellhaften Beschreibung eines Sachverhaltes der realen Welt kann sich diese auf jeden betrachteten Punkt eines Untersuchungsgebietes beziehen. Die Repräsentation in Form diskreter Objekte wäre hier nahezu unmöglich. Beispielsweise kann die Topographie viel besser mit einem Höhenwert pro abgegrenzte Teileinheit beschrieben werden, als dies diskret und im Vektordatenmodell möglich ist, wo alle möglichen Ausprägungen einer Landschaft zu berücksichtigen wären.

Das Rasterdatenmodell bietet die Möglichkeit, ein Untersuchungsgebiet in meist quadratische Einheiten, gleich einer Matrix mit Spalten und Zeilen, zu teilen und jeder Zelle einen Wert zuzuweisen. *„Raster representations divide the world into arrays of cells and assign attributes to the cells.“* (Longley et al., 2005, 72). Die Anwendung umfasst die Repräsentation physikalischer Phänomene wie z.B. Temperatur, Niederschlag, Topographie, die flächendeckende Beschreibung von Landnutzung, Distanzoberflächen, usw. Bilder stellen ebenfalls Rasterdaten dar, deren Zellinhalte (Pixel) einen Reflexionswert des elektromagnetischen Spektrums annehmen (z.B. Satelliten- und Luftbilder mit unterschiedlichen Kanälen) (Bernhardsen, 2002, 73ff).

Die geometrische Auflösung des Modells hängt von der Zellgröße ab. Je größer diese Auflösung ist, desto mehr wird die dargestellte Oberfläche geglättet (generalisiert), je feiner und hoch aufgelöster, desto mehr Details können herausgearbeitet werden. Der geographische Bezug wird durch die horizontale und vertikale Lage des ersten, im linken oberen Eck befindlichen Pixels definiert. Der große Vorteil dieses relativ simplen Datenmodells von nach ein-

heitlichem Muster angeordneten Zellen ist die einfache Berechnung neuer Werte aus der Kombination mehrerer Themen (Bernhardsen, 2002, 73ff). GIS-Software bietet dazu ein breites Spektrum an Map-Algebra-Funktionalität, die auch in den Implementierungen dieser Arbeit intensiv genutzt wurde.

2.4 Untersuchungsgebiet und -zeitraum

Im Forschungsprojekt „Räumliche Modellierung von Grünlanderträgen unter Berücksichtigung von Witterungseinflüssen“ wurde ursprünglich das Untersuchungsgebiet „Bezirk Hartberg“ ausgewählt. Dieses Gebiet ist durch seine Repräsentativität hinsichtlich topographischer Unterschiede und der verschiedenen Wasserverfügbarkeitsverhältnisse für die Modellanforderungen gut geeignet. Allerdings konnten geostatistische Interpolationen von Wetterdaten mit den wenigen Messstationen im Bezirk Hartberg (siehe *Abbildung 6*) nicht durchgeführt werden, da die für eine Anwendung der Methode Kriging notwendige Anzahl an Wertepaarbildungen nicht möglich war. Aus diesem Grund wurde das Untersuchungsgebiet auf eine das Bundesland Steiermark umgebende Bounding-Box ausgedehnt (farbliche Reliefdarstellung in *Abbildung 6*).

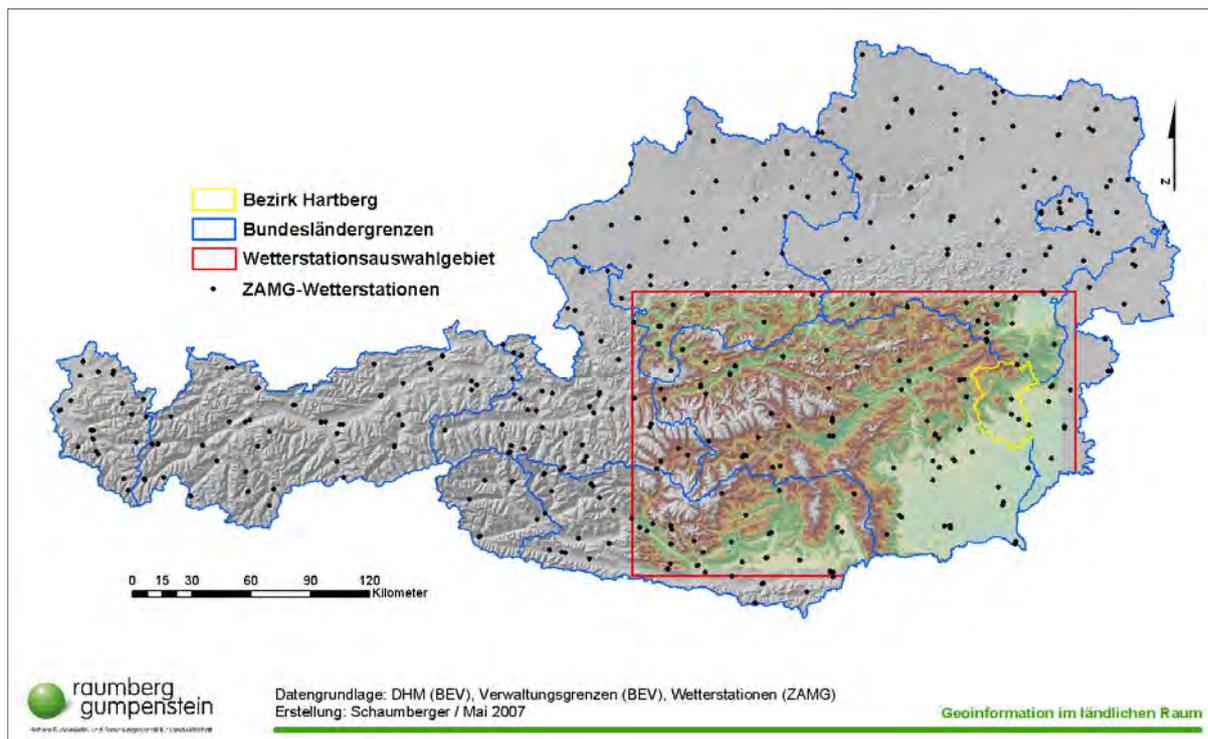


Abbildung 6: Untersuchungsgebiet für die Ertragsermittlung

Damit die nächstliegenden Messstationen um das Untersuchungsgebiet mitberücksichtigt werden konnten, wurde das Auswahlfenster für die Messstationen etwas über dieses Gebiet hinaus verschoben. Damit werden auch die Randbereiche der Interpolationsraster besser repräsentiert. Der Grund für die Einschränkung auf ein Untersuchungsgebiet liegt im extrem hohen Rechenaufwand, der für das ganze Bundesgebiet erhebliche Zeit in Anspruch nehmen

würde und sich auch schon für die Steiermark im Bereich von einigen Wochen befindet. Für den Untersuchungszeitraum wurden verschiedene Jahre bzw. Vegetationsperioden (März bis Oktober) aus den aufbereiteten Wetterdaten des Zeitraums 1990 bis 2009 verwendet. Es ist jederzeit möglich, die räumlichen Modelle für alle diese Jahre auszuführen. Im Programm sind lediglich die Parameter *dateFrom* und *dateTo* entsprechend anzupassen. Die Berechnungen müssen sich auf eine vollständige Vegetationsperiode beziehen, da tageweise aufbereitete Daten teilweise akkumuliert werden müssen. Einige GIS-Analysen wurden über das Untersuchungsgebiet hinaus für ganz Österreich durchgeführt.

2.5 Beschreibung der implementierten Modelle

Die verschiedenen Modelle, welche für die Ertragsermittlung in einer gewissen hierarchischen Reihenfolge Verwendung finden, werden in diesem Abschnitt sowohl methodisch als auch hinsichtlich der fachlichen Einbettung in die Gesamtmodellierung beschrieben. In weiterer Folge wird deren Anwendung exemplarisch anhand von Implementierungsbeispielen gezeigt. In Schaumberger (2005) findet sich zu jenen Modellen, welche die Grundlagen der bisherigen Arbeiten waren, eine detaillierte Beschreibung. Modelle, die im vorliegenden Projekt neu entstanden sind bzw. signifikant verbessert wurden, werden dagegen ausführlich erläutert.

2.5.1 Räumliche Modellierung der Globalstrahlung

Die Globalstrahlung ist im Zusammenhang mit der Ertragsmodellierung einer der wichtigsten Parameter. Für deren Berechnung werden die 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) benötigt (siehe *Abbildung 4*).

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 und Rich (1999). Unter Einbeziehung eines Digita-

len 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. Einstellungen hinsichtlich des Verhältnisses von direkter und diffuser Strahlung bzw. der Transmittivität der Atmosphäre variieren monatlich und wurden nach Schaumberger (2005) durch Vergleich von Modellergebnissen und einem Durchschnitt von monatlichen Maximumwerten aus Beobachtungen angepasst.

In diesem Projekt wird die Globalstrahlung als Summe für jeden Tag der Vegetationsperiode benötigt. Die Anforderung an technische Ressourcen ist bei einer flächendeckenden Berechnung des dafür notwendigen Strahlungsfaktors derart hoch, dass dies 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 ist für die Berechnung kleiner Gebiete ausgelegt. Die Anwendung auf die Fläche eines Bundeslandes wie die Steiermark bzw. auf ganz Österreich führt bei einer Rasterauflösung von 50 m bzw. 250 m zu massiven Speicherproblemen. Es wurde daher ein Algorithmus entwickelt, welcher in der Art eines „Moving Windows“ die Berechnungsfläche in Kacheln unterteilt, jede Kachel für sich unter Einbeziehung der jeweiligen „Solar Radiation“-Methoden aus der ArcObjects-Bibliothek berechnet und alle Ergebnisse abschließend zu einem gemeinsamen Raster zusammenführt. Die Größe eines Berechnungsabschnittes beträgt dabei 30 x 30 km. Die für die ordnungsgemäße Berücksichtigung der Abschattung an den Rändern dieses Bereiches notwendige Topographieinformation wird aus einem 10 km breiten Rahmen um die jeweilige Kachel entnommen.

Bei der Implementierung wurde besonders auf exakt definierte Schnittstellen Wert gelegt, denen vom Benutzer lediglich Informationen über das zu berechnenden DHM, die Kachel- bzw. Rahmengröße und die beabsichtigte Auflösung des Ergebnisses übergeben werden. Sämtliche Berechnungsschritte können mit diesen Angaben ohne weitere Benutzereingriffe ausgeführt werden und ermöglichen damit eine sehr flexible und eine von der räumlichen Ausdehnung des Untersuchungsgebietes unabhängige Anwendung.

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 7* ist der Unterschied zwischen den Varianten schematisch dargestellt. Die Veränderungen im Einstrahlungswinkel aufgrund der verschiedenen Oberflächenstruktur führen auch zu unterschiedlichen Ergebnissen in den Strahlungssummen.

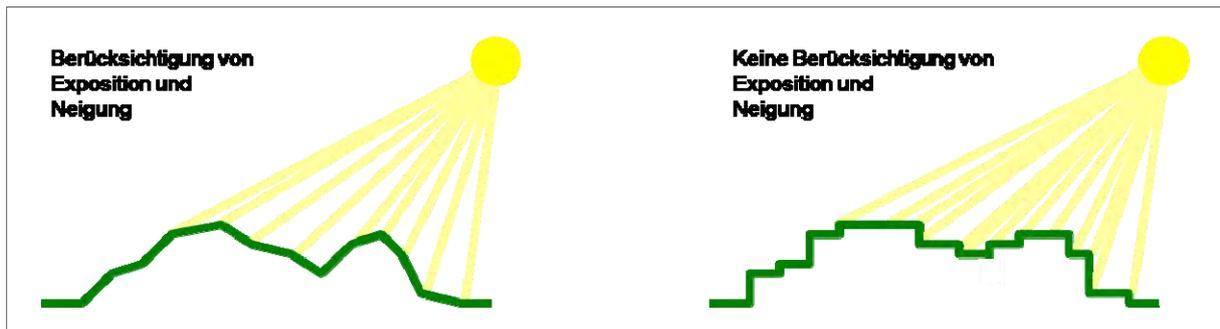


Abbildung 7: Schema der Berücksichtigung unterschiedlicher Geländeoberflächen

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 in der Form

$$\text{Strahlungsfaktor } (R_f) = \frac{\text{Strahlung mit Exposition und Neigung}}{\text{Strahlung ohne Exposition und Neigung}}$$

miteinander in Beziehung gesetzt. Andere topographische Eigenschaften wie Abschattungseffekte, die geographische Lage sowie die Seehöhe sind in beiden Rasterdaten gleich gesetzt und beeinflussen den Strahlungsfaktor nicht. *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.

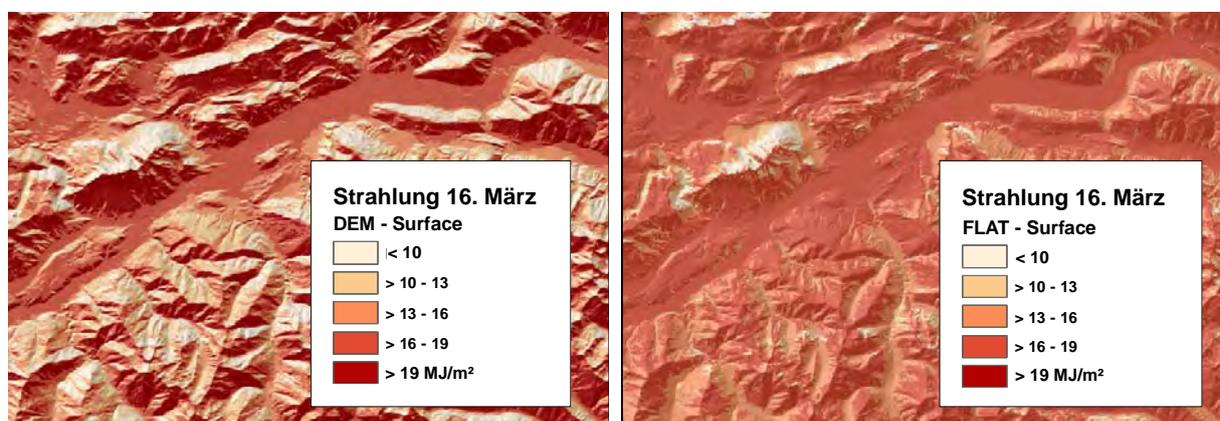


Abbildung 8: Strahlungsraster mit (links) und ohne (rechts) Berücksichtigung von Exposition und Neigung

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 (vgl. *Abbildung 9*) ihre quantitative Entsprechung und können als kontinuierliche Werteoberflächen zur wesentlichen Verbesserung der stationsbasierten, geostatistischen Interpolationsoberfläche herangezogen werden.

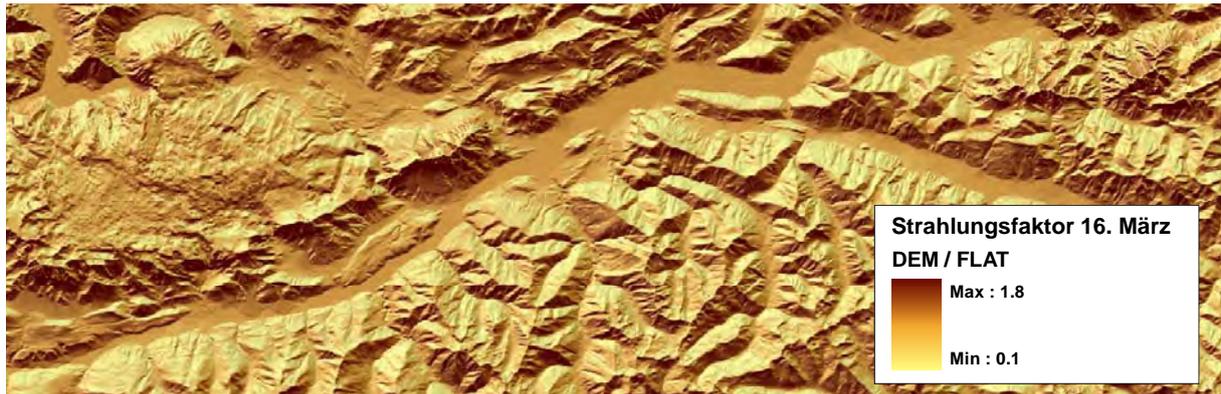


Abbildung 9: Rasterdaten der topographiebedingten Änderung in den Strahlungswerten

Der Zusammenhang zwischen modellierter Globalstrahlung und den an einer Wetterstation gemessenen Werten im Jahresverlauf wird in *Abbildung 10* am Beispiel des Standortes der Wetterstation Hartberg dargestellt. Die langjährigen Durchschnitts-, Maximum- und Minimumwerte basieren auf gemittelte Monatsdaten der Jahre 1995 bis 2007.

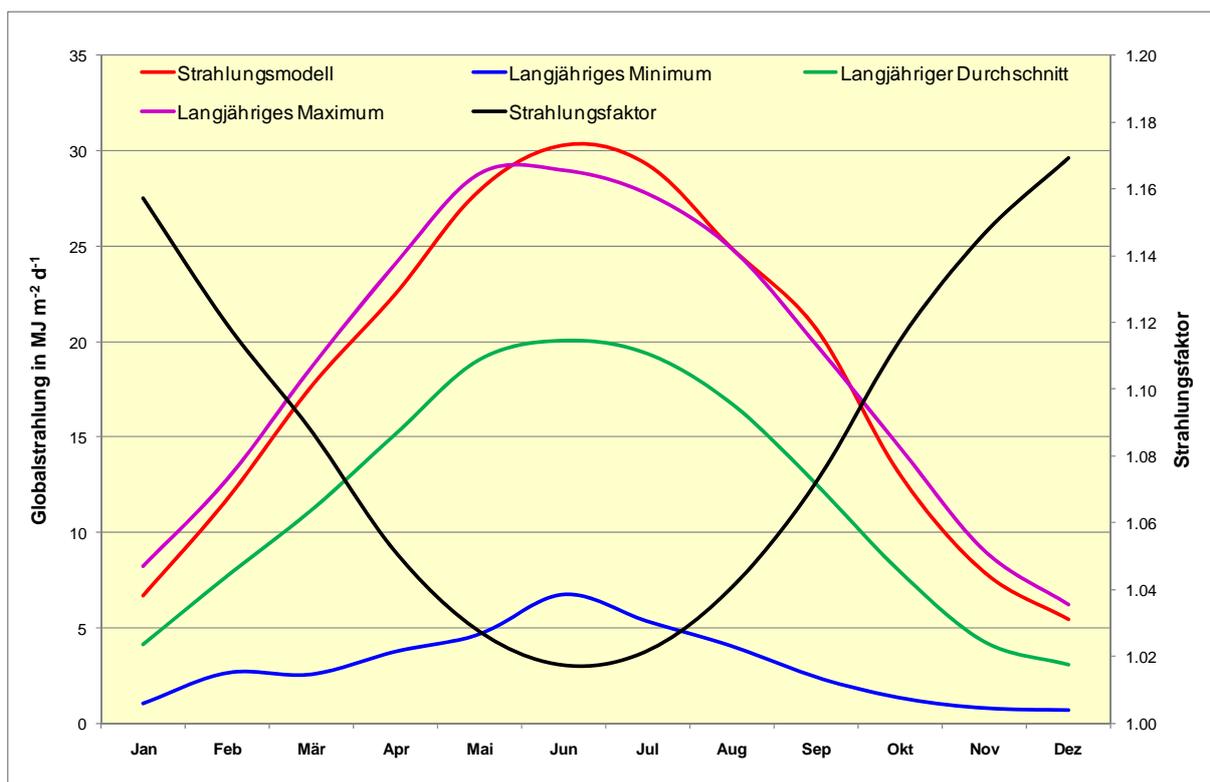


Abbildung 10: Globalstrahlung im Jahresverlauf an der Station Hartberg

Da im Strahlungsmodell die aktuelle Wettersituation wie z.B. Wolkenbedeckung nicht berücksichtigt wird, entsprechen diese Werte näherungsweise der astronomisch möglichen Einstrahlung. Aus diesem Grund sollten sich die Modellergebnisse an den Maximalwerten der Beobachtungsreihe orientieren, wie dies in *Abbildung 10* mit einer mittleren Abweichung von $0.44 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ zum Ausdruck kommt. Wie stark sich die beobachteten Tageswerte von den

Modellwerten im Mittel abheben können, ergibt sich im Vergleich von Modellkurve mit dem langjährigen Durchschnitt. Die normal verteilte Abweichung zwischen beiden Datenreihen beträgt durchschnittlich $6.4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ und kann sich bis zur Minimumkurve ausdehnen. *Abbildung 10* zeigt deutlich, dass die realen Globalstrahlungswerte nicht aus dem Modell abgeleitet werden können und diese nur in Kombination mit den Beobachtungswerten sinnvoll anzuwenden sind. Daher spielt für diese Anwendung nur der aus den zwei unterschiedlichen Implementierungsvarianten abgeleitete Strahlungsfaktor eine Rolle. Im dargestellten Beispiel vermindert sich der Faktor mit Zunahme des Sonnenstandes, da sich Exposition und Neigung im Hochsommer weniger stark auswirken. Der für diese Station aus dem DHM errechnete Wert für die Exposition beträgt 200 Grad, der für die Hangneigung 11 Grad. Diese Bedingungen einer leicht geneigten, südexponierten Lage erklären die höheren Strahlungsfaktoren in den Wintermonaten und den immer noch geringfügig über 1 liegenden Werten im Juni.

Die auf Wetterstationen gestützte Interpolation der beobachteten Globalstrahlung wird Zelle für Zelle mit den Strahlungsfaktoren multipliziert und ergibt einen mit dem Einfluss der Topographie gewichteten Wert, der in die räumlichen Modelle zur Ertragsermittlung integriert werden kann. Für die im nachfolgenden Kapitel dargestellte Modellierung der Referenz-Evapotranspiration ist der Strahlungsfaktor bereits ein wichtiger Modellparameter.

2.5.2 Räumliche Modellierung 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. Am Wasserkreislauf der Erde ist sie mit einem Anteil von 15 % zwar geringer beteiligt als die Evaporation über dem Meer mit 85 % (Ahrens, 2007), doch spielt sie für das System Boden-Pflanze eine umso größere Rolle, zumal das Pflanzenleben durch Wasserangebot und Transpirationsleistung wesentlich bestimmt wird. Außer für die Aufrechterhaltung ökologischer Systeme ist demnach die Evapotranspiration als bestimmender Parameter des Wasserhaushaltes von Pflanzenbeständen auch maßgeblich für die Felderträge in der Landwirtschaft verantwortlich (Ehlers, 1996).

Bei der Berechnung der potenziellen 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 potenzielle Evapotranspiration stellt somit jene Wassermenge dar, welche bei unlimitierter Wasserverfügbarkeit verdunsten könnte.

Ausschlaggebend dafür sind der für den Verdunstungsprozess notwendige Energieeintrag in Form von Strahlung und Temperatur sowie der Feuchtigkeitstransfer durch Wind und Luftfeuchtigkeit in der bodennächsten Atmosphärenschicht (Brown, 2000).

Eine exakte Messung der Evapotranspiration ist schwierig und mit hohen Kosten verbunden, weshalb man zu ihrer Bestimmung im Allgemeinen Gleichungen heranzieht, die sich aufgrund ihrer Anforderungen an vorhandene Wetterdaten in ihrer Komplexität unterscheiden. So kommt die bekannte Formel nach Haude (1955) mit Temperatur- und Luftfeuchtheitsdaten aus, also mit Parametern, die in der Regel an jeder Wetterstation erhoben werden. Andere Ansätze wie beispielsweise jene nach Blaney und Criddle (1950), Turc (1961) oder Hargreaves (1985) benötigen zusätzlich Daten zur Sonnenscheindauer und/oder Globalstrahlung, deren Messungen wesentlich seltener vorgenommen werden. Eine der meistverwendeten Formeln ist die Gleichung nach Penman-Monteith, welche auch von der Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO) empfohlen wird. Fank (2007) hat sich eingehend mit einer Untersuchung dieser Methode beschäftigt und sie mit exakten Messungen in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung verglichen.

Die FAO-Gleichung gehört zu den komplexen, physikalisch basierten Ansätzen und benötigt daher auch eine Reihe von meteorologischen Parametern wie die Globalstrahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchte oder aerodynamische Einflussgrößen. Die Arbeit von Allen *et al.* (1998) bildet mit ihrer detaillierten Beschreibung zur Verwendung der FAO-Penman-Monteith-Gleichung die theoretische Grundlage der hier durchgeführten Berechnungen. Für diese Gleichung wird eine Referenzoberfläche mit Grasbedeckung und einer Schnittlänge von 12 cm, einem Albedowert von 0,23 und einem aerodynamischen Widerstandsbeiwert mit 70 s^{-1} definiert. Die Einführung dieser Referenzoberfläche erleichtert den Vergleich von räumlich und zeitlich differenzierten Ergebnissen und erlaubt auch eine pflanzenartenspezifische Erweiterung durch das zusätzliche Anbringen eines Pflanzenfaktors. Die Erweiterung der Referenz-Evapotranspiration auf jene für nicht standardisierte Bedingungen hinsichtlich Vegetationsdecke und Wasserverfügbarkeit ist insbesondere für die in der vorliegenden Arbeit durchgeführte GIS-Implementierung der Bodenwasserbilanz eine wichtige Grundlage.

Die Referenz-Evapotranspiration wird stationsbezogen und auf Tagesbasis errechnet. Als Untersuchungszeitraum für eine ausführliche Evaluierung des hier implementierten Ansatzes wurde das Jahr 2003 zwischen März und Oktober (Vegetationsperiode) gewählt, wobei die meteorologische Datenerhebung an 274 über ganz Österreich verteilten Klimastationen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) mit einer mittleren Nachbarschaftsdistanz von 9.373 m erfolgte. Die Messung des für die Evapotranspiration wichtigsten Parameters, und zwar der Globalstrahlung, erfolgte in diesem Zeitraum jedoch lediglich an 110 Stationen mit einer signifikant höheren mittleren Nachbarschaftsdistanz von 15.866 m. Damit die restlichen 164 Stationen nicht aus der Menge der Stützstellen für die geostatistische Interpolation herausfallen und vor allem im Bergland die Stationsdichte erhalten bleibt, wird die potenzielle Evapotranspiration bzw. die Globalstrahlung mit den nachfolgend vorgestellten Methoden geschätzt. Die für die Interpolation vor allem im Bergland wichtige Stationsdichte bleibt dadurch erhalten. *Abbildung 11* zeigt die räumliche Verteilung der Stationen,

von denen 33 als zufällig ausgewählte Teststationen für die abschließende Evaluierung und Validierung der Ergebnisse herangezogen werden.

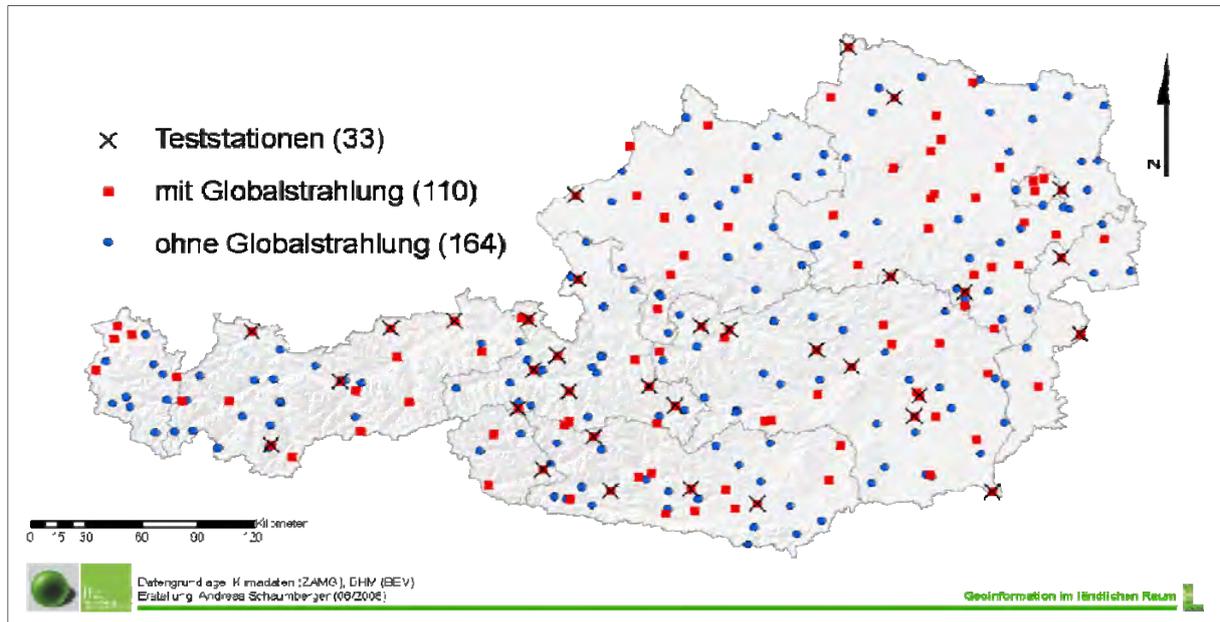


Abbildung 11: Verteilung der im Untersuchungszeitraum einbezogenen Klimastationen der ZAMG

2.5.2.1 Berechnung der Referenz-Evapotranspiration

Die FAO-Penman-Monteith-Gleichung (2.5.2-1) wird bei Verfügbarkeit der notwendigen Wetterdaten auf Tagesbasis angewandt und hat die Form

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot vpd}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)}, \quad (2.5.2-1)$$

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

Der Wind wird an meteorologischen Stationen in 10 Meter Höhe gemessen. Um auf die in (2.5.2-1) geforderte Höhe von 2 Meter über Grund zu kommen, wird in (2.5.2-2) ein logarithmisches Windgeschwindigkeitsprofil der Form

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8 \cdot z - 5.42)} \quad (2.5.2-2)$$

zur Anpassung verwendet, wobei z die Messhöhe über dem Boden [m] und u_z die Windgeschwindigkeit [m s^{-1}] in z Meter Höhe angibt.

Die Beziehung zwischen Sättigungsdampfdruck und Temperatur wird durch die Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve Δ [kPa °C⁻¹] ausgedrückt und wie folgt berechnet:

$$\Delta = \frac{4098 \cdot 0.6108 \cdot e^{\frac{17.27T}{T+237.3}}}{(T+237.3)^2} \quad (2.5.2-3)$$

Für die Berechnung der Psychrometerkonstante γ [kPa °C⁻¹] wird in der vorliegenden Arbeit der atmosphärische Druck als Funktion der Seehöhe z herangezogen:

$$\gamma = 0.665 \cdot 10^{-3} \cdot 101.3 \cdot \left(\frac{293 - 0.0065 \cdot z}{293} \right)^{5.26} \quad (2.5.2-4)$$

Der Berechnung des Sättigungsdefizits vpd [kPa] geht die Bestimmung des Sättigungsdampfdrucks e_s [kPa] nach Deutschem Wetterdienst (1976) voraus:

$$e_s = 0.61078 \cdot e^{\left(\frac{17.08085T}{234.175+T} \right)} \quad (T > 0) \quad e_s = 0.61078 \cdot e^{\left(\frac{17.84362T}{245.425+T} \right)} \quad (T < 0) \quad (2.5.2-5)$$

Weiters wird der aktuelle Dampfdruck e_a [kPa] benötigt, welcher näherungsweise aus der relativen Luftfeuchtigkeit RH [%] in der Form

$$e_a = e_s \cdot \frac{RH}{100} \quad (2.5.2-6)$$

abgeleitet werden kann. Die Differenz aus e_s und e_a ergibt das Sättigungsdefizit vpd , wobei im Unterschied zu Allen *et al.* (1998) in (2.5.2-1) nicht der Tagesmittelwert Verwendung findet, sondern die Differenzen um 7:00, 14:00 und 19:00 Uhr separat gebildet und anschließend gemittelt werden.

$$vpd = \frac{(e_s - e_a)_{7h} + (e_s - e_a)_{14h} + (e_s - e_a)_{19h}}{3} \quad (2.5.2-7)$$

Das Sättigungsdefizit wird zu den einzelnen Tageszeiten bestimmt und in weiterer Folge kann dadurch eine Verbesserung des Mittelwertes erreicht werden.

2.5.2.2 Berechnung der Globalstrahlung und Strahlungsbilanz

Vor allem bei den Daten für Globalstrahlung und Sonnenscheindauer gibt es sowohl räumlich als auch zeitlich erhebliche Datenlücken. Aus diesem Grund wird bei fehlender Globalstrahlung das Modell nach Angström verwendet (Allen *et al.*, 1998), das auch in einem Methodenvergleich von Trnka *et al.* (2005) in der Form

$$R_s = \left(a_s + b_s \cdot \frac{n}{N} \right) \cdot R_a \quad (2.5.2-8)$$

empfohlen wird, wobei R_s die Globalstrahlung [MJ m⁻² d⁻¹] ist, die Konstanten a_s mit dem Wert 0,25 und b_s mit 0,50 von Allen *et al.* (1998) vorgeschlagen werden und n die aktuelle Sonnenscheindauer [h] sowie N die maximal mögliche Sonnenscheindauer [h] bezeichnen. R_a

bezeichnet die extraterrestrische Strahlung [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]. R_a wird auf Tagesbasis berechnet und hat die Form

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} \cdot G_{SC} \cdot d_r \cdot [\omega_s \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s)] \quad (2.5.2-9)$$

wobei G_{SC} die Solarkonstante $0,0820 \text{ [MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}\text{]}$, d_r die inverse relative Distanz Erde-Sonne [rad] (2.5.2-10), δ die Sonnendeklination [rad] (2.5.2-11), ω_s den Stundenwinkel der Sonne bei Sonnenuntergang [rad] sowie φ die geographische Breite [rad] bezeichnen. Die inverse relative Distanz Erde-Sonne d_r sowie die Sonnendeklination δ sind gegeben durch

$$d_r = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot J\right) \quad (2.5.2-10)$$

$$\delta = 0.409 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot J - 1.39\right) \quad (2.5.2-11)$$

wobei J den Tag des Jahres im Wertebereich von 1 bis 365 bzw. 366 bezeichnet.

Der in (2.5.2-9) verwendete Stundenwinkel ω_s [rad] ist gegeben durch

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad (2.5.2-12)$$

Die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer N [h] ergibt sich aufgrund der Beziehung

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (2.5.2-13)$$

Als astronomisch mögliche Sonnenscheindauer wird N ohne Berücksichtigung der Abschätzung durch die Topografie bestimmt und hat deshalb bei hoher Reliefenergie eine Unterschätzung der in (2.5.2-8) berechneten Globalstrahlung zur Folge. Die in Gleichung (2.5.2-1) einzusetzende Strahlungsbilanz R_n ermittelt man als Differenz von kurzwelliger Nettostrahlung R_{ns} und langwelliger Nettostrahlung R_{nl} gemäß der Beziehung:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2.5.2-14)$$

Die Berechnung von R_{ns} [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$] erfolgt gemäß der Beziehung $R_{ns} = (1-\alpha) R_s$, wobei α den Albedowert 0,23 für die hypothetische Grasreferenzoberfläche darstellt. Die langwellige Nettostrahlung R_{nl} [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$] wird in der Form

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left[\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right] \cdot (0.34 - 0.14 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot \left(1.35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (2.5.2-15)$$

berechnet, wobei σ die Stefan-Boltzmann-Konstante [$4.903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$] darstellt. Die Maximum- und Minimumtemperaturen T_{\max} bzw. T_{\min} sind in Kelvin umzurechnen. R_{so} beschreibt die potenzielle Strahlung (clear-sky radiation) [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$] und wird unter Berücksichtigung der Seehöhe z gemäß der Beziehung

$$R_{so} = (0.75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z) \cdot R_a \quad (2.5.2-16)$$

bestimmt. Für die Gleichung (2.5.2-1) wird die Globalstrahlung R_s als Parameter der Strahlungsbilanz R_n verwendet, sofern sie als Messwert vorhanden ist (an 40 % der Stationen), an-

derfalls wird sie unter Heranziehung von Gleichung (2.5.2-8) geschätzt. Dafür sind jedoch Daten der Sonnenscheindauer n notwendig, welche bei fehlender Globalstrahlungsmessung in 22 % der Beobachtungen verfügbar sind. Die noch verbleibenden 38 % der Datensätze weisen weder eine Messung der Globalstrahlung noch eine der Sonnenscheindauer auf. Für diese erfolgt eine direkte Schätzung der potenziellen Evapotranspiration, welche im Folgenden dargestellt wird.

2.5.2.3 Schätzung der Referenz-Evapotranspiration

Für die Berechnung der Evapotranspiration stehen verschiedene Modelle zur Verfügung, die sich, wie einleitend beschrieben, in ihren Anforderungen hinsichtlich der Inputparameter unterscheiden. Allen *et al.* (1998) führen als Alternative zur FAO-Penman-Monteith-Gleichung die Methode nach Hargreaves (1985) an, welche in der vorliegenden Arbeit für den Untersuchungszeitraum 2003 angewendet und auch von Vicente-Serrano *et al.* (2007) für einen Methodenvergleich der räumlichen Interpolation verwendet wurde:

$$ET_0 = 0.0023 \cdot (T_{mean} + 17.8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0.5} \cdot R_a \quad (2.5.2-17)$$

ET_0 bezeichnet die Referenz-Evapotranspiration [mm d^{-1}], T die Lufttemperatur in 2 m Höhe [$^{\circ}\text{C}$] und R_a die extraterrestrische Strahlung [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$].

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den starken quadratischen Zusammenhang zwischen Sättigungsdefizit (vpd) und potenzieller Evapotranspiration innerhalb der Beobachtungen eines Monats zu nutzen (Schaumberger, 2005).

Aus den für die einzelnen Monate abgeleiteten quadratischen Regressionsgleichungen mit dem Sättigungsdefizit als unabhängiger und der Referenz-Evapotranspiration als abhängiger Variable kann die Referenz-Evapotranspiration für jene Tage und jene Stationen geschätzt werden, an denen weder Globalstrahlungs- noch Sonnenscheindauerdaten verfügbar sind.

2.5.2.4 Räumliche Interpolation der Referenz-Evapotranspiration

Die Interpolation von Wetterdaten bildet eine wichtige Grundlage für einige der hier verwendeten Modelle. Dies gilt insbesondere für die Referenz-Evapotranspiration, die eine Aggregation mehrerer Einzeldaten aus Wetterbeobachtungen darstellt. Beim Einsatz von räumlichen Interpolationsmethoden ist besonders darauf zu achten, dass die bei der Interpolation unvermeidlich auftretenden Fehler so gering wie möglich gehalten werden können. In den hier bearbeiteten Modellen spielt die Höhenabhängigkeit der Temperatur und davon abgeleiteter Parameter eine zentrale Rolle.

Die geostatistische Interpolation unter Einbeziehung zusätzlicher Information, in diesem Fall der Seehöhe, erfährt in der Literatur eine besondere Aufmerksamkeit. Goovaerts (2000) beschreibt drei multivariate geostatistische Algorithmen für die räumliche Schätzung von Niederschlag unter Einbeziehung eines DHM, die aber ebenso auf Temperatur bzw. Evapotranspiration anwendbar sind. Eine ausführliche methodische Auseinandersetzung zu diesem

Thema findet sich in Goovaerts (1997). Eine dieser beschriebenen Methoden wird als „simple kriging with varying local means“ bezeichnet und ist für die vorliegende Arbeit relevant. Die auch als Georegression bezeichnete Methode wird von Blöschl und Merz (2002) ebenfalls für die Niederschlagsinterpolation mit Höhenabhängigkeit angewendet.

In einem ersten Schritt wird eine Regression der zu interpolierenden Größe (z.B. Referenz-Evapotranspiration) mit der Zusatzvariablen (z.B. Seehöhe) aufgestellt. Die Regressionsgleichung liefert die Werte für alle Positionen der Zusatzinformation (z.B. DHM bei der Seehöhe). Anschließend werden die Residuen, welche an den Messpunkten durch die Differenz zwischen Regressions- und Messwert bestimmt sind, geostatistisch mittels Kriging interpoliert und hinzugezählt. Die Methode wird in einer Arbeit von Li *et al.* (2003a) als *Elevationally Detrended Ordinary Kriging* bezeichnet und setzt sich explizit mit der räumlichen Repräsentation der Referenz-Evapotranspiration auseinander. Li *et al.* (2003b) haben dazu eine eigene Implementierung als Erweiterung zu ArcGIS vorgenommen. Eine ausführliche Beschreibung der Georegression findet sich in einer Arbeit von Clark und Clausen (1981). Im Rahmen von COST 719 „The use of geographical information systems in climatology and meteorology“ wurde von Tveito *et al.* (2006) die Methode als *Residual Kriging* oder *Detrended Kriging* beschrieben.

Im vorliegenden Projekt wird gemäß der in der Literatur angegebenen Methodik ein in den Monaten der Vegetationsperiode starker linearer Zusammenhang zwischen Referenz-Evapotranspiration und Seehöhe genutzt (Schaumberger, 2005). Man ermittelt zunächst die Koeffizienten a_m und b_m der Regressionsgeraden mit der Referenz-Evapotranspiration ET_0 [mm d⁻¹] als abhängiger sowie der Seehöhe z [m] an der Wetterstation als unabhängiger Variablen aus den Beobachtungsdaten eines gesamten Monats m in der Form

$$\widehat{ET}_{0m} = a_m \cdot z + b_m \quad (2.5.2-18)$$

und berechnet danach die Residuen e [mm], also die Differenz zwischen der jeweiligen Referenz-Evapotranspiration eines Tages i und jenen Werten, welche man aufgrund des Regressionsmodells für das Monat m erhält, wobei die Tage i innerhalb des aktuell zu berechnenden Monats liegen ($i \in m$). Die monatlich ermittelte Höhenabhängigkeit wird auf die täglichen Evapotranspirationswerte in der Form

$$e_i = ET_{0i} - \widehat{ET}_{0m} \quad (2.5.2-19)$$

angewendet. Die so errechneten täglichen Residuen werden im Anschluss mittels Ordinary Kriging zu einer kontinuierlichen Oberfläche $Raster(e_i)$ interpoliert. Aus dem höhenabhängigen Anteil der Referenz-Evapotranspiration wird unter Verwendung der in 2.5.2-18 ermittelten Koeffizienten a_m und b_m und mit den Seehöhen z [m] des Digitalen Höhenmodells *DEM* in der Form

$$Raster(ET_{0m}) = a_m \cdot z_{DEM} + b_m \quad (2.5.2-20)$$

ebenfalls eine kontinuierliche Oberfläche $Raster(ET_0)$ für den Monat m erzeugt. Für die Berechnung einer Rasteroberfläche, welche die täglichen Werte der Referenz-Evapotranspiration

enthält und damit das Ergebnis des räumlichen Interpolationsprozesses darstellt, werden der höhenabhängige Anteil und die Werte der täglichen Residuen addiert:

$$\text{Raster}(ET_{0_i}) = \text{Raster}(ET_{0_m}) + \text{Raster}(e_i) \quad (2.5.2-21)$$

Um die Oberfläche der täglichen Referenz-Evapotranspiration zusätzlich mit Informationen über die topographischen Parameter Exposition und Hangneigung zu kombinieren, wird der Strahlungsfaktor R_f (vgl. Kapitel 2.5.1) verwendet. Damit kann die in der Gleichung 2.5.2-1 verwendete Strahlungsbilanz R_n um R_f erweitert werden, wobei die Berücksichtigung nicht an der Station mit einem Einzelwert erfolgt, sondern erst nach der geostatistischen Interpolation der ET_0 durch Kombination von Rasterdatensätzen an jedem Tag i in der Form

$$\text{Raster}(ETr_{0_i}) = \text{Raster}(ET_{0_i}) \cdot \text{Raster}(R_{f_i}) \quad (2.5.2-22)$$

erfolgt. Für jede Rasterzelle der kontinuierlichen Oberfläche $\text{Raster}(ETr_{0_i})$ wird so eine der Abhängigkeit von Exposition und Neigung entsprechende Gewichtung durchgeführt.

Die räumliche Modellierung der Referenz-Evapotranspiration ist der erste Schritt für die weiteren Berechnungen im Rahmen der Bodenwasserbilanzierung.

2.5.3 Räumliche Modellierung der 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. Zhang *et al.* (2004) beziehen dazu Daten aus MODIS Land Surface Temperature (LST) und für die Beschreibung der Vegetationsveränderungen die zu LST in Beziehung gesetzten Zeitreihen der MODIS-Land-Cover-Daten ein. Für die Anwendung in Ertragsmodellen ist die räumliche (1 km) und zeitliche (8 Tage) Auflösung allerdings zu ungenau, um daraus Bewirtschaftungsmaßnahmen (z.B. Schnittzeitpunkte) ableiten zu können. Aasa *et al.* (2004) zeigen mit Hilfe langjähriger phänologischen Aufzeichnungen Veränderungen im Verlauf der Vegetationsperiode für Estland und Zentral- bzw. Osteuropa auf. Dazu werden auch Monatswerte der Luft- und Bodentemperatur sowie Indizes der Nordatlantik- und Arktik-Oszillation eingebunden, welche in Trendanalysen ausgewertet werden. Der Zusammenhang zwischen atmosphärischen Zirkulationen, Temperaturen und der Phänologie in der ersten Jahreshälfte ist signifikant und deshalb ein äußerst interessanter Ansatz zur Bestimmung des Vegetationsbeginns.

Eine Reihe von Arbeiten zur Bestimmung der Vegetationsperiode nutzt einen kombinierten Datenbestand aus phänologischen Aufzeichnungen und Temperaturmessungen. Dieser Ansatz wurde in der vorliegenden Arbeit jedoch auf Grund fehlender Phänologiedaten auf eine rein thermische Vegetationsperiodenbestimmung reduziert, allerdings um eine Komponente erweitert, die den Beginn der Vegetationsperiode vom Vorhandensein bzw. Fehlen der Schneedecke abhängig macht. Auf dieses Modell wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen. Für

die räumliche Modellierung eignet sich der Ansatz der thermischen Vegetationsperiode sehr gut, da hier die Problemstellung auf den Temperaturzusammenhang reduziert und damit stark vereinfacht wird. Trotz der Einfachheit hat sich die thermische Vegetationsperiode in der Praxis bewährt, zumal dafür auch GIS als Modellierungswerkzeug eingesetzt werden kann. Basis der Implementierung bilden täglich gerechnete kontinuierliche Oberflächen der Tagesmitteltemperatur.

2.5.3.1 Räumliche Interpolation der Temperatur

Ausgehend von den Temperaturmessstellen wird unter Ausnützung der Höhenabhängigkeit die Tagesmitteltemperatur zu flächendeckenden Rasterdaten mit 250 Meter Auflösung interpoliert. Der in den Monaten der Vegetationsperiode ausgeprägte Zusammenhang zwischen Temperatur und Seehöhe wird, wie bereits für die in Abschnitt 2.5.2.4 dargestellte Interpolation der Referenz-Evapotranspiration, für die Anwendung der Georegression genutzt. Mit der Gleichung

$$\hat{T}_m = a_m \cdot z + b_m \quad (2.5.3-1)$$

werden die Koeffizienten a_m und b_m der Regressionsgeraden mit der Tagesmitteltemperatur T [°C] als abhängiger sowie der Seehöhe z [m] an der Wetterstation als unabhängiger Variablen aus den Beobachtungsdaten eines gesamten Monats m berechnet. Die Residuen e [mm] als Differenz zwischen der jeweiligen Tagesmitteltemperatur eines Tages i und den Werten der Monate m , wobei die Tage i innerhalb des aktuell zu berechnenden Monats liegen ($i \in m$), werden in der Form

$$e_i = T_i - \hat{T}_m \quad (2.5.3-2)$$

errechnet.

Abbildung 12 zeigt ein Beispiel mit konkreten Temperaturdaten. Das im ersten Schritt aus den Monatswerten ermittelte lineare Modell der Höhenabhängigkeit (vgl. 2.5.3-1) wird im zweiten Schritt zur Residuenbestimmung (vgl. 2.5.3-2) für die Temperaturmesswerte aller im Untersuchungsgebiet gelegenen Wetterstationen eines bestimmten Tages, in diesem Fall ist es der 10. Mai 1999, herangezogen. Die als Residuen verbleibenden Wertedifferenzen können nicht durch die Seehöhe erklärt werden, zeigen jedoch einen Zusammenhang mit der räumlichen Verteilung, welcher geostatistisch genutzt werden kann. Der Grund für die Ermittlung der Höhenabhängigkeit aus Monatsdaten liegt darin, dass besondere Wettersituationen an bestimmten Tagen möglicherweise nur einen schwachen Zusammenhang von Temperatur und Höhe erkennen lassen. Der Trend in der Werteverteilung eines einzelnen Tages kann daher nicht auf einen aussagekräftigen Höhengradienten zurückgeführt werden, vielmehr sind es andere, nicht höhenabhängige Einflüsse, welche durch die geostatistische Interpolation der Residuen ihre Berücksichtigung finden müssen.

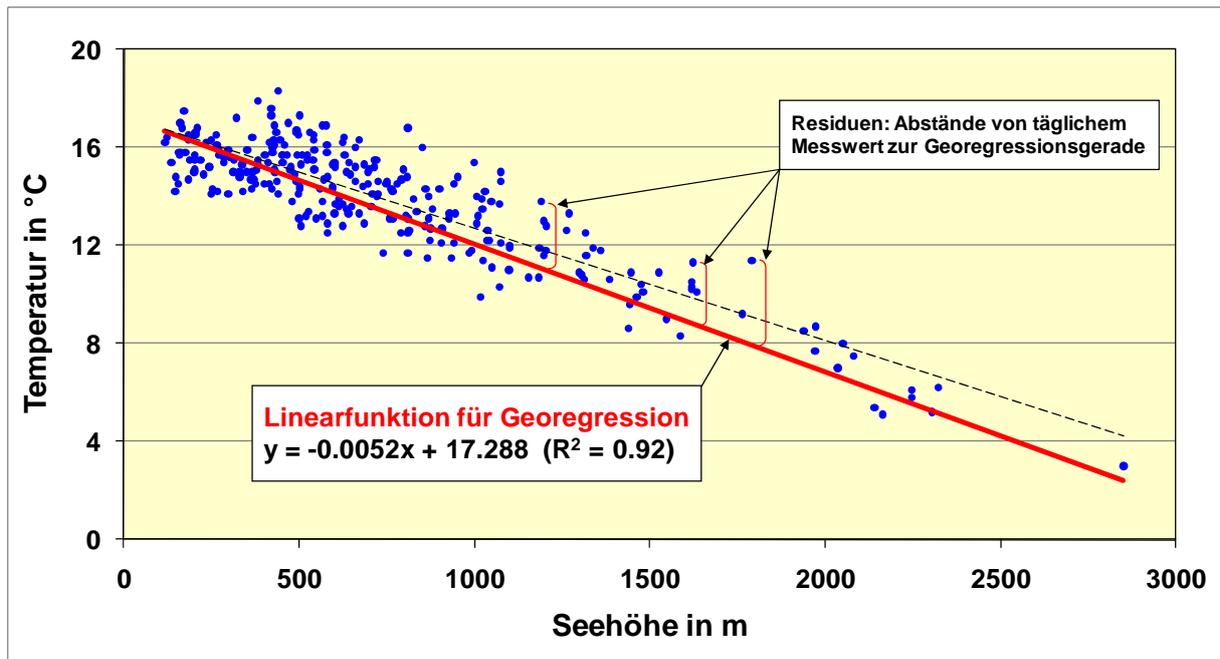


Abbildung 12: Temperatur am 10. Mai 1999 in Kombination mit der Regressionsgeraden für den Monat Mai 1999 als Grundlage für die Anwendung der Georegression

Die täglichen Residuen werden daher mittels Ordinary Kriging zu einer kontinuierlichen Oberfläche $Raster(e_i)$ interpoliert. Aus dem höhenabhängigen Anteil der Temperatur wird unter Verwendung der in 2.5.3-1 ermittelten Koeffizienten a_m und b_m und mit den Seehöhen z [m] des Digitalen Höhenmodells DEM in der Form

$$Raster(T_m) = a_m \cdot z_{DEM} + b_m \quad (2.5.3-3)$$

ebenfalls eine kontinuierliche Oberfläche $Raster(T_m)$ für den Monat m erzeugt. Für die Berechnung einer täglichen Temperaturoberfläche werden die täglichen Residuen zum monatlich ermittelten, höhenabhängigen Anteil addiert:

$$Raster(T_i) = Raster(T_m) + Raster(e_i) \quad (2.5.3-4)$$

Die Temperaturraster sind die Datengrundlage, welche nach zu definierenden Kriterien miteinander kombiniert werden, um den Beginn und das Ende der thermischen Vegetationsperiode zu bestimmen.

2.5.3.2 Berechnung der thermischen Vegetationsperiode

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 not-

wendigen Vereinfachung ausgeschlossen werden. Eine Ausnahme bildet die Berücksichtigung der Schneedecke. Dazu wird ein räumliches Modell eingesetzt, das als zusätzliche Einschränkung für Beginn bzw. Ende der Vegetationsperiode herangezogen wird.

Zunächst werden die Temperaturreasterdaten auf Tagesbasis beginnend mit 1. März eines jeden Jahres, wie in Abschnitt 2.5.3.1 beschrieben, 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.

In *Abbildung 13* wird die Bestimmung des Vegetationsbeginns beispielhaft am Standort Gumpenstein gezeigt. Diese standortorientierte Analyse entspricht bei einer räumlichen Applikation der Vorgehensweise für eine einzelne Rasterzelle. Bei dem erstmaligen Auftreten einer Fünf-Tages-Periode mit Tagesmitteltemperaturen über 5 °C – in diesem Beispiel ab 24. März 1999 – wird der Beginn der thermischen Vegetationsperiode festgesetzt.

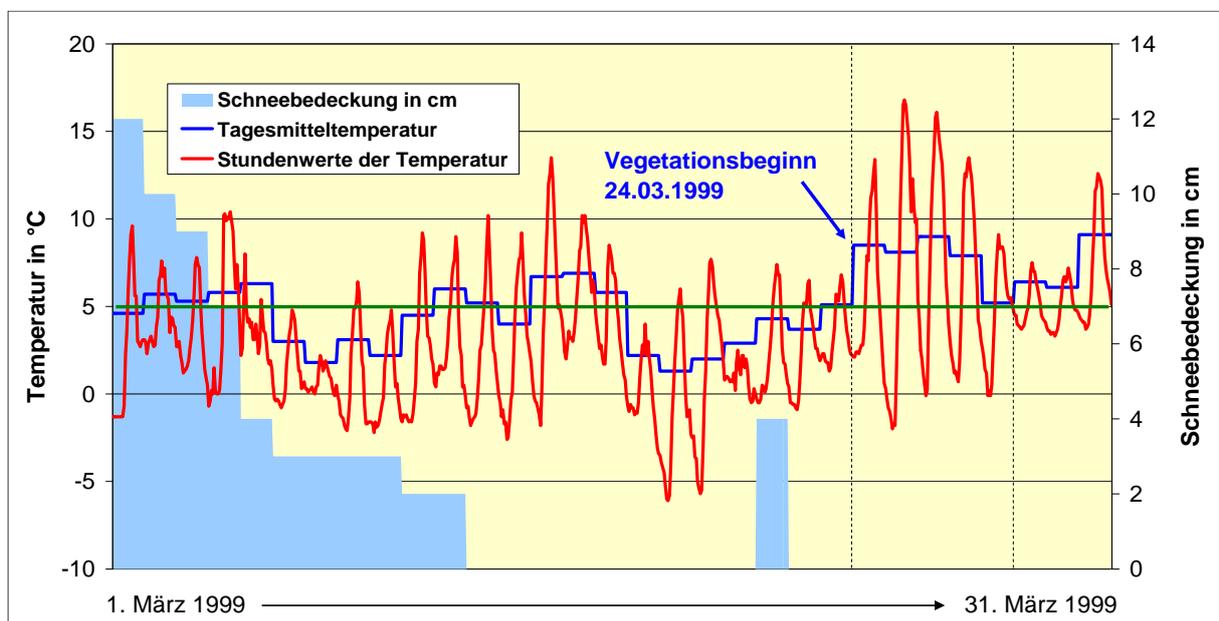


Abbildung 13: Temperaturverlauf und Schneebedeckung im März 1999 an der Station Gumpenstein

Das dargestellte Beispiel enthält auch Informationen über die Schneebedeckung. Wird eine solche innerhalb der für die Erfüllung des Temperaturkriteriums relevanten fünf Tage erkannt, arbeitet der Algorithmus ohne Erfassung eines Ergebnistages so lange weiter, bis die nächste

schneefreie Fünf-Tages-Periode auftritt. Im Fall der räumlichen Umsetzung wird die Schneebedeckung jedoch als räumliches Modell benötigt und im folgenden Abschnitt beschrieben.

2.5.4 Räumliche Modellierung der Schneebedeckung

Die Modellierung von meteorologischen Phänomenen steht im Spannungsfeld zwischen Komplexität und Genauigkeit. Dies trifft in besonderer Weise auf die Problematik der Schneebedeckung zu, da hier viele Einflussfaktoren zusammenwirken. Die angewandten Methoden für deren räumliche Repräsentation unterscheiden sich im Wesentlichen in ihrer Komplexität. Nicht alle Parameter sind für eine Interpolation gleich gut geeignet, so können beispielsweise Windverfrachtungen, die von besonderen topographischen Strukturen, kleinklimatischen Phänomenen oder der Oberflächenbeschaffenheit abhängen, nur schwer abgebildet werden. Eine Modellapplikation für großräumige Untersuchungsgebiete stellt daher eher die Ausnahme dar; viele wissenschaftliche Arbeiten beziehen sich entweder auf die lokale, stationsbezogene Untersuchung in der auch die verschiedenen Metamorphosestadien des Schnees berücksichtigt werden können, oder beschränken sich auf kleinräumige Studien. Nachfolgend werden einige räumlich orientierte Ansätze vorgestellt, um an Hand dieser Beispiele die Herangehensweisen an die Problematik der Schneebedeckungsmodellierung aufzuzeigen.

In der Arbeit von Parajka *et al.* (2001) wird der Fragestellung von Schneeakkumulation und -schmelze auch unter Einbeziehung von GIS nachgegangen. Eingesetzt wird dabei das Modell UEB-EHZ (Utah Energy Balance Snow Accumulation and Melt Model), welches auf Tagesbasis Temperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und Strahlung als Inputparameter verwendet. Darüber hinaus werden auch Topographie und die verschiedenen Vegetationsarten einbezogen. Die Anwendung beschreibt die Veränderungen der Schneedecke für ein Gebiet von 22,2 km² unter Einbeziehung von Vegetationsbedeckung, Windverfrachtung und Abflussverhalten in einer sehr hohen Genauigkeit. Eine weitere räumliche Modellierung der Schneebedeckung wurde von Weibel *et al.* (2003) mit einem interessanten Ansatz, nämlich der Kombination von Fernerkundungs- und Messstationsdaten vorgenommen. Neben NOAA-AVHRR-Satellitenbildern in einer Auflösung von 1 km wurden interpolierte meteorologische Parameter wie Temperatur, Niederschlag und Strahlung berücksichtigt. Die Kalibrierung und Validierung der modellierten Schneehöhe als Wasseräquivalent erfolgte sowohl mit Hilfe der Satellitendaten als auch mit Schneehöhenmessungen an Wetterstationen. Als problematisch wird die Modellierung der Strahlung mittels Grad-Tag-Faktor angesehen, die vor allem am Ende des Winters zu einer Unterschätzung der Schneetiefe führt.

Scheppler (2000) untersuchte in seiner Arbeit mit Hilfe von Temperatur und Niederschlag sowie eines Parameter-Kalibrationsmodells die Simulation von Auf- und Abbau der Schneedecke. Das Modell arbeitet mit dem Grad-Tag-Verfahren in der Absicht einer flächendeckenden Umsetzung. Die Kalibrierung mit Stationsmessdaten bezieht sich auf den Grad-Tag-Faktor, die kritische Schmelztemperatur und auf eine Niederschlagskorrektur. Die Berechnungen wurden nur für ausgewählte Stationen durchgeführt.

Für eine großräumige Bestimmung der Schneedecke eignen sich Fernerkundungsdaten in Form von Satellitenbildern sehr gut, da zum einen große Gebiete in einer hohen zeitlichen Auflösung, meist täglich, abgedeckt werden und zum anderen eine ganze Reihe von Produkten verfügbar ist, die auf diese Daten aufbauen und spezielle Algorithmen und Modelle zur Bestimmung der Schneedecke einsetzen. Snow Cover Images des Systems MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) vom National Snow and Ice Data Center (NSIDC) sind ein Beispiel für diese Datenaufbereitung. Die MODIS-Sensoren befinden sich auf den Satelliten TERRA und AQUA des NASA Earth Observation Systems. Aus den verfügbaren 36 spektralen Bändern (von ca. 0.4 bis 14.4 μm) entstehen neben verschiedenen geophysikalischen Auswertungen auch die globalen Schneebedeckungsdaten auf Tagesbasis in einer Auflösung von 500 Meter. Die Berechnung erfolgt automatisiert und basiert auf der Ermittlung eines Normalised Difference Snow Index (NDSI), welcher die starke Infrarot-Reflexion des Schnees im sichtbaren und die starke Absorption im kurzwelligen Spektralbereich nutzt. Analog zum Normalised-Difference Vegetation Index (NDVI) wird der Reflexionswert aus der Kombination von zwei Bändern bestimmt. Für Landsat TM (Thematic Mapper) ergibt sich dafür folgende Gleichung (Hall *et al.*, 2001):

$$NDSI = (TM \text{ Band } 2 - TM \text{ Band } 5) / (TM \text{ Band } 2 + TM \text{ Band } 5).$$

Parajka und Blöschl (2006) haben MODIS Snow Cover Images speziell für Österreich validiert. Dabei wurde die Übereinstimmung der MODIS Images mit Messwerten aus 754 Stationen verglichen. Probleme hinsichtlich der Genauigkeit bzw. der Anwendbarkeit von MODIS-Daten ergeben sich hauptsächlich durch die in Österreich vor allem in den Wintermonaten relativ häufige Wolkenbedeckung.

Im Gegensatz zu einem Modell auf Basis meteorologischer Parameter, mit dem auch zukünftige Szenarien basierend auf Klimamodellen gerechnet werden können, beziehen sich Fernerkundungsdaten ausschließlich auf eine Betrachtung der Vergangenheit. Außerdem ist der Aufwand zur Aufbereitung langer Zeitreihen aus Satellitendaten nicht zu unterschätzen. Die Zielsetzung in der vorliegenden Arbeit ist demnach die GIS-basierte Implementierung eines einfachen Modells, das flexibel und effizient auf unterschiedliche Untersuchungsgebiete und -zeiträume angepasst werden kann. Diese Anforderungen werden durch einen Ansatz von Cazorzi und Dalla Fontana (1996) erfüllt, die in ihrer Arbeit die flächendeckende Bestimmung der Schneebedeckung mit Hilfe der Parameter Temperatur, Niederschlag und potenzielle Globalstrahlung für ein kleinräumiges Gebiet in den Dolomiten beschreiben. Die Einflüsse der Topographie (Hangneigung, Exposition und Höhe) werden in den Strahlungswerten repräsentiert, die zusammen mit der Temperatur und einem empirischen Schmelzfaktor die Modellierung der Schneeschmelze darstellen. Der Schmelzfaktor wurde mit Hilfe einer mehrjährigen Versuchsreihe bestimmt und kalibriert. Das Modell besticht durch seine Einfachheit und der Eignung für eine flächendeckende Anwendung, die möglichst viele Parameter einbezieht, welche relativ einfach zu erheben sind. Vor allem werden hier auch die verschiedenen topo-

graphischen Bedingungen berücksichtigt. Daher wurde dieses Modell für die GIS-Implementierung in der vorliegenden Arbeit verwendet.

Bei der Berechnung der Schneebedeckung müssen hauptsächlich zwei Probleme durch eine entsprechende Simulation gelöst werden: Schneeakkumulation und Schneeschmelze. Beide Vorgänge erfordern die Einbeziehung meteorologischer Parameter und, bei einer räumlichen Betrachtung, deren Überführung in kontinuierliche Oberflächen. Um der Problematik der variablen Schneedichte auszuweichen, wird sowohl bei der Akkumulation als auch bei der Schmelze mit dem Wasseräquivalent des Schnees gearbeitet, wodurch Aussagen über die Schneehöhe nur bedingt möglich sind.

Datenbasis sind Temperatur [$^{\circ}\text{C}$], Niederschlag [mm] und die potenzielle Globalstrahlung [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$] unter Einbeziehung eines Digitalen Höhenmodells (vgl. Abschnitt 2.5.1). Die Berechnung der Temperatur- und Niederschlagsoberfläche auf Tagesbasis als wichtigste Faktoren für die Schneeakkumulation und -schmelze setzen täglich gemessene Stationswerte voraus. Für die Temperaturinterpolation wurden Daten der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), für den Niederschlag eine Kombination aus Messungen der ZAMG und des Hydrographischen Zentralbüros (HZB) für unterschiedliche Tageszeiten herangezogen. In *Abbildung 14* wird ein einfacher, schematischer Überblick über die Eingangsparameter und den Workflow im Modell gezeigt. Die Verarbeitung der Daten auf Tagesbasis erfordert eine weitgehende Automatisierung der Berechnungsprozeduren und damit eine umfangreiche Programmierung.

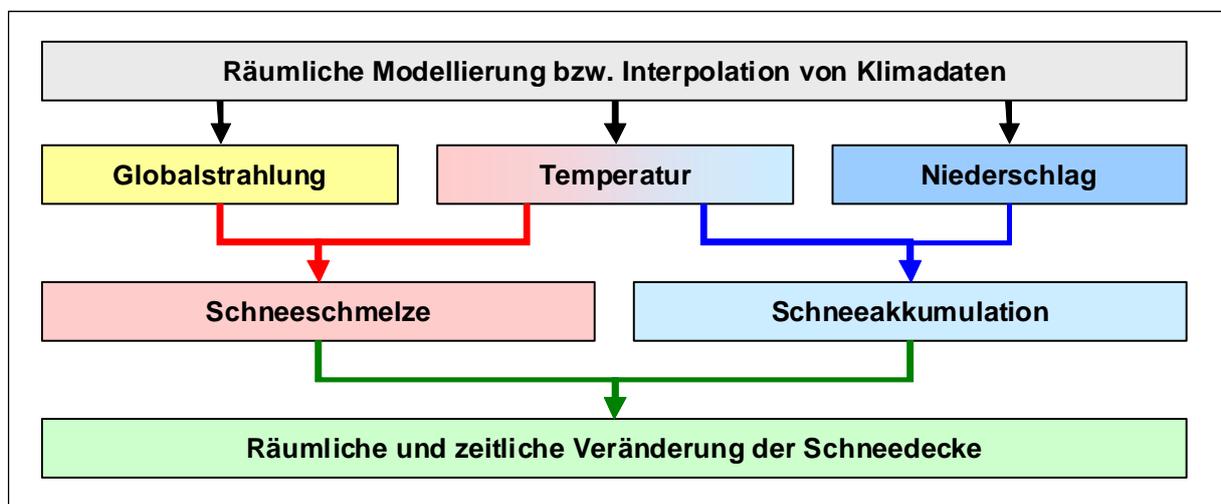


Abbildung 14: Komponenten für die Modellierung der Schneebedeckung

2.5.4.1 Berechnung der täglichen Schneemenge

Eine geeignete Kombination von Temperatur und Niederschlag führt zu Schnee. Der Temperaturschwellwert beträgt analog dem Modell von Cazorzi und Dalla Fontana (1996) $0,5^{\circ}\text{C}$. Um die Temperaturen im Tagesverlauf möglichst gut abbilden zu können, wird zwischen Tages- und Nachtmittel (2.5.4-1) unterschieden. Eine höhere zeitliche Auflösung wäre zwar

wünschenswert, auf Grund der begrenzten technischen Möglichkeiten sowie fehlender Messwerte jedoch praktisch nicht durchführbar. Die beiden Mittelwerte unterscheiden sich wie folgt:

$$T_{day_i} = \frac{T_{7_i} + T_{14_i} + T_{19_i} + T_{max_i}}{4} \quad T_{night_i} = \frac{T_{19_i} + T_{7_{i+1}} + T_{min_{i+1}}}{3} \quad (2.5.4-1)$$

wobei mit T die Lufttemperatur [°C] des Tages i zu unterschiedlichen Messzeitpunkten bzw. im Tagesmaximum und -minimum beschrieben wird.

Die an sich ausgeprägte Höhenabhängigkeit der Temperatur wird vor allem in den Wintermonaten durch das Auftreten von Inversionen gestört. Bei den in Tälern bzw. Kesseln auftretenden Kaltluftseen erfolgt eine Entkoppelung der Luft der freien Troposphäre und der bodennahen Grenzschicht, wobei die bodennahe Luftmasse deutlich kälter sein kann. Der Temperaturgradient im Bereich von +1 bis +6 Kelvin pro 100 Meter verhält sich damit anders als in den Luftschichten oberhalb des Kaltluftsees (Häckel, 2005, 340). Dieses diffizile Verhalten der Luftschichten ist modellhaft kaum abzubilden und die Auftrennung der Regressionsrechnung für Wetterstationen, die sich entweder im Berg- oder Talgebiet befinden, ist ein Versuch, Inversionen in der Temperaturinterpolation auf einfachste Weise implizit zu berücksichtigen. Der sich daraus ergebende Temperaturgradient wird in eine entsprechende Schichtung der Atmosphäre umgelegt, ohne auf die Besonderheiten in Hangnähe einzugehen.

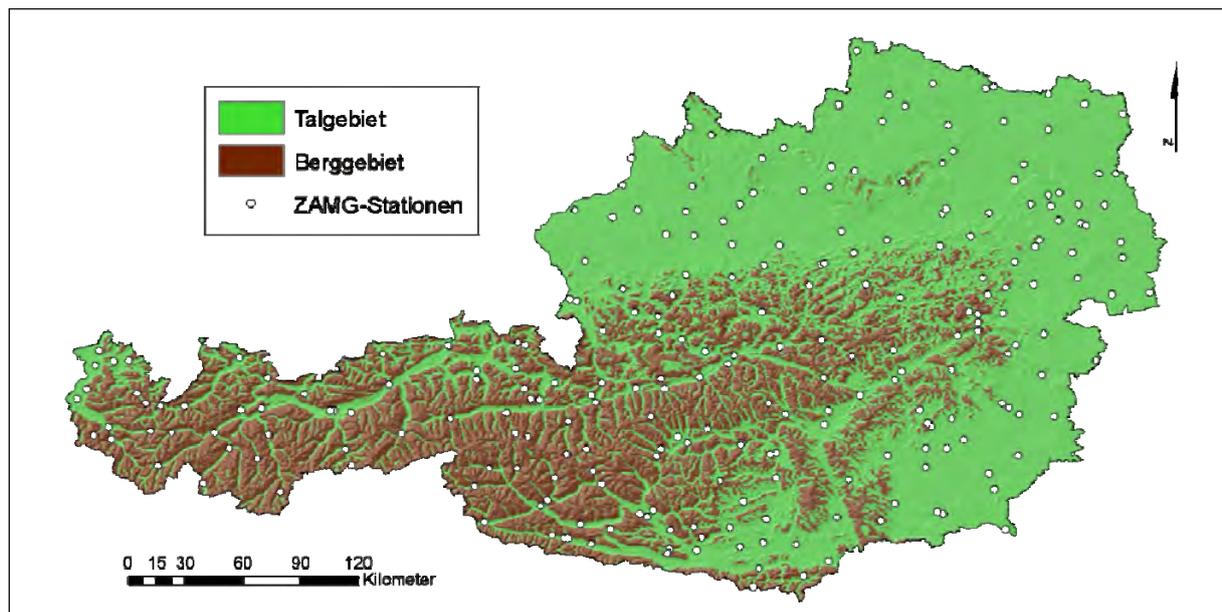


Abbildung 15: Klassifizierung von Tal- und Berggebiet mit den Wetterstationen der ZAMG

Zur Klassifizierung von Stationen für Tal- bzw. Berglagen wurde mittels Nachbarschaftsanalyse aus dem DHM das Höhenminimum für jede Rasterzelle der umgebenden Zellen in einem Radius von zwei Kilometer ermittelt (siehe *Abbildung 15*). Durch Differenzbildung mit dem DHM und einer binären Klassifizierung unter Verwendung der Klassengrenze von 300 Meter werden Tal- und Berggebiete bestimmt und den jeweiligen Stationen zugeordnet. Damit wer-

den die relativen Höhenunterschiede für die Bildung der jeweiligen Gebiete herangezogen, sodass sich unabhängig von der absoluten Seehöhe beispielsweise Täler auch in höheren Lagen befinden können.

Die standortbezogene Mittelwertbildung (2.5.4-1) bildet die Basis für die Interpolation mittels Georegression nach der in Abschnitt 2.5.3.1 dargestellten Methode. Die Interpolation der Residuen wird für Tal- und Berggebiet getrennt durchgeführt und jeweils mit dem binären Tal-Berg-Klassifikationsraster maskiert. Für die ca. 230 Talstationen wird Ordinary Kriging mit einem variablen Suchradius unter Einbeziehung von 12 Nachbarn verwendet. Die Schätzung des Semi-Variogramms (Lagsize, Sill und Range) erfolgt mit Standardwerten. Die Bergstationen sind auf Grund der geringen Anzahl und der damit fehlenden Dichte für eine räumlich-statistische Interpolation nicht geeignet und werden mittels Inverse Distance Weighted (Power 2) interpoliert. Die für Berg- und Talgebiet getrennt errechneten Oberflächen werden abschließend zu einem einzigen Raster mittels Addition zusammengeführt.

In weiterer Folge wird der Niederschlag an den Messstationen der ZAMG und des HZB mittels Ordinary Kriging interpoliert. Um die unterschiedlichen Temperaturergebnisse von Tag und Nacht auch dem entsprechenden Niederschlag zuordnen zu können, muss der Niederschlag in Tages- und Nachtniederschlag aufgeteilt werden. An den ZAMG-Stationen ist dies problemlos durchführbar, da hier Messwerte um 7:00 und 19:00 Uhr zur Verfügung stehen. Der HZB-Niederschlag kann nur als 7:00-Uhr-Messwert berücksichtigt werden, daher erfolgt die Aufteilung dieses Wertes im Verhältnis der Verteilung an der nächstgelegenen ZAMG-Station, deren Einzugsbereiche mittels Thiessen-Polygone ermittelt werden. Durch Multiplikation mit dem reklassifizierten Temperaturraster (Zellen mit Temperaturen > 0.5 °C nehmen den Wert 1, ansonsten den Wert 0 an) bleiben nur jene Flächen erhalten, die Schneefall aufweisen. Tages- und Nachtschneefall werden anschließend zu einem Gesamtschneefallraster addiert:

$$Snow_i = (N_{day_i} \cdot N_{recDay_i}) + (N_{night_i} \cdot T_{recNight_i}) \quad (2.5.4-2)$$

wobei $Snow_i$ die Neuschneemenge (Wasseräquivalent) [mm] des Tages i darstellt, N_{day} und N_{night} die am Tag i festgestellte Niederschlagsmenge [mm] ist und T_{recDay} bzw. $T_{recNight}$ [0,1] die binär klassifizierte Temperaturrasterdaten beschreiben. Alle Variablen beziehen sich auf kontinuierliche Oberflächen. Diese Kombination führt dazu, dass alle Rasterzellen, welche den Wert 0 enthalten (also das Temperaturkriterium für Schneefall nicht erfüllen) auch in das Ergebnis mit 0 als Wert des Produktes dieser Rastermultiplikation eingehen.

2.5.4.2 Berechnung der täglichen Schmelzwassermenge

Die Schneeschmelze wird hauptsächlich durch den Energieeintrag in Form von Wärme- und Strahlungsenergie bestimmt. Dies sind auch jene Parameter, welche von Cazorzi und Dalla Fontana (1996) für ihre Modellierung der Schneeschmelze herangezogen wurden. Die Temperatur als eine der beiden Komponenten wird in gleicher Weise wie bei der Berechnung der

Schneemenge aufbereitet und als kontinuierliche Oberfläche (2.5.4-1) für Tag und Nacht einbezogen. Daneben hat der Strahlungsenergieeintrag in Form der potenziell verfügbaren Globalstrahlung (vgl. Abschnitt 2.5.1) für die Bestimmung der Schmelze eine große Bedeutung. Die Modellgleichungen für die Schmelze werden nach Cazorzi und Dalla Fontana (1996) für Tag und Nacht unterschiedlich angesetzt:

$$Melt_{day_i} = CMF * Rad_i * T_{day_i} \quad (T_{day_i} \geq 0) \quad (2.5.4-3)$$

$$Melt_{night_i} = CMF * T_{night_i} \quad (T_{night_i} \geq 0) \quad (2.5.4-4)$$

wobei *Melt* die Schmelzrate [mm] getrennt für Tag und Nacht am Tag *i*, *Rad* die potenzielle Globalstrahlung [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}_i^{-1}$] und T_{day} bzw. T_{night} [$^{\circ}\text{C}$] die für Tag und Nacht gemittelten Temperaturwerte beschreiben. Mit Ausnahme von der Konstante *CMF* stellen auch hier alle Variablen kontinuierliche Oberflächen dar. Der für das Modell signifikante Kalibrierungsfaktor *CMF* (Combined melt factor) wurde von Cazorzi und Dalla Fontana (1996) in einer mehrjährigen Versuchsreihe erarbeitet. Mit einem iterativen trial-and-error Ansatz wurde modellierte und beobachtete Schneebedeckung miteinander verglichen und ein Wertebereich zwischen 0,016 und 0,024 [$\text{mm } ^{\circ}\text{C}^{-1} \text{Rad}^{-1} \text{h}^{-1}$] bestimmt. Niedrige *CMF*-Werte sind auf die hohe Albedo bei Neuschnee zurückzuführen und höhere Werte werden durch den zunehmenden Verschmutzungsgrad des Altschnees und damit der geringeren Albedo verursacht (Cazorzi und Dalla Fontana, 1996).

In der vorliegenden Arbeit werden Metamorphosen bzw. die Variabilität der Schneedichte nicht berücksichtigt, sondern lediglich mit dem Wasseräquivalent des Schnees sowohl bei der Akkumulation als auch bei der Schmelze gearbeitet. Die Ermittlung eines eigens kalibrierten *CMF*-Wertes ist auf Grund der Größe des Untersuchungsgebietes nicht möglich. An den Wetterstationen müssten Schneegewichtsmessungen verfügbar sein, um aus dem Verhältnis zu den gemessenen Schneehöhen Rückschlüsse auf die Veränderungen im Wasseräquivalent ziehen zu können. Da dies praktisch nicht durchführbar ist, wird der von Cazorzi und Dalla Fontana (1996) eingehender untersuchte Mittelwert von 0,020 [$\text{mm } ^{\circ}\text{C}^{-1} \text{Rad}^{-1} \text{h}^{-1}$], der zufrieden stellende Resultate lieferte, für die Modellimplementierung verwendet. Für die Berechnung von *Melt* bedeutet dies eine Umrechnung des Stundenwertes auf einen 12-Stunden-Wert und ergibt damit 0,24 [$\text{mm } ^{\circ}\text{C}^{-1} \text{Rad}^{-1}$].

2.5.4.3 Berechnung der Schneeakkumulation

Nachdem alle Faktoren der Schneebildung und -schmelze berechnet sind, wird die Differenz zwischen diesen beiden Werten gebildet (2.5.4-5). Es entsteht ein Rasterdatensatz, der die Schneebilanz *SC* als Wasseräquivalent [mm] des aktuell berechneten Tages darstellt:

$$SC_i = Snow_i - (Melt_{day_i} + Melt_{night_i}) \quad (2.5.4-5)$$

Voraussetzung für die korrekte Abbildung der Schneedecke eines beliebigen Tages im Berechnungszeitraum ist die Akkumulation des täglich neu gebildeten Schnees *SC*. Zu Beginn

der Rechenperiode (1. November) wird von einer nicht mit Schnee bedeckten Oberfläche ausgegangen und ein Null-Raster als Initialisierung verwendet. In späterer Folge muss die Schneebedeckung des Vortages (SC_{i-1}) für die Summenbildung herangezogen werden.

$$AccSnow = SC_{i-1} + SC_i \quad (2.5.4-6)$$

AccSnow stellt das Modellenergebnis in Form des Wasseräquivalents des Schnees [mm] für jeden Tag i des Untersuchungszeitraums dar. *AccSnow* wird täglich als Rasteroberfläche gespeichert und dient auch gleichzeitig als Inputparameter für die Berechnung des darauffolgenden Tages, da hier die Information des bisher akkumulierten Schnees in mm Wasseräquivalent gehalten wird.

Mit Hilfe der räumlichen Modellierung der Schneebedeckung kann die Vegetationsperiode und hier vor allem deren Beginn genauer spezifiziert werden. Die möglichst gute Abbildung der Vegetationsperiodendauer spielt insbesondere bei den in dieser Arbeit implementierten und im nächsten Abschnitt beschriebenen Modellen zur Abschätzung von Schnitthäufigkeit und Schnittzeitpunkten eine große Rolle.

2.5.5 Modellierung von Schnitthäufigkeit und Aufwuchsdauer

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 Rispschieben“ erreicht und hängt von den klimatischen Bedingungen, der Pflanzenbestandszusammensetzung und den Bewirtschaftungsmaßnahmen des Landwirtes ab (Buchgraber und Gindl, 2004, 56f). Eine Modellierung ist aus diesem Grund nur näherungsweise möglich.

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz geht von der potenziell zur Verfügung stehenden Vegetationsdauer aus. Diese wird vereinfacht über das in Abschnitt 2.5.3 beschriebene temperaturabhängige Modell beschrieben, indem das Ergebnisraster des Vegetationsbeginns von jenem des Vegetationsendes subtrahiert wird. 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.

Jeder Aufwuchs benötigt eine gewisse Zeit des Wachstums bis zur Ernte und mit Zunahme der Schnittfrequenz muss auch die potenziell 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. Durch 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. *Abbildung 16* zeigt die-

sen Ansatz in schematischer Form. Für die untere Grenze der Vierschnittnutzung werden beispielsweise 181 Tage, für die Dreischnittnutzung 155 Tage und für die Zweischnittnutzung 130 Tage festgelegt.

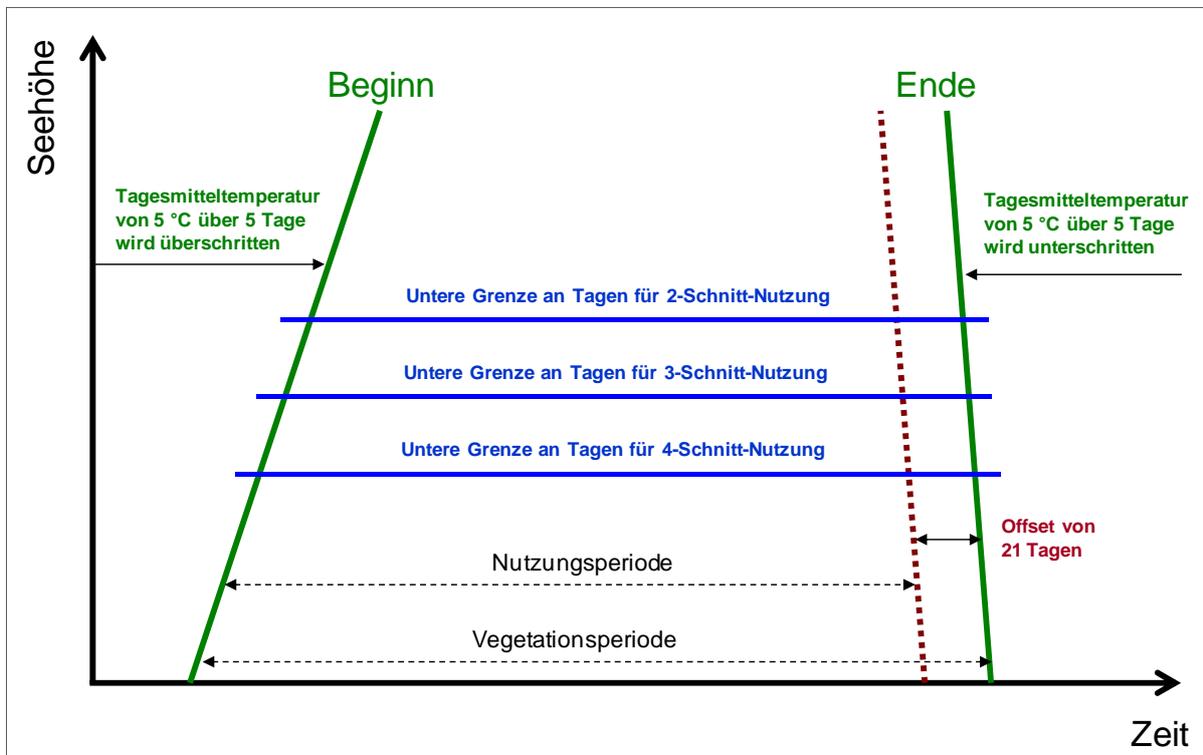


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Modellierung von Vegetations- und Nutzungsperiode

Das Pflanzenwachstum verläuft nicht linear, sondern verteilt sich über die Vegetationsperiode ganz unterschiedlich. Die Ausprägung der Wachstumskurve hängt stark von den Standortfaktoren und Umweltbedingungen während der einzelnen Phasen ab. Beispielsweise benötigt das Grünland für die Ertragsbildung von 1 kg TM mindestens 500 Liter Wasser und damit ist der Wasserhaushalt bzw. die Wasserverfügbarkeit für die Biomassezunahme von entscheidender Bedeutung. Ausbleibende Niederschläge auf trockenen Standorten führen unmittelbar zu Ertragseinbußen bzw. in extremen Fällen von anhaltender Trockenheit zu Ertragsausfällen (Buchgraber und Gindl, 2004, 53).

In *Abbildung 17* werden drei Wachstumskurven auf Mähweiden mit unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit dargestellt. Alle Verläufe zeigen auf verschiedenem Niveau ähnliche Charakteristiken und sollen damit verdeutlichen, dass die Aufwuchszeit für die einzelnen Schnitte zwar unregelmäßig, aber einem gewissen Schema folgend verläuft. Der erste Aufwuchs benötigt in der Regel einen kürzeren Zeitraum als die Folgeaufwüchse, außerdem ist hier der Ertrag signifikant höher als bei den späteren Nutzungen.

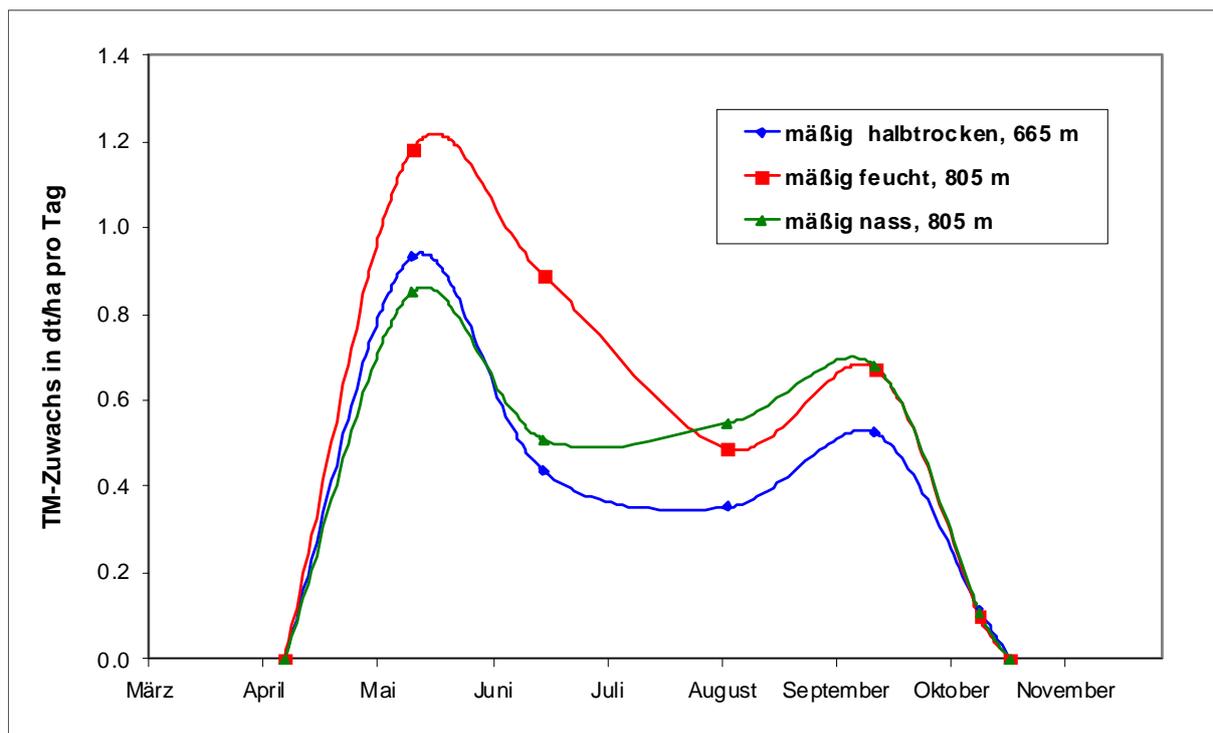


Abbildung 17: Wachstumsverlauf auf Mähweiden in Abhängigkeit des Wasserhaushalts (Quelle: BOHNER, 2003)

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. *Tabelle 1* zeigt zu den jeweiligen Schnittnutzungen die Anzahl an Tagen vom Beginn eines durchschnittlichen Vegetationsbeginns (1990 - 2006) bis zum Tag der Nutzung. Die daraus ableitbaren Verhältniszahlen beruhen auf Exaktversuchsdaten und sind in der Regel durch die Festlegung von „praxisnahen“ Schnittterminen beeinflusst. Aus diesem Grund wurde eine gewisse Glättung in der relativen Verteilung (fettgedruckte Werte in Klammer) auf Basis von Erfahrungen aus der Praxis vorgenommen und analog dazu im Modell implementiert.

Tabelle 1: Anzahl von Tagen vom Ø Vegetationsbeginn (1990 - 2006) und das Verhältnis der Aufwuchsdauer zwischen den Aufwüchsen (Auswertung von 4733 Erhebungsdaten von 1990 - 2006)

| | Zweischnittnutzung | | Dreischnittnutzung | | Vierschnittnutzung | |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Tage | Verhältnis | Tage | Verhältnis | Tage | Verhältnis |
| 1. Aufwuchs | 94 | 57 (55) % | 47 | 22 (22) % | 35 | 15 (18) % |
| 2. Aufwuchs | 70 | 43 (45) % | 52 | 25 (30) % | 40 | 16 (20) % |
| 3. Aufwuchs | | | 112 | 53 (48) % | 78 | 32 (28) % |
| 4. Aufwuchs | | | | | 90 | 37 (34) % |

Die Verhältniszahlen werden 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 *Abbildung 18* dargestellt.

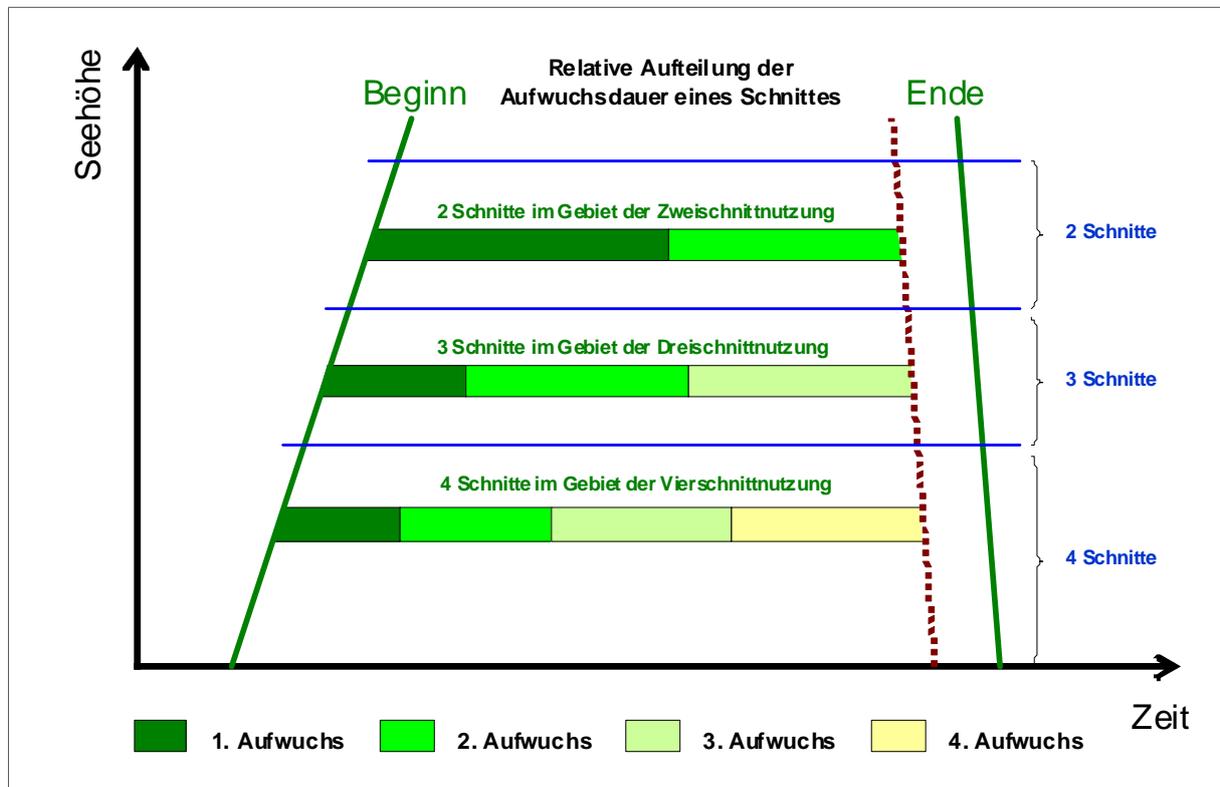


Abbildung 18: Relative Verteilung der Aufwuchszeiten und daraus ableitbare Schnitttermine

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 kann die Dauer der einzelnen Aufwüchse für eine näherungsweise Bestimmung der Biomassezunahme bei der Berechnung der Interzeption im Rahmen des Bodenwasserbilanzmodells, welches nachfolgend beschrieben wird, einbezogen werden.

2.5.6 Modellierung 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 von einem wassergesättigtem Zustand ausgegangen.

Die physiologische Reaktion von Pflanzen auf meteorologische Bedingungen beeinflusst die Verdunstung erheblich. So ist bei den Bedingungen einer hohen potenziellen Evapotranspiration (warmes, windiges und trockenes Wetter) die aktuelle Evapotranspiration aufgrund der geringeren Transpiration (Schließung der Stomata) stark eingeschränkt. Bei der Evaporation spielt der Bodenwassergehalt ebenfalls eine zentrale Rolle; geht dieser zurück, sind starke molekulare Bindekräfte in den Bodenteilchen zu überwinden, welche sich der Verdunstung mit Abnahme des Wassergehalts zunehmend widersetzen (Häckel, 2005, 98).

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Schritte zur Bestimmung der aktuellen Evapotranspiration dargestellt.

2.5.6.1 Berechnung der Crop-Evapotranspiration

Die Anpassung der Referenz-Evapotranspiration, die sich auf eine definierte Referenzoberfläche bezieht (vgl. Abschnitt 2.5.2), 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

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (2.5.6-1)$$

beschrieben wird. ET_c ist die Crop-Evapotranspiration [mm d^{-1}] der Grünlandfläche, K_c der Pflanzenfaktor (crop coefficient) und ET_0 die potenzielle bzw. Referenz-Evapotranspiration [mm d^{-1}] der definierten Referenz-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 2.5.3) 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 Pflanzenfaktorkurve. Nach dem letzten Schnitt wird der Pflanzenfaktor mit dem der „Späten Phase“ zugeordneten Wert bis zum Ende der Berechnungsperiode am 31. Oktober fortgeschrieben.

In *Abbildung 19* wird der Verlauf des Pflanzenfaktors an Hand eines Beispiels dargestellt. Hier ist auch die durch den Pflanzenfaktor angebrachte Gewichtung der Referenz-Evapotranspiration (2.5.6-1) mit dem sich daraus ergebenden Verlauf der Crop-Evapotranspiration dargestellt. 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.

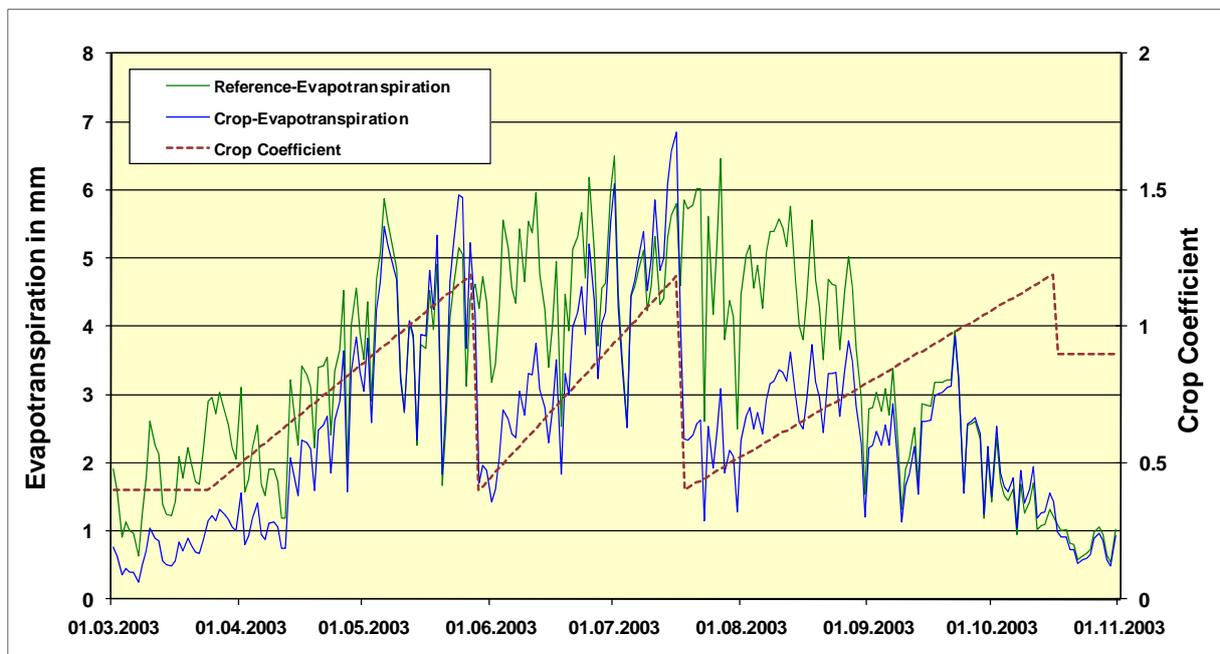


Abbildung 19: Verlauf der Evapotranspiration in Abhängigkeit des Pflanzenfaktors am Beispiel eines Dreischnittregimes am Standort Kirchberg/Walde für die Vegetationsperiode 2003

Für ein räumliches Modell der Crop-Evapotranspiration ist es notwendig, die täglich gerechnete Oberfläche der Referenz-Evapotranspiration (vgl. Abschnitt 2.5.2.4) auch mit einer Oberfläche des täglichen Pflanzenfaktors zu kombinieren. Abgeleitet wird diese aus dem räumlichen Modell der Schnitthäufigkeit und Schnittzeitpunkte (vgl. Abschnitt 2.5.5).

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

2.5.6.2 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. Das Ergebnis 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.

2.5.6.3 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:

$$ET_{c,adj} = ET_0 \cdot K_c \cdot K_s \cdot pf \quad (2.5.6-2)$$

$ET_{c,adj}$ 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 2.5.6.2 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 Potenzial 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.

$$TAW = 1000 \cdot aFC \cdot Z_r \quad (2.5.6-3)$$

TAW als insgesamt verfügbares Wasser [mm] hängt von der nutzbaren Feldkapazität aFC [m³ 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:

$$RAW = p \cdot TAW \quad (2.5.6-4)$$

$$p = p_T + 0.04 \cdot (5 - ET_c) \quad (2.5.6-5)$$

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 2.5.6-5 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 2.5.6-2 die aktuelle Evapotranspiration. Durch die Berücksichtigung der Bodenwasserabsenkung D_r des Vor-

trages 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

$$K_s = \frac{TAW - D_{r,i-1}}{TAW - RAW} \quad (2.5.6-6)$$

wobei K_s als Wasserstresskoeffizient [0-1] aus den in 2.5.6-3 und 2.5.6-4 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 2.5.6-2 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:

$$D_{r,top,i} = D_{r,top,i-1} - (P_i - I_i) + ET_{c,top,i} + DP_{top,i} \quad (2.5.6-7)$$

für Subsoil *sub* die Form:

$$D_{r,sub,i} = D_{r,sub,i-1} - DP_{top,i} + ET_{c,sub,i} + DP_{sub,i} \quad (2.5.6-8)$$

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 2.5.6-7 und DP_{top} [mm] am Tag i in der Gleichung 2.5.6-8. 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 2.5.6-7 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 2.5.6.1) und auf den Wertebereich der Interzeption angewendet. Daraus ergibt sich:

$$I_i = 1.875 \cdot K_{c,i} - 0.25 \quad (2.5.6-9)$$

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 2.5.6-7 eingeht.

Allen *et al.* (1998) berücksichtigen in der Gleichung 2.5.6-7 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 und Subsoil wie folgt gerechnet:

$$DP_{top,i} = (P_i - I_i) - ET_{c,top,i} - D_{r,top,i-1} \quad (2.5.6-10)$$

$$DP_{sub,i} = DP_{top,i} - ET_{c,sub,i} - D_{r,sub,i-1} \quad (2.5.6-11)$$

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 2.5.6-10 bzw. 2.5.6-11 um den Faktor K_s und wird daraus folgend als $ET_{c,adj}$ berücksichtigt.

Zusammenhang zwischen den Parametern

Um über die formale Beschreibung hinaus den Zusammenhang zwischen den einzelnen Parametern des Bodenwasserbilanzmodells darzustellen, werden in *Abbildung 20* die in den Gleichungen 2.5.6-3 bis 2.5.6-11 errechneten Werte im Verlauf der Vegetationsperiode 2003 für den Standort Kirchberg/Walde gezeigt. Dieser Standort befindet sich im Übergang von Flachland und Berggebiet und ist durch eine intensive Grünlandbewirtschaftung gekennzeichnet. Die Kurven der Wasserbilanzparameter zeigen, dass sich hier die Trockenheit im Jahr 2003 deutlich auswirkt.

Zu Beginn des Jahres ist der Boden mit Wasser gesättigt und K_s weist den Wert 1 auf. Die Trockenheit zu Beginn der Vegetationsperiode führt zu einem deutlichen Anstieg der Bodenwasserabsenkung welche in der oberen Bodenschicht durch kleinere Niederschlagsereignisse Anfang April kurzfristig ausgeglichen wird. Die fortgesetzte Trockenheit führt zu einem weiteren Anstieg der D_r , die bald in kritische Bereiche vordringt.

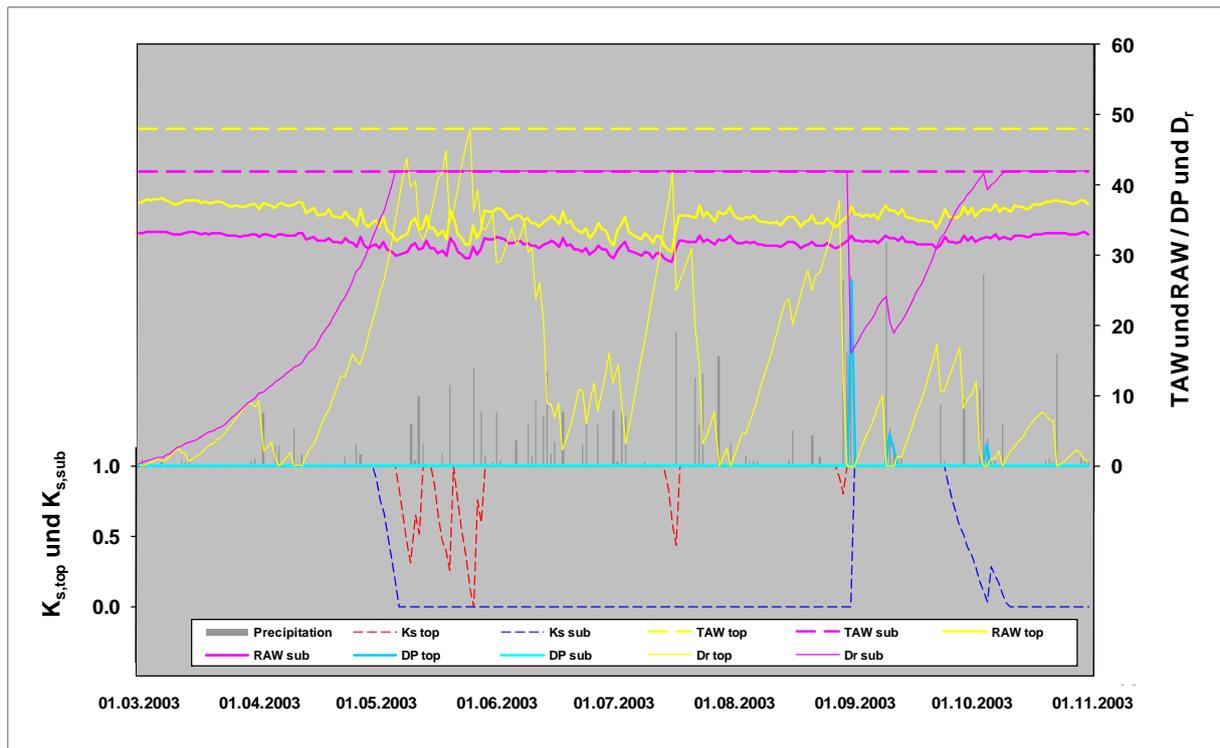


Abbildung 20: Verlauf der Parameter des Bodenwasserbilanzmodells für den Standort Kirchberg/Walde im Trockenjahr 2003

Geringe Niederschläge während der Sommermonate füllen den Oberboden zwar immer wieder etwas auf, die Menge ist jedoch so gering, dass keine Tiefenversickerung in den Unterboden erfolgt und so zeigt sich in der unteren Bodenschicht über den ganzen Sommer eine massive Trockenstresssituation. Sobald D_r Anfang Mai in der unteren Bodenschicht das Niveau von RAW erreicht, wirkt sich das auf den K_s -Wert aus, der, wenn K_s TAW erreicht, auf den Wert 0 sinkt. Die Entwicklung in der oberen Bodenschicht ist ähnlich, allerdings reagiert diese auf kleine Niederschlagsereignisse etwas sensibler und Wasserstress tritt deshalb mit einer kleineren Verzögerung ein. Ergiebige Niederschläge in der ersten Hälfte des Septembers und Oktobers bewirken, dass Wasser bis in die untere Bodenschicht vordringt ($DP_{top} > 0$) und die Bodenwasserabsenkung durch zunehmende Wasseraufnahme vor allem in der oberen Bodenschicht gegen 0 geht. Die kritische Marke RAW wird von $D_{r,top}$ in der Folge nicht mehr überschritten und daher tritt auch kein Wasserstress in dieser Bodenschicht auf. Etwas Niederschlag im Herbst bewirkt, dass sich beide D_r -Kurven unterhalb von RAW befinden und bis zum Ende der Vegetationsperiode kein Wasserstress mehr auftritt.

Das Ergebnis der Bodenwasserbilanzierung kommt durch die aktuelle Evapotranspiration zum Ausdruck. Diese spielt neben der Crop-Evapotranspiration in der weiteren Verarbeitung des Ertragsmodells eine zentrale Rolle. Um die direkten Konsequenzen der in *Abbildung 20* dargestellten Parameter der Bodenwasserbilanz auf die aktuelle Evapotranspiration zu zeigen, wird diese in *Abbildung 21* im Vergleich zu den anderen Arten der Evapotranspiration für die gleiche Periode (2003) am Standort Kirchberg/Walde abgebildet.

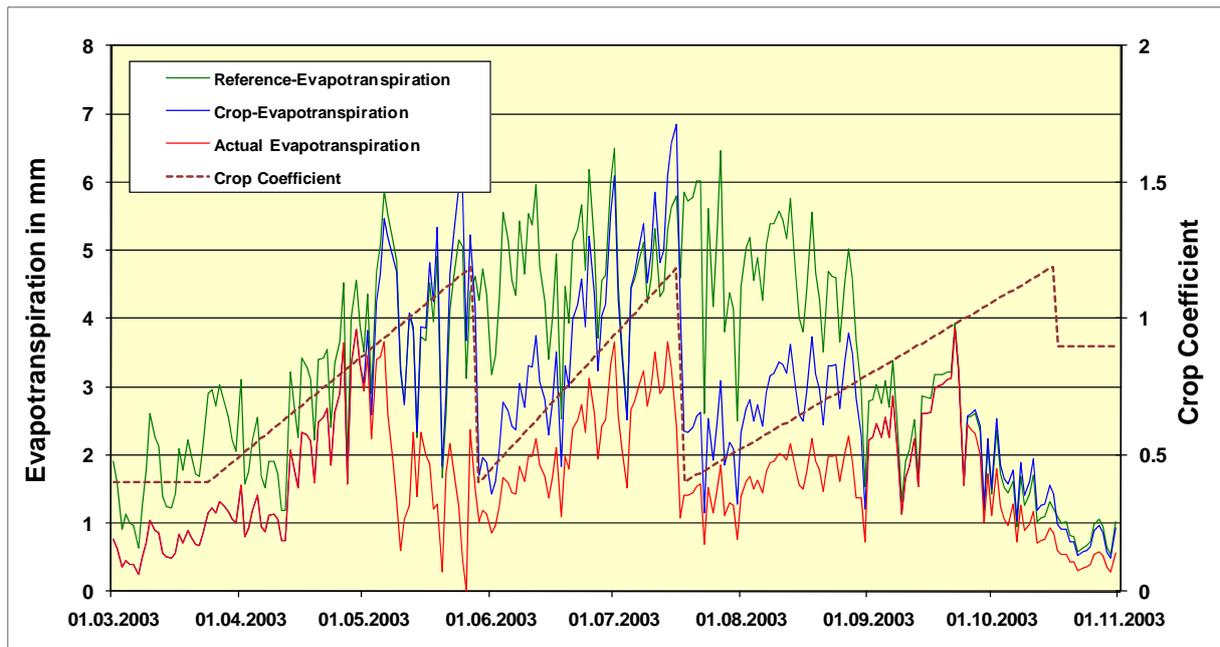


Abbildung 21: Verlauf der Evapotranspiration am Standort Kirchberg/Walde im Jahr 2003

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.

2.5.6.4 Berechnung der aktuellen Evapotranspiration ohne Pflanzenfaktor

Im Laufe der Modellentwicklung hat sich herausgestellt, dass die Bodenwasserverhältnisse mit Berücksichtigung des Pflanzenfaktors nur für ganz bestimmte räumliche Nutzungsszenarien anwendbar sind. Dies bedeutet die eindeutige Festlegung einer bestimmten Nutzungsvariante für die jeweiligen Rasterzellen. Zum Beispiel sind Gebiete mit Dreischnittnutzung von jenen mit Vierschnittnutzung klar getrennt. Es ist ohne bedeutenden Rechenaufwand nicht möglich, in einem „Vierschnittgebiet“ auch die gesamte Dreischnittnutzung abzubilden, da die zugrundeliegende Bodenwasserbilanzierung von einem nutzungsabhängigen Pflanzenfaktor geprägt ist.

Der Pflanzenfaktor K_c [0,4..1,2] nach Allen *et al.* (1998) erlaubt eine Anpassung der ET_0 auf eine bestimmte Kulturart, im vorliegenden Fall auf Wirtschaftsgrünland. Da für die Ermittlung des K_c der Wachstumsverlauf in Abhängigkeit der einzelnen Schnitte berücksichtigt werden muss, kann sich eine derartig berechnete ET_a nur auf ein bestimmtes Nutzungssystem beziehen. Dabei muss eine große Unsicherheit hinsichtlich der zeitlichen Verteilung von Nut-

zungsterminen bzw. des realen Wachstumsverlaufs der einzelnen Aufwüchse hingenommen werden (vgl. 2.5.5). Aus Vereinfachungsgründen wird deshalb in einer Berechnungsvariante auf die Anpassung der ET_0 an die Kulturart Grünland verzichtet.

Die lineare Zunahme des K_c vom Vegetationsbeginn bis zum ersten Schnitt und in weiterer Folge zum jeweils darauffolgenden Schnittnutzungstermin wird durch einen konstanten K_c -Wert von 1 ($ET_c \triangleq ET_0$) ersetzt. Dies erleichtert die Implementierung und reduziert den Rechenaufwand bei der Implementierung sämtlicher Nutzungsregime für das gesamte Untersuchungsgebiet auf ein praktisch umsetzbares Ausmaß. Da sich die Referenzoberfläche bei der ET_0 ebenfalls auf Gras bezieht, bleibt die Abweichung auf die tatsächliche Wuchshöhe des Pflanzenbestandes beschränkt, welche sich wegen fehlender Informationen über die Bewirtschaftung (exakter Wachstumsverlauf bzw. Nutzungsfrequenz und -termine) ohnehin nur näherungsweise bestimmen lässt. Die so modifizierte Berechnung der $ET_{c,adj}$ lautet:

$$ET_a = ET_0 \cdot K_s \cdot pf \quad (2.5.6-12)$$

wobei ET_a die aktuelle Evapotranspiration [mm d^{-1}] ohne Pflanzenfaktorangepassung ist. Die in weiterer Folge vorgestellte Variante der Modellkalibrierung geht bei der Berechnung der Wasserstressfaktoren von diesem ET_a -Wert aus. Die Umsetzung dieser Methode führt zu einer Veränderung der Bodenwasserbilanzparameter wie sie in *Abbildung 22* dargestellt sind (vgl. dazu *Abbildung 20*). An den einzelnen Gleichungen (2.5.6-5 bis 2.5.6-11) verändert sich mit einem K_c -Faktor von 1 lediglich der Wert von ET_c , welcher nun jenem von ET_0 entspricht.

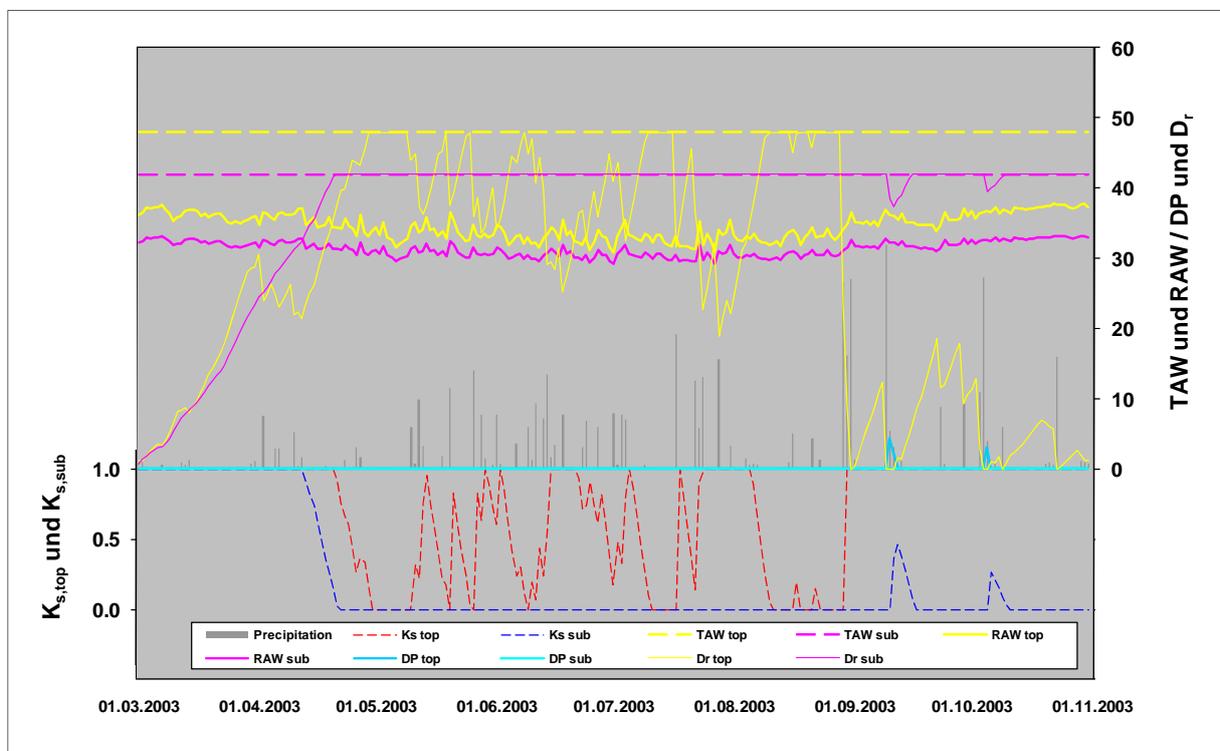


Abbildung 22: Verlauf der Parameter des Bodenwasserbilanzmodells für den Standort Kirchberg/Walde im Trockenjahr 2003

Das Auftreten von Wasserstress ist in diesem Ansatz häufiger zu beobachten, da die ET_0 für den überwiegenden Teil der Aufwuchszeit höher liegt als bei Verwendung einer schnittangepassten ET_c . Eine höhere potenzielle Evapotranspiration hat auch Einfluss auf die aktuelle Verdunstung – bei gleichbleibendem Wassereintrag (Niederschlag) vergrößert sich die Kluft zwischen beiden Kurven, da in dieser Variante der Wasseraustrag (Verdunstung) tendenziell höher ist (vgl. *Abbildung 21* und *Abbildung 23*). In *Abbildung 23* ist die Kurve der Referenz-Evapotranspiration ident mit der Crop-Evapotranspiration, da der K_c -Faktor (Crop Coefficient) über den gesamten Zeitraum konstant bei 1 bleibt.

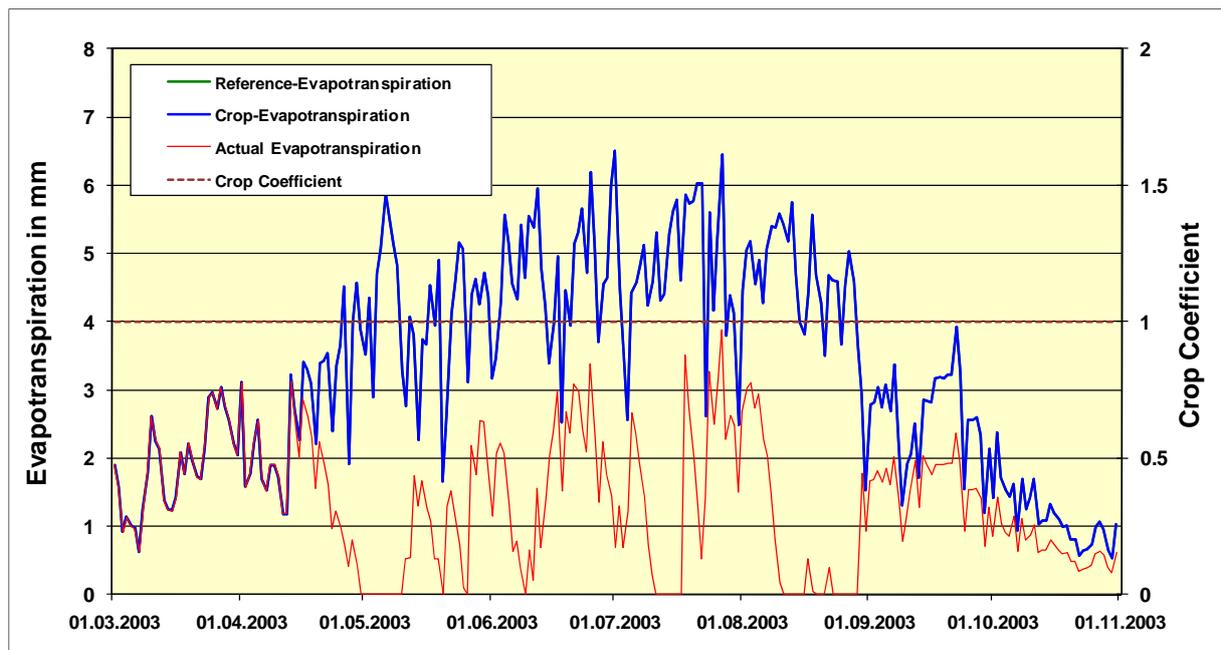


Abbildung 23: Verlauf der Evapotranspiration am Standort Kirchberg/Walde im Jahr 2003

Die letztendlich realisierte Überlegung, dass die Bodenwasserbilanzierung einheitlich gerechnet wird (ohne Veränderung durch den Pflanzenfaktor) bietet den Vorteil, dass erst im letzten Schritt bei der Anwendung des Grassland Statistical Model (GRAM) zwischen den Nutzungsintensitäten unterschieden wird. Die klimatisch relevanten Daten werden einheitlich aufbereitet und jedes einzelne Nutzungsregime wird in der Folge für das gesamte Untersuchungsgebiet gerechnet. Im Nachhinein muss eine entsprechende räumliche Maskierung erfolgen, welche die Ergebnisse für ein bestimmtes Nutzungsregime einem auch tatsächlich so genutzten Raum zuordnet – beispielsweise kann dies mit Hilfe der INVEKOS-Daten erfolgen, wo zum Teil auch die Information über die Nutzungsfrequenz enthalten ist.

Die verwendete Methode zur Bestimmung der Bodenwasserbilanz wirkt sich bei der Kalibrierung des Ertragsschätzmodells entsprechend aus. Nachfolgend wird das statistische Modell vorgestellt, das sowohl für die Methode mit und ohne Crop Coefficient getestet wurde. Da sich keine signifikanten Unterschiede in den Ergebnissen ergaben, wurde die für den praktischen Einsatz besser geeignete Variante $ET_c \triangleq ET_0$ verwendet. Sämtliche hier dargestellte Ergebnisse beziehen sich auf diesen Ansatz.

2.5.7 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 21 ausgewählten und in ganz Österreich verteilten Standorten kalibriert wurde. Den Erträgen stehen die Ergebnisse aus der Bodenwasserbilanzierung und den dafür zugrundeliegenden meteorologischen Messdaten gegenüber. Es ist daher notwendig, jedem Versuchsstandort eine Wetterstation zuzuordnen. Die Auswahl der Wetterstationen basiert primär auf der geringstmöglichen Distanz, allerdings wurde dafür auch auf eine bestmögliche Übereinstimmung mit der Seehöhe und auf eine einheitliche Topographie geachtet. In *Abbildung 24* ist die Verteilung der Versuchsstandorte mit den jeweils verwendeten Wetterstationen dargestellt.

2.5.7.1 Analyse der Wetterdatenbasis an den Versuchsstationen

Die räumlichen Abstände zwischen Wetterstationen und Versuchsstation bedingen geringfügige Veränderungen der Wetterwerte. Für die Modellkalibrierung ist die Verfügbarkeit einer bestmöglichen Beobachtungsdatenbasis entscheidend.

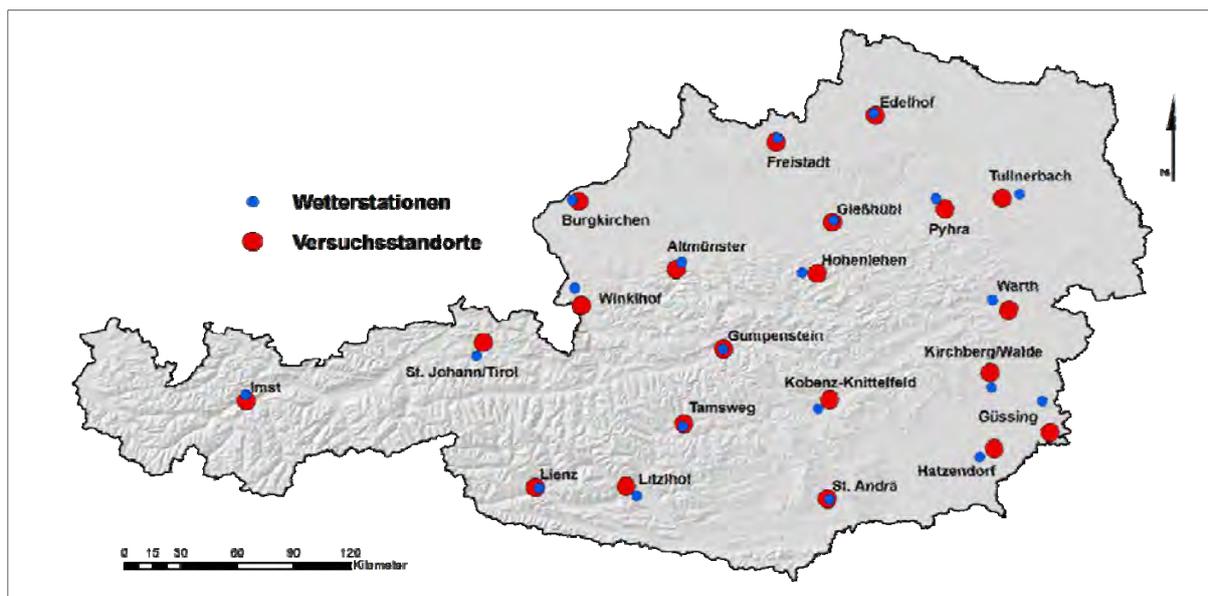


Abbildung 24: Räumliche Verteilung der Versuchsstandorte mit den dazugehörigen Wetterstationen

Es wurden daher alle für das Ertragsmodell benötigten Parameter über den gesamten Kalibrierungszeitraum (2002 bis 2009) geostatistisch interpoliert und den Versuchsstandorten zugeordnet. Die Abweichungen im direkten Vergleich zwischen Interpolations- und Messwerten sind aufgrund der Auswahlbedingungen für die Eignung von Wetterstationen minimal und werden durch die nachfolgenden Abbildungen 25 bis 28 dokumentiert. Als Beispiel für die Untersuchung wurde die Vegetationsperiode 2003 am Versuchsstandort Kirchberg/Wald mit der zugeordneten Wetterstation Hartberg, welche 8 km entfernt liegt, herangezogen.

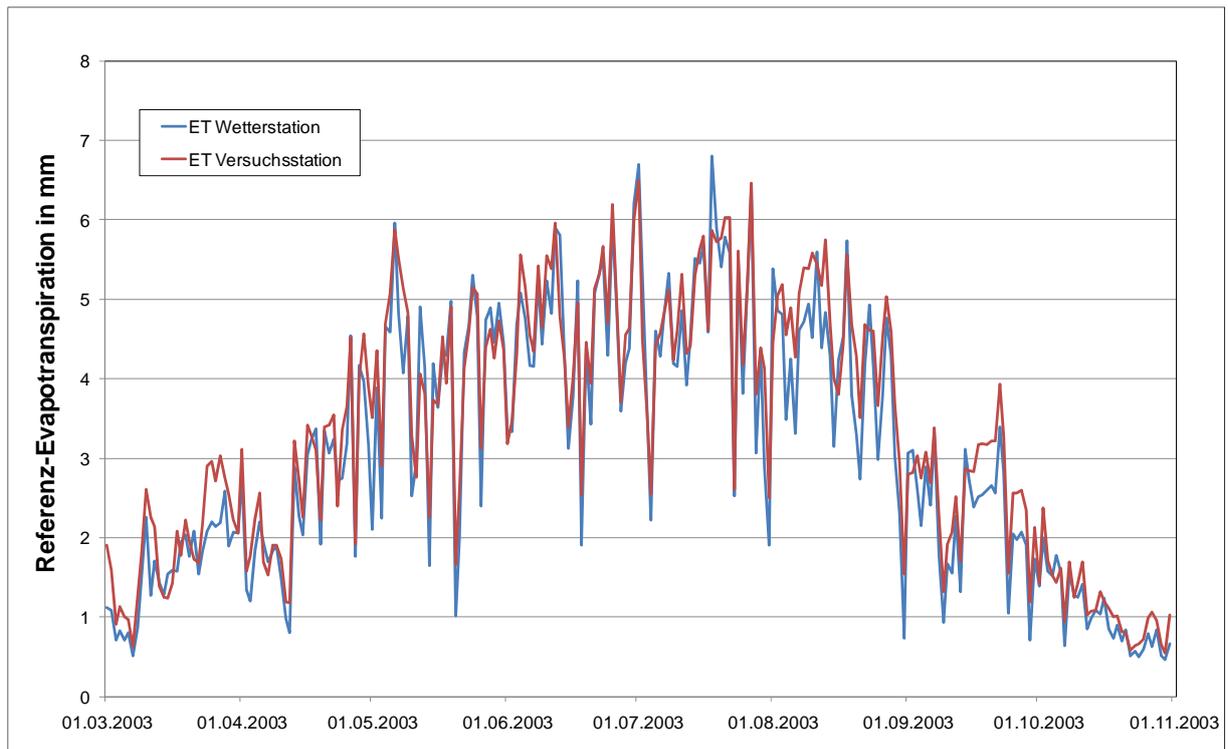


Abbildung 25: Vergleich von Interpolation und wetterstationsbasierter Berechnung der ET_0

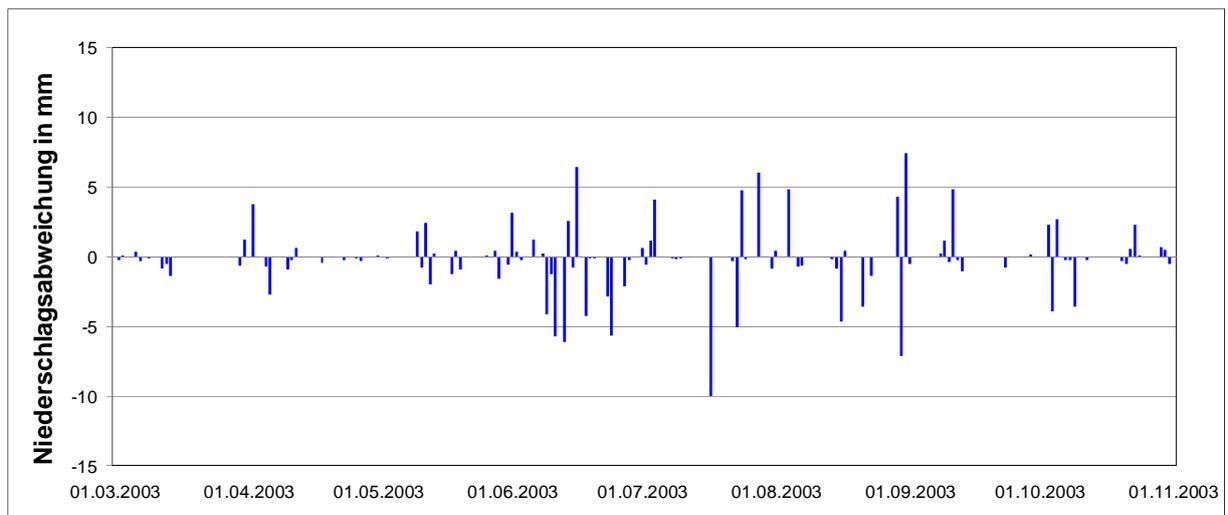


Abbildung 26: Abweichung der Niederschlagswerte an der Versuchsstation im Vergleich zur Wetterstation

Der Niederschlag ist besonders kritisch zu betrachten, da er als Wassereintragsparameter für die Bodenwasserbilanz eine entscheidende Größe darstellt. *Abbildung 26* zeigt, dass die Abweichungen mit wenigen Ausnahmen gering sind; im Mittelwert beträgt sie -0.1 mm mit einer Standardabweichung von 1.7 mm, das Maximum der Abweichung beträgt 7.4 mm, das Minimum 9.9 mm.

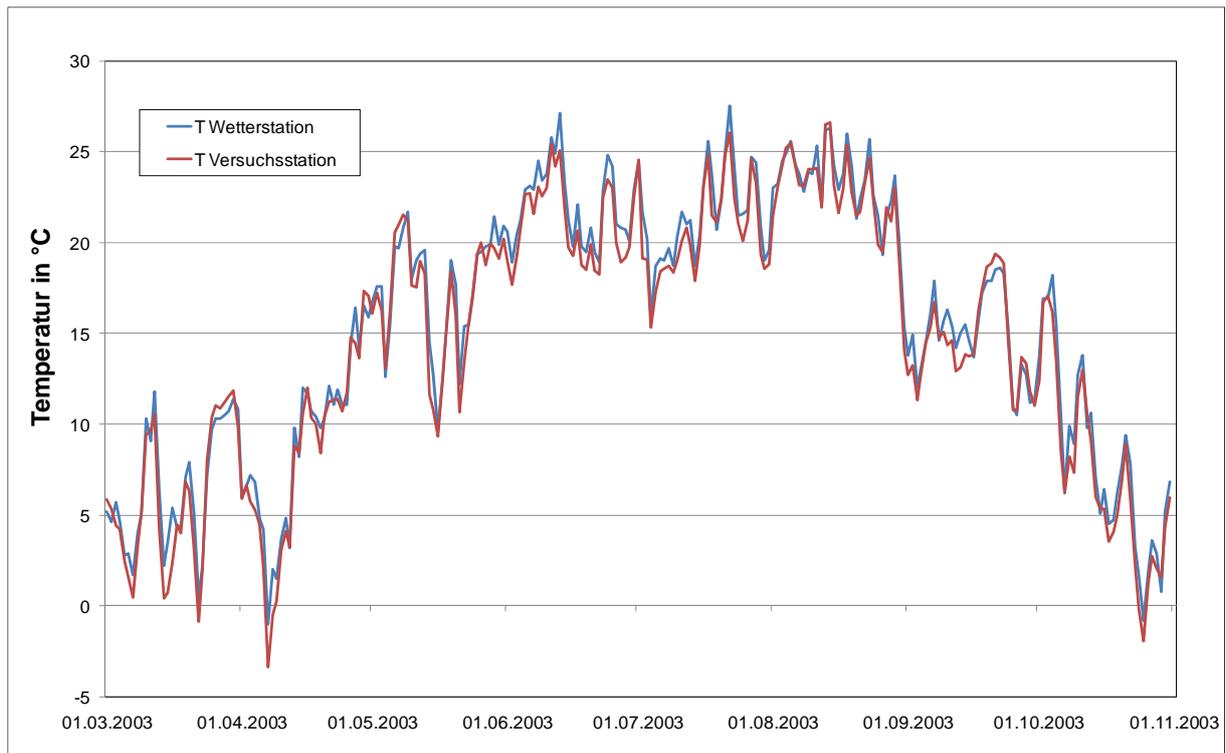


Abbildung 27: Vergleich der Temperaturwerte an Versuchs- und Wetterstation

Die Temperatur, welche mehrfach in verschiedene Modelle eingeht, weist ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messdaten an der Wetterstation und den auf die Versuchsstation interpolierten Beobachtungsdaten auf.

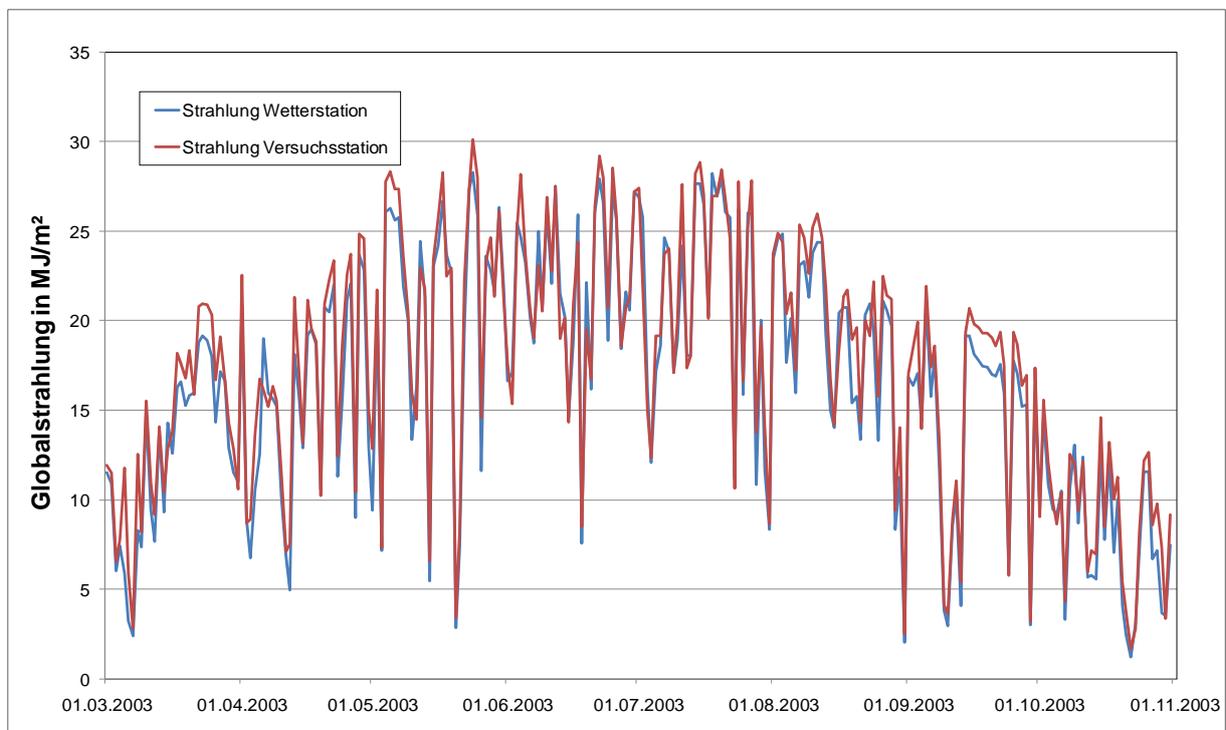


Abbildung 28: Vergleich der Globalstrahlungswerte an Versuchs- und Wetterstation

Die Globalstrahlung wird als Modellparameter für die Evapotranspiration und wie die Temperatur direkt als Prädiktor in der Ertragsgleichung verwendet. Die Interpolation dieses Parameters ist demnach entscheidend für die Qualität der Modellanwendung. *Abbildung 28* zeigt am Beispiel der Standorte Kirchberg/Walde ↔ Hartberg, dass es nur zu geringen Abweichungen kommt und daher Verwendung für eine Schätzung der Grünlanderträge finden kann.

2.5.7.2 Wasserverfügbarkeit und Wachstumsfaktor

Der Wasserstress ergibt sich aus dem Verhältnis von ET_a und ET_0 , wobei eine Reduktion der Biomassezunahme erst eintritt, wenn die Werte von ET_a kleiner als zwei Drittel der ET_0 sind (t_{CS} bzw. $t_{CL} = 1,5$). Nach Trnka *et al.* (2006) wird der kurzfristige Wasserstress (W_S) der letzten sechs Tage sowie der langfristige Wasserstress (W_L) vom Beginn der Vegetationsperiode für den Wasserverfügbarkeitsfaktor (W_A) herangezogen:

$$W_S = t_{CS} \cdot \frac{ET_{a,S}}{ET_{0,S}} \quad (2.5.7-1)$$

$$W_L = t_{CL} \cdot \frac{ET_{a,L}}{ET_{0,L}} \quad (2.5.7-2)$$

$ET_{a,S}$ ist die akkumulierte ET_a über die letzten 6 Tage, $ET_{0,S}$ die akkumulierte ET_0 über denselben Zeitraum. $ET_{a,L}$ entspricht der Akkumulation von ET_a über den gesamten Zeitraum vom Vegetationsbeginn bis zum aktuellen Tag; $ET_{0,L}$ der Summe von ET_0 . Die Kombination der für unterschiedliche Zeiträume berechneten Wasserstressfaktoren W_S und W_L in der Art

$$W_A = [CW_L^M + (1 - C)W_S^M]^{\frac{1}{M}} \quad (2.5.7-3)$$

ergibt den Wasserverfügbarkeitsfaktor W_A . C und M sind empirisch bestimmte Modellkoeffizienten und gehen mit folgenden Werten in die Gleichung ein:

| | |
|--------|------|
| C..... | 0,55 |
| M..... | 3,0 |

Die Wachstumsbedingungen werden mit Hilfe eines Wachstumsfaktors (Growth Supporting Factor g_s) [0..1] in der Form

$$g_s = \exp^{\alpha \exp^{\beta W_A^\gamma}} \quad (2.5.7-4)$$

ausgedrückt. Der Zusammenhang mit der Wasserverfügbarkeit W_A wird durch die Koeffizienten α , β und γ beeinflusst, welche empirisch mit folgenden Werten besetzt wurden:

| | |
|----------------|------|
| α | -3,0 |
| β | -2,5 |
| γ | 3,5 |

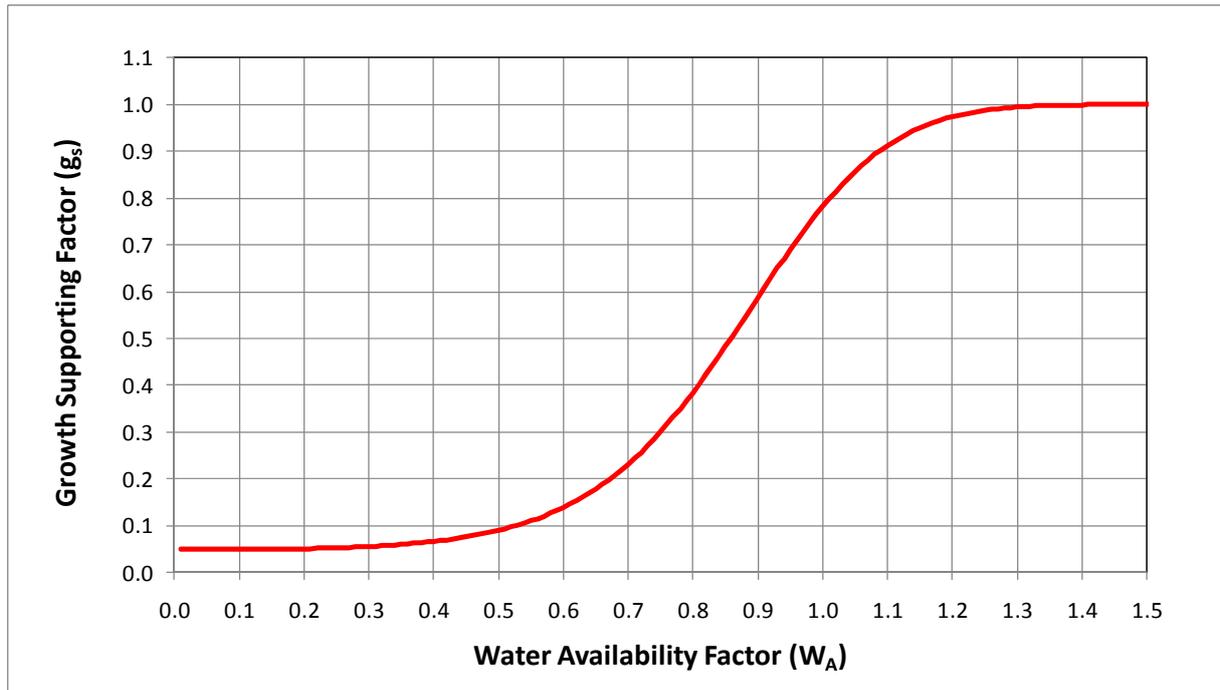


Abbildung 29: Zusammenhang von Wasserverfügbarkeit W_A und Wachstumsbedingungen g_s

Bei maximaler Wasserverfügbarkeit entsteht keine Beeinträchtigung des Wachstums: g_s liegt bei 1,0. Wie die Funktion in *Abbildung 29* zeigt, nimmt g_s mit zunehmendem Wassermangel rapide ab und flacht bei einem W_A -Wert von etwa 0,1 ab. Die Wachstumsbedingungen, ausgedrückt im g_s , gehen auf einen Minimumwert von 0,05 zurück.

Wie bereits in *Abbildung 22* und *Abbildung 23* wird auch in *Abbildung 30* am Beispiel der Vegetationsperiode 2003 am Standort Kirchberg/Walde der Zusammenhang zwischen den einzelnen GRAM-Modellparametern und ihrer zeitlichen Entwicklung dargestellt.

Zur Orientierung werden im Hintergrund die Basiskurven für die Ermittlung von Wasserstress, die Crop-Evapotranspiration und die aktuelle Evapotranspiration gezeigt (vgl. *Abbildung 23*). Aus dem Verhältnis beider Kurven zueinander kann der langfristige und kurzfristige Wasserstress abgeleitet werden. Die Reaktion beider Werte ist sehr unterschiedlich; während der kurzfristige Wasserstress sensibel und unmittelbar reagiert, verläuft der langfristige Wasserstress nach einer ersten Depression in der zweiten Maiwoche mit reduzierten Werten relativ stabil bis zum Ende der Vegetationsperiode.

Der Wasserverfügbarkeitsfaktor als Funktion beider Werte berücksichtigt sowohl kurzfristige Änderungen, zeigt aber auch eine Wirkung des langfristigen Trends – die Werte weisen ab dem ersten Auftreten eines massiven Wassermangels im Mai für die weitere Vegetationsperiode keine vollständige Erholung mehr auf.

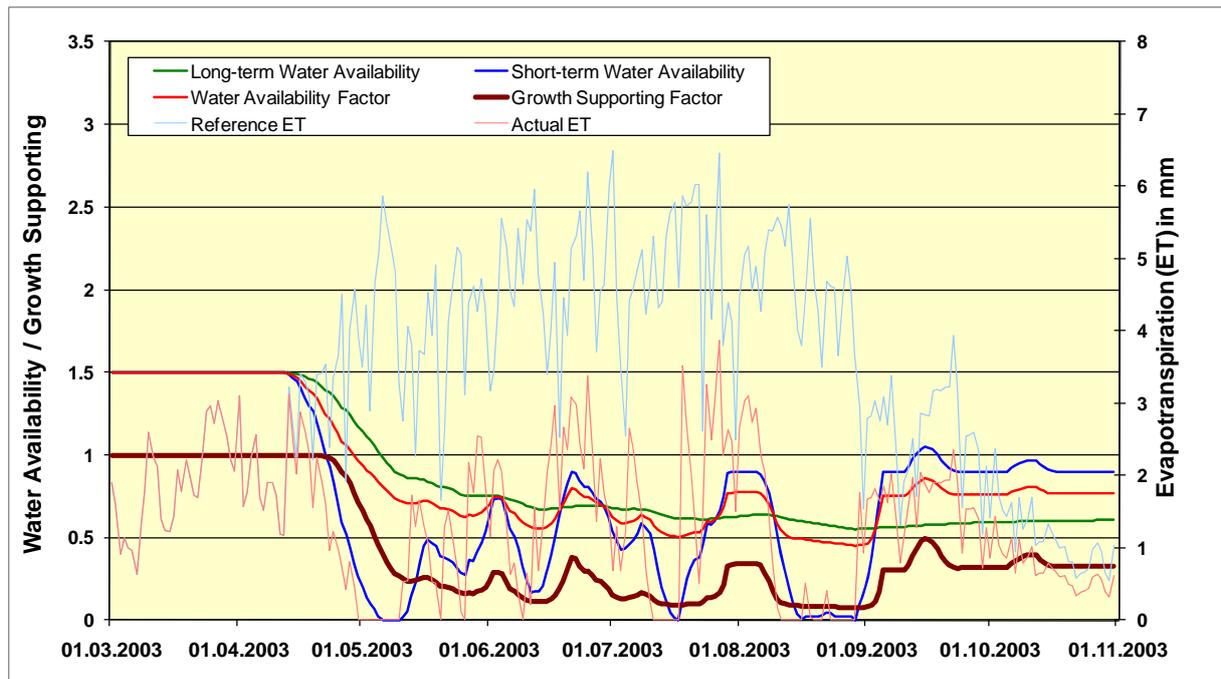


Abbildung 30: Wasserverfügbarkeit und Wachstumsfaktor im Vergleich zum Verlauf der Evapotranspiration am Standort Kirchberg/Walde im Jahr 2003

Der Wachstumsfaktor ist vom Wasserverfügbarkeitsfaktor funktional abhängig und zeigt dieselbe Kurvencharakteristik auf einem etwas unterschiedlicheren Niveau. Wird der durch die Wasserverfügbarkeit bestimmte Wachstumsfaktor < 1 und damit das Auftreten von Wasserstress ausgedrückt, wirkt sich dies auf das Pflanzenwachstum negativ aus.

2.5.7.3 Effektive Temperatur und effektive Globalstrahlung

Die Bestimmung des Wachstumsfaktors g_s ist in der vorliegenden Arbeit das Ziel der gesamten Bodenwasserbilanzrechnung. Dieser wird in weiterer Folge mit der täglichen Temperatur- bzw. Globalstrahlung kombiniert und wirkt demzufolge bei einer Limitierung der Wasserverfügbarkeit reduzierend auf die Temperatur- und Globalstrahlungssumme, welche als Prädiktoren in das Modell eingehen. 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 [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$] wie folgt ein:

$$T_e = \int_{t_0}^{t_n} T_d g_s dt \quad G_e = \int_{t_0}^{t_n} R_d g_s dt \quad (2.5.7-5)$$

Die effektive Temperatur (T_e) und Globalstrahlung (G_e) sind das Resultat der Akkumulation von täglichen Temperatur- und Globalstrahlungswerten, gewichtet mit dem Growth Supporting Factor g_s über den Zeitraum t_0 bis t_n , wobei t_0 der Beginn der Vegetationsperiode bzw. der erste Tag nach einer Schnittnutzung und t_n der Tag des Schnittes ist. Wie sich die

Anwendung von g_s auf den Temperatur- und Globalstrahlungsverlauf innerhalb einer Vegetationsperiode auswirkt, ist beispielhaft für den Standort Kirchberg/Walde im Jahr 2003 in der *Abbildung 31* und *Abbildung 32* dargestellt.

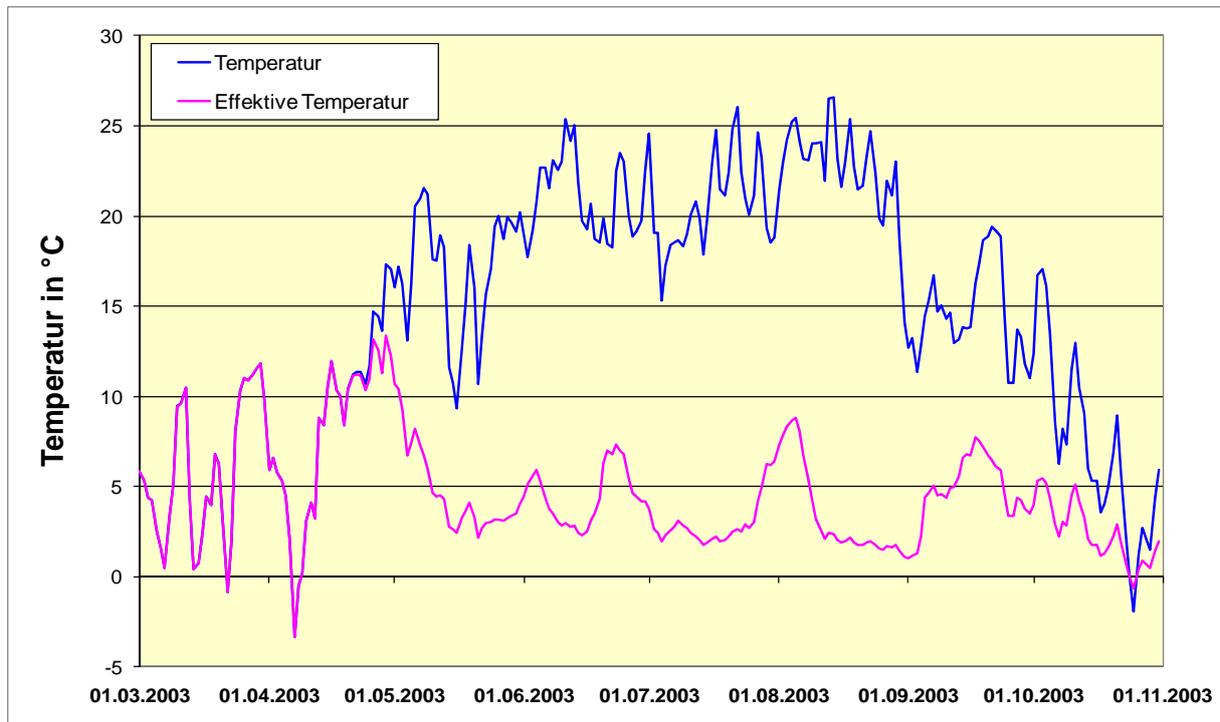


Abbildung 31: Verlauf von Temperatur und mittels Wachstumsfaktor modifizierter effektiver Temperatur am Standort Kirchberg/Walde im Jahr 2003

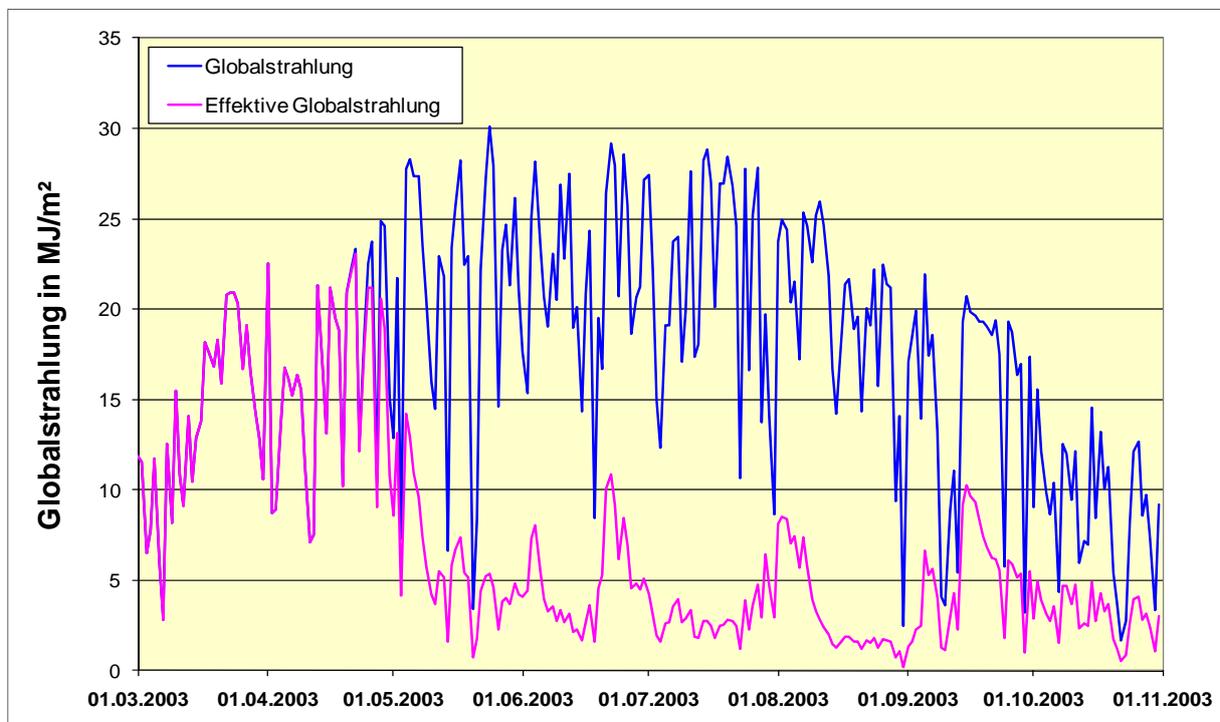


Abbildung 32: Verlauf von Globalstrahlung und mittels Wachstumsfaktor modifizierter effektiver Globalstrahlung am Standort Kirchberg/Walde im Jahr 2003

Beginnend mit der Abbildung der Parameter des Bodenwasserbilanzmodells (*Abbildung 22*) über die davon abgeleitete aktuelle Evapotranspiration (*Abbildung 23*) bis hin zu den Parametern aus GRAM (*Abbildung 30*) kann eine lückenlose Betrachtung der gesamten Modellierung nach dem Prinzip „cause and effect“ an Hand der Beispielperiode 2003 am Standort Kirchberg/Walde durchgeführt werden.

2.6 Ertragserhebung zur Ergebnisvalidierung

Ziel der Ertragsmodellierung ist es, die Erträge auf den Flächen der Grünlandbauern möglichst gut abzuschätzen. Dazu ist ein Vergleichsdatenbestand notwendig, der für die Evaluierung und Validierung des erarbeiteten Modells herangezogen werden kann. Die Sammlung derartiger Daten ist äußerst zeitaufwendig, da über eine ganze Ernteperiode hinweg die Erträge der einzelnen Schnitte auf verschiedenen Flächen erhoben werden müssen.

Für das Projekt GT Hartberg wurde der Versuch unternommen, auf Flächen von praktischen Landwirten Ertragsdaten zu sammeln, um sie den Modellergebnissen gegenüberstellen zu können. Die Umsetzung der Ertragserhebung wurde in Zusammenarbeit mit der Land- und Forstwirtschaftlichen Fachschule Kirchberg am Walde (Bezirk Hartberg) durchgeführt. Dazu fand am 29. März 2006 an der Schule eine Vortragsveranstaltung statt, zu der Schüler, Eltern, Lehrer und Interessensvertreter geladen waren. 32 Schüler mit ihren Eltern erklärten sich bereit, auf den Flächen des heimatischen Betriebes die Erhebungen durchzuführen. Vom LFZ Raumberg-Gumpenstein wurde ein entsprechendes Formular ausgearbeitet, welches der Erfassung von Stammdaten der einzelnen Betriebe und der jeweiligen Erhebungsflächen mit ihren Erträgen diente. Jeder Schüler erhielt eine Formlarmappe, die über die Ernteperiode nach und nach ausgefüllt wurde.

Zur Ertragsmessung mussten von den Schülern im Rahmen des Unterrichts Holzrahmen mit exakt einem Quadratmeter Innenfläche gefertigt werden. Dieser Rahmen wurde unmittelbar vor dem Schnitt auf rund zehn verschiedene Punkte innerhalb der Erntefläche zufällig verteilt, die Pflanzen in jedem ausgewählten Bereich in einer praxisüblichen Schnitthöhe von Hand geschnitten, abgewogen und die so ermittelten Werte im bereitgestellten Formular festgehalten. Dieser Vorgang wiederholte sich bei jedem Schnitt auf zwei verschiedenen Flächen eines Betriebes. Insgesamt standen damit für die weitere Auswertung 1904 Einzelertragsdaten zur Verfügung.

Von den einbezogenen 32 Betrieben konnten die Daten aus 63 Beprobungsflächen herangezogen werden (siehe *Abbildung 33*). Auf jeder Fläche erfolgten acht bis zehn Einzelmessungen, die im Rahmen der Auswertung zu einem Durchschnittswert zusammengezogen wurden. Je nach Schnittanzahl auf den Einzelflächen entstanden damit insgesamt 317 durchschnittliche Ertragsdaten.

Das gemähte Gras wurde unmittelbar nach der Ernte abgewogen und als Frischmassewert (FM) im Formular erfasst. Bei jeder Nutzung war auch die Angabe des Vegetationsstadiums

notwendig, damit die FM-Daten in mit den TM-Ergebnissen des Ertragsmodells kompatible Werte umgerechnet werden konnten. Als Umrechnungsfaktoren wurden für das Stadium „Schossen“ 15 %, für „Ähren- und Rispenschieben“ 18 %, für „Blüte“ 21 % und für „überständig“ 25 % nach Buchgraber herangezogen. Beispielsweise ergeben 2000 g FM im Vegetationsstadium „Ähren- und Rispenschieben“ den TM-Wert von 360 g. Da die Umrechnung auf Schätzungen basiert, ist die Genauigkeit der in TM ausgedrückten Erntemenge auch dahingehend zu bewerten und mit einer exakten Laboranalyse und -messung nicht vergleichbar.

Wie im Abschnitt 2.5.6.2 beschrieben, wird die Fläche für Ergebnisse aus dem Ertragsmodell durch die räumliche Abgrenzung verfügbarer Werte der nutzbaren Feldkapazität reduziert. In *Abbildung 33* sind jene Gebiete, welche letztlich für den Vergleich von Ertragsmodell und Ertragsmessung zur Verfügung stehen, blau dargestellt. Von den ursprünglich 317 Ertragsdaten können durch diese räumliche Einschränkung nicht alle Erhebungen für die Auswertung herangezogen werden.

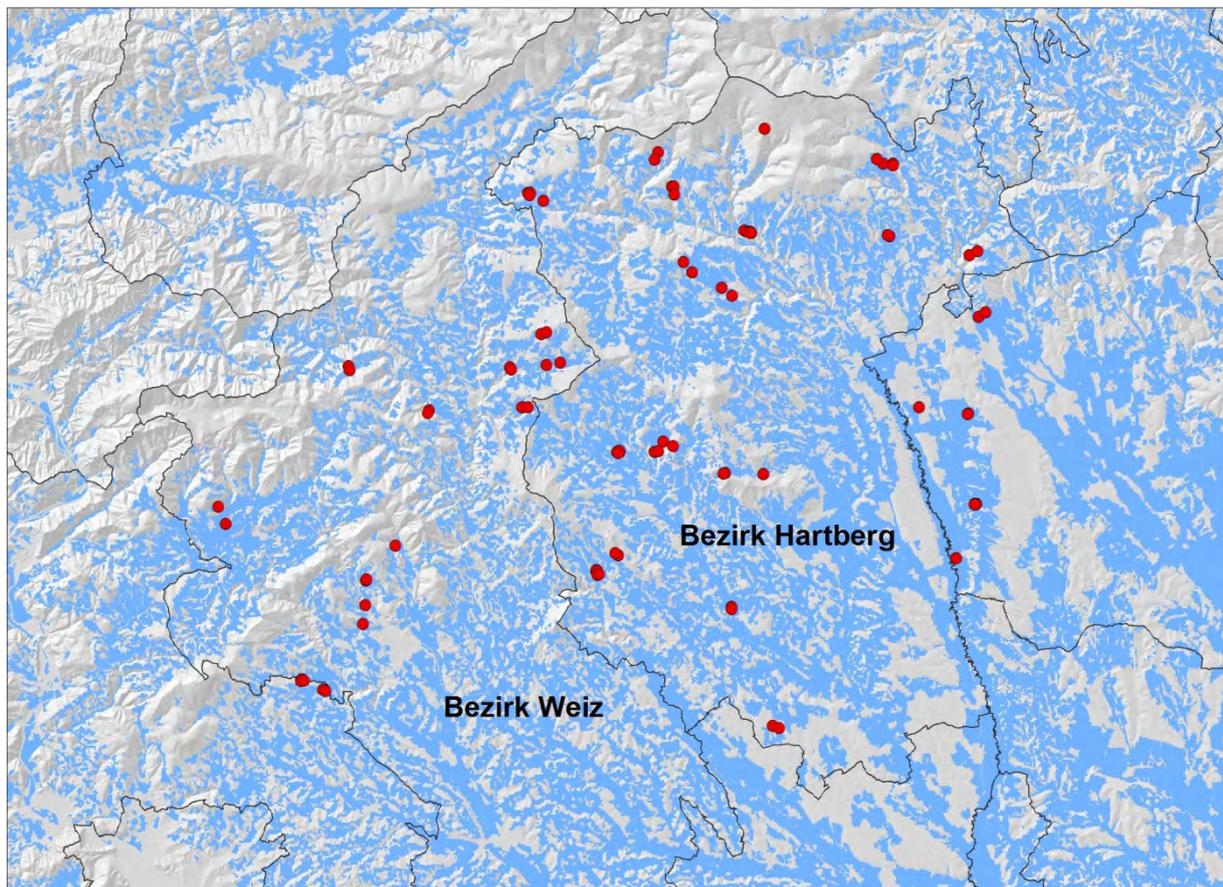


Abbildung 33: Standorte der Ertragsmessungen im Raum Hartberg

3 Implementierung

Die im Laufe des Projektfortschritts vorgenommene Modellweiterentwicklung und -verbesserung zur Bestimmung des Grünlandertrages erfordert eine Systemumgebung, welche eine effiziente Anpassung von Modellparametern unterstützt. Viele der bereits dargestellten Modelle arbeiten auf Tagesbasis und müssen über längere Zeiträume akkumuliert werden. Bei der räumlichen Implementierung entstehen viele Geodaten in Form von kontinuierlichen Oberflächen, die erst nach intensiven Rechenprozeduren und durch geeignete Kombination Ergebnisse liefern, die einer eingehenden Evaluierung unterzogen werden können.

Dem Werkzeug für die Durchführung dieser Operationen kommt eine besondere Bedeutung zu, da nur eine effiziente Implementierung mit möglichst wenigen Benutzereingriffen eine ständige Wiederholung aufwändiger Berechnungen mit leicht geänderten Inputparametern die Grundlage für eine Modellweiterentwicklung darstellt. Eine der wichtigsten Aufgaben der vorliegenden Arbeit besteht demnach darin, ein solches Werkzeug für die explorative Herangehensweise an die verschiedenen Modelle zur Verfügung zu stellen. Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den Rahmenbedingungen und technischen Voraussetzungen der Implementierung. Programmierkonzepte, Systemstruktur und konkrete Umsetzungsbeispiele gehen auf diesen zentralen Aspekt der Projektarbeit ein und zeigen die prinzipielle Verarbeitung der in Abschnitt 2 dargestellten Modelle mit Methoden der Geoinformatik. Dabei wird der entwickelte Programmcode nicht zur Gänze analysiert, sondern nur exemplarisch auf die wichtigsten Algorithmen hingewiesen.

3.1 Objektorientierte Programmierung mit Visual C#

Es wurde bereits mehrmals auf extrem hohe Rechenzeiten hingewiesen. Dieser Umstand erfordert bei der Implementierung besondere Aufmerksamkeit, da jede Möglichkeit einer Performanceverbesserung unbedingt genutzt werden muss. Ein wesentliches Element dafür stellt die Wahl des geeigneten Programmierkonzeptes dar. Im Folgenden wird auf die Grundzüge der objektorientierten Programmierung eingegangen, ohne den Anspruch einer erschöpfenden Einführung zu erheben. Will der Leser sich in diese Thematik vertiefen, steht ihm eine breite Palette an Literatur zur Verfügung, die auch mit einer kleinen Auswahl im Quellenverzeichnis vertreten ist.

3.1.1 Auswahl grundlegender objektorientierter Konzepte

Der objektorientierte Ansatz ist eng mit der Notwendigkeit ereignisgesteuerter Programmierung zur Mensch-Maschine-Kommunikation verbunden, wie wir sie alle aus der Welt grafischer Benutzeroberflächen kennen (z.B. Microsoft Windows). Das objektorientierte Denkmodell beschäftigt sich mit Objekten, welche aus einer Kombination von Daten (Eigenschaften) und den darauf anwendbaren Operationen (Methoden) bestehen. Diese Objekte können beim

Ablauf eines Programms aktiv miteinander kommunizieren und Daten austauschen – sie stehen also in der Regel miteinander in Beziehung. Die Vereinigung von Daten und Operationen mit den jeweiligen Beziehungen entspricht dem Denkmuster, das aus der realen Welt übernommen wurde, um damit Simulationen in abstrakten Welten, ähnlich denen, die wir aus der Realwelt kennen, umzusetzen (Rechenberg, 2000, 156f).

Ein wichtiges Prinzip in der Informatik ist „Teile und Herrsche“ – ein komplexes Problem wird in kleinere Teilprobleme zerlegt, dort gelöst und zur Gesamtlösung wieder zusammengefügt. Die objektorientierte Programmierung unterstützt diesen Ansatz durch die Möglichkeit der Kapselung von Information und Verhalten in Klassen, die über exakt definierte Schnittstellen miteinander kommunizieren. Die Zerlegung in Teilsysteme entspricht so einer modulartigen Struktur, welche die Wiederverwendbarkeit einzelner Komponenten gewährleistet und beliebig erweiterbar ist.

Eine Klasse, auch Typ genannt, beschreibt in abstrakter Form Objekte, deren Gemeinsamkeit in der von der Klasse festgelegten Struktur besteht. Die Klasse entspricht also der Objektdefinition, die einzelnen Objekte als Instanzen dieser Klasse enthalten die Daten gemäß der festgelegten Definition. Die Möglichkeit der Erweiterung beschränkt sich nicht nur darauf, neue Klassen zu definieren und dem System hinzuzufügen, sondern Klassen können ihre Eigenschaften und ihr Verhalten Unterklassen vererben. Bereits einmal definierte Inhalte werden somit auf andere Klassen übertragen und können dort erweitert (spezialisiert) oder verändert (überschrieben) werden (Goos, 2001, 145ff).

Ein einfaches Beispiel soll das Konzept illustrieren: Die Klasse *Punkt* enthält die Attribute *X* und *Y*. Eine Instanz von *Punkt* mit dem Namen *Punkt1* speichert für *X* 14,5 und für *Y* 49,3, eine weitere Instanz *Punkt2* enthält für *X* 13,8 und für *Y* 48,0. Nun soll das Objekt einer meteorologischen Messstelle modelliert werden. Der Name der Klasse ist *Messstelle* und wird als eine Erweiterung der Klasse *Punkt* geführt. Sie enthält einen Verweis auf die Oberklasse (*Punkt*) und die Attribute *Betreiber* und *Messtyp*. Das Objekt gemäß dieser Klassendefinition heißt nun *HoheWarte* und enthält folgende Informationen: *X* 15,1 und *Y* 49,6, Betreiber *ZAMG*, Messtyp *Niederschlag*.

Die Implementierung mit C# sieht folgendermaßen aus:

```
public class Punkt {
    public double x;
    public double y;
}

public class Messstelle : Punkt {
    public string Betreiber;
    public string Messtyp;
}
```

Die Klassendefinitionen entsprechen benutzerdefinierten Datentypen, die wie atomare Datentypen (z.B. Double, String, Integer, usw.) verwendet werden können – die Methode *InstanzenVonPunkt()* zeigt dies. Hier werden zwei Punktobjekte erzeugt und durch Wertzu-

weisungen mit Inhalt gefüllt. Die Verwendung der erweiterten Klasse *Messstelle* macht den Sinn von Vererbung deutlich.

```
public void InstanzenVonPunkt() {
    Punkt Punkt1 = new Punkt();
    Punkt1.x = 14.5;
    Punkt1.y = 49.3;

    Punkt Punkt2 = new Punkt();
    Punkt2.x = 13.8;
    Punkt2.y = 48.0;
}

public void InstanzVonMessstelle() {
    Messstelle HoheWarte = new Messstelle();
    HoheWarte.x = 15.1;
    HoheWarte.y = 49.6;
    HoheWarte.Betreiber = "ZAMG";
    HoheWarte.Messtyp = "Niederschlag";
}
```

Objekte bestehen nicht immer nur aus Eigenschaften, sondern können wie gesagt auch Verhalten beschreiben. Um bei dem obigen Beispiel zu bleiben, könnte die Klasse *Punkt* beispielsweise über eine Methode verfügen, welche die im Objekt gespeicherten Koordinatenwerte auf die Konsole ausgibt.

```
public class Punkt {
    public double x;
    public double y;

    public void Koordinatenausgabe() {
        Console.WriteLine("Koordinaten des Punktes: " + x + " / " + y);
    }
}
```

Dieses Verhalten wird ebenfalls auf die Klasse *Messstelle* vererbt. Aufruf und Ausgabe mit den Instanzen von *Punkt* und *Messstelle* sehen dabei wie folgt aus:

```
Punkt1.Koordinatenausgabe();    → Koordinaten des Punktes: 14.5 / 49.3
HoheWarte.Koordinatenausgabe(); → Koordinaten des Punktes: 15.1 / 49.6
```

Wenn die Methode für die Konsolenausgabe in der erbenden Unterklasse überschrieben und mit anderer oder zusätzlicher Funktionalität ausgestattet wird, benutzt der entsprechende Objekttyp auch diese speziellere Methode.

```
public class Messstelle : Punkt {

    public string Betreiber;
    public string Messtyp;

    public void Koordinatenausgabe() {
        Console.WriteLine("Koordinaten: " + x + " / " + y);
        Console.WriteLine("Betreiber: " + Betreiber);
    }
}
```

Aufruf und Ausgabe dieser erweiterten Methode sehen wie folgt aus:

```
HoheWarte.Koordinatenausgabe(); → Koordinaten: 15.1 / 49.6
                                Betreiber: ZAMG
```

Das Objekt *Messstelle* ist aber gleichzeitig auch ein *Punkt* und wenn die Objektreferenz *HoheWarte* einem neuen Punktobjekt (z.B. *Zentralstation*) zugewiesen und mit diesem Punktobjekt nun die Methode *Koordinatenausgabe()* aufgerufen wird, erhält man die in der Oberklasse *Punkt* definierte Funktionalität:

```
Zentralstation.Koordinatenausgabe(); → Koordinaten des Punktes: 15.1 / 49.6
```

Mit diesem Beispiel soll zum Ausdruck gebracht werden, dass Unterklassen typkompatibel mit Oberklassen sind. Damit ist unter anderem ein gleiches Außenverhalten von Objekten gewährleistet: Die Objektreferenz *HoheWarte* liefert als Punktobjekt *Zentralstation* genau jenes Verhalten, wie das für Punkte festgelegt wurde. Wenn von der Oberklasse *Punkt* auch noch weitere Unterklassen abgeleitet werden (z.B. Orte, Kreuzungen, Hotels, usw), so kann unabhängig davon, wie diese Objekte konkret ausgeprägt sind, immer auch das Verhalten von *Punkt* (in diesem Fall die Abfrage der Koordinaten) auf alle weiteren Objekte angewendet werden – eine Art kleinster gemeinsamer Nenner.

Bestimmend für das konkrete Verhalten eines Objektes ist immer die Klasse des Objektes und nicht der statische Datentyp der Objektreferenz. Beispielsweise wäre bei der Deklaration von

```
Punkt HoheWarte = new Messstelle();
```

das Verhalten von *Punkt* und nicht das von *Messstelle* ausschlaggebend, obwohl der statische Datentyp *Messstelle* ist.

Dieses wichtige Konzept objektorientierter Programmierung wird Polymorphie genannt und ist für ein Verständnis dieser Art der Programmierung unerlässlich. Sprachen wie C# bieten ein sehr breites Spektrum an Möglichkeiten zur Gestaltung von Objekten und deren Beziehungen, auf die hier jedoch nicht weiter eingegangen wird. In diesem Zusammenhang sei auf die umfangreiche Literatur zu diesem Thema verwiesen.

3.1.2 C# und das .NET-Framework

Wie bereits beim Versuch im vorigen Abschnitt, ein komplexes Themengebiet so kompakt wie möglich und doch noch einigermaßen verständlich abzuhandeln, setzt sich dieses Problem auch hier fort. Im Rahmen dieser Arbeit geht es nicht darum, Grundlagen zur Programmierung zu vermitteln, sondern die für die Implementierung der Modelle angewandten Methoden aufzuzeigen. Das wichtigste Werkzeug in diesem Zusammenhang ist die gewählte Sprache und die mit ihr verbundene technische Plattform.

Das .NET-Framework von Microsoft wurde vor einigen Jahren eingeführt, um die Windows-Programmierung von Grund auf zu erneuern. Die langjährige Erfahrung mit Technologien wie dem Application Programming Interface (API) oder dem Component Object Model (COM) hat gezeigt, dass eine Weiterentwicklung auf dieser Basis nur eingeschränkt möglich war. Mit einer gemeinsamen Plattform für mehrere Sprachen und einer konsequenten Verfolgung objektorientierter Grundsätze wurde ein zukunftsicheres und erweiterbares Konzept ver-

folgt. Erreicht wurde dies mit einer speziellen Laufzeitumgebung und einer enorm umfangreichen Klassenbibliothek (Eller, 2006, 25f).

Die Sprachenunabhängigkeit des .NET-Frameworks wurde durch die Einführung einer Spezifikation namens Common Type System (CTS) ermöglicht, an die sich alle .NET-Komponenten halten müssen. Alle Klassen werden von einer einzigen Wurzelklasse *System.Object* abgeleitet und es muss ein einheitliches Klassen- und Interfacekonzept unterstützt werden. Eine Festlegung der Sprachanforderungen erfolgt über die Common Language Specification (CLS), an die sich die fünf offiziellen Sprachen C#, VB, Visual C++, Visual J# und JScript.NET halten. Alle Sprachen nutzen die Common Language Runtime (CLR), in der alle .NET-Anwendungen ausgeführt werden (Liberty, 2005, 3f).

Die CLR ist zentraler Bestandteil der .NET-Plattform und unterstützt eine automatische Speichereinigung (Garbage Collection), Sicherheit und Interoperabilität zwischen den verschiedenen Sprachen. Bevor .NET-Programme ausgeführt werden, muss der Code der verschiedenen .NET-Programmiersprachen mit dem Befehlssatz der Common Intermediate Language (CIL) übersetzt und anschließend „just in time“ kompiliert werden (JIT-Compiler). Dabei wird der CIL-Code in einen auf die Zielrechenmaschine abgestimmten Maschinencode übertragen. Es spielt also letztlich keine Rolle, ob eine Anwendung in C#, VB oder Visual C++ codiert wurde, mit CIL und CLR wird sämtlicher Code vereinheitlicht (Mössenböck, 2006, 4f).

Die Architekturkomponenten des .NET-Frameworks stellen verschiedene Abstraktionsschichten dar, welche vereinfacht in *Abbildung 34* dargestellt sind und die obigen Aussagen grafisch zusammenfassen.

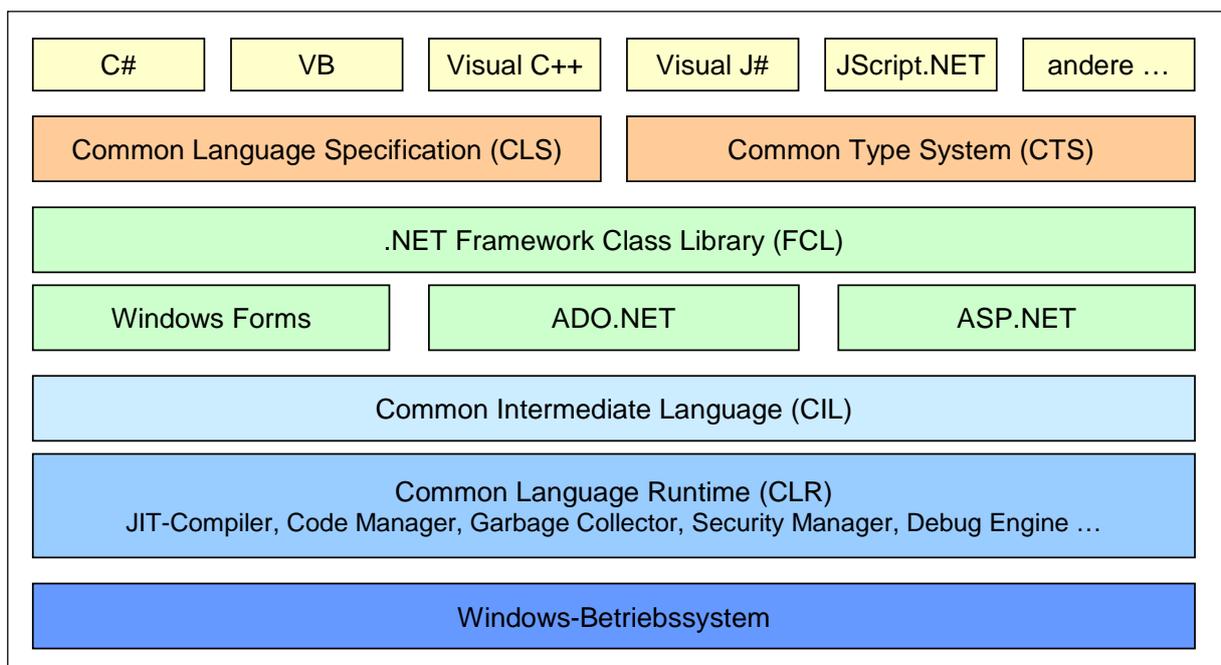


Abbildung 34: Grobarchitektur des .NET-Frameworks

C# wurde speziell auf die vom .NET-Framework gebotenen Möglichkeiten abgestimmt und gilt als einfache, sichere, moderne, objektorientierte, internetbasierte und leistungsfähige Sprache. Dabei wird lediglich die Syntax mit etwa 80 Schlüsselwörtern und einigen eingebauten Datentypen definiert, sämtliche Funktionalität entstammt der .NET-Klassenbibliothek mit über 4600 Klassen, auf welche über verschiedene Namensräume zugegriffen werden kann (Eller, 2006, 34). Die Sprache ist nicht von Grund auf neu erfunden, sondern greift auf die Erfahrung der letzten dreißig Jahre zurück und verfügt über jene Eigenschaften, welche zur Softwareentwicklung auf dem neuesten Stand der Technik erforderlich sind. C# profitiert von einer Art Kombination aus Java, C++ und Visual Basic, wo bewährte Eigenschaften übernommen und problembehaftete Konzepte vermieden wurden (Mössenböck, 2006, 1f). Damit ist der Entwickler bestens gerüstet, um strukturierte, komponentenbasierte und objektorientierte Software für Windows-Plattformen erstellen zu können.

Eine Programmiersprache und die dahinter stehende Technologie in wenigen Zeilen zu beschreiben, erfordert Kompromisse beim „Tiefgang“. Deshalb ist dem interessierten Leser auch ein weiteres Mal empfohlen, sich mit der entsprechenden Literatur auseinanderzusetzen.

3.2 Softwareentwicklung mit ArcObjects

GIS-Applikationen beschränken sich nicht nur auf die Nutzung von Standardoberflächen wie z.B. ArcMap oder ArcCatalog von ESRI, sondern schließen auch die Integration ausgewählter GIS-Funktionalität in eigene Entwicklungen ein, wie dies in der vorliegenden Arbeit umgesetzt wurde. Ein sehr mächtiges Framework zur Realisierung neuer Applikationen bietet ArcObjects von ESRI. Es stellt COM-basierte Objektkomponenten bereit, welche auch die Grundlage für die gesamte Funktionalität der ESRI-Oberflächen (ArcMap, ArcCatalog, ArcReader, usw.) bildet. Der Entwickler bedient sich also für die Erstellung eigener Applikationen der gleichen Technologie, wie sie ESRI für ihre Oberflächen nutzt (ESRI, 2000). Der Umfang dieser Bibliothek ist riesig und stellt eine der größten COM-Entwicklungsprojekte außerhalb des Hauses Microsoft dar. Dementsprechend schwierig ist es auch, sich im Modell der vielen Objektkomponenten zurechtzufinden. Unterstützt wird der Nutzer dabei durch Klassendiagramme, ausführliche Beschreibungen, Hilfetexte und Beispielimplementierungen auf der Entwicklerhomepage von ESRI und den zahlreichen Artikeln in den User-Foren.

Die Umsetzung von ArcObjects mit COM bietet hinsichtlich Wiederverwendbarkeit einzelner Komponenten, der vollen Integration objektorientierter Grundsätze und einer konsequenten Nutzung von wohldefinierten Schnittstellen große Vorteile. COM ist ein Protokoll, das die einzelnen Softwarekomponenten und -module miteinander verbindet und basiert auf dem Client-Server-Prinzip. Der Server oder die Klasse stellt die Funktionalität zur Verfügung, in ihren Methoden ist die Logik einer Problemlösung implementiert. Der Client verwendet diese Implementierung und kommuniziert mit ihr mittels Schnittstelle, welche genau festlegt, wie auf die Funktionalität der Klasse zugegriffen werden kann. Dies hat den Vorteil, dass zwischen Verwendung der Funktionalität und ihrer Implementierung eine Abstraktionsschicht

eingezogen wird, welche der Verwendung eine gewisse Unabhängigkeit von der Implementierung zugesteht. Komponenten können so mehrfach in verschiedenen Zusammenhängen und Prozessen genutzt werden (Interprozessfähigkeit). Wichtig dabei ist der COM-Standard, welcher die Art und Weise der Kommunikation zwischen Client und Server festlegt (Höck und Manegold, 2006, 102ff).

In ArcObjects gibt es drei Arten von Klassen – abstrakte Klasse, CoKlassen und Klassen. *Abstrakte Klassen* dienen der Implementierung grundsätzlicher Funktionalitäten, die dann von weiteren Klassen geerbt werden. Von diesen Klassen können keine Instanzen erzeugt werden, es würde auch wenig Sinn machen, da sie nur der Festlegung von übergeordneten Eigenschaften und Methoden der davon abgeleiteten Unterklassen dienen. Beispiel: Für die Klasse Geometry sind eigene Objekte nicht sinnvoll, sehr wohl aber für Point, Polygon, Line usw. In Geometry werden Eigenschaften und Methoden festgelegt, die sich in allen abgeleiteten Klassen wieder finden, die dort aber noch zusätzlich für ihre spezielle Ausprägung eigene Eigenschaften und Methoden beinhalten. Auch Interfaces, die auf die Oberklasse zugreifen, sind von Objekten der Unterklassen verwendbar, da die Unterklasse nur als eine Erweiterung der Oberklasse zu verstehen ist und deshalb auch alle Anforderungen des Oberklasse-Interface erfüllt. *CoKlassen* sind Klassen, von denen Instanzen erzeugt werden können (beispielsweise ist Point eine solche). Das Schlüsselwort dafür ist *new*. Auf dieses Objekt sind sämtliche Methoden dieser Klasse anwendbar. Der Zugriff darauf erfolgt über das Interface. Die dritte Art sind *Klassen*. Sie sind nicht öffentlich, d.h. es kann nicht direkt darauf zugegriffen und auch keine Objekte davon erzeugt werden, sondern nur über Objekte einer anderen Klasse. Objekte von Klassen können als Eigenschaften von Objekten einer anderen Klasse erzeugt werden bzw. Funktionen werden über Punktnotation von Objekten dieser anderen Klasse angesprochen (Höck und Manegold, 2006, 105ff).

Die Verwendung von COM-Objektcomponenten im .NET-Framework wird durch ein entsprechendes API für .NET gewährleistet. Im Gegensatz zu .NET-Applikationen in der CLR (managed Code) handelt es sich bei COM-Komponenten um unmanaged Code, also um einen Code, der nicht ohne weiteres von der CLR ausgeführt werden kann. Die Interaktion zwischen COM und .NET wird mittels *COM Interop* ermöglicht. Dabei werden die Typinformationen der COM-Komponente in .NET-Metadaten konvertiert, welche die CLR nun verstehen kann. Die .NET-Laufzeitumgebung stellt Wrapper-Klassen zur Verfügung, welche die Kommunikation zwischen managed und unmanaged Code gestattet. Wenn beispielsweise managed Clients die Methode eines COM-Objektes aufrufen, wird eine Runtime Callable Wrapper (RCW) erzeugt, welche die Interaktion zwischen beiden Umgebungen steuert. Für den praktischen Einsatz von ArcObjects in einer .NET-Umgebung heißt dies, dass ESRI Interop-Assemblies für alle in COM implementierte Komponenten zur Verfügung stellt, welche vom Entwickler so verwendet werden können, als handle es sich um ursprüngliche .NET-Implementierungen (ESRI, 2004, 228f).

Im nächsten Kapitel wird auf die praktische Umsetzung der beschriebenen Methoden und programmtechnischen Hintergründe eingegangen und in Form von Beispielen auf die konkrete Anwendung in der Softwareentwicklung Bezug genommen. Theoretische Beschreibungen der letzten Abschnitte werden dadurch transparent und leichter zugänglich.

3.3 Systemstruktur

Die Struktur des modellierten Systems ist von entscheidender Bedeutung für die Umsetzung eines effektiven und effizienten Werkzeuges, das leicht erweiterbar und anpassungsfähig ist. Die einzelnen Systemkomponenten müssen daher eine geringe Kopplung untereinander, eine hohe Kohäsion innerhalb der Paketstruktur und wohldefinierte Schnittstellen aufweisen. Ein Subsystem (wie z.B. das Paket für die Erstellung von *Workspaces*) sollte möglichst wenige Abhängigkeiten zu anderen Paketen aufweisen und die Logik zur Bewältigung einer spezifischen Aufgabe vollständig innerhalb der Paketstruktur abbilden. Damit bleibt die Wartbarkeit und Erweiterbarkeit des Systems mit vertretbarem Aufwand gewährleistet und Änderungen haben in der Regel keine Auswirkungen auf andere Subsysteme.

Besonders wichtig sind in diesem Zusammenhang stabile Schnittstellen, welche den Zugang zur Funktionalität einer Systemkomponente von außen definieren. *Abbildung 35* stellt das Strukturdiagramm in UML-Paketdiagrammnotation dar.

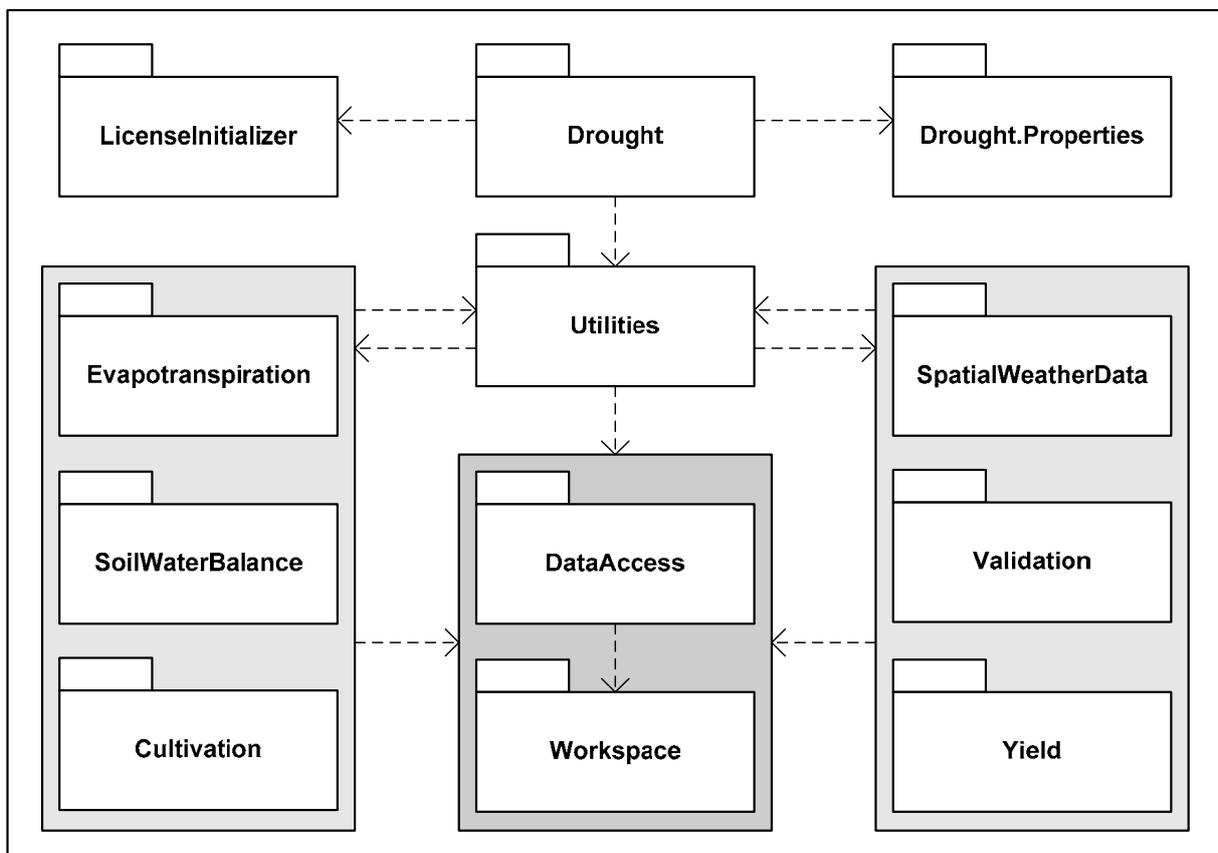


Abbildung 35: Paketdiagramm des modellierten Systems

Die Abhängigkeitsbeziehungen zwischen den einzelnen Paketen bzw. Paketverschmelzungen (grau hinterlegt) werden mit Pfeilen dargestellt (z.B. *DataAccess* ist abhängig von *Workspace*). Eine Abhängigkeit besteht dann, wenn sich Änderungen im unabhängigen Paket auf abhängige Pakete auswirken, wenn Objekte einer Klasse in einem anderen Paket verwendet werden oder wenn Klassen abhängiger Pakete andere in unabhängigen Paketen importieren (Fowler, 2004, 67ff).

Das Paket *Drought* enthält eine Klasse mit der ausführbaren *main*-Methode – sie ist sozusagen das Herz der Applikation. In der vorliegenden Version wird hier lediglich eine Testumgebung ausgeführt, welche sämtliche Funktionen aller implementierten Algorithmen beinhaltet. In einer zukünftigen Version verbindet dieses Paket die Programmlogik mit einer noch zu erstellenden Windowsoberfläche als Präsentationsschicht. Im Kontext einer Drei-Tier-Architektur wird in der vorliegenden Arbeit nur die Logikschicht beschrieben. *LicenseInitializer* beinhaltet die zur Einbindung von ArcObjects notwendige Abfrage einer gültigen ArcView- bzw. ArcInfo-Lizenz. Ohne diese Prüfung bzw. ohne verfügbare ArcGIS-Instanz kann das Programm nicht ausgeführt werden. *Drought.Properties* beinhaltet lediglich systeminterne .NET-Funktionalität und wird bei der Anlage eines neuen Visual-Studio-Projektes automatisch erzeugt.

Das Paket *Utilities* enthält Klassen, welche zum einen sämtliche Variablen für alle anderen Pakete deklariert und initialisiert und zum anderen Werkzeuge bereithält, die von den anderen Paketen genutzt werden (z.B. Ausgabe von Daten in Textdateien, Berechnung von Regressionen und Interpolationen, Testklasse, usw.). Die Abhängigkeit dieses Paketes von den meisten anderen Paketen ist relativ groß, bietet jedoch den Vorteil, dass sämtliche Änderungen von Parameterwerten und wichtigen, komponentenübergreifenden Funktionen an zentraler Stelle durchgeführt werden können.

Die wichtigsten Pakete mit den stabilsten Schnittstellen sind *Workspace* und *DataAccess*. Sie nutzen die in den *Utilities* definierte Systemumgebung (Pfade, Dateinamen, Serverzugriffsdaten), um den Workspace (Verzeichnis oder Datenbank für den Lese- und Schreibzugriff auf Geodaten) sowie den eigentlichen Datenzugriff auf Raster- und Featuredaten zu regeln. So gut wie alle Systemkomponenten hängen von diesen beiden Paketen ab und sie müssen deshalb über besonders stabile Schnittstellen verfügen. Hier durchgeführte Änderungen würden sich auf alle abhängigen Klassen auswirken.

Die sechs Pakete, welche die modellbezogenen Algorithmen enthalten (*Evapotranspiration*, *SoilWaterBalance*, *Cultivation*, *SpatialWeatherData*, *Validation* und *Yield*), sind hauptsächlich von *Workspace* und *DataAccess* und zu einem kleinen Teil von *Utilities* abhängig. Der Grund für die wechselseitige Abhängigkeit zwischen *Utilities* und den sechs Hauptpaketen liegt einerseits in der zentralen Haltung von „universalen“ Werkzeugen, welche in den einzelnen Komponenten benötigt werden und andererseits im Austausch von Objektdaten (z.B. Variablen der Modellparameter und Objekte für Testumgebung).

3.4 Programmablauf

In *Abbildung 35* werden die einzelnen Systemkomponenten hinsichtlich ihrer Abhängigkeit dargestellt. Um ausgehend von den Wetterdaten zu einer Ertragsbestimmung zu gelangen, müssen diese Komponenten in einer bestimmten Reihenfolge verarbeitet werden, da der Datenoutput aus einer Berechnung gleichzeitig den Dateninput für die nachgelagerten Operationen darstellt.

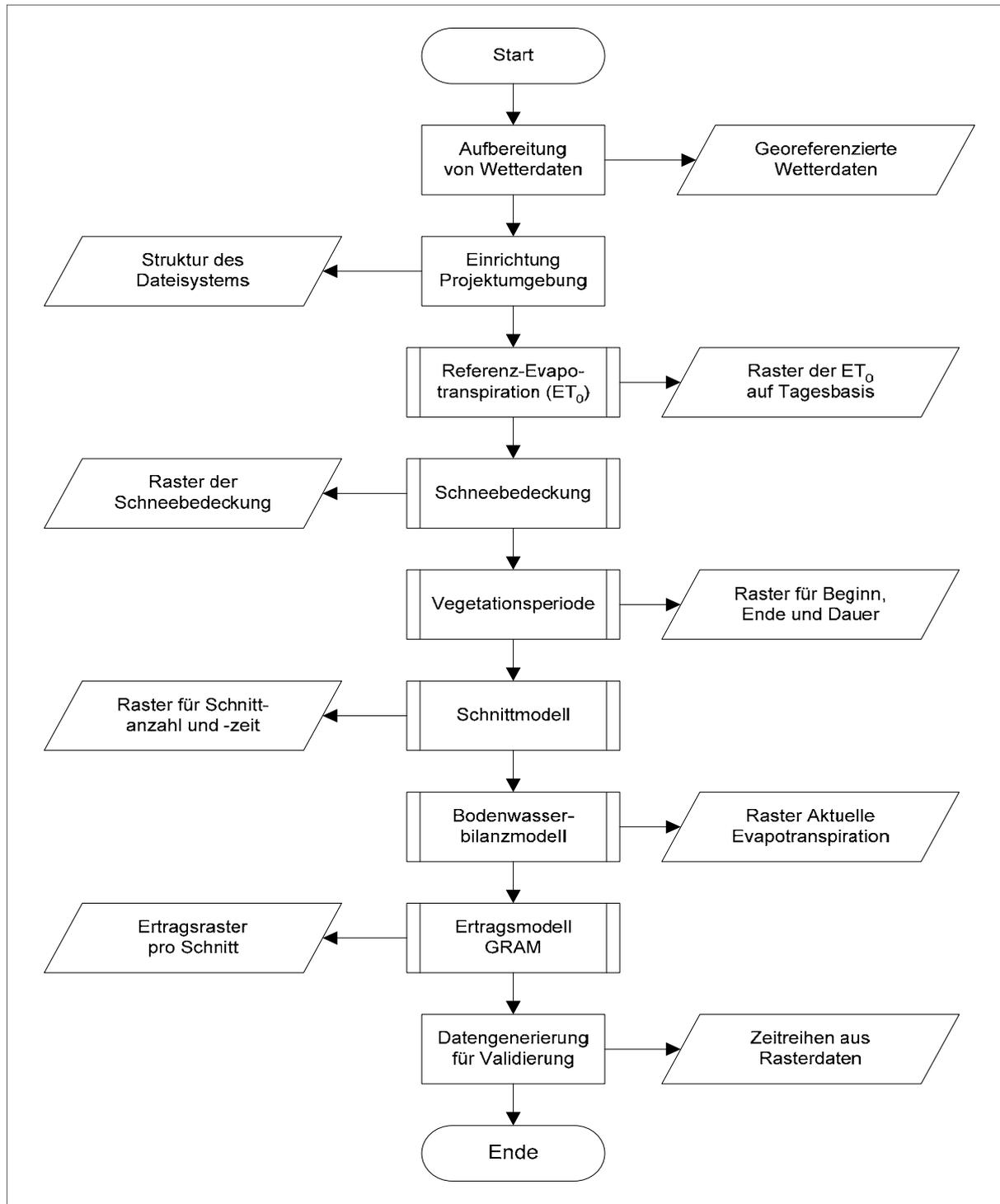


Abbildung 36: Vereinfachtes Ablaufdiagramm des Gesamtsystems

Das Ablaufdiagramm in *Abbildung 36* zeigt diese Abfolge der Bearbeitungsschritte mit den dafür notwendigen Subsystemen und den wichtigsten daraus abgeleiteten Datenbeständen. Die starke Vereinfachung der Darstellung verzichtet auf die konsequente Beschreibung sämtlicher Operationen und den Informationsflüssen von In- und Outputdaten. Im Mittelpunkt steht hier die Ordnung, in welcher die verschiedenen Implementierungen ausgeführt werden müssen, damit keine Dateninkonsistenzen auftreten. Die konkrete Vorgehensweise in den verschiedenen Bereichen wurde im Abschnitt 2 theoretisch beschrieben. Auf die jeweilige Implementierung wird hier nicht in vollem Umfang eingegangen, sondern die technische Umsetzung nur an Hand ausgewählter Beispiele gezeigt.

3.5 Datenzugriff

Wie bereits in *Abbildung 35* gezeigt, nimmt der Datenzugriff eine zentrale Rolle ein. Sämtliche Systemkomponenten müssen für die Durchführung ihrer Operationen Daten aus dem Dateisystem oder einer Datenbank lesen und zurück schreiben. Im Gegensatz zu einem klassischen objektorientierten Modell, wo Datenobjekte ausgetauscht werden, ist dies aufgrund der großen Datenmenge, welche in Objekten gehalten werden müsste, nur bedingt möglich.

Viele Operationen liefern Ergebnisse auf Tagesbasis in Form von Rasterdaten. In der Regel muss die ganze Vegetationsperiode, das sind rund 270 Tage, abgebildet werden. Für das hier gewählte Untersuchungsgebiet in einer Auflösung von 50 Meter bedeutet dies z.B. für die Evapotranspiration 50 MB pro berechneten Tag und für die Ergebnisse einer gesamten Vegetationsperiode aus allen Komponenten rund 80 GB an Speicherbedarf. Daher werden die Ergebnisse einer Komponente in Rasterdateien (ArcGIS GRID-Format) abgelegt und für die nachfolgenden Berechnungen wieder zur Verfügung gestellt. Damit auf ein einheitliches Dateisystem zugegriffen werden kann, wird mit *Utilities.ProjectEnv* eine Projektumgebung angelegt, welche in einem definierten Verzeichnis die gesamte benötigte Ordnerstruktur aufbaut. Die Ablage von Rasterdaten in Dateien hat im Gegensatz zur Speicherung in einer Datenbank enorme Performancevorteile, da für Raster-Algebra-Operationen Rasterobjekte benötigt werden, die bei Daten aus einer SDE-Datenbank erst gebaut und als temporäre Rasterdateien zur Verfügung gestellt werden müssten.

Für alle Datenzugriffsoperationen muss ein Workspace definiert werden, der die Information über den Speicherort von Geodaten kapselt. Dies kann entweder ein Verzeichnis im Dateisystem oder eine Datenbank sein. Da es sich bei Workspace um eine reguläre Klasse handelt, muss mit Hilfe der CoKlasse *WorkspaceFactory* das jeweilige Objekt für Raster-, Feature- oder Datenbankzugriffe erzeugt werden (*RasterWorkspaceFactoryClass()*, *ShapefileWorkspaceFactoryClass()*, *AccessWorkspaceFactoryClass()* und *SdeWorkspaceFactory Class()* als Implementierung der abstrakten CoKlasse *WorkspaceFactory*). Diesem *Workspace-Factory-Objekt* kann ein Pfad, der Dateiname einer Personal Geodatabase oder eine SDE-Datenbank zugeordnet werden. Unabhängig von der jeweiligen Ausprägung der *WorkspaceFactory* ist das damit erzeugte Objekt mit der Klasse *Workspace* und der dort implementierten Schnitt-

stelle *IWorkspace* kompatibel. Diese Objektverflechtung ist die Voraussetzung für die in *Abbildung 37* als Klassendiagramm in UML-Notation dargestellte Implementierungsvariante.

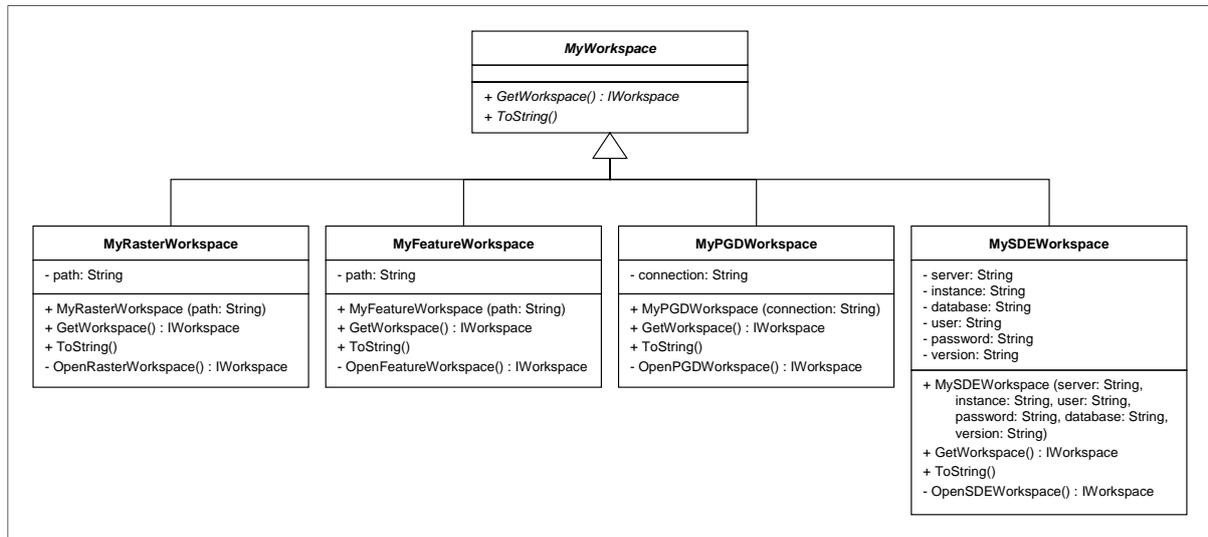


Abbildung 37: Klassendiagramm des Paketes *Workspace*

In der abstrakten Klasse *MyWorkspace* werden die Schnittstellen zu zwei Methoden festgelegt. Eine davon behandelt die String-Repräsentation des Objektes, die andere und besonders wichtige ist *GetWorkspace()* mit dem Rückgabebetyp *IWorkspace*. Diese Methode wird in den vier abgeleiteten Klassen je nach Speicherart und -ort der für eine Operation benötigten Geodaten implementiert. Sie enthält in den von *MyWorkspace* erbinden Klassen jeweils nur den Aufruf von *OpenXXXWorkspace()*, ebenfalls mit dem Rückgabewert *IWorkspace*. Hier wird der jeweilige Workspace mit Hilfe der Informationen aus der Klassenvariable (*path*, *connection*, Datenbankverbindungsinformationen), die durch den Konstruktor von außen übergeben werden, erstellt.

Welche Vorteile bringt nun diese Art der Implementierung? Wie bereits ausgeführt und auch im Diagramm ersichtlich, ist der Rückgabewert in allen Fällen *IWorkspace*. Bei der Erzeugung eines neuen Workspace-Objektes wird zunächst ein *MyWorkspace* in einer bestimmten Ausprägung angelegt, z.B. ein Raster-Workspace:

```
MyWorkspace myWS = new MyRasterWorkspace(path);
```

Die abstrakte Methodenschnittstelle *GetWorkspace()* schreibt vor, dass in allen Unterklassen von *MyWorkspace* die Implementierung mit dem Rückgabewert *IWorkspace* einheitlich erfolgen muss. Aus diesem Grund kann jede Art von Workspace immer einem *IWorkspace*-Objekt zugewiesen werden:

```
IWorkspace pWS = myWS.GetWorkspace() as IRasterWorkspace;
```

Dies ist deshalb wichtig, da die eigentliche Operation für den Datenzugriff immer ein *IWorkspace*-Objekt benötigt und unabhängig vom speziellen Datentyp der Aufruf *myWS.GetWorkspace()* in allen Fällen den jeweils benötigten Workspace liefert.

Wenn ein Workspace definiert wurde, kann auf die dort vorhandenen Geodaten zugegriffen werden. *Abbildung 38* zeigt das Klassendiagramm in UML-Notation im dafür eingerichteten Programmpaket und auch die Verknüpfung zum Paket *Workspace*.

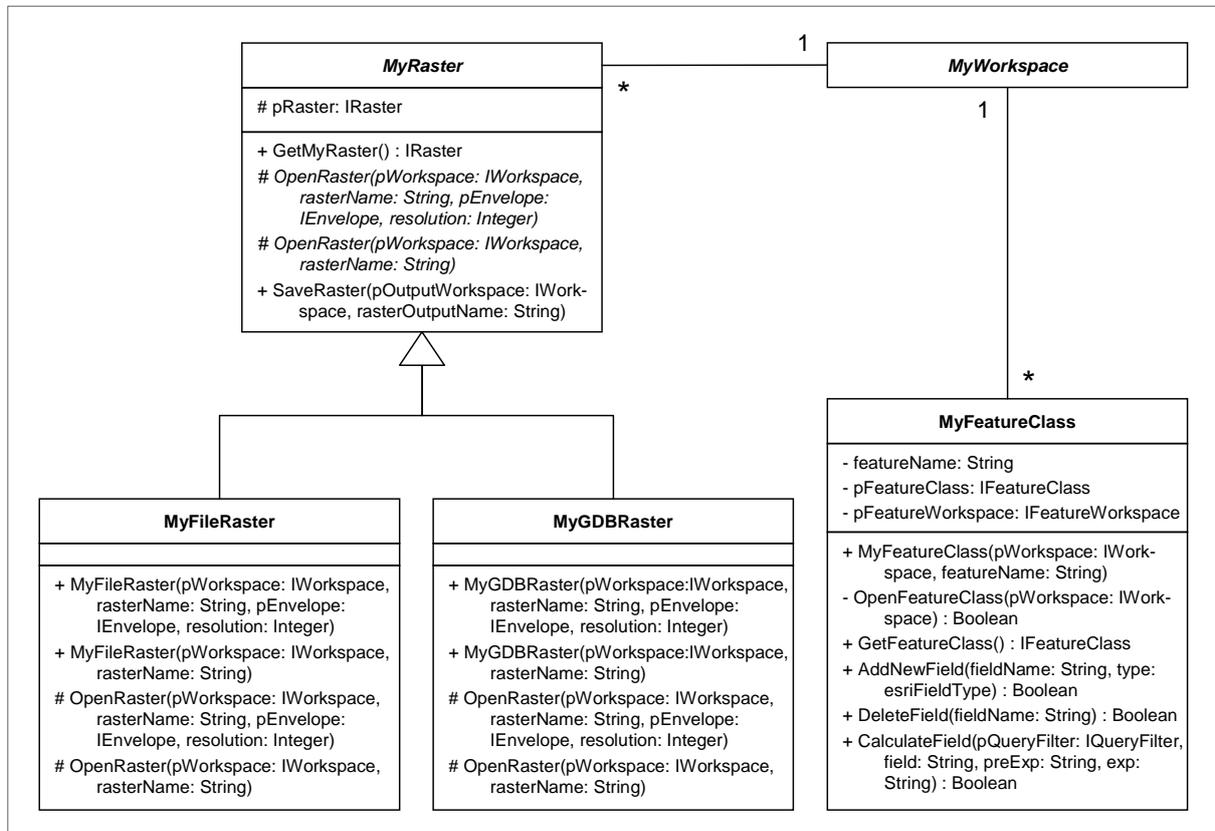


Abbildung 38: Klassendiagramm des Paketes DataAccess

Grundsätzlich wird unterschieden, ob auf Raster- oder Featuredaten zugegriffen wird. Im Gegensatz zu den Features muss beim Raster unterschieden werden, ob es sich um einen im Dateisystem oder in einer Geodatabase (Access und SDE) gespeicherten Datenbestand handelt. Aus diesem Grund wurde der Rasterzugriff über eine abstrakte Klasse definiert, welche abhängig vom Speichersystem implementiert ist.

Der Unterschied zum oben beschriebenen Paket *Workspace* besteht darin, dass der Zugriff nur über eine Methode (*GetMyRaster()*) in der abstrakten Klasse erfolgt. Initialisiert wird die Klassenvariable *pRaster* jedoch in den Unterklassen durch die Parameterübergabe in den zweifach überladenen Konstruktoren. Die ebenfalls überladenen Methoden *OpenRaster(xxx)* enthalten die Algorithmen, auf die hier nicht näher eingegangen wird. Die beiden Schnittstellen unterscheiden sich nur in der Anzahl der übergebenen Parameter – zusätzlich zum *IWorkspace* und dem Rasternamen kann auch ein *IEnvelope* und ein Auflösungs Wert übergeben werden. Diese beiden Parameter ermöglichen es dem Anwender, nicht den gesamten gespeicherten Rasterdatensatz zu laden, sondern sich auf einen im *IEnvelope* definierten Ausschnitt in der gewünschten Auflösung zu beschränken. Beispielsweise wird so das für ganz

Österreich verfügbare DHM auf das Untersuchungsgebiet eingeschränkt, ohne dass ein eigener Datenbestand zurechtgeschnitten werden muss. Der Aufruf eines Rasters ist somit mit einer Zeile Code möglich, unabhängig davon, wo der Datenbestand gespeichert ist (das Workspace-Objekt wurde aus obigem Beispiel übernommen):

```
MyRaster myR = new MyFileRaster(myWS.GetWorkspace(), "RasterName");
```

Die Klasse *MyRaster* enthält auch eine Methode zum Speichern einer Rasterdatei:

```
myR.SaveRaster(myOtherWS.GetWorkspace(), "NeuerRasterName");
```

Diese Implementierung spielt in der gesamten Arbeit eine sehr wichtige Rolle, da aus den verschiedenen Paketen zahlreiche Rasterzugriffsoperationen ausgeführt werden müssen. Das Beispiel einer vollständigen Zugriffsmethode stellt die realisierte Effizienz zusammenfassend dar:

```
public IRaster RasterAccess(string path, string rasterName) {
    MyWorkspace myWS = new MyRasterWorkspace(path);
    MyRaster myR = new MyFileRaster(myWS.GetWorkspace(), rasterName);
    return myR.GetMyRaster();
}
```

Der Zugriff auf Featuredaten entspricht in etwa den Operationen für Rasterdaten. Über den Konstruktor werden die Parameter für Workspace und Datei- bzw. Tabellennamen übergeben, die Featuredatei geöffnet und mit der Methode *GetFeatureClass()* kann auf die Datei zugegriffen werden. Der Klasse wurden noch kleine praktische Werkzeuge angefügt, die das Hinzufügen und Löschen eines Feldes ermöglichen sowie einen Feldinhalt berechnen können. Die jeweiligen Aufrufe reduzieren sich in der Anwendung wiederum auf eine einzige Codezeile, wie die nachfolgenden Beispiele verdeutlichen:

```
MyWorkspace myWS = new MyFeatureWorkspace("C:/Test/");
MyFeatureClass myFC = new MyFeatureClass(myWS.GetWorkspace(), "Test.shp");

myFC.AddNewField("NeuesFeld", esriFieldType.esriFieldTypeDouble);
myFC.CalculateField(null, "NeuesFeld", "res = 5.4*6.0", "res");
myFC.DeleteField("NeuesFeld");
```

Wie aus dem Klassendiagramm ersichtlich, kann bei *CalculateField(yyy)* eine Abfrage auf bestimmte Datensätze erfolgen (QueryFilter) – im Beispiel wird mit *null* keine Einschränkung vorgenommen.

3.6 Berechnung von Regressionen

Wie der Datenzugriff ist auch der entwickelte Algorithmus zur Berechnung von Regressionen ein Konzept, das nicht nur im Rahmen der vorliegenden Arbeit relevant, sondern vielfältig einsetzbar ist und deshalb als weiteres Beispiel hier vorgestellt wird.

Fachlicher Hintergrund für die technische Umsetzung ist unter anderem die Implementierung der Georegression (vgl. Abschnitt 2.5.2.4 bzw. 2.5.3.1) sowie die in Abschnitt 2.5.2.3 beschriebene Schätzung der Evapotranspiration mit Hilfe des Sättigungsdefizits, für die eine

quadratische Regressionsrechnung (vgl. *Abbildung 39*) erforderlich ist. Diese Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen beiden Parametern an einem Beispieldatensatz für den Mai 2000 an allen ZAMG-Messstationen, an denen die Berechnung der Evapotranspiration uneingeschränkt möglich war.

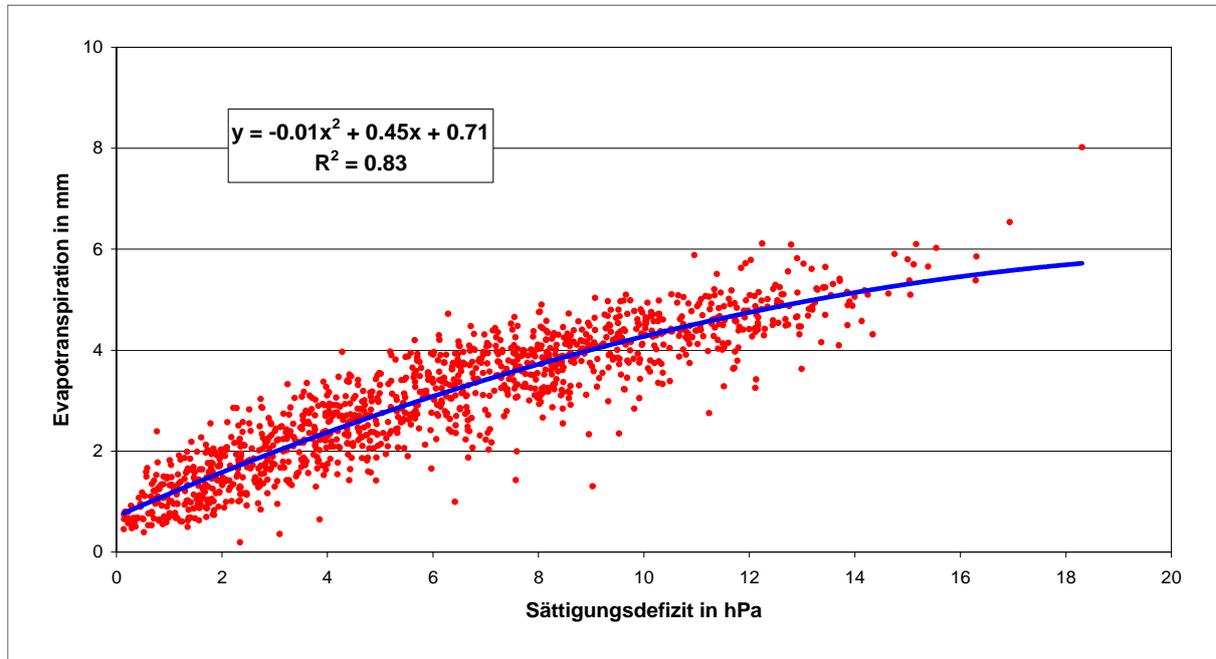


Abbildung 39: Zusammenhang von Evapotranspiration und Sättigungsdefizit an den Messstationen der ZAMG im Mai 2000

Ziel der Implementierung ist es, aus den gegenübergestellten Daten der Evapotranspiration und des Sättigungsdefizits aller Tage eines Monats die Regressionskoeffizienten a , b und c zu erhalten und damit an den Messstationen ohne Evapotranspiration diese aus dem Sättigungsdefizit zu berechnen. Dazu werden mehrere Klassen eingebunden, welche in der dargestellten Abfolge von Operationen und deren Datenflüsse zusammenarbeiten.

Zunächst wird mit Hilfe der Klasse *DataAccess.MyFeatureClass* auf die Geo-Objekte der Wetterstationen mit den Messdaten zugegriffen, die auch die berechneten Werte der Evapotranspiration und des Sättigungsdefizits enthalten. In einer verschachtelten Schleife über die zu berechnenden Jahre werden alle Monate der Vegetationsperiode (März bis Oktober) durchlaufen und für jeden Monat in einer weiteren Schleife ein Feature nach dem anderen aufgerufen (*NextFeature*) und die beiden Werte der Evapotranspiration und des Sättigungsdefizits in zwei Datenlisten eingetragen. Eine Abfrage reduziert den gesamten Datenbestand auf das aktuell zu berechnende Jahr und Monat sowie auf jene Stationen, an denen die Berechnung der Evapotranspiration vorgenommen wurde.

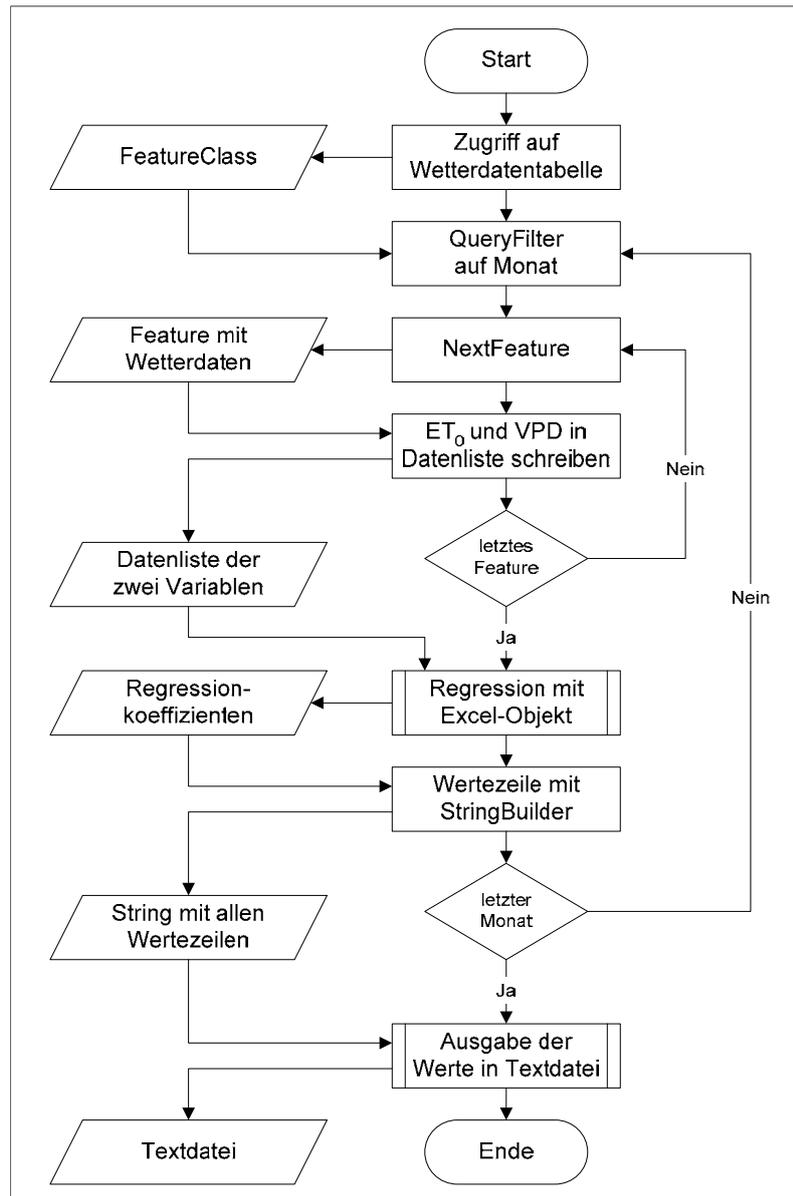


Abbildung 40: Ablaufdiagramm Regressionsberechnung

Die eigentliche Operation wird von der Methode *Square(ArrayList depVal, ArrayList indepVal)* der statischen Klasse *Utilities.Regression* ausgeführt, deren Inputparameter zwei Listen mit den Werten der abhängigen und unabhängigen Variablen sind. Der Rückgabewert dieser Methode ist ein Array, welches die drei Regressionskoeffizienten enthält. Der Algorithmus bedient sich eines Excel-Application-Objekts, d.h. es wird ein Excel-Objekt mit einem aktiven Worksheet angelegt, in das die Werte aus den übergebenen Listen in drei Spalten (unabhängige Variable, Quadrat der unabhängigen Variablen und abhängige Variable) eingetragen werden. Dazu müssen beide übergebenen Listen mit einer Schleife durchlaufen und die Werte in die Zellen des angelegten Worksheets übertragen werden.

Mit der *FormularR1C1*-Eigenschaft von Excel werden die Wertespalten über das R1C1-Bezugssystem an die Excel-Funktion *RGP* zur Berechnung der Regression übergeben, die das

Ergebnis (Regressionskoeffizienten) in drei leere Zellen schreibt. Das Auslesen dieser Zellen erfolgt mit den der *Range*-Eigenschaft übergebenen Zellkoordinaten.

Alternativ zur Verwendung des Microsoft Excel-Objektes kann auch eine andere numerische Bibliothek eingesetzt werden. Im vorliegenden Projekt wird dafür alternativ mit der IMSL C# Numerical Library 5.0 von Visual Numerics gearbeitet. Die Schnittstellen sind für beide Anwendungsalternativen gleich, die IMSL-Bibliothek bietet allerdings eine signifikante Steigerung der Performance. Für die Ausführung mittels IMSL muss allerdings eine Lizenz zur Verfügung stehen – aus diesem Grund kann im Programmcode durch eine einfache Schaltung entweder der Algorithmus mit dem Excel-Objekt oder jener mit IMSL verwendet werden.

Der Methodenaufruf findet innerhalb der „Monatsschleife“ statt, d.h. dieser Algorithmus wird für jeden Monat abgearbeitet. Anschließend wird das Rückgabearray noch in derselben Schleife weiterverarbeitet, um für den nächsten Durchlauf (Folgemonat) neue Werte aufnehmen zu können. Die Weiterverarbeitung erfolgt durch die Erstellung einer Zeichenfolge, die eine Kennung der durchgeführten Operation (in diesem Fall „ETVPD“), das berechnete Jahr und Monat und die drei Regressionskoeffizienten enthält und sieht z.B. wie folgt aus:

```
ETVPD;2006;7;-0.00629625449393758;0.356357430317295;1.15570552939961
```

Diese Zeile wird einem StringBuilder-Objekt hinzugefügt, der mit jedem neuen Monat einen neuen Eintrag der obigen Form aufnimmt. Sind alle zu berechnenden Jahre und deren Monate in der Schleife durchlaufen, wird das gesamte StringBuilder-Objekt mit allen darin enthaltenen Zeilen in eine Textdatei geschrieben. Diese Vorgehensweise ist deshalb notwendig, damit die Textdatei nicht bei jedem Schleifendurchlauf geöffnet werden muss. Der einmalige Zugriff auf die Datei am Ende des Algorithmus ist sicherer und performanter. Nun kommt eine weitere statische Klasse namens *Utilities.IOTextFile* zum Einsatz, welche den gesamten Text mit der Methode *Write(string fileName, string text)* persistent in den definierten Speicherort ablegt. Durch das Anlegen einer Textdatei ist es möglich, in einer beliebigen Phase des Programmablaufs außerhalb der aktuellen Laufzeit die Werte für einen bestimmten Monat aus dieser Datei wieder herauszulesen. Die dafür notwendige *Read*-Methode wird ebenfalls von *IOTextFile* zur Verfügung gestellt.

Der beschriebene Ablauf ist relativ komplex und es stellt sich für den Anwender die Frage, ob hier noch eine performante Umsetzung gegeben ist. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Berechnung für die Jahre 1990 bis 2006 durchgeführt. Mit immerhin 136 Monaten und 525.394 Datensätzen blieb die Laufzeit bis zur fertigen Textdatei mit 23 Minuten in einem optimalen Zeitrahmen.

Die Implementierung wurde so angelegt, dass durch stabile Schnittstellen eine umfassende Verwendung der Regressionsrechnung möglich ist. Neben einer quadratischen Regression kann auch eine lineare ausgeführt werden, die ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit für die Georegression von Evapotranspiration und Seehöhe sowie Temperatur und Seehöhe benötigt wird. Auch außerhalb der Grünlandertragmodellierung ist diese Klasse ein nützliches Werk-

zeug. Mit der Übergabe von zwei beliebigen Wertelisten ist sowohl eine lineare als auch quadratische Regression in kürzester Zeit gerechnet. Die beiden Methodenschnittstellen erlauben die Integration in verschiedenste Anwendungen:

```
public static double[] Linear(ArrayList depVal, ArrayList indepVal)
public static double[] Square(ArrayList depVal, ArrayList indepVal)
```

Der Methodenaufruf mit entsprechendem Rückgabewert als Array vom Typ *Double* für zwei bzw. drei Regressionskoeffizienten erfolgt mit:

```
double[] regParam = new double[2]
regParam = Regression.Linear(depVal, indepVal);

double[] regParam = new double[3]
regParam = Regression.Square(depVal, indepVal);
```

Für die optimale Handhabung im Gesamtsystem der vorliegenden Arbeit wurden die Objekte, welche am Wertelistenbau für die Regressionsrechnung, der Regressionsrechnung selbst sowie der Ausgabe in Form einer Textdatei beteiligt sind, so miteinander verflochten, dass durch den Aufruf einer einzigen Methode und der Übergabe von entsprechenden Inputparametern alle Fälle der linearen und quadratischen Regressionsrechnung, inklusive deren Ergebnisausgabe in Textdateien, ausgeführt werden können.

3.7 Beispielanwendung für Raster-Algebra

Das primäre Geodatenmodell in den verschiedenen Systemkomponenten zur Bestimmung des Grünlandertrages ist das Rasterdatenmodell. Damit können einerseits kontinuierliche Oberflächen lückenlos mit Werten beschrieben werden, andererseits ist die Verarbeitung im Vergleich zu Vektordaten relativ einfach mit Raster-Algebra-Funktionen umzusetzen. Diese Methode spielt in der entwickelten Anwendung eine zentrale Rolle und wird deshalb im Rahmen eines etwas umfangreicheren Beispiels vorgestellt.

Das für Raster-Algebra benötigte Objekt aus der Klassenbibliothek von ArcObjects ist *IRasterModel*. Diesem Objekt kann mit der Eigenschaft *Script* eine Zeichenfolge mitgegeben werden, welche die einzelnen Operationen enthält. Im praktischen Einsatz sieht das wie folgt aus:

```
IRasterModel pRasModel = new RasterModelClass();
pRasModel.BindRaster(raster1, "raster1");
pRasModel.BindRaster(raster2, "raster2");
pRasModel.Script = "[result] = [raster1] + [raster2]";
pRasModel.Execute();
IRaster result = pRasModel.get_BoundRaster("result");
pRasModel.UnbindSymbol("result");
pRasModel.UnbindSymbol("raster1");
pRasModel.UnbindSymbol("raster2");
```

Die beiden Rasterdatensätze *raster1* und *raster2* werden für die Verwendung im Script durch *BindRaster* vorbereitet, im *Script* Rasterzelle für Rasterzelle addiert, die Raster-Algebra-

Funktion ausgeführt und dem Raster *result* zugewiesen. Anschließend wird die Zuordnung der Variablen zu den jeweiligen Rasterdatensätzen wieder freigegeben. Dieser Aufbau ist die Voraussetzung für das Verständnis des hier gezeigten Beispiels, da nur auf den Inhalt von *Script* eingegangen wird.

Schnittanzahl als Grundlage für den Pflanzenfaktor

Den fachlichen Hintergrund bildet die Berechnung des Pflanzenfaktors K_c (vgl. Abschnitt 2.5.6.1). Der Pflanzenfaktor beschreibt den Biomassezuwachs im Laufe der Vegetationsperiode unter Berücksichtigung der Schnittnutzung. Im Wertebereich von 0.4 bis 1.2 wird die Entwicklung des Grünlandbestandes vom Vegetationsbeginn bzw. nach der Ernte bis zum Nutzungszeitpunkt näherungsweise und vereinfacht linear beschrieben. Er wird täglich und flächendeckend für das gesamte Untersuchungsgebiet berechnet und resultiert aus einer umfangreichen Kombination verschiedenster Rasterdaten. Die Einflussfaktoren für den Verlauf des Pflanzenfaktors sind in erster Linie die Vegetationszeit (Beginn und Ende) sowie die Häufigkeit und der Zeitpunkt von Schnittnutzungen. In *Abbildung 19* wird der Verlauf des Pflanzenfaktors am Beispiel des Jahres 2003 für die Versuchsstation Kirchberg/Walde mit einer Dreischnittnutzung gezeigt. Der Schnittzeitpunkt entspricht der relativen Verteilung der Aufwuchsdauer für die einzelnen Nutzungen (vgl. Abschnitt 2.5.5). Das Pflanzenwachstum verläuft naturgemäß nicht linear und wird von vielen, vor allem wetterbedingten Faktoren beeinflusst. Eine Annäherung an die Realität basiert auf dem Modell der Vegetationsperiode (siehe Abschnitt 2.5.3), welches im Schnittmodell (siehe Abschnitt 2.5.5) weiterverarbeitet wird. Als Beispiel wird eine Rasteroberfläche der Schnittanzahl in *Abbildung 41* gezeigt.

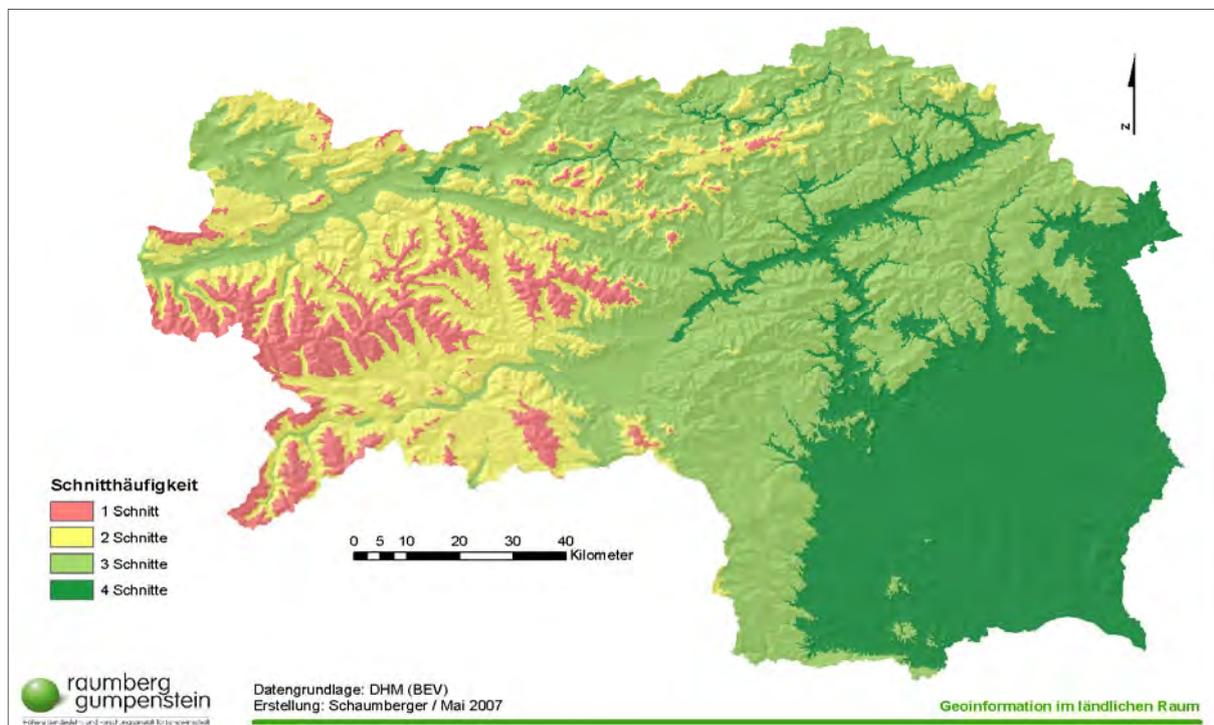


Abbildung 41: Räumliche Verteilung der theoretischen Nutzungshäufigkeit für das Jahr 2006

Berechnung der Raster für die Aufwuchsdauer

Die Berechnung der Dauer in Tagen für die einzelnen Aufwüchse ist der Einstiegspunkt für die Präsentation der implementierten Raster-Algebra-Operationen. Aus dem Schnittmodell und den dafür gerechneten Schnittzeitpunkten kann die Aufwuchsdauer abgeleitet werden, welche die Steigung der Kurve des Pflanzenfaktors bestimmt. Als Beispiel wird in *Abbildung 42* die Dauer des 1. Aufwuchses dargestellt.

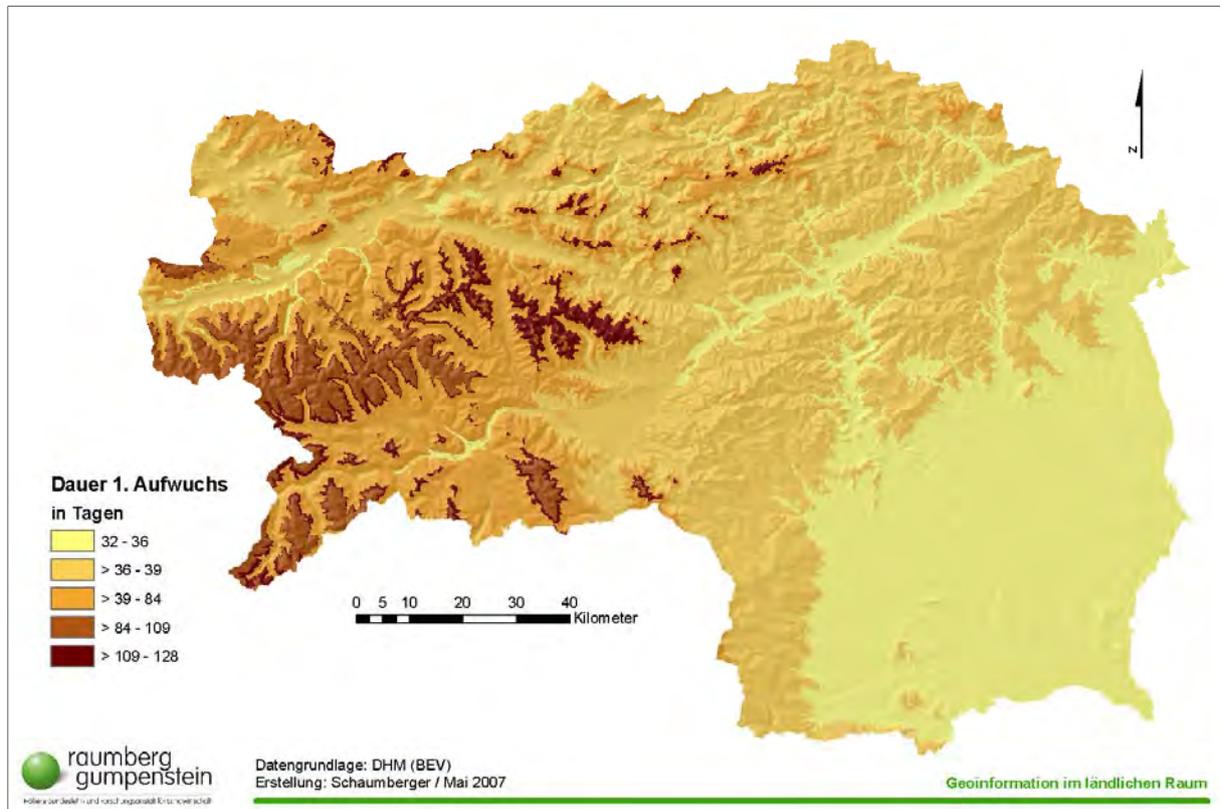


Abbildung 42: Theoretische Wuchsdauer des 1. Aufwuchses 2006 nach modelliertem Schnittzeitpunkt

Inputdaten sind ein Raster des Vegetationsbeginns (*vbeg*), der Vegetationsdauer (*vdur*) und der räumlichen Verteilung der Schnittanzahl (*nrCuts*). Weiters werden die in *Tabelle 1* vorgestellten Verhältniswerte benötigt, um für jede Rasterzelle die Anzahl an Tagen der Aufwuchsdauer bestimmen zu können.

```
[vtime] = [vdur] - 21
// Die Vegetationsdauer wird mit dem Offset von 21 Tagen auf die
// Nutzungsdauer reduziert.

[masklreg] = [nrCuts] == 1
// Der Raster für die Schnittanzahl wird für das Einschnittregime
// maskiert. Alle Rasterzellen im Gebiet mit Einschnittnutzung
// enthalten den Wert 1, die übrigen den Wert 0.

[time1reglcutRaw] = [vtime] * 1.0
// Die Dauer des 1. Aufwuchses eines Einschnittregimes erstreckt sich
// über die gesamte Nutzungsdauer.
```

```

[time1reg1cut] = int([time1reg1cutRaw] * [mask1reg])
// Das Ergebnis wird auf das Gebiet der Einschnittnutzung beschränkt und
// in einen ganzzahligen Wert umgewandelt.

// Die weiteren Schnitte werden nach dem selben Schema bearbeitet.
[mask2reg] = [nrCuts] == 2
[time2reg1cutRaw] = [vtime] * 0.55
[time2reg1cut] = int([time2reg1cutRaw] * [mask2reg])
[time2reg2cutRaw] = [vtime] * 0.45
[time2reg2cut] = int([time2reg2cutRaw] * [mask2reg])

[mask3reg] = [nrCuts] == 3
[time3reg1cutRaw] = [vtime] * 0.22
[time3reg1cut] = int([time3reg1cutRaw] * [mask3reg])
[time3reg2cutRaw] = [vtime] * 0.30
[time3reg2cut] = int([time3reg2cutRaw] * [mask3reg])
[time3reg3cutRaw] = [vtime] * 0.48
[time3reg3cut] = int([time3reg3cutRaw] * [mask3reg])

[mask4reg] = [nrCuts] == 4
[time4reg1cutRaw] = [vtime] * 0.18
[time4reg1cut] = int([time4reg1cutRaw] * [mask4reg])
[time4reg2cutRaw] = [vtime] * 0.20
[time4reg2cut] = int([time4reg2cutRaw] * [mask4reg])
[time4reg3cutRaw] = [vtime] * 0.28
[time4reg3cut] = int([time4reg3cutRaw] * [mask4reg])
[time4reg4cutRaw] = [vtime] * 0.34
[time4reg4cut] = int([time4reg4cutRaw] * [mask4reg])

[dur1] = [time1reg1cut] + [time2reg1cut] + [time3reg1cut] + [time4reg1cut]
[dur2] = [time2reg2cut] + [time3reg2cut] + [time4reg2cut]
[dur3] = [time3reg3cut] + [time4reg3cut]
[dur4] = [time4reg4cut]

```

Für die Ergebnistraster (*durX*) werden die einzelnen Schnittbereiche kombiniert. Der erste Aufwuchs ist beispielsweise für alle Regime relevant, wohingegen der vierte Aufwuchs einer Vierschnittnutzung nur dort möglich ist, wo dies der Ausweisung im Schnittmodell entspricht. Die Addition der Raster führt zu einer flächendeckenden Beschreibung der Aufwuchszeit, da die Einzlraster nur dort Werte enthalten, wo entsprechend maskiert wurde und somit keine Überlappungsbereiche vorhanden sind.

Berechnung der Raster für die tägliche Zunahme des Pflanzenfaktors

Der nächste Schritt ist die Berechnung der täglichen Zunahme des Pflanzenfaktors innerhalb eines Aufwuchses. Inputdaten sind die Ergebnistraster aus der obigen Raster-Algebra-Operation.

```

[kcbDay1Growth] = 0.8 / [dur1]
// Der tägliche Anteil des Pflanzenfaktors wird aus dem Range
// (0.4 bis 1.2) und der entsprechenden Aufwuchsdauer gerechnet.

[zeroOf2Growth] = [dur2] == 0
// Jenes Gebiet, in dem nur eine Einschnittnutzung möglich ist,
// wird im Raster dur2 mit 0 ausgewiesen. Mit dieser Operation
// entsteht ein Raster, welche die 0-Zellen mit dem Wert 1 füllt und
// alle anderen mit dem Wert 0.

```

```

[kcb2] = 0.8 / ([dur2] + [zeroOf2Growth])
// Der Grund für obige Maßnahme wird durch diese Zeile verständlich.
// Es muss dafür gesorgt werden, dass in den Gebieten, die
// ursprünglich 0-Werte aufwiesen, keine Division durch 0 auftritt.

[kcb2Corr] = [kcb2] < 0.1
// Alle jene Bereiche, welche in obiger Operation den Wert 1
// enthielten, sind nur Einschnittflächen und weisen jetzt einen
// Pflanzenfaktor auf, der viel höher ist, als jener, der für
// die gültigen Zellen des Rasters dur2 entsteht. Eine entsprechende
// Maskierung sorgt dafür, dass gültige Zellen den Wert 1 enthalten
// (durch die Bedingung kcb2 < 0.1) und alle anderen den Wert 0.

[kcbDay2Growth] = [kcb2] * [kcb2Corr]
// Mit dem Korrekturraster, der alle gültigen Bereiche mit 1 kenn-
// zeichnet, wird das Ergebnistraster für den 2. Aufwuchs entsprechend
// eingeschränkt.

// Die weiteren Schritte werden nach dem selben Schema bearbeitet.
[zeroOf3Growth] = [dur3] == 0
[kcb3] = 0.35 / ([dur3] + [zeroOf3Growth])
[kcb3Corr] = [kcb3] < 0.1
[kcbDay3Growth] = [kcb3] * [kcb3Corr]

[zeroOf4Growth] = [dur4] == 0
[kcb4] = 0.35 / ([dur4] + [zeroOf4Growth])
[kcb4Corr] = [kcb4] < 0.1
[kcbDay4Growth] = [kcb4] * [kcb4Corr]

[kcbDayLastGrowth] = [kcbDay1Growth] * 0.7
// Der tägliche Pflanzenfaktor nach dem letzten Schnitt wird mit
// 70 % des Faktors aus dem 1. Aufwuchs gewichtet.

```

Die entstandenen Raster beinhalten in den Zellen für den gültigen räumlichen Bereich eines Aufwuchses den Wert, der die tägliche Zunahme des Pflanzenfaktors enthält.

Berechnung der Pflanzenfaktorraster

Ausgehend vom Startwert bei 0.4 wird bis zum Erreichen des Schnitzeitpunktes bei dem Faktorwert von 1.2 täglich akkumuliert. Die nachfolgende Raster-Algebra-Operation stellt diese Vorgehensweise dar. Inputdaten sind Vegetationsbeginn (*vegBeg*), Vegetationsende (*vegEnd*), Schnittanzahl (*nrCuts*), die vier Raster mit der Dauer eines jeden Aufwuchses (*dur1*, *dur2*, *dur3*, *dur4*) und die oben generierten täglichen Zunahmen (*kcbDay1Growth*, *kcbDay2Growth*, *kcbDay3Growth*, *kcbDay4Growth*, *kcbDayLastGrowth*). Um für jeden Tag einen Pflanzenfaktorraster zu erhalten, muss die gesamte Operation in einer Schleife über jeden Tag der Vegetationsperiode laufen. Der aktuelle Tag eines Schleifendurchlaufs (*DayOfYear*) wird ebenfalls als Inputparameter in die Operation integriert.

```

[nrOfDay] = " + DayOfYear + " - [vegBeg]
// Der Tag innerhalb der aktuellen Vegetationsperiode wird ermittelt, indem
// vom fortlaufenden Tag des Jahres jener Tag des Jahres subtrahiert wird,
// an dem der Vegetationsbeginn festgestellt wurde.

[isDayInVegPeriod] = [nrOfDay] >= 0
// Nur jene Rasterzellen werden berücksichtigt, an denen der Tag in der

```

```

// Vegetationsperiode liegt. Frühere Zeitpunkte ergeben aus der vorangehenden
// Operation negative Werte.

[nrOfDayFromVegBeg] = [nrOfDay] * [isDayInVegPeriod]

// Dieser Raster enthält nur in jenen Rasterzellen Werte > 0 (Anzahl der
// Tage in der Vegetationsperiode), für welche die Vegetationsperiode bereits
// begonnen hat.

[isDayIn1Growth] = [nrOfDayFromVegBeg] <= [dur1]

// Alle Rasterzellen, deren Tag innerhalb des 1. Aufwuchses liegt, werden
// mit 1 belegt, die übrigen mit 0.

[kcbFor1Growth] = ([kcbDay1Growth] * [nrOfDayFromVegBeg]) * [isDayIn1Growth]

// Die in der Rasterzelle gespeicherte Anzahl an Tagen seit Vegetationsbeginn
// wird mit der täglichen Zunahme des Pflanzenfaktors multipliziert und auf
// jene Gebiete eingeschränkt, deren Tag sich im 1. Aufwuchs befindet.

[isAreaFor2Cut] = [nrCuts] > 1

// Das Gebiet mit mehr als nur einer Nutzung wird maskiert.

[isDayIn2Growth] = [nrOfDayFromVegBeg] > [dur1] & [nrOfDayFromVegBeg] <=
    ([dur1] + [dur2])

// Prüfung, ob sich der in der Schleife aktuell durchlaufene Tag in der Zeit
// für den 2. Aufwuchs befindet.

[kcbFor2Growth] = ([kcbDay2Growth] * ([nrOfDayFromVegBeg] - [dur1])) *
    [isDayIn2Growth] * [isAreaFor2Cut]

// Der Tag für den Beginn der Akkumulation befindet sich nach dem 1. Schnitt.
// Multipliziert wird der Tagesfaktorwert mit der Anzahl der Tage vom Beginn
// des 2. Aufwuchses.

// Die weiteren Schnitte werden nach dem selben Schema bearbeitet.
[isAreaFor3Cut] = [nrCuts] > 2
[isDayIn3Growth] = [nrOfDayFromVegBeg] > ([dur1] + [dur2]) &
    [nrOfDayFromVegBeg] <= ([dur1] + [dur2] + [dur3])
[kcbFor3Growth] = ([kcbDay3Growth] * ([nrOfDayFromVegBeg] - ([dur1] +
    [dur2]))) * [isDayIn3Growth] * [isAreaFor3Cut]

[isAreaFor4Cut] = [nrCuts] > 3
[isDayIn4Growth] = [nrOfDayFromVegBeg] > ([dur1] + [dur2] + [dur3]) &
    [nrOfDayFromVegBeg] <= ([dur1] + [dur2] + [dur3] + [dur4])
[kcbFor4Growth] = ([kcbDay4Growth] * ([nrOfDayFromVegBeg] - ([dur1] + [dur2] +
    [dur3]))) * [isDayIn4Growth] * [isAreaFor4Cut]

[isDayOfLastGrowth] = [nrOfDayFromVegBeg] > ([dur1] + [dur2] + [dur3] + [dur4])
[kcbForLastGrowth] = ([kcbDayLastGrowth] * ([nrOfDayFromVegBeg] - ([dur1] +
    [dur2] + [dur3] + [dur4]))) * [isDayOfLastGrowth]

[isDayBeforeVegEnd] = [vegEnd] >= " + DayOfYear

// Am Ende der Vegetationsperiode werden alle Bereiche mit Tagen nach dem
// Vegetationsende mit 0-Werten belegt.

[result] = (([kcbFor1Growth] + [kcbFor2Growth] + [kcbFor3Growth] +
    [kcbFor4Growth] + [kcbForLastGrowth]) * [isDayBeforeVegEnd]) + 0.8

```

Mit der Zusammenfassung aller Einzelergebnisse für die jeweiligen Aufwüchse entsteht ein flächendeckender Raster (*result*), dessen Wertebereich von 0.4 bis 1.2 reicht. Der Anwender muss lediglich im Kopf der Schleife den Zeitraum definieren, für den er die Berechnungen

durchführen möchte. Die Ergebnistraster werden nach der Ausführung der beschriebenen Algebra-Operationen in Rasterdaten auf Tagesbasis abgelegt. Als Beispiel für die Verwendung von Raster-Algebra zeigt diese Anwendung sehr gut die vielfältigen Möglichkeiten, die sich mit diesem Datenmodell ergeben.

3.8 Bildung von Zeitreihen zur Validierung

Die meisten implementierten Modelle liefern Ergebnisse in Form von Rasterdaten auf Tagesbasis. Pro Vegetationsperiode entstehen rund 270 kontinuierliche Oberflächen, die hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs nur schwer zu untersuchen sind. Eine Möglichkeit besteht darin, mehrere Raster hintereinander zu visualisieren. Dies ist aufwendig und liefert zudem keine numerischen Werte als exakte Anhaltspunkte für die Plausibilitätsprüfung des Wertebereichs und zeitlichen Verlaufs.

Beschränkt sich die Analyse auf ausgewählte Punkte, so kann exemplarisch an diesen Positionen der Wert eines jeden Rasterdatensatzes abgefragt und damit eine Zeitreihe gebildet werden. Diese Vorgehensweise ist für die Implementierung unerlässlich, insbesondere, wenn es sich um komplexe Operationen handelt. Die im Abschnitt 3.7 vorgestellten Rasteroperationen könnten beispielsweise ohne die ständige Überprüfung durch Zeitreihenbildung nur schwer entwickelt werden, da eine Fehlersuche im Code ohne Kenntnis über die Konsequenzen eines Fehlers nahezu unmöglich ist.

Nicht nur zur Entwicklung eines einwandfreien Programmcodes ist dieses Instrument unverzichtbar, sondern auch zur Interpretation von Ergebnissen einer Berechnung bzw. zum Vergleich verschiedener Ergebnisse, die Abhängigkeiten untereinander aufweisen und gegenübergestellt werden müssen. Die Zeitreihenbildung aus den berechneten Rasterdatensätzen stellt somit ein zentrales Werkzeug dar, das für Entwicklung, Validierung und Interpretation der implementierten Modelle außerordentlich wichtig ist.

Die technische Umsetzung ist relativ einfach und wird in *Abbildung 43* schematisch dargestellt. Nach der Auswahl des zu untersuchenden Zeitraums (in der Regel wird das die gesamte Vegetationsperiode sein) muss in einer Schleife nach und nach jeder Raster des Untersuchungszeitraums geöffnet werden. An den ausgewählten Positionen, welche in einer FeatureClass als Punkte definiert sind, wird der Rasterzellenwert Position für Position abgefragt und als Zeichenfolge gespeichert. Nach Abschluss aller Schleifendurchläufe muss die Zeichenfolge persistent in Form einer Textdatei abgelegt werden und ist so für Statistik- bzw. Tabellenkalkulationsprogramme verfügbar. Für den Zugriff auf die Punkte der ausgewählten Standorte wird ein *DataAccess.MyFeatureClass*-Objekt verwendet, der Rasterzugriff erfolgt nach Einrichtung von *Workspace.MyWorkspace* über *DataAccess.MyRaster*. Für die Werteabfrage in den Rasterzellen muss die XY-Position des im Schleifendurchlauf aktuellen Punkte-Feature ausgelesen werden. Diese Information wird einem *IRasterIdentifyObj*-Objekt übergeben, mit dessen Hilfe der Rasterzellenwert festgestellt und zusammen mit Angaben über das Punkte-Feature und dem Datum in eine Zeichenfolge gespeichert werden kann. Die Textaus-

gabe erfolgt, wie bereits im Abschnitt 0 beschrieben, über ein *StringBuilder*-Objekt innerhalb der Schleife und im Anschluss an die Schleifendurchläufe durch Ausgabe einer Textdatei mit einem *Utilities.IOTextFile*-Objekt. Das Ergebnis dieser Implementierung kann sofort mit einem Tabellenkalkulationsprogramm, wie z.B. bei den *Abbildungen 25 bis 28*, umgesetzt werden.

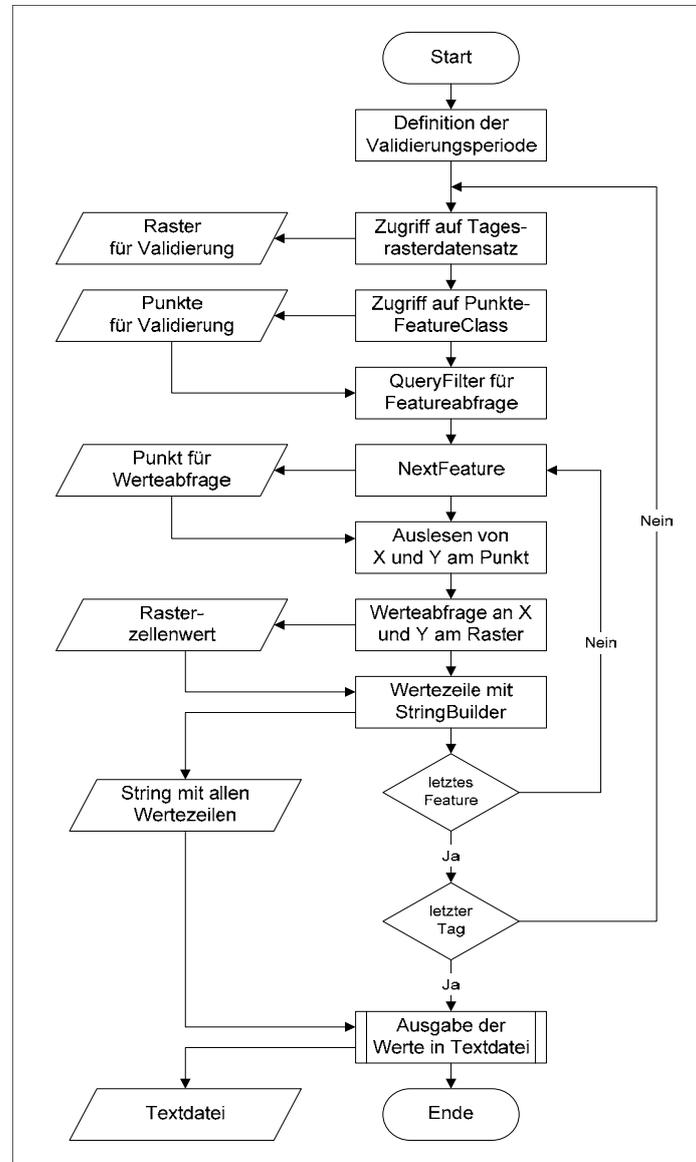


Abbildung 43: Ablaufdiagramm der Validierung von Rasterdaten

Mit diesem Implementierungsbeispiel wird die etwas ausführlichere Auseinandersetzung mit der technischen Umsetzung abgeschlossen. Eine vollständige Interpretation des Programmcodes würde den Rahmen dieser Arbeit bei weitem sprengen. Es wurden deshalb vier Beispiele ausgewählt, die zum einen im Gesamtsystem einen wichtigen Platz einnehmen und zum anderen auch über das Grünlandertragsmodell hinaus in unterschiedlichen Anwendungen einsetzbar sind und deshalb von allgemeinem Interesse sein dürften.

3.9 Hinweise zur Implementierung der räumlichen Modelle

Im Gegensatz zu standortbezogenen Berechnungen ist der Ressourcenbedarf für eine räumliche Umsetzung mit GIS unvergleichlich höher. Vor allem dann, wenn die Zwischenergebnisse auf Tagesbasis über lange Zeiträume 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, zunächst das Bundesland Steiermark und in weiterer Folge das gesamte österreichische Bundesgebiet, mit einer Bodenauflösung von 250 Metern analysiert, d.h. jeder Rechenschritt manipuliert 434.016 (Steiermark) bzw. 2.876.800 Werte (Österreich) – das ist die Anzahl an Rasterzellen für eine einzelne kontinuierliche Rasteroberfläche. Für die Anwendung auf ein Jahr bzw. eine Vegetationsperiode, die im Zeitraum von 1. März bis 31. Oktober gerechnet wird, fallen damit 245 Tage an.

Die eingesetzten Modelle basieren auf einer täglichen Berechnung von Inputdaten bzw. der Weiterverarbeitung von Zwischenergebnissen auf Tagesbasis. Die Auswahl und Größe des Untersuchungsgebietes spielt daher neben der gewählten Zielauflösung im Laufzeitverhalten der verwendeten Algorithmen eine entscheidende Rolle. Eine effiziente Applikation der Modelle befindet sich somit im Spannungsfeld zwischen Performance und gewählter Auflösung.

Im Rahmen des hier bearbeiteten Projektes konnten umfangreiche Erfahrungen mit dem Umgang großer Datenmengen auf Basis des Rastermodells gesammelt werden. Es gibt daher einige Punkte, deren Beachtung entscheidende Vorteile hinsichtlich Rechenzeiten bringen:

1. Bei der Implementierung ist darauf zu achten, dass möglichst viele Zwischenergebnisse, welche unmittelbar weiterverarbeitet werden, nur temporär in den Arbeitsspeicher gelegt werden. Dies erhöht die Performance signifikant, da Speicher- und Lesezugriffe auf die Festplatte weitgehend vermieden werden. Bei der Strukturierung von Funktionen und deren Aufruf innerhalb von Schleifen ist diesem Umstand Rechnung zu tragen.
2. Zur Speicherung von Ergebnissen auf Tagesbasis wurde eine ArcGIS File Geodatabase verwendet. Die Zugriffsgeschwindigkeit ist im Vergleich zum GRID-Format deutlich höher und im Vergleich zur Personal Geodatabase speichermäßig nicht limitiert.
3. Einige Algorithmen müssen Zwischenergebnisse des Vortages einbeziehen – dies ist zum Beispiel bei der Berechnung des Wasserstresses notwendig, der kumulativ über die Dauer einer Vegetationsperiode gerechnet wird. Die Manipulation großer Datenmengen führt des Öfteren zu systembedingten Programmabstürzen (z.B. durch Speicherüberlauf). Damit kumulative Rechnungen nicht immer wieder am ersten Tag der Berechnungsperiode beginnen müssen, sind die Algorithmen so zu implementieren, dass jederzeit ein Einstieg zu einem beliebigen Datum innerhalb der Vegetationsperiode möglich ist.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Räumliches Modell der Referenz-Evapotranspiration

Die Gleichung nach FAO-Penman-Monteith ist als physikalisches Modell für eine tägliche Berechnung der Referenz-Evapotranspiration am besten geeignet (Allen *et al.*, 1998), aber auch hinsichtlich der Anforderungen an die notwendigen Parameter sehr anspruchsvoll. Insbesondere die von der Globalstrahlung abgeleitete Strahlungsbilanz ist ein kritischer Faktor, da die im Abschnitt 2.5.2.2 beschriebene Berechnung der Strahlungsbilanz ohne Globalstrahlung nicht möglich ist. Für eine räumliche Interpolation in hoher Qualität sind möglichst viele Stützpunkte notwendig und deshalb kann auf die vielen Stationen ohne Globalstrahlungsmessung (vgl. *Abbildung 11*) nicht verzichtet werden. Aus diesem Grund werden mehrere im Abschnitt 2.5.2 dargestellte Methoden eingesetzt, um Datenlücken durch geeignete Schätzungen zu schließen. In *Abbildung 44* wird das Berechnungsschema unter Berücksichtigung dieser Datenlücken und der angewandten Schätzmethoden bis hin zum räumlichen Modell abgebildet.

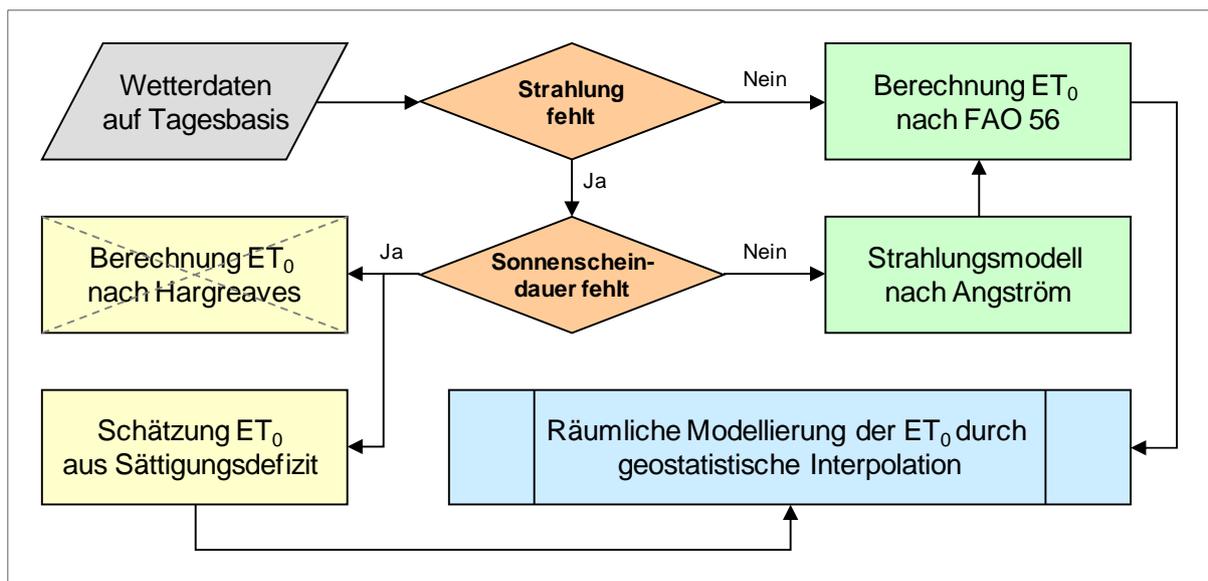


Abbildung 44: Ablaufschema zur Berechnung und Schätzung der Referenz-Evapotranspiration

An allen Stationen mit verfügbaren Globalstrahlungswerten kann die Referenz-Evapotranspiration direkt mit Hilfe der FAO-Penman-Monteith-Gleichung berechnet werden. Fehlt die Globalstrahlung, wird aber die Sonnenscheindauer gemessen, kann mit Hilfe des Strahlungsmodells nach Angström (vgl. Abschnitt 2.5.2.2) die Globalstrahlung geschätzt und damit ebenfalls die FAO-Penman-Monteith-Gleichung angewendet werden.

Zur Evaluierung des Angström-Modells wurden an Globalstrahlungsstationen die Messdaten den berechneten Modelldaten gegenübergestellt. In *Abbildung 45* ist die statistische Auswertung dargestellt, welche alle verfügbaren Stationen, aber auch eine Beispielstation im Flachland und im

Bergland einschließt. Die Berglandstation (Gumpenstein) weist im Vergleich zum Flachland (Leibnitz) eine geringfügige Unterschätzung durch das Modell auf, da die in der Angström-Formel verwendete astronomisch mögliche Sonnenscheindauer (vgl. Gleichung 2.5.2-13) keine topographischen Abschattungen berücksichtigt. Dieses Verhalten einer systematischen Unterschätzung ist ebenso im gesamten Evaluierungsdatenbestand zu beobachten, da die Sonnenscheindauer an den meisten Stationen durch die Topographie beeinflusst wird.

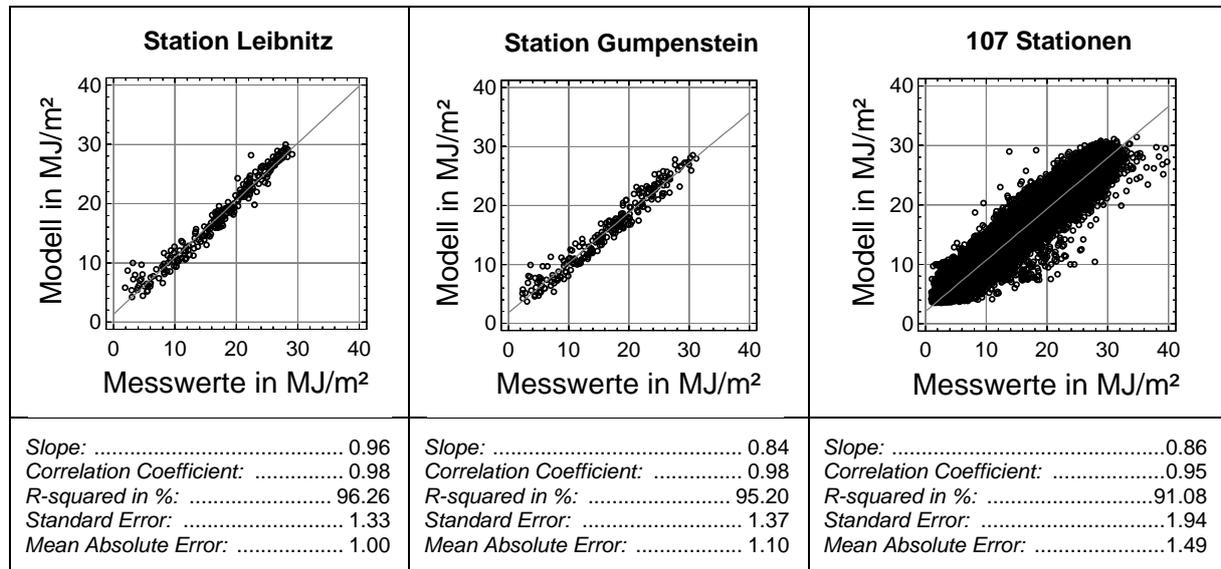


Abbildung 45: Korrelation von modellierter und gemessener Globalstrahlung an einer Station im Flachland (Leibnitz), im Berggebiet (Gumpenstein) und an allen Stationen mit verfügbaren Globalstrahlungsdaten (25.528 Datensätze)

An allen Stationen ohne Globalstrahlungs- und Sonnenscheindaten muss nach einer alternativen Schätzmethode gesucht werden, um sie als Interpolationsstützen für das räumliche Modell der Referenz-Evapotranspiration zu erhalten. Dem Beispiel von Vicente-Serrano *et al.* (2007) folgend wurde die Gleichung nach Hargreaves (1985) verwendet und an den Stationen mit verfügbarer Globalstrahlung bzw. Sonnenscheindauer den Berechnungsergebnissen nach FAO-Penman-Monteith gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind wieder für eine Bergland- und Flachlandstation sowie für sämtliche Stationen in *Abbildung 46* dargestellt. Die Gleichung nach Hargreaves (vgl. Abschnitt 2.5.2.3) ist wesentlich einfacher als jene nach FAO-Penman-Monteith, es werden lediglich mittlere Tagestemperatur, Tagesminimum- und Tagesmaximumtemperatur benötigt. Die weiteren benötigte extraterrestrische Strahlung kann für jeden gewünschten Tag (vgl. Abschnitt 2.5.2.2) ohne weitere meteorologische Parameter berechnet werden.

Zwischen Berg- und Flachland zeigen sich keine signifikanten Unterschiede, allerdings ist der Gesamtzusammenhang von 78,7 % nicht so stark, um diese Methode zur Schließung von Datenlücken in fast 40 % aller Interpolationsstützstellen ohne weitere Methodenprüfung einzusetzen. Aus diesem Grund wurde der physikalisch basierte Zusammenhang zwischen Sättigungsdefizit und Evapotranspiration untersucht und evaluiert. Aus den Werten eines Monats kann ein quadratischer Zusammenhang zwischen Sättigungsdefizit und Referenz-Evapotranspiration abgeleitet

werden, welcher zur direkten Schätzung der täglichen Referenz-Evapotranspiration im jeweiligen Monat herangezogen wird.

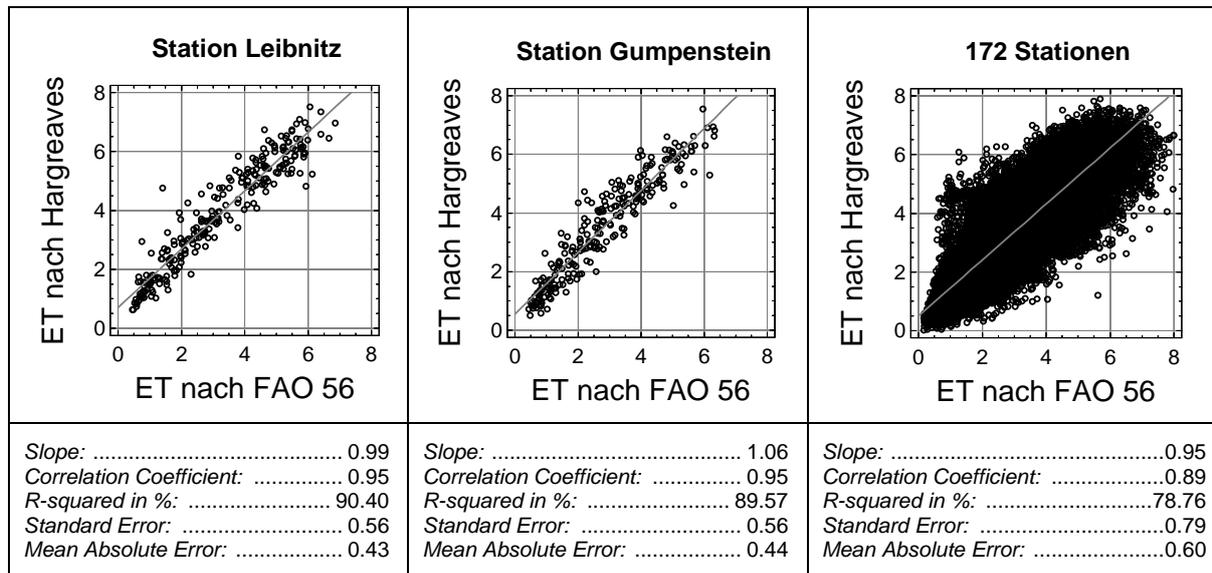


Abbildung 46: Zusammenhang der Referenz-Evapotranspiration zwischen den Modellergebnissen nach Hargreaves und nach FAO-Penman-Monteith

Als Beispiel für den Zusammenhang zwischen Sättigungsdefizit und Referenz-Evapotranspiration werden in *Abbildung 47* die Werte des Monats Juli im Jahr 2003 gegenübergestellt.

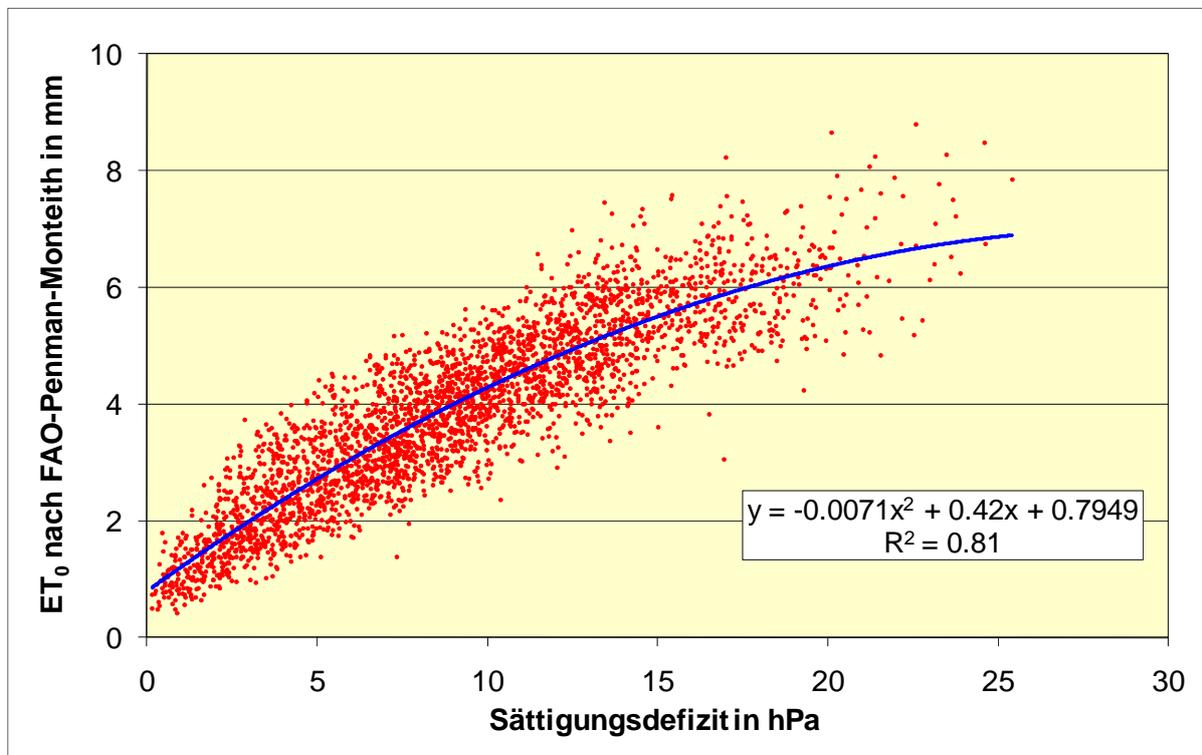


Abbildung 47: Zusammenhang zwischen Sättigungsdefizit und Evapotranspiration im Monat Juli 2003

Um eine Bewertung der eingesetzten Methoden durchführen zu können, wird die Berechnung der Referenz-Evapotranspiration aus Schätzmethode und FAO-Penman-Monteith-Gleichung einander gegenübergestellt. Die Einbeziehung der Angström-Formel in die FAO-Penman-Monteith-Gleichung ist in *Abbildung 48* dargestellt. Der starke Zusammenhang von über 98 % zeigt, dass der Einsatz für Stationen, an denen keine Globalstrahlung, jedoch die Sonnenscheindauer verfügbar ist, ohne weiteres gerechtfertigt ist. Für alle jene Stationen, an denen beide Parameter fehlen, kann die Referenz-Evapotranspiration direkt aus dem Sättigungsdefizit mit einem Zusammenhang von 91 % geschätzt werden (vgl. *Abbildung 61*). Die mit diesem Zusammenhang gewonnene Qualität der Schätzung ist um einiges höher als jene nach Hargreaves (vgl. *Abbildung 46*). Die Berechnung der Referenz-Evapotranspiration nach Hargreaves wird demnach verworfen. Der Verzicht auf die Schätzung durch das Sättigungsdefizit würde viele Stationen (knapp 40 %) von der räumlichen Interpolation ausschließen und hat einen deutlich negativeren Einfluss auf das Interpolationsergebnis, als bei dessen Berücksichtigung trotz einer geringen Unsicherheit im Schätzergebnis.

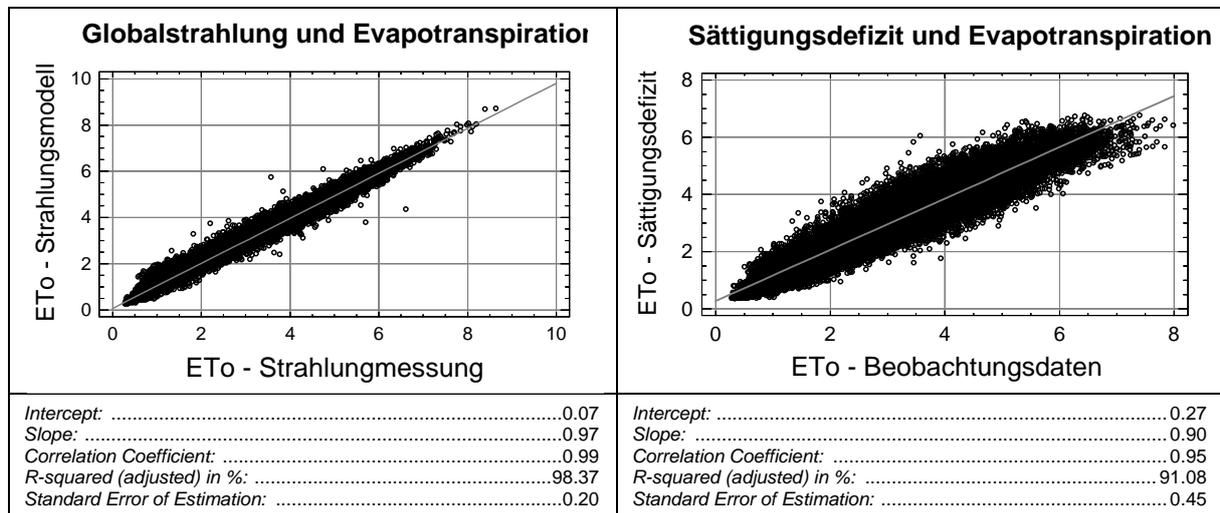


Abbildung 48: Einbeziehung von Strahlungsmodell bzw. Strahlungsmessung zur Berechnung der Referenz-Evapotranspiration

Abbildung 49: Abschätzung der Referenz-Evapotranspiration aus dem Sättigungsdefizit bzw. aus meteorologischen Beobachtungen

Ausgehend von den stationsbasierten Ergebnissen aus direkter und geschätzter Ermittlung der Referenz-Evapotranspiration werden kontinuierliche Oberflächen auf Tagesbasis interpoliert. Diese flächendeckenden Werteraster dienen in weiterer Folge zur Berechnung der aktuellen Evapotranspiration, aus der letztendlich der Wasserstress abgeleitet und über den gesamten Verlauf einer Vegetationsperiode akkumuliert wird.

Das in *Abbildung 50* dargestellte Beispiel beschreibt die Summe der Referenz-Evapotranspiration für den Monat Juni im Jahr 2003. Mit einer 250-Meter-Auflösung und der in Abschnitt 2.5.2.4 beschriebenen Methodik der Georegression sind die topographiebedingten Einflüsse auf die Evapotranspiration deutlich zu erkennen. Für dieses Beispiel wurden die einzelnen Tagesraster aufsummiert. Die räumliche Verteilung der Verdunstungswerte, vor allem die hohen Werte im Osten, bilden die Wettersituation im extrem trockenen Jahr 2003 gut ab, wo-

bei eine Aussage über den Grad der Trockenheit bzw. das Eintreten von Wasserstress nur in Zusammenschau mit dem Niederschlag und der Bodenbeschaffenheit getätigt werden kann, d.h. in der Betrachtung des Verhältnisses von Referenz- zu aktueller Evapotranspiration.

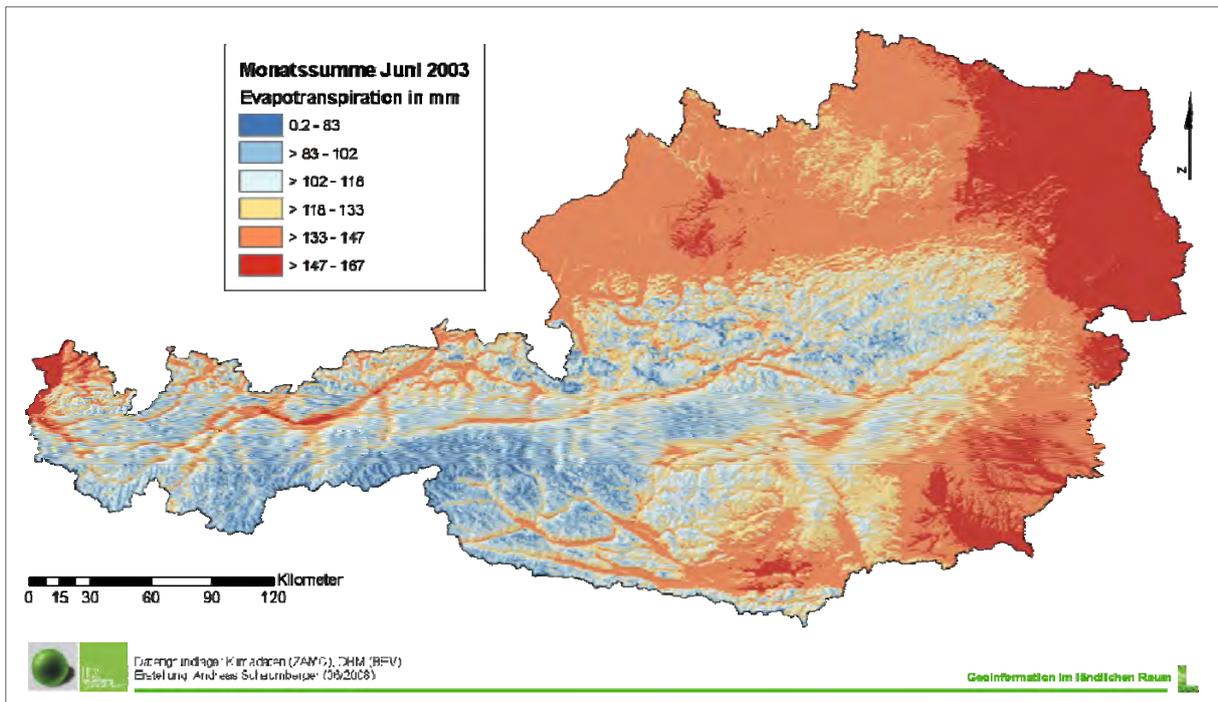


Abbildung 50: Räumliches Modell der Referenz-Evapotranspiration am Beispiel einer Monatssumme

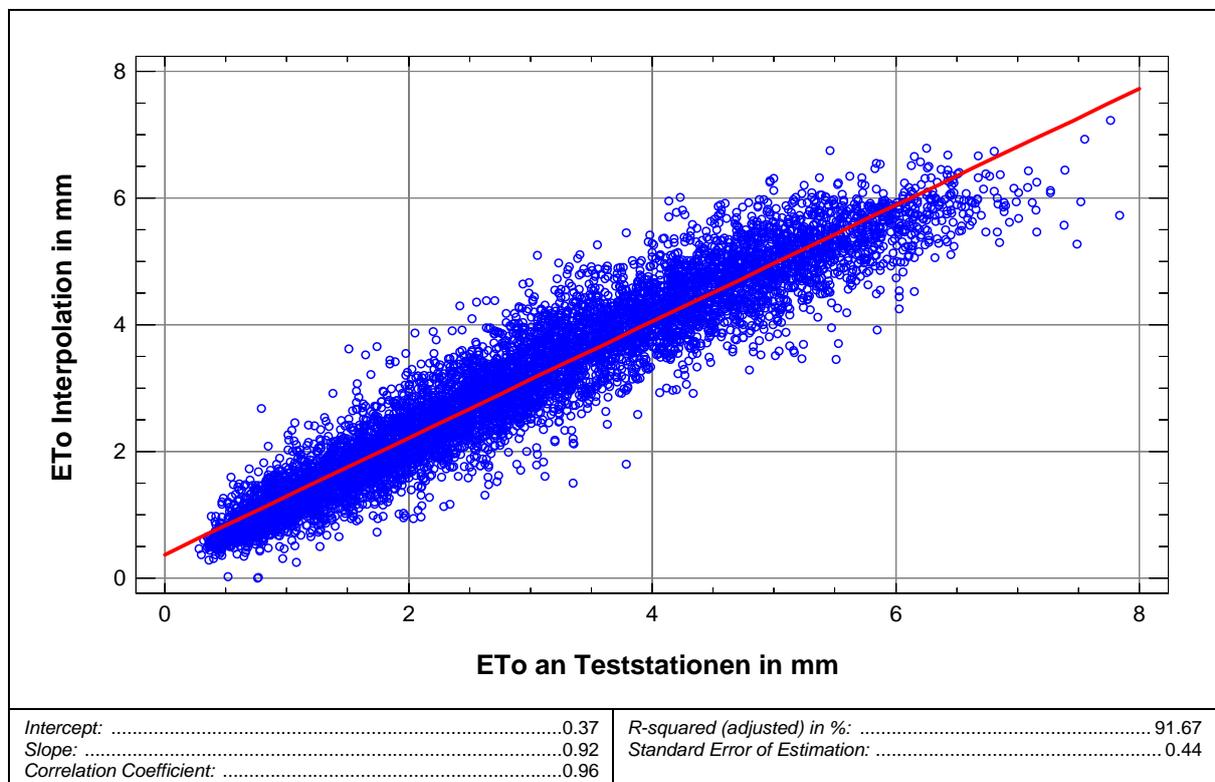


Abbildung 51: Ergebnis der Interpolationsvalidierung an 33 Teststationen (8.046 Datensätze)

Zur Validierung der räumlichen Modellierung wurden 33 Stationen aus der täglichen Interpolation des gesamten Jahres 2003 herausgenommen. Diese Teststationen wurden zufällig ausgewählt und sind in *Abbildung 11* geographisch dargestellt. In *Abbildung 51* werden die interpolierten den an den Teststationen gerechneten Werten der Referenz-Evapotranspiration gegenübergestellt. Das Validierungsergebnis zeigt eine leichte systematische Unterschätzung, welche aus den bereits bei der Strahlungsmodellierung nach Angström und besonders bei der Schätzung aus dem Sättigungsdefizit zurückgehenden systematischen Fehlern resultiert. Wie das vorliegende Ergebnis zeigt, bietet die in dieser Arbeit beschriebene Kombination von methodisch bewährten Verfahren zur Datenaufbereitung bzw. dem Füllen von Datenlücken sowie der anschließenden geostatistischen Interpolation eine solide Grundlage für die räumliche Modellierung der potenziellen Evapotranspiration auf Tagesbasis, womit eine wichtige Voraussetzung für die Integration dieses Ansatzes in GIS und in den weiterführenden Modellen des vorliegenden Projektes gegeben ist.

4.2 Räumliches Modell der Vegetationsperiode

Im vorliegenden Projekt wurde die thermische Vegetationsperiode implementiert, deren Plausibilität mit Hilfe langjähriger Auswertungen von Beginn, Ende und Dauer an den Stationen evaluiert wurde. Die Untersuchungsreihe über mehrere Jahrzehnte bestätigt den Trend einer Ausdehnung der Vegetationsdauer (Menzel und Fabian, 1999). In *Abbildung 52* ist der zeitliche Verlauf von 1961 bis 2006 im Mittel aller ZAMG-Wetterstationen dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die Zunahme der Vegetationsdauer hauptsächlich auf einen früheren Vegetationsbeginn zurückzuführen ist.

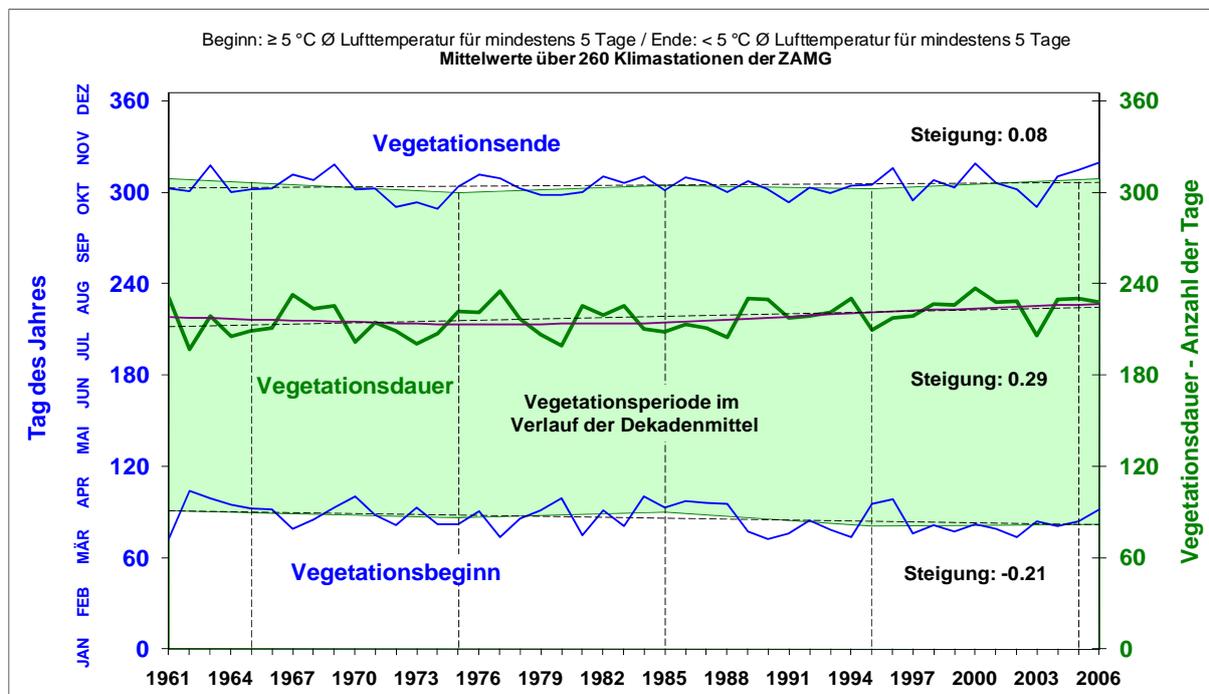


Abbildung 52: Verlauf von Beginn, Ende und Dauer der Vegetationsperiode in Österreich im Mittelwert über 260 Wetterstationen

Die Dauer der Vegetationsperiode wird durch die Breite des schattierten Bereichs ausgedrückt, dessen Abgrenzung durch den linearen Verlauf der Dekadenmittelwerte definiert ist. Die darüber liegende strichlierte Linie zeigt den langjährigen Trend, wobei die Abweichungen der einzelnen Dekaden auf diese Weise gut zu erkennen sind.

Standorte im Bergland verhalten sich etwas anders als im Flachland – hier ist tendenziell eine größere Zunahme der Vegetationsdauer zu beobachten. Beispielsweise zeigt die Station Rauris (vgl. *Abbildung 53*) eine Steigung der Vegetationsdauer von 0,38 (entspricht 17,48 Tagen). Andere Bergstationen (Bad Aussee, Mariazell, Rax, usw.) weisen ebenfalls eine überdurchschnittliche Zunahme der Vegetationsdauer auf. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass bei dieser langjährigen Untersuchung die Schneebedeckung vernachlässigt wurde, welche jedoch besonders im Bergland eine wichtige Rolle spielt.

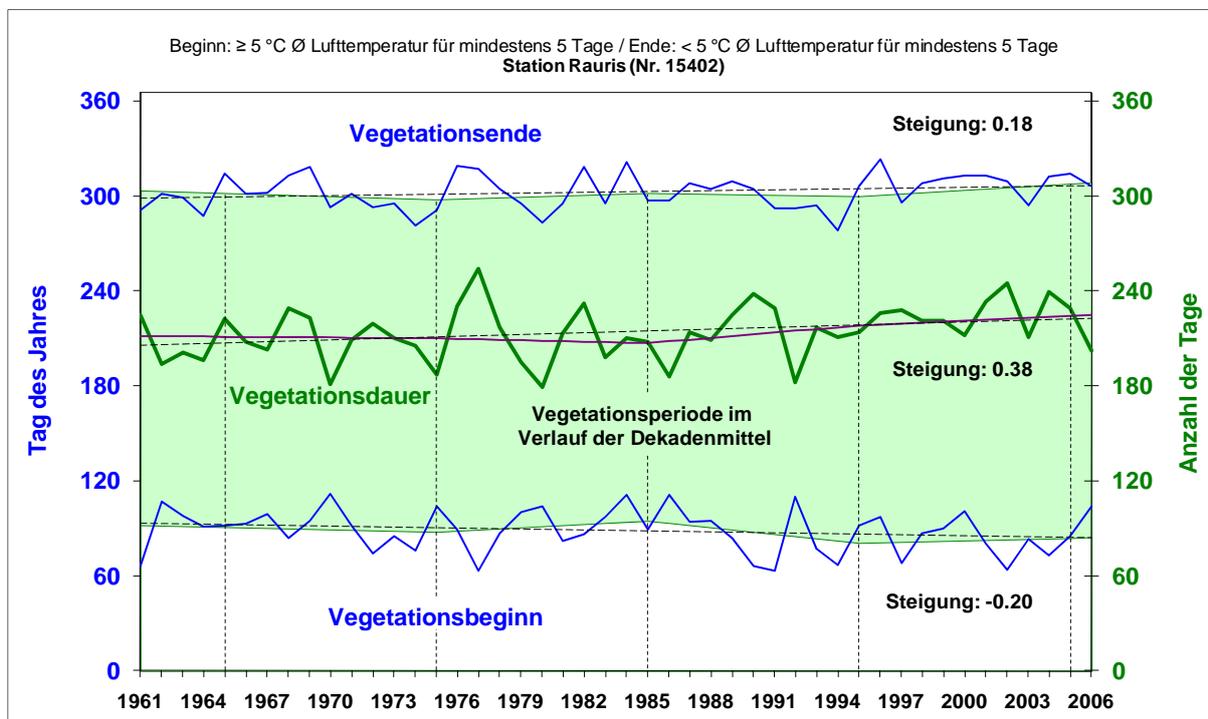


Abbildung 53: Verlauf von Beginn, Ende und Dauer der Vegetationsperiode in Rauris

Im Flachland fällt die Zunahme eher unterdurchschnittlich aus. In Laa/Thaya (vgl. *Abbildung 54*) beispielsweise beträgt die Steigung des langjährigen Trends der Vegetationsdauer 0,18, in Graz 0,20 und in Wien 0,24. Der Vergleich mehrerer Berg- und Flachlandstationen zeigt, dass die Ausdehnung der Vegetationsperiode aufgrund thermischer Bedingungen im Bergland intensiver als im Flachland ausfällt. Die längere Vegetationszeit ist zu einem großen Teil auf ein früheres Ende der Ruheperiode zurückzuführen.

In der vorliegenden Arbeit steht neben der stationsbezogenen Analyse besonders die räumliche Veränderung im Mittelpunkt des Interesses. In den nachfolgenden Abbildungen wird das räumliche Modell der verschiedenen Vegetationsperiodenparameter für das Jahr 1999 als Beispiel dargestellt. Die Oberflächen für Beginn und Ende der Vegetationsperiode bestehen aus

der Kombination von täglichen Temperaturrastern, die gemäß dem Algorithmus zur Berechnung der thermischen Vegetationsperiode verarbeitet wurden.

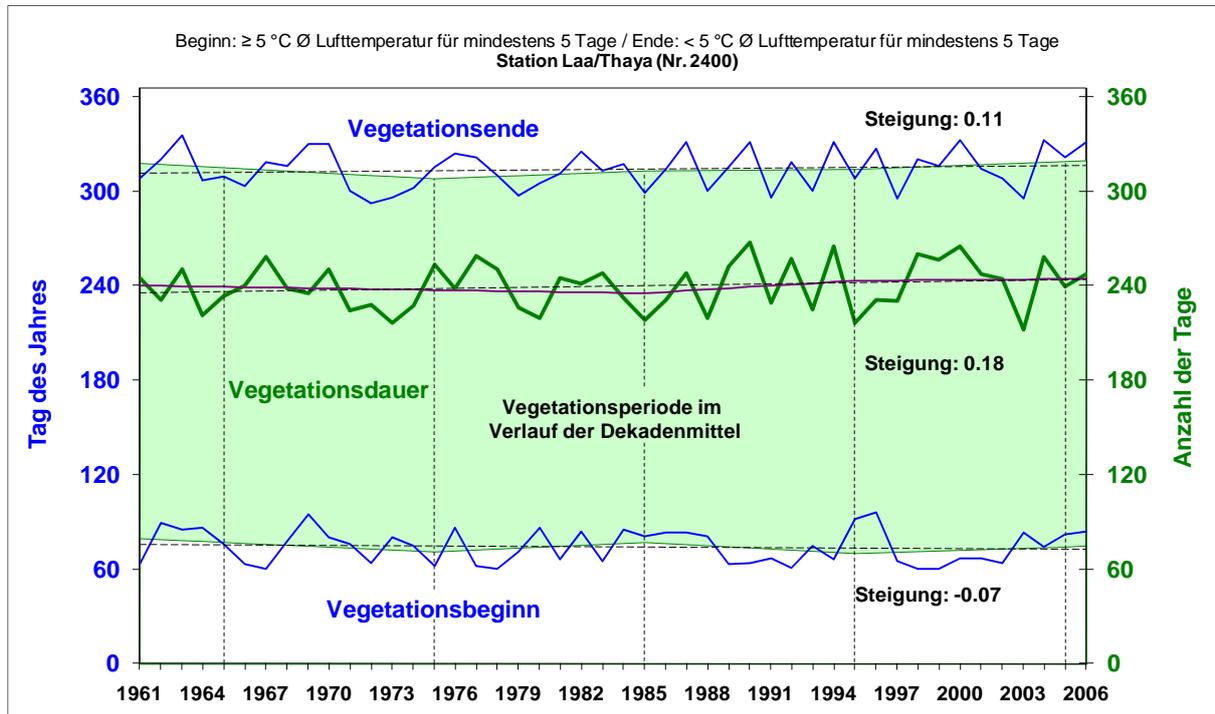


Abbildung 54: Verlauf von Beginn, Ende und Dauer der Vegetationsperiode in Laa/Thaya

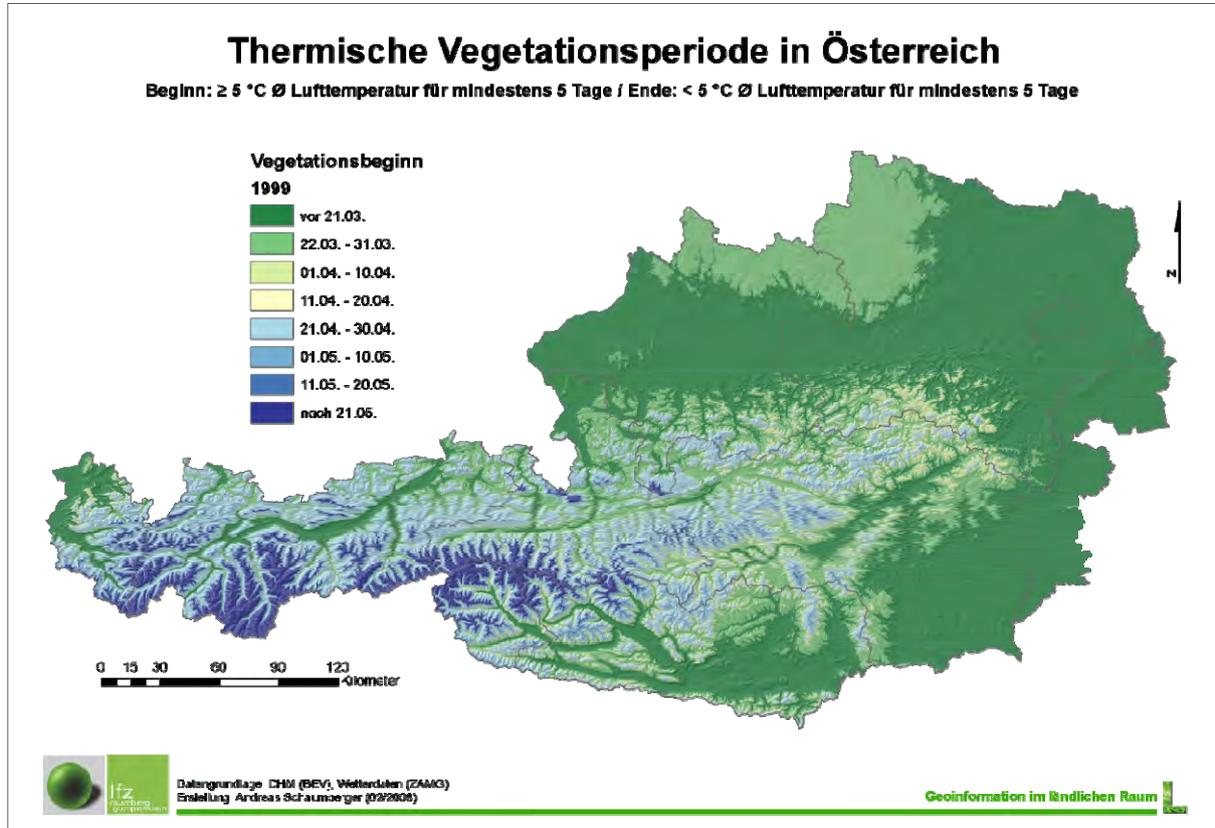


Abbildung 55: Beginn der thermischen Vegetationsperiode im Jahr 1999

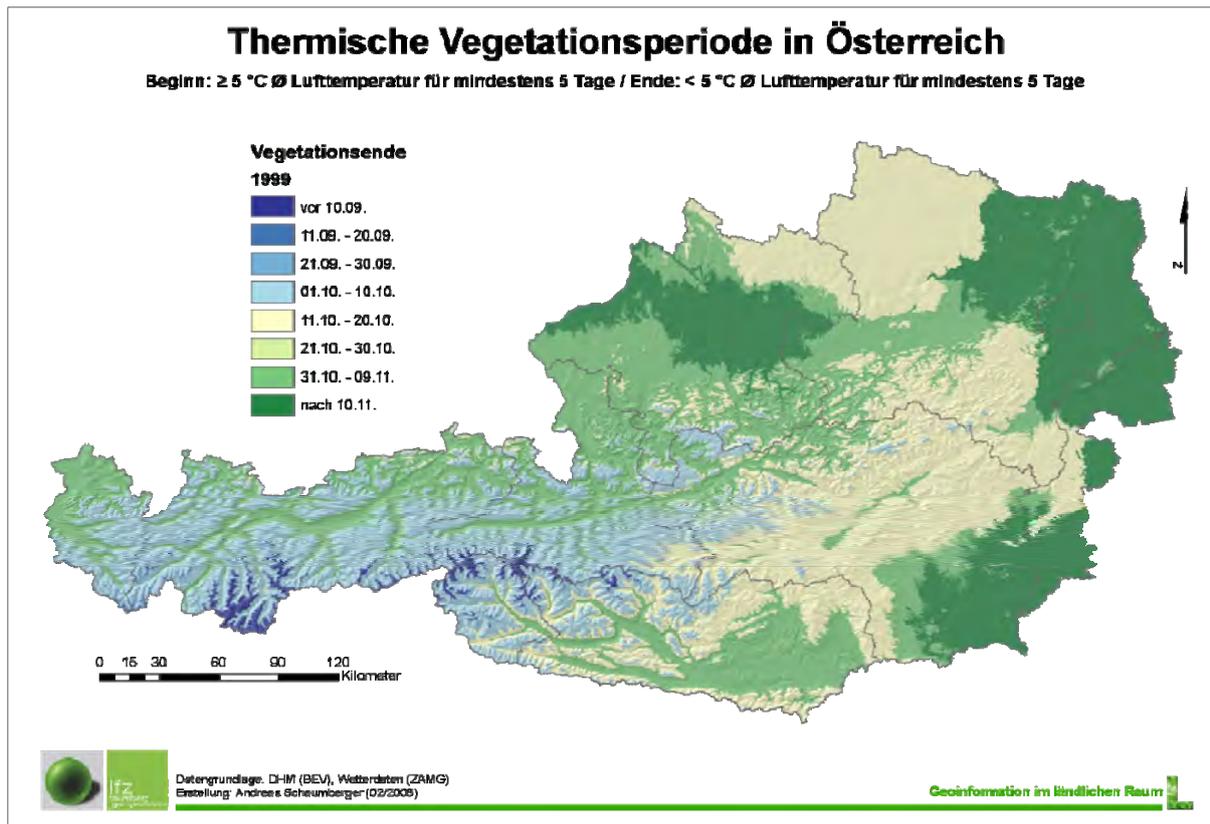


Abbildung 56: Ende der thermischen Vegetationsperiode im Jahr 1999

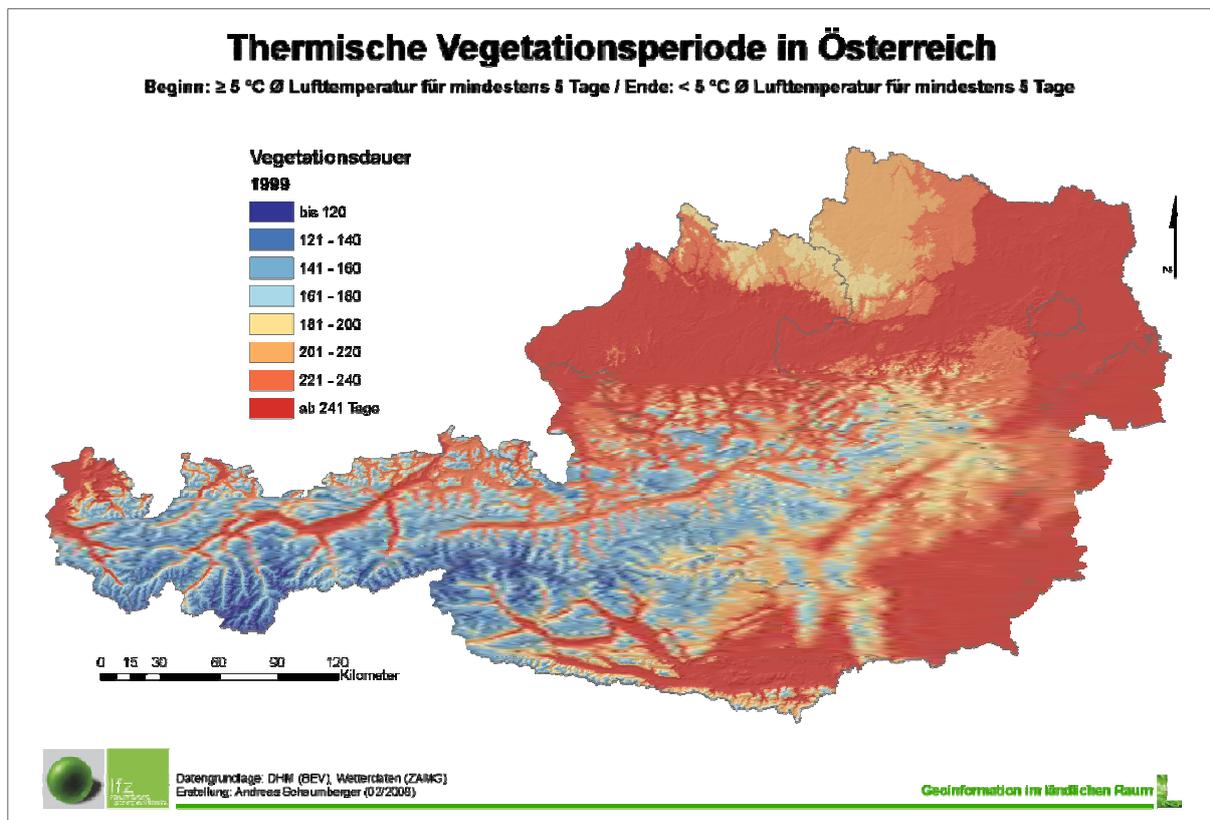


Abbildung 57: Dauer der thermischen Vegetationsperiode im Jahr 1999

Für den Zeitraum 1961 bis 2006 wurden 8.761 Rasteroberflächen (Temperatur auf Tagesbasis) für ganz Österreich mittels Rasteralgebra analysiert. Der Implementierung aller notwendigen Algorithmen muss bei dieser Datenmenge besonderes Augenmerk geschenkt werden und ist mit einer erheblichen Rechenzeit verbunden. Die täglichen Temperaturreaster wurden zur Laufzeit erzeugt, temporär vorgehalten und der Speicher nach Überprüfung des Temperaturkriteriums an den fünf Tagen wieder freigegeben (vgl. Abschnitt 2.5.3).

Die thermische Vegetationsperiode dient als Input für die Modellierung der Bewirtschaftungsintensität (vgl. Abschnitt 2.5.5) und geht indirekt über die Berechnung von Schnittfrequenz und Aufwuchsdauer in die Grünlandertragsmodellierung ein.

4.3 Räumliches Modell der Schneebedeckung

Die tägliche Schneebedeckung in Österreich wurde beispielhaft für zwei Winter von 1. November 2002 bis 30. April 2003 (181 Tage) bzw. 1. November 2003 bis 30. April 2004 (182 Tage) gerechnet. Die Ergebnisse liegen in Form von Rasterdaten in einer Auflösung von 50 Meter vor. Sie enthalten Werte des Wasseräquivalents des Schnees in mm pro Tag, die indirekt auf die Schneehöhe hinweisen. In erster Linie sind die Ergebnisse für die Beurteilung des Vorhandenseins von Schnee zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort konzipiert. Mit der Information über die Schneebedeckung kann die Vegetationsperiode vor allem im Berggebiet noch genauer abgegrenzt werden. Ziel in der vorliegenden Arbeit ist die Überführung eines wissenschaftlichen Modells mit einfacher Parametrisierung in eine praktische Anwendung, die auch in der Lage ist, größere Untersuchungsgebiete abzudecken und dabei eine akzeptable Genauigkeit zu erreichen.

Die Applikation, welche auf die im Vorfeld aufbereiteten Daten (vgl. Abschnitt 2.5.4) zugreift, wurde in der Programmiersprache Visual C# unter Einbindung der Klassenbibliothek von ESRI ArcObjects realisiert. Diese Implementierung hat sich als äußerst komfortabel und gerade im Zusammenwirken mit ArcObjects als performante Lösung erwiesen. Die Umsetzung objektorientierter Konzepte, die Möglichkeit der übersichtlichen Strukturierung und die Unabhängigkeit von einer ArcGIS-Oberfläche waren weitere wichtige Gründe für die Verwendung von C#.

Als Beispiel für die Ergebnisoberflächen wird in *Abbildung 58* das Ergebnis der Berechnungen für einen kurzen Zeitabschnitt von fünf aufeinanderfolgenden Tagen visualisiert. Der 31. Dezember 2002 zeigte eine mehr oder weniger massive Bedeckung in den Alpen, wobei die breiteren Täler schneefrei waren. Zu Beginn des neuen Jahres setzte dann vor allem im Osten und Norden Schneefall ein. Die von Osten heranziehende Kaltfront hat sich auch noch am 2. Jänner vor allem im Osten gehalten, wurde jedoch von einer massiven Warmluftzufuhr aus westlicher Richtung an den darauf folgenden Tagen stark zurückgedrängt. Im Flachland wurden in dieser Warmperiode bis 5 °C gemessen. Der Süden blieb weitgehend niederschlagsfrei.

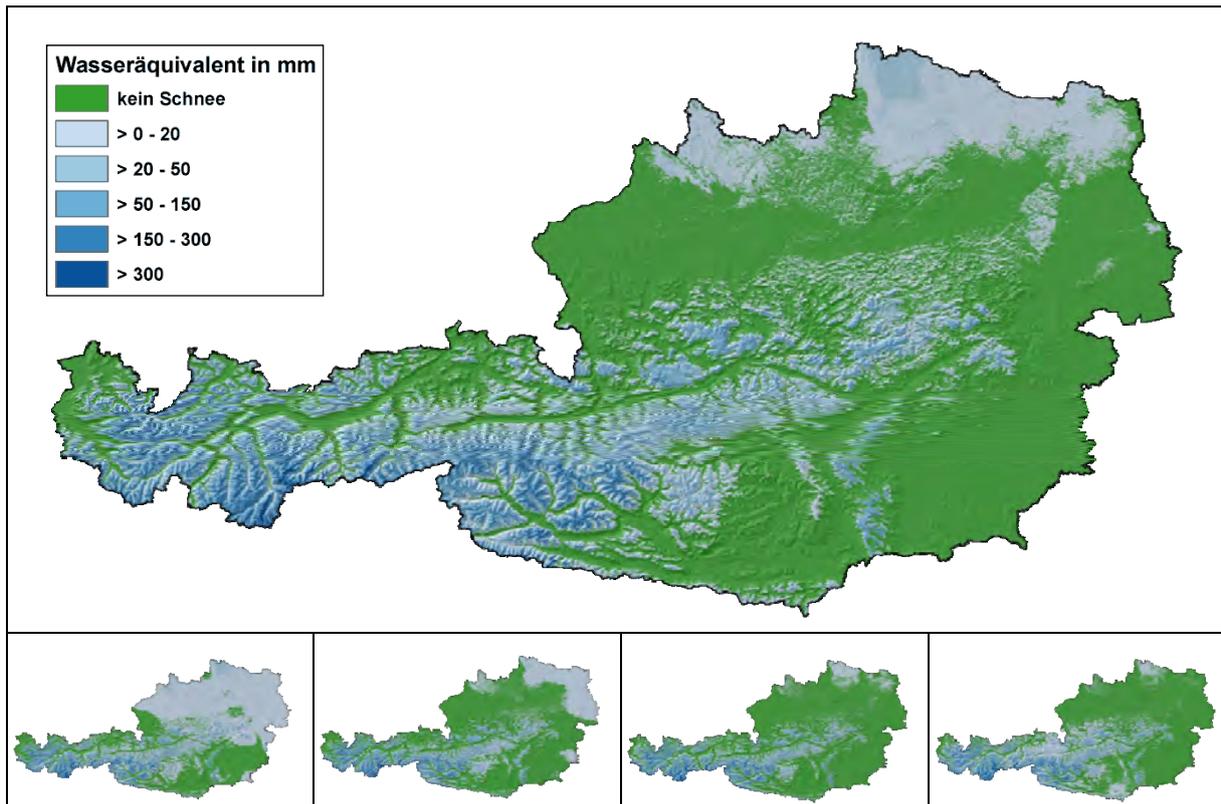


Abbildung 58: Ergebnisse am Beispiel des 31. Dezember 2002 und den darauf folgenden vier Tagen in der Berechnungsperiode Winter 2002/2003

Evaluierung der Modellimplementierung

Die Beurteilung der Ergebnisse ist auf Grund der Größe des Untersuchungsgebietes und den zahlreichen Einflussfaktoren auf die Schneeakkumulation und -schmelze eine besondere Herausforderung. Die lückenlose Berücksichtigung der vielfältigen regionalen Unterschiede würde ein extrem dichtes Messnetz über das gesamte Untersuchungsgebiet erfordern, welches jedoch nicht gegeben ist. Von Cazorzi und Dalla Fontana (1996) wurde die Anwendung in einem kleinen Gebiet ausführlich getestet und ist in der vorliegenden Arbeit nicht Gegenstand der Diskussion. Eine Validierung mit Hilfe von Fernerkundungsdaten ist ein möglicher Ansatz, stellt aber einen erheblichen Aufwand dar.

Die Evaluierung der vorliegenden Ergebnisse wurde mit vorhandenen Schneehöhenmessungen an 740 HZB-Stationen vorgenommen (vgl. Parajka und Blöschl, 2006). Die an den jeweiligen Tagen gespeicherten Rasterzellwerte (Wasseräquivalent in mm) an den Positionen der HZB-Stationen wurden mit den Messwerten des zu untersuchenden Tages verglichen. Eine Übereinstimmung war dann gegeben, wenn beide Werte auf Schneebedeckung hinwiesen bzw. in beiden Fällen kein Schnee gemessen bzw. gerechnet wurde. Da im Modell bereits kleinste Niederschlagsmengen bei entsprechenden Temperaturen als Schnee gewertet werden, ist eine scharfe Abgrenzung nicht sinnvoll. Für die Bewertung der Übereinstimmung wurde deshalb ein Unschärfebereich von 10 mm eingeführt. Die *Abbildungen 59* und *61* zeigen neben dem zeitlichen Verlauf der Übereinstimmung auch einen Vergleich der relativen, mit

Schnee bedeckten Gesamtfläche aus den Ergebnissen der Modellrechnung und dem Verhältnis von Gesamtanzahl an Messstationen zu jenen mit Schneebedeckung. Damit können die Fehlerhäufungen im Modell in Zusammenhang mit der im Untersuchungsgebiet stattfindenden Schneeakkumulation und -schmelze gebracht werden.

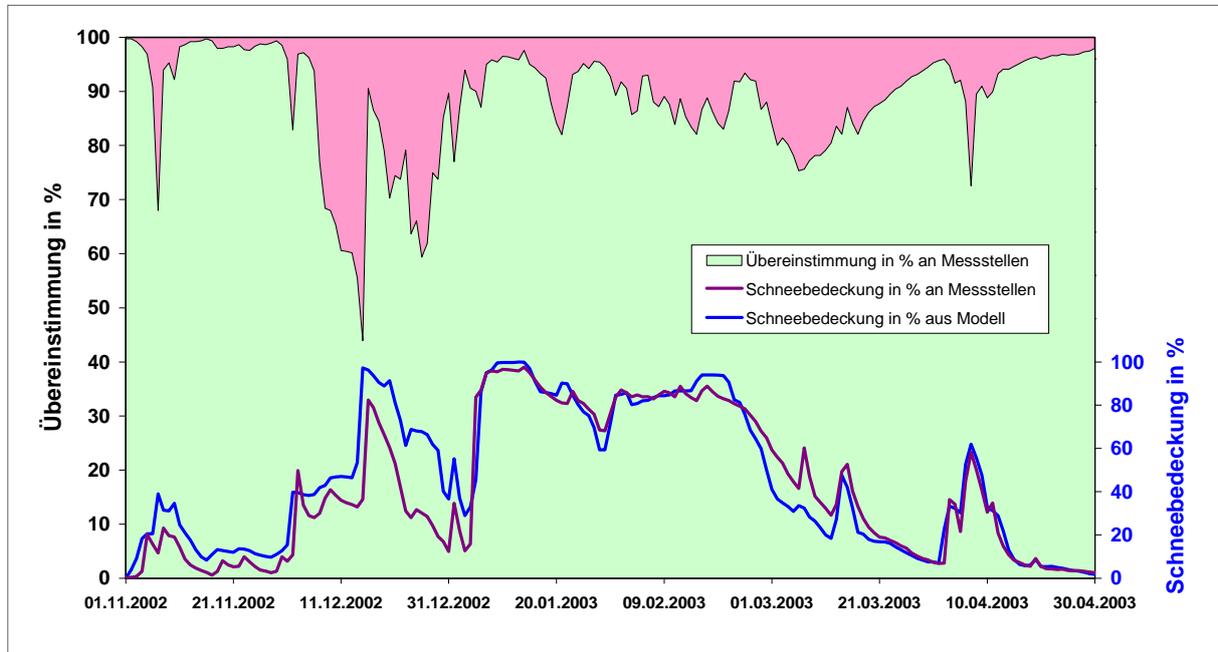


Abbildung 59: Übereinstimmung der vom Modell gerechneten Schneebedeckung mit Messwerten an 740 HZB-Stationen und die gesamte schneebedeckte Fläche Österreichs im Winter 2002/2003

Die Grafik zeigt einen deutlichen Zusammenhang zwischen massiven Änderungen in der Schneebedeckung und der, wenn auch nur kurzfristigen, Fehlabbildung des Modells. Insbesondere der Monat Dezember 2002 fällt durch massive Fehlerhäufungen auf. Eine Erklärung dafür findet sich in den komplizierten Wetterbedingungen dieser Zeit: „... Nach einem allgemein milden Monatsbeginn setzte um den 6. die ungewöhnlich lange anhaltende Trennung in einen warmen Westen und Süden sowie einen kalten Norden und Osten ein. ...“ (ZAMG, 2002).

Die Übereinstimmung zwischen Messungen und Modellergebnissen ist dann besonders hoch, wenn viele Stationen keine Schneebedeckung aufweisen. Sobald im Modell Niederschlag als Schnee akkumuliert wird, d.h. die Temperaturen unter $0,5\text{ °C}$ liegen, werden die Schwächen besonders sichtbar. Das liegt unter anderem in der Variabilität der Temperaturgrenze für Schneefall, die in der Natur nie statisch bei $0,5\text{ °C}$ liegt und zudem nur die Temperatur der bodennahen Luftschicht als Messwert einfließt. Auch die zeitlich nicht exakte Kombination von Niederschlag und Temperatur spielt hier eine große Rolle. Im Modell wurde der Niederschlag nur zwei diskreten Zeiträumen (Tag und Nacht) zugeordnet und darauf der jeweilige Temperaturmittelwert angewendet.

In *Abbildung 60* wird in der Gegenüberstellung des Verlaufs der Schneebedeckung an vier HZB-Messstationen in unterschiedlichen Höhenlagen zwischen Schneehöhenmessungen und Modellergebnissen die Schwäche bei der Schneeakkumulation und -schmelze deutlich. Mehr-

fach berechnet das Modell auch eine zu rasche Abschmelzung, was auf die Nichtberücksichtigung des Kältespeichers in einer durchgefrorenen Schneedecke hinweisen kann. Bei der Interpretation der Kurven sei darauf hingewiesen, dass die Dimension beider Wertereihen unterschiedlich ist; das Wasseräquivalent des Schnees entspricht nicht der Schneehöhe in cm und deshalb ist der Vergleich auf die relativen Unterschiede zwischen beiden Kurven beschränkt.

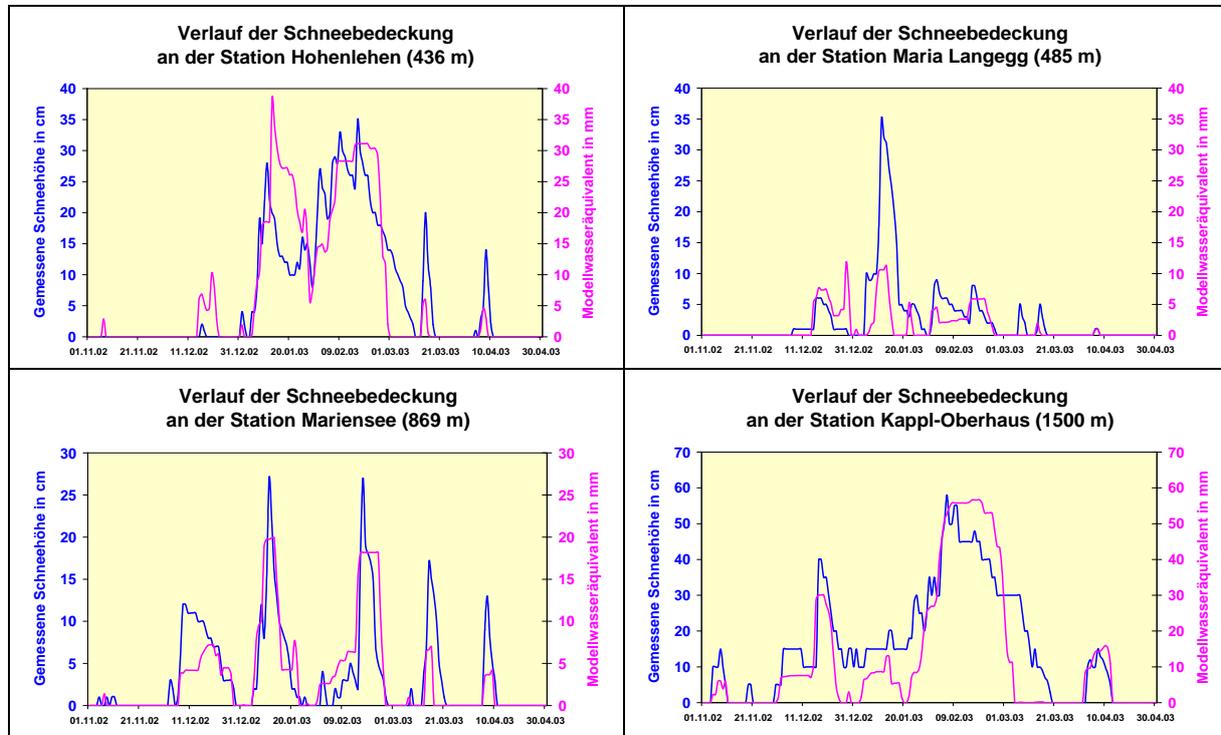


Abbildung 60: Verlauf der Schneebedeckung im Winter 2002/2003 an vier Messstationen im Vergleich zwischen Beobachtung und Modellergebnissen

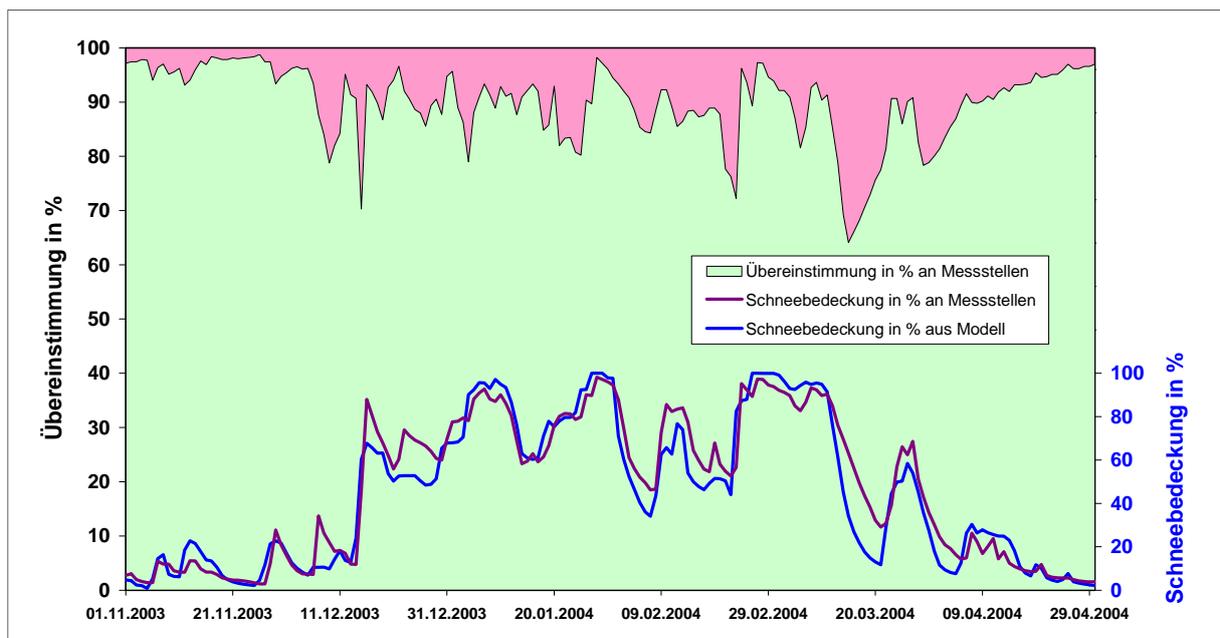


Abbildung 61: Übereinstimmung der vom Modell gerechneten Schneebedeckung mit Messwerten an 740 HZB-Stationen und die gesamte schneebedeckte Fläche Österreichs im Winter 2003/2004

Die Untersuchung des zweiten Winters in *Abbildung 61* zeigt ein etwas ausgeglicheneres Bild der Fehlabbildung, wobei auch hier massive Änderungen der Schneefläche zu Ausreißern in der Übereinstimmung führen. Die Abweichungen betreffen wiederum Zeiträume, in welchen Schnee akkumuliert wurde. Die Übereinstimmung am Beginn und Ende des Winters sind auf Grund der großen schneefreien Fläche sehr gut, aber wie schon im Vorjahr zu beobachten war, auch im Hochwinter durchaus akzeptabel.

Die Beschreibung der ZAMG für den Monat März 2004, der ein etwas auffälligeres Verhalten zeigt, erklärt die Ursachen: „... *Bis zum Beginn der zweiten Dekade herrschte im März 2004 kaltes und verbreitet schneereiches Spätwinterwetter. Danach sorgte Warmluftzufuhr für kräftige Erwärmung und für die Jahreszeit ungewöhnlich hohe Temperaturmaxima. Die letzte Dekade brachte dann erneut Winterwetter mit weiteren Schneefällen, ehe kurz vor Monatsende der Frühling einen neuen Anlauf nahm.* ... „(ZAMG, 2004).

In *Abbildung 62* werden die gleichen Stationen wie in *Abbildung 60* miteinander verglichen. Modellerte Schneeakkumulation und -schmelze geben den Verlauf der gemessenen Schneebedeckung zwar nicht exakt wieder, es ist aber ein doch sehr ähnliches Verhalten beider Kurven zu beobachten.

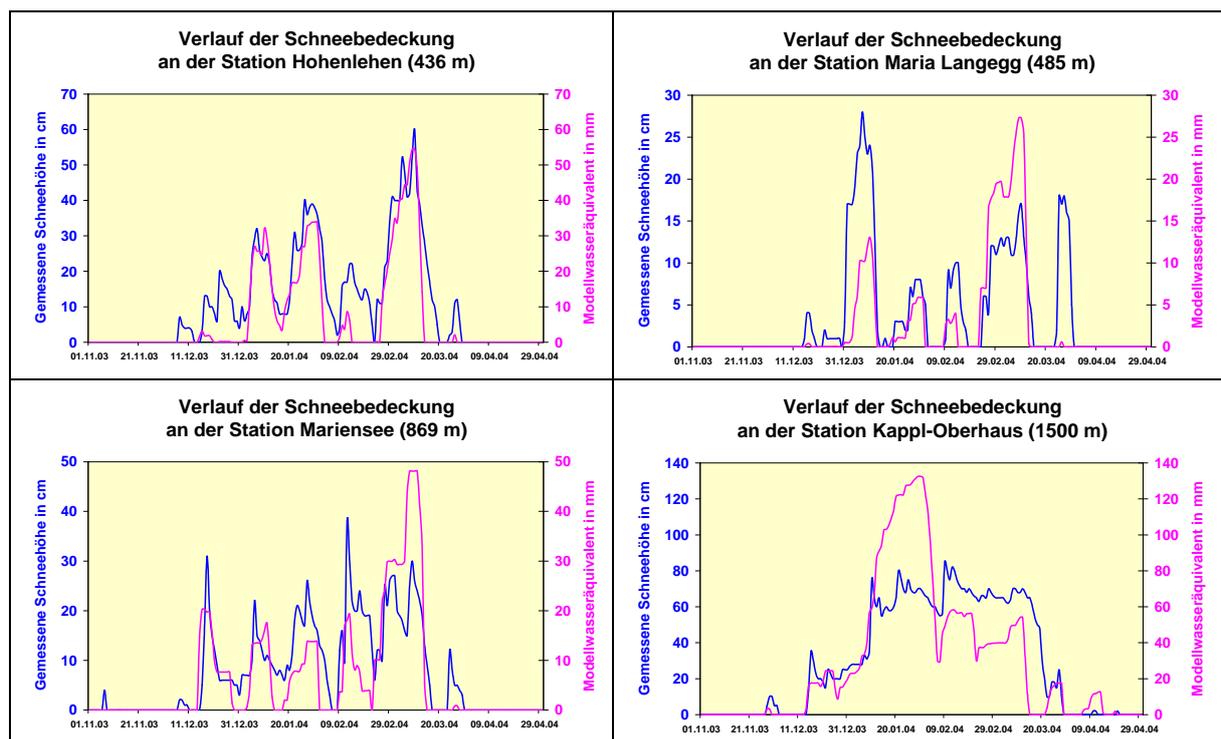


Abbildung 62: Verlauf der Schneebedeckung im Winter 2003/2004 an vier Messstationen im Vergleich zwischen Mess- und Modellergebnissen

Die durchschnittliche Übereinstimmung (siehe Abbildungen 59 und 61), ob an den Messstationen Schnee liegt oder nicht, beträgt im Winter 2002/2003 88,5 %, im Winter 2003/2004 ist sie geringfügig höher und liegt bei 89,9 %. Ein Trend für eine stetige Verschlechterung des Modells im Zeitverlauf liegt nicht vor. Die Ergebnisse zeigen ein weitgehendes Funktionieren

der im Modell gerechneten Schneeakkumulation und -schmelze, wobei die natürlichen Vorgänge durch die getroffenen Modellvereinfachungen nur mit eingeschränkter Genauigkeit abgebildet werden.

Um eine Evaluierung aller Ergebnisse über die gesamte Untersuchungsperiode vornehmen zu können, wurde die gemessene Anzahl der Schneetage eines Winters mit jener der modellierten Schneetage verglichen (siehe *Abbildung 63*).

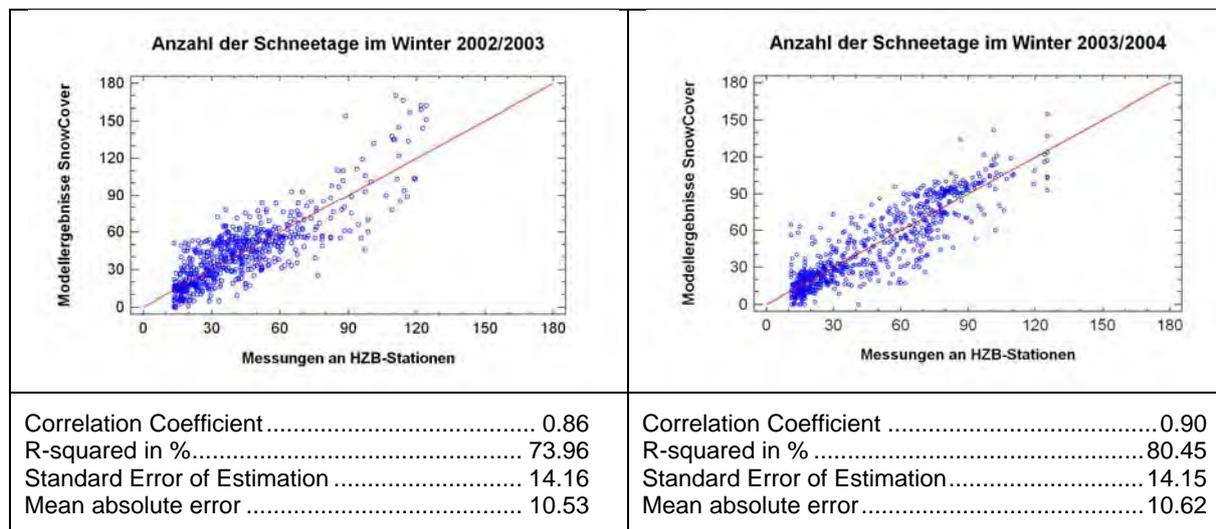


Abbildung 63: Anzahl der Schneetage in den beiden Berechnungsperioden im Vergleich von Modellergebnissen und Schneehöhenmessungen an 740 HZB-Stationen

Unter Berücksichtigung der einfachen Modellkonzeption sind diese Ergebnisse äußerst zufrieden stellend und bringen den Nachweis, dass auch eine großflächige Modellapplikation für den praktischen Einsatz verwendet werden kann.

4.4 Räumliches Modell der Schnitthäufigkeit und Aufwuchsdauer

Im Abschnitt 3.7 wurde auf die technische Implementierung, insbesondere auf die Anwendung von Raster-Algebra, zur Ermittlung von Schnitthäufigkeit und Aufwuchsdauer eingegangen. In *Abbildung 41* wird das Ergebnis der räumlichen Modellierung zur Schnitthäufigkeit, wie sie methodisch in Abschnitt 2.5.5 erläutert ist, visualisiert. Dieser Ansatz muss als eine theoretische Herangehensweise verstanden werden, da auf Basis der thermischen Vegetationsperiode und der eingeführten Schwellwerte (vgl. *Abbildung 16*) nur eine Annäherung an reale Verhältnisse möglich ist. Zur flächendeckenden Berechnung der Crop Evapotranspiration ist eine Diskretisierung der einer Schnittanzahl zugeordneten Fläche notwendig. Die darauf aufbauende aktuelle Evapotranspiration bezieht sich also immer genau auf eine bestimmte geographische Einheit (in diesem Fall sind es Rasterzellen in 250-Meter-Auflösung), deren Schnittsystem exakt definiert ist (vgl. Abschnitt 2.5.6.1 und 2.5.6.3). Zu diesem Zweck wird bei Anwendung eines solchen Berechnungsansatzes bereits bei der Ermittlung der Bodenwasserbilanz zwischen den verschiedenen Schnitthäufigkeiten unterschieden.

Wie im Abschnitt 2.5.6.4 erläutert wird, stellt dies einen erheblichen Nachteil bei der Berechnung unterschiedlicher Bewirtschaftungsintensitäten (Schnitthäufigkeiten) für die gleiche geographische Einheit dar. Um möglichst effizient unterschiedliche Nutzungssysteme für die selbe Fläche berechnen zu können, wird bei der Bodenwasserbilanzierung auf die Einführung eines Pflanzenfaktors verzichtet und demzufolge spielt auch die Schnitthäufigkeitsberechnung nur eine untergeordnete Rolle (vgl. Abschnitt 2.5.6.4).

Die aufwendigen Vorarbeiten bei der Verarbeitung von Wetter- und Bodendaten kommen bei der hier umgesetzten Variante ohne Berücksichtigung des Pflanzenfaktors aus. Die Schnitthäufigkeitsberechnung kann allerdings in einer späteren Phase bei der Zuordnung der Ertragsschätzergebnisse auf eine bestimmte geographische Einheit neben anderen räumlichen Bewirtschaftungsindikatoren (z.B. landesübliche Bewirtschaftung in einem definierten Gebiet, Informationen aus INVEKOS, usw.) verwendet werden. Die Ertragsschätzung liefert nämlich für jede Rasterzelle je ein Ergebnis für Zwei-, Drei- und Vierschnittsysteme. Nach einer geeigneten flächenbezogenen Beurteilung muss eine Zuordnung zu einem bestimmten Bewirtschaftungssystem erfolgen, da beispielsweise die Ertragssituation einer berechneten Zweischnittvariante auf einem Schlag mit tatsächlicher Vierschnittnutzung zu einer erheblichen Abweichung zwischen Realertrag und Modellertrag führt. Allerdings kann bei dem hier gewählten Ansatz die Zuordnung flexibel erfolgen, da sämtliche den Schnittsystemen entsprechende Erträge zur Verfügung stehen.

Für die Anwendung des Grassland Statistical Model (GRAM) ist die Aufwuchsdauer als ein hochsignifikanter Modellprädiktor von großer Bedeutung. Bei dem hier gewählten Ansatz einer flächendeckenden Implementierung für jedes Schnittregime spielen die in *Abbildung 16* dargestellten räumlichen Abgrenzungen (Schwellwerte in der zur Verfügung stehenden Nutzungsperiode) keine Rolle, sondern die relative Aufteilung der einzelnen Aufwuchszeiten (vgl. *Tabelle 1*) wird vom Beginn bis zum Ende der Nutzungsperiode für die gesamte Untersuchungsfläche herangezogen. Die Bestimmung von Nutzungsterminen (*Abbildung 64*) nach der in Abschnitt 2.5.5 beschriebenen Methode und unter Verwendung der in *Tabelle 1* definierten Verhältniszahlen ist die Voraussetzung für die Berechnung der Aufwuchsdauer. Bei der angewandten Modellierung wird die gesamte Oberfläche einbezogen, sodass sich beispielsweise auch im Hochgebirge entsprechende theoretische Nutzungstermine ergeben.

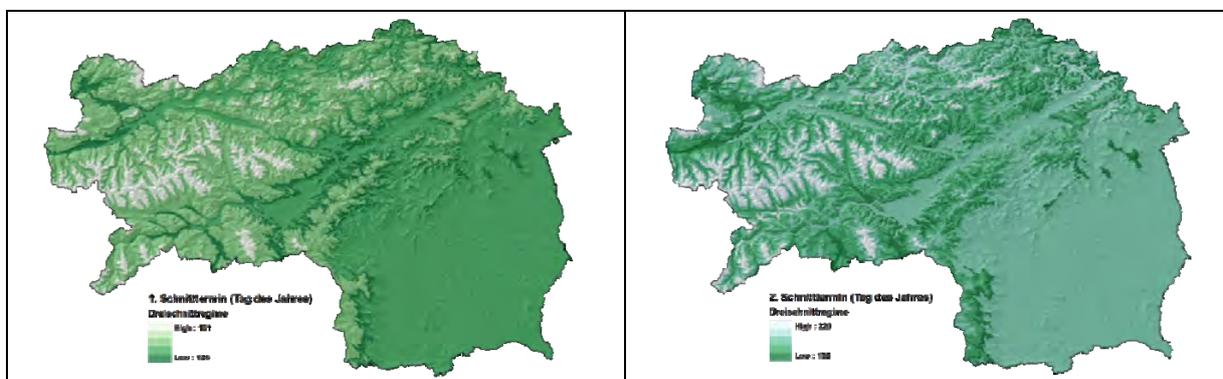


Abbildung 64: Modellierte Nutzungstermine (Tag des Jahres) eines Dreischnittregimes für den 1. und 2. Aufwuchs am Beispiel des Jahres 2006

Das verwendete Modell führt naturgemäß zu nicht plausiblen Ergebnissen, wenn zum Beispiel die einzelnen Aufwuchszeiten eines Drei- oder Vierschnittregimes in einer höheren Lage aufgrund der geringen zur Verfügung stehenden Nutzungsdauer extrem kurz ausfallen. In den *Abbildungen 65* und *66* mit einer Darstellung der unterschiedlichen, auf ein Nutzungsregime angepassten Aufwuchsdauer ist dies klar ersichtlich. Die Dauer für den ersten Schnitt liegt beim Dreischnittregime im Minimum bei 17 Tagen – dies ist in den hohen Lagen nicht möglich. Andererseits ist auch die Dauer von 50 Tagen für den ersten Aufwuchs in den tiefen und klimatisch begünstigten Lagen des Flachlandes nicht plausibel. Hier wird in der Regel das Wirtschaftsgrünland mit einem Vierschnittregime bearbeitet.

Der Vorteil einer flächendeckenden Berechnung liegt jedoch darin, dass grundsätzlich die Möglichkeit besteht, einer extensiv bewirtschafteten Fläche im „Vierschnittgebiet“ auch eine Dreischnittnutzung mit den entsprechenden Erträgen zuordnen zu können.

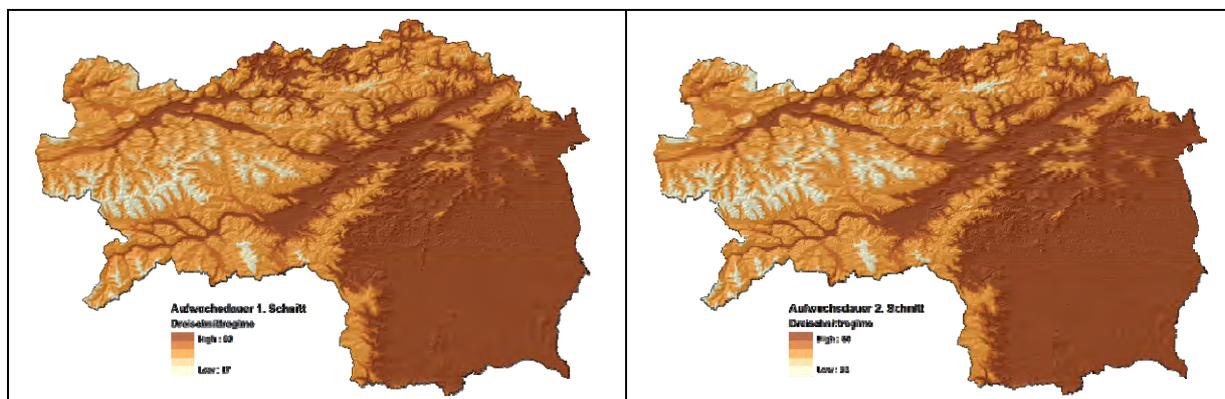


Abbildung 65: Dauer (in Tagen) der ersten beiden Aufwüchse eines Dreischnittregimes im Jahr 2006

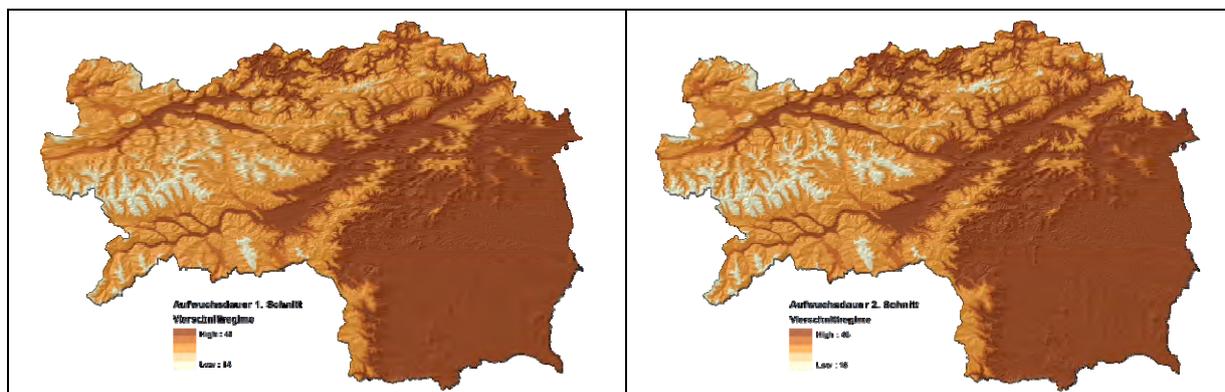


Abbildung 66: Dauer (in Tagen) der ersten beiden Aufwüchse eines Vierschnittregimes im Jahr 2006

Abschließend wird nochmals darauf hingewiesen, dass bei der hier angewandten Methode der Schnitttermin- und Aufwuchsdauermodellierung eine nachträgliche Gebietsabgrenzung für die dort errechneten Erträge erfolgen muss. Dies ist vor allem dann notwendig, wenn die natürlichen Standortbedingungen ein bestimmtes Nutzungsregime aufgrund der zu kurzen Aufwuchszeiten nicht erlauben. Die dort geschätzten Erträge sind nicht korrekt und dürfen keiner Weiterverarbeitung bzw. Interpretation zugeführt werden.

4.4 Räumliches Modell der Bodenwasserbilanz

Für die Ermittlung des Grünlandertrages unter dem besonderen Aspekt der Wasserverfügbarkeit ist die räumliche Implementierung eines Bodenwasserbilanzmodells notwendig. Die Aggregation und Interpolation von Wetterdaten als wichtiger Schritt bestimmt letztendlich die Qualität der für die Ertragsmodellierung errechneten klimarelevanten Prädiktoren. Die räumliche Implementierung der Inputfaktoren des Bodenwasserbilanzmodells setzt eine erhebliche Vereinfachung des Berechnungsansatzes voraus, da sämtliche Teilinformationen in jeder Zelle der entstehenden Ergebnisoberfläche vorhanden sein müssen.

Das in diesem Projekt verfolgte Ziel einer flächendeckenden Berechnung von Grünlanderträgen liegt im Spannungsfeld zwischen der bestmöglichen Abbildung der Bodenwasserbilanz und deren Übertragbarkeit auf eine kontinuierliche Oberfläche mittels Geographischem Informationssystem. Zur Umsetzung dieses Zieles sind gewisse Vereinfachungen und Approximationen unerlässlich und die hier vorgestellten Ergebnisse müssen unter diesem Aspekt beurteilt werden. Die einzelnen Faktoren wurden nach dem aktuellen Stand des Wissens und unter Beziehung von standardisierten und etablierten Methoden errechnet. Die zu bilanzierenden Größen in der Bodenwasserbilanz bestehen im vorliegenden Ansatz im Wesentlichen aus dem Wassereintrag in Form des Niederschlags und dem Wasseraustrag in Form der Evapotranspiration. Die beiden Parameter in ihrer räumlichen Umsetzung sind beispielhaft für den 15.05.2003 in den *Abbildungen 67* und *68* dargestellt.

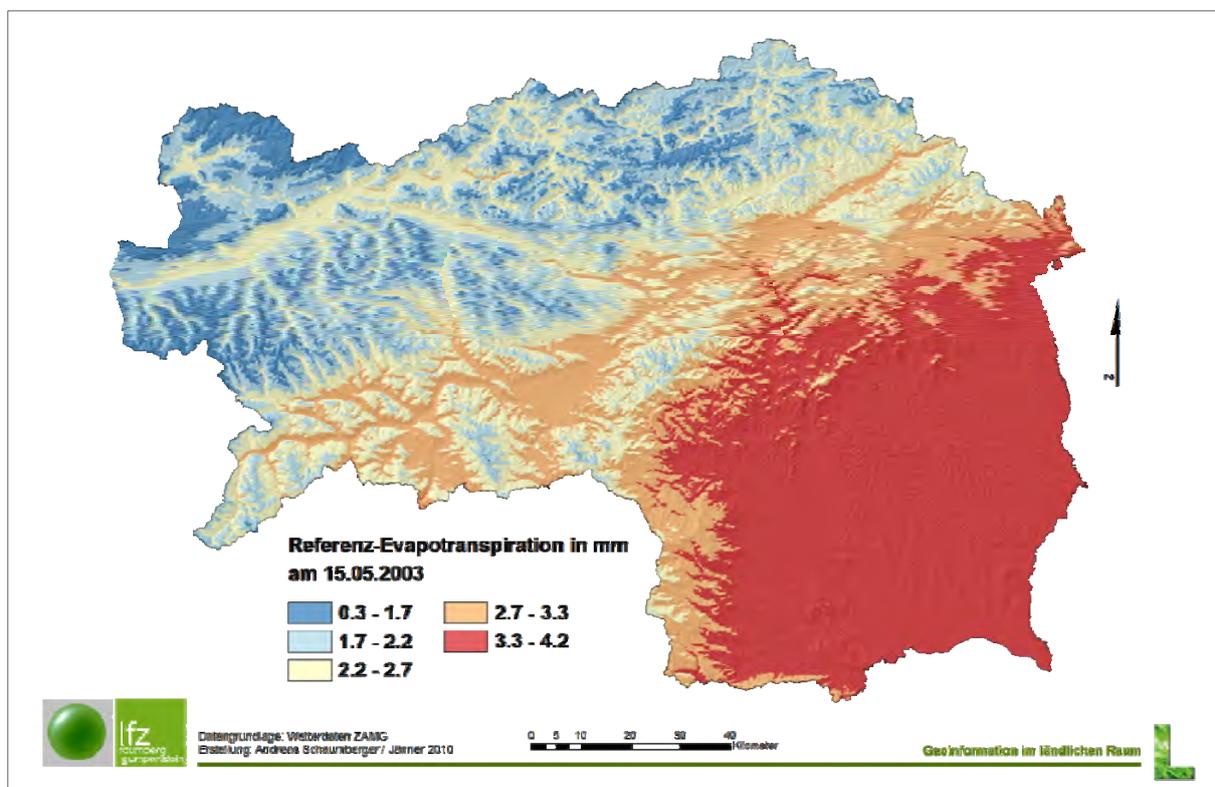


Abbildung 67: Beispiel für das räumliche Modell der Referenz-Evapotranspiration

Auf die Interpolation der Referenz-Evapotranspiration wurde besondere Aufmerksamkeit gelegt, da dieser Wert für die spätere Ableitung von Bodenwassergehalt und Wasserstress eine zentrale Rolle einnimmt. Im Abschnitt 2.5.2 wird die Methodik genau beschrieben. Besonders wichtig im Zusammenhang einer geeigneten Interpolation sind die Berücksichtigung möglichst vieler Interpolationsstützstellen (Wetterstationen) und die Einbeziehung der topographischen Variabilität (vgl. Abschnitt 2.5.1).

Für die Interpolation des Niederschlags wurde ein geostatistischer Ansatz (Ordinary Kriging) herangezogen, welcher durch die Einbeziehung möglichst vieler Stützstellen (vgl. Abschnitt 2.2.2) optimiert wurde.

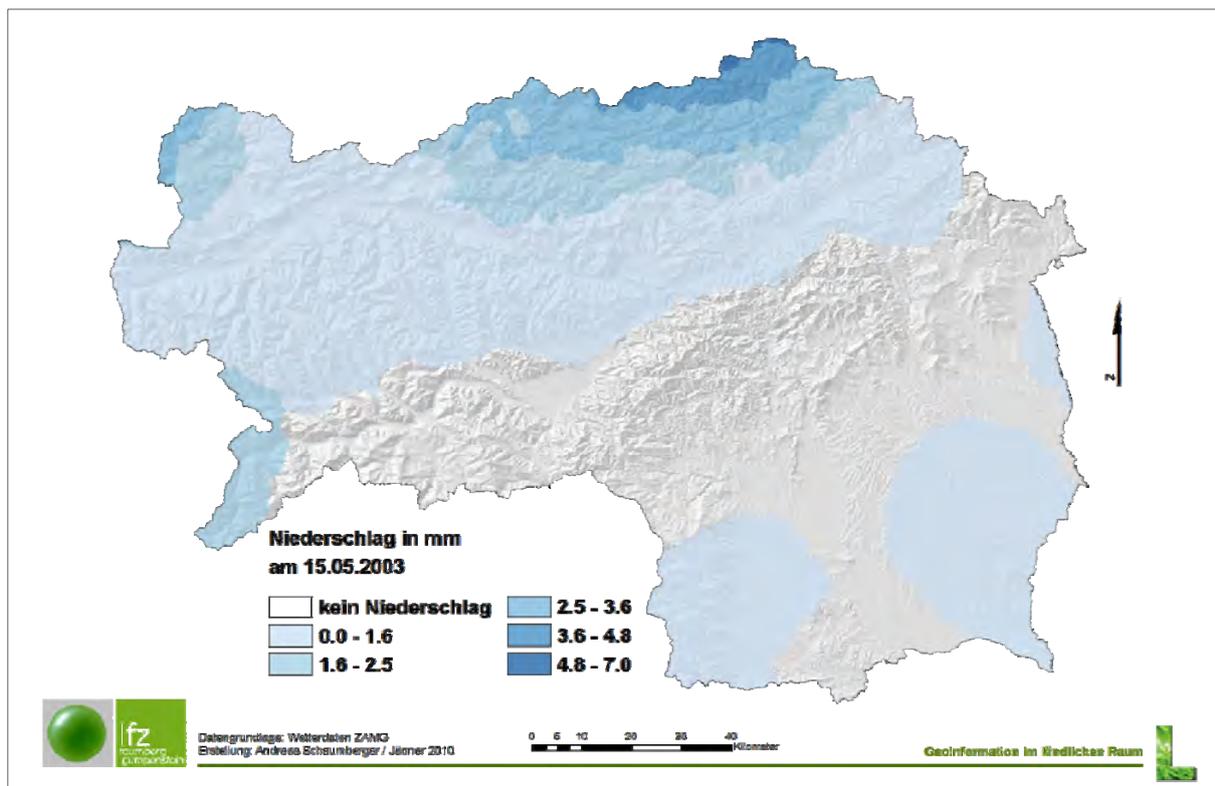


Abbildung 68: Beispiel für das räumliche Modell des Niederschlags

Abgesehen von Niederschlag und Verdunstung spielen bei der Bodenwasserbilanzierung noch eine Reihe weiterer Faktoren wie zum Beispiel der Oberflächenabfluss und der Kapillarhub eine Rolle, auf deren Berücksichtigung jedoch aus den für die GIS-Applikation notwendigen Vereinfachungsgründen verzichtet werden musste.

Für die Berechnung der aktuellen Evapotranspiration, welche letztlich für die Bestimmung der Wasserverfügbarkeit eine zentrale Rolle spielt, ist die Entwicklung der Bodenwasserabsenkung bzw. die Tiefenversickerung als Negativseite der Wasserbilanz kumulativ für jeden Tag der Vegetationsperiode abzubilden. Als Beispiel wird in den *Abbildungen 69 bis 72* der Stand beider Faktoren zum 15.05.2003 sowohl im Ober- als auch Unterboden gezeigt. An diesem Tag ist im Süden der Steiermark bereits eine deutliche Absenkung des Bodenwasser-

gehalten festzustellen. Im Gegensatz dazu gibt es im Norden im Oberboden noch ausreichende Reserven. Im etwas träger reagierenden Unterboden herrscht Mitte Mai im ganzen Land eine markante Bodenwasserabsenkung.

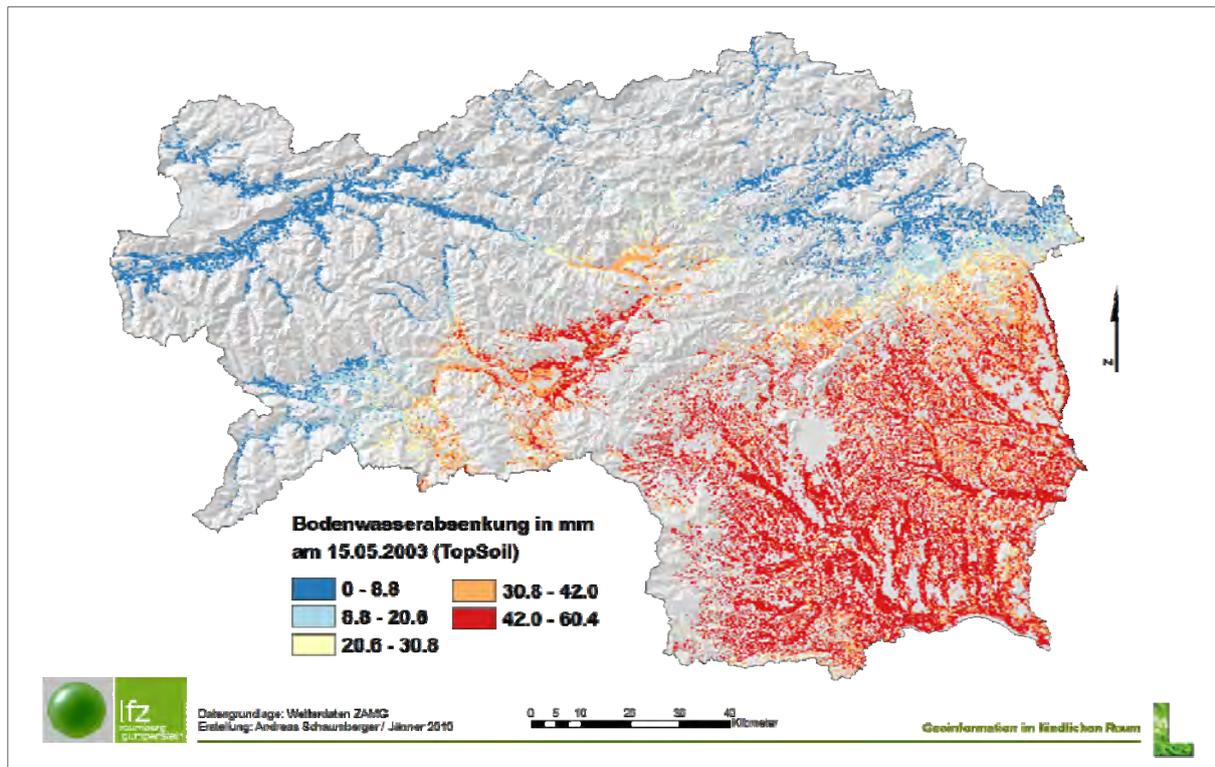


Abbildung 69: Bodenwasserabsenkung im Oberboden Mitte Mai 2003

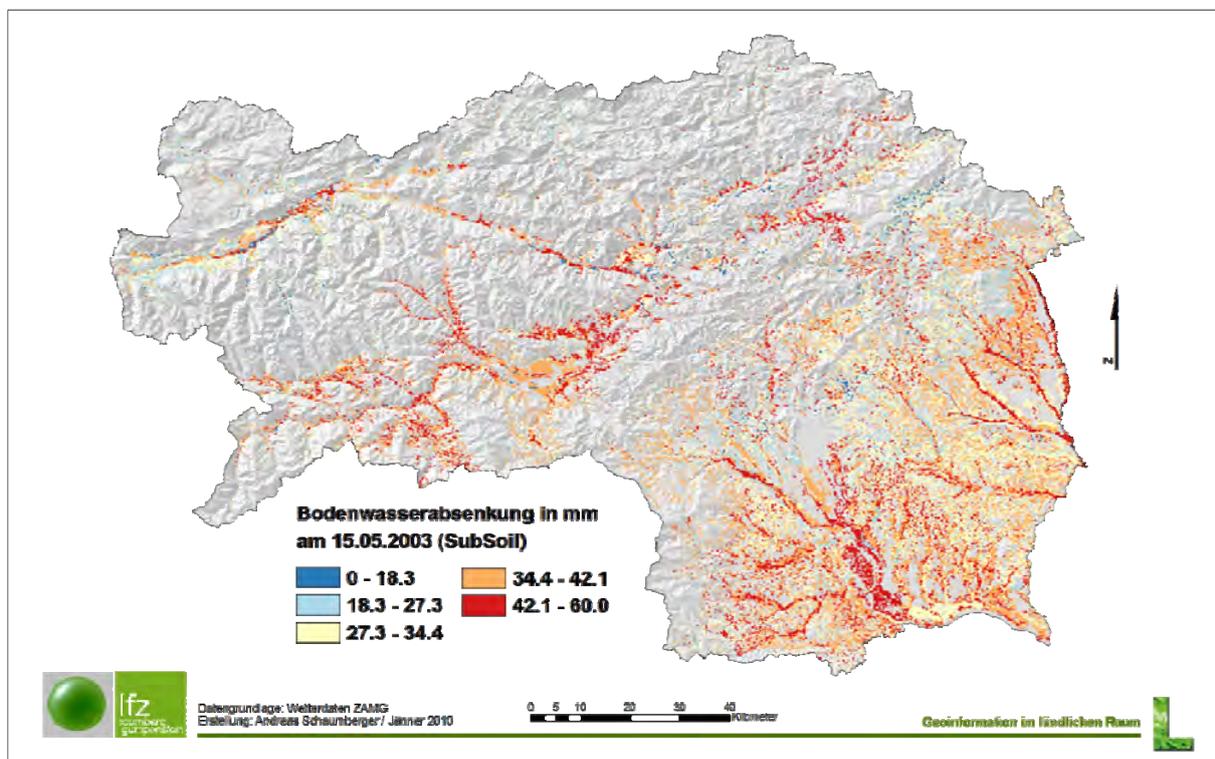


Abbildung 70: Bodenwasserabsenkung im Unterboden Mitte Mai 2003

Die Tiefenversickerung steht im direkten Zusammenhang mit der Bodenwasserabsenkung. Sie findet nur dann statt, wenn der Boden bereits ausreichend gesättigt ist und das Bodenwasser nicht mehr in der entsprechenden Bodenschicht gehalten wird.

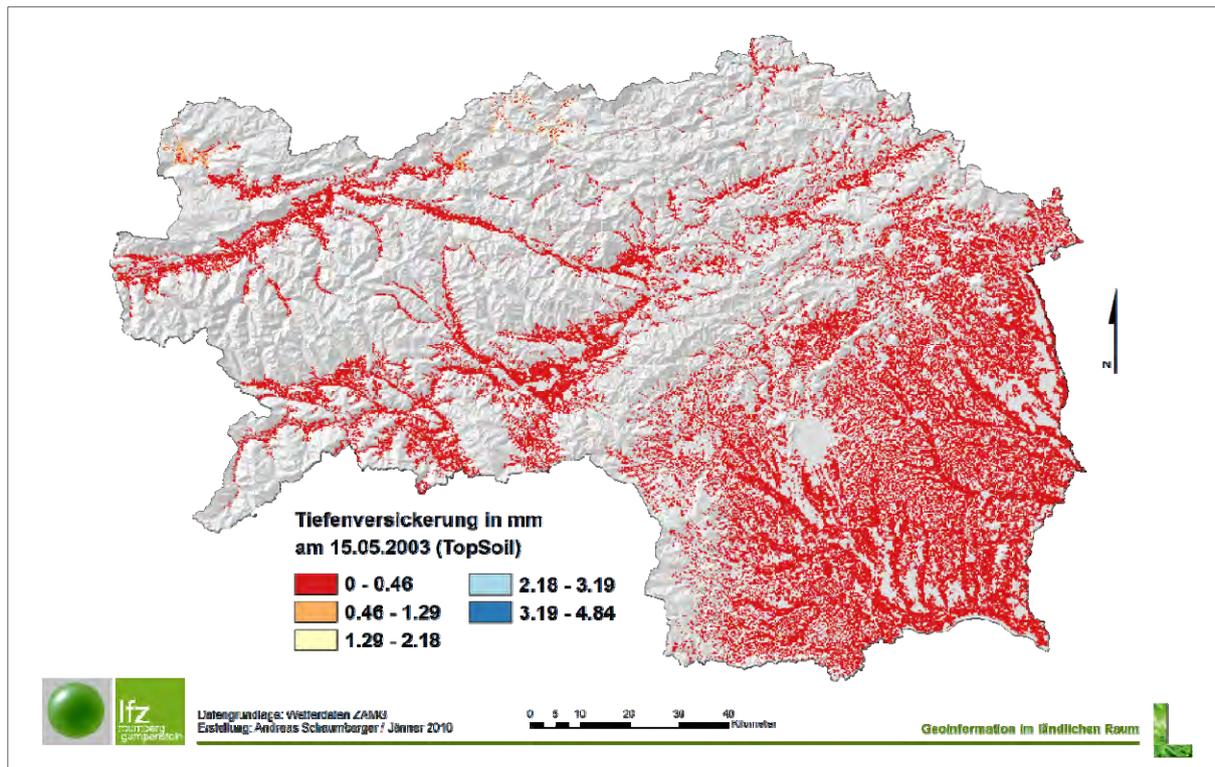


Abbildung 71: Tiefenversickerung im Oberboden Mitte Mai 2003

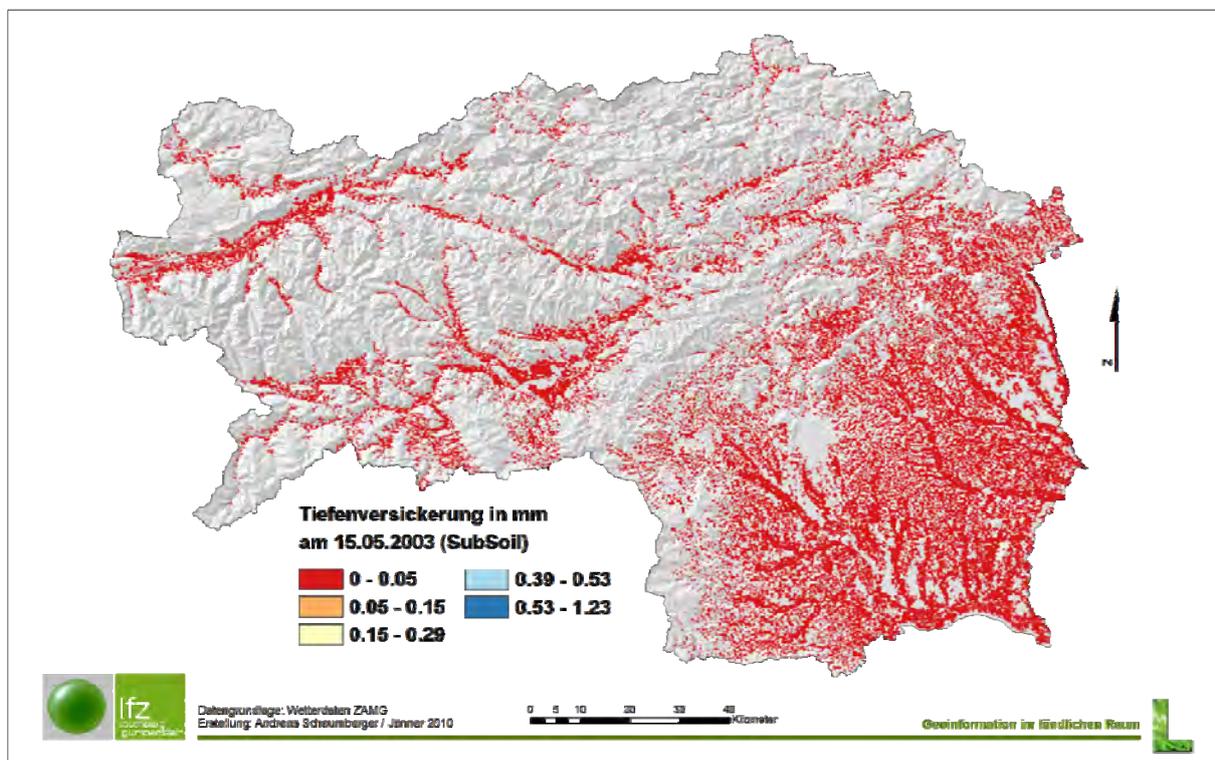


Abbildung 72: Tiefenversickerung im Unterboden Mitte Mai 2003

In beiden Bodenschichten wird kaum Wasser an darunterliegende Schichten abgegeben, da zunächst einmal die bereits stattgefundenene Bodenwasserabsenkung durch den Niederschlag aufgefüllt werden muss. Im Mai 2003 herrschte bereits in vielen Gebieten eine angespannte Situation der Wasserversorgung, die in den dargestellten Beispielen deutlich zum Ausdruck kommt. Die spärlichen Niederschläge im späten Frühjahr 2003 und die damit voranschreitende Bodenwasserabsenkung resultierten in einer Zunahme des Wasserstress, dessen Grad durch den Wasserstressfaktor zum Ausdruck kommt.

Wenn die Bodenwasserabsenkung über der leicht verfügbaren Bodenwassermenge liegt, beginnt der Wasserstressfaktor linear vom Wert 1 an abzunehmen und geht bis gegen 0, wenn die Grenze des komplett verfügbaren Bodenwassers überschritten wird und damit die Bodenwasserabsenkung ein Maximum erreicht. Wie das Beispiel am Standort Kirchberg/Walde in *Abbildung 22* zeigt, reagieren Ober- und Unterboden unterschiedlich. Während im Oberboden kleinere Niederschlagsereignisse bereits zu einer Erholung der Bodenwasserabsenkung führen, bleibt die untere Bodenschicht so lange „trocken“, bis der Oberboden vollständig gesättigt ist und damit eine Tiefenversickerung erfolgen kann.

In den *Abbildungen 73* und *74* wird am Beispiel des 15.05.2003 eine Momentaufnahme des Wasserstressfaktors für beide Bodenschichten dargestellt.

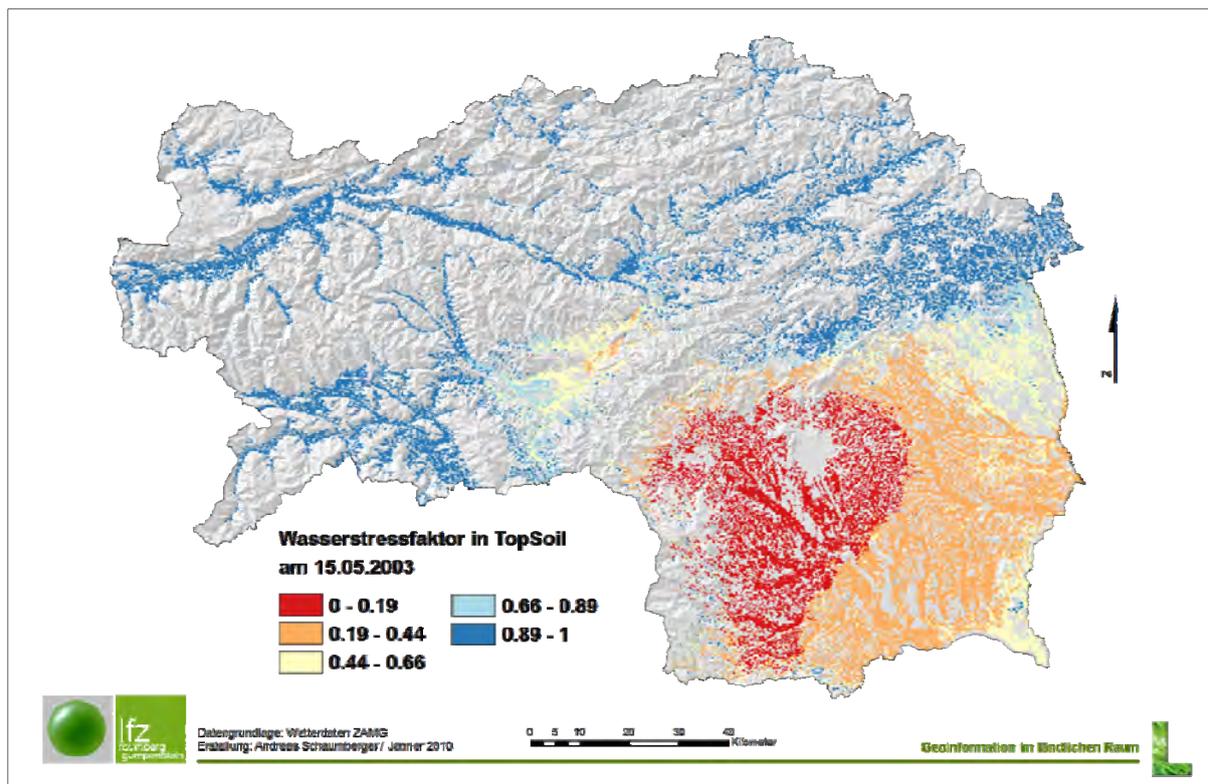


Abbildung 73: Wasserstresssituation im Oberboden Mitte Mai 2003

Im Süden der Steiermark ist dieser Faktor bereits deutlich gesunken und wirkt sich auf die Erträge des zweiten Aufwuchses eines Vierschnittregimes aus. Da die aktuelle Evapo-

transpiration für die jeweilige Bodenschicht separat gerechnet wird, spielt natürlich auch der für den Unterboden gerechnete Wert gemäß dem Proportionalitätsfaktor (0,6 für den Oberboden und 0,4 für den Unterboden) eine erhebliche Rolle. Wie in *Abbildung 74* dargestellt, ist die Stresssituation im Unterboden in den meisten Landesteilen sehr ausgeprägt und ist vor allem dann ertragswirksam, wenn diese Werte mit einem niedrigen Wasserstressfaktors im Oberboden zusammentreffen. Am Beispiel des 15.05.2003 ist dies im Süden der Steiermark weitgehend der Fall.

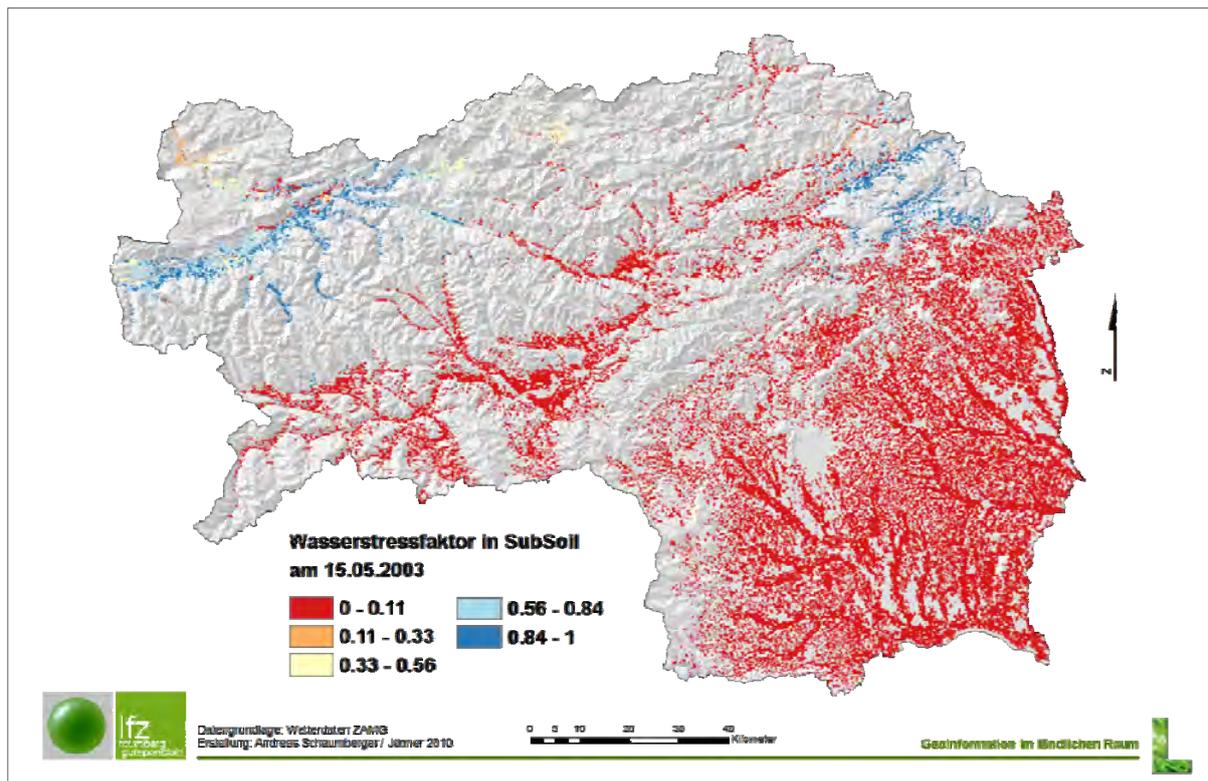


Abbildung 74: Wasserstresssituation im Unterboden Mitte Mai 2003

Nachdem die aktuelle Evapotranspiration aus der Referenz-Evapotranspiration der jeweiligen Bodenschicht und dem dazugehörigen Wasserstressfaktor (vgl. 2.5.6-12) gerechnet wurde, sind die bodenschichtabhängigen Teilergebnisse wieder zu einem Gesamtwert zusammenzuführen. Für den 15.05.2003 ergibt sich damit eine räumliche Werteverteilung der aktuellen Evapotranspiration wie sie in *Abbildung 75* gezeigt wird.

Aus dem Verhältnis von Referenz-Evapotranspiration zu aktueller Evapotranspiration wird über eine kurz- und langfristige Akkumulation die Wasserverfügbarkeit gemäß den methodischen Grundlagen (vgl. Abschnitt 2.5.7.2) errechnet. In weiterer Folge wird die Beziehung von Wasserverfügbarkeit und Wachstumsbedingungen durch ein empirisches Modell hergestellt. Die Wachstumsbedingungen, ausgedrückt im *Growth Supporting Factor*, gehen als wichtige Grundlage in die weitere Modellierung der Grünlanderträge ein und bilden im Wesentlichen den witterungsbedingten Einfluss bzw. die Konsequenzen der Wasserlimitierung auf das Wachstum ab.

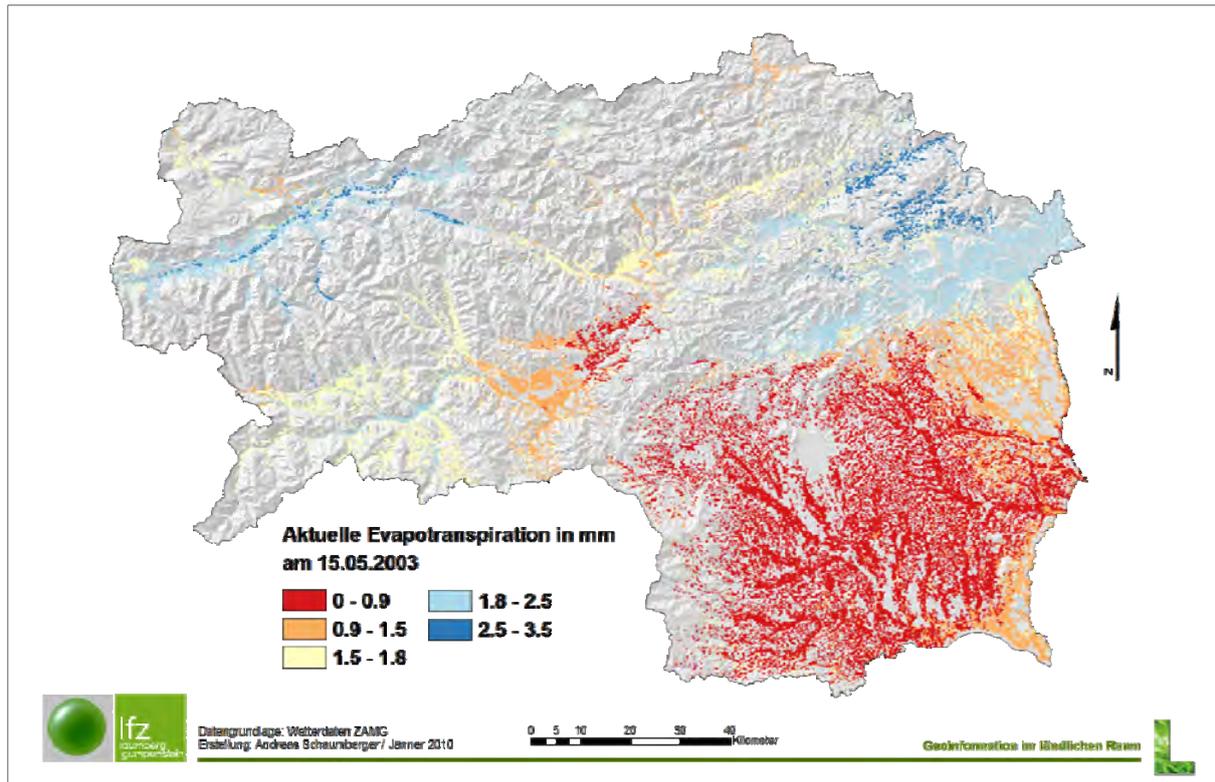


Abbildung 75: Aktuelle Evapotranspiration am 15.05.2003

4.5 Kalibrierung und Verifizierung von GRAM

Für die Kalibrierung bzw. Modellverifizierung wurden 1.159 Versuchsdaten von 21 Standorten (siehe *Abbildung 76*) über den Zeitraum 2002 bis 2009 herangezogen.

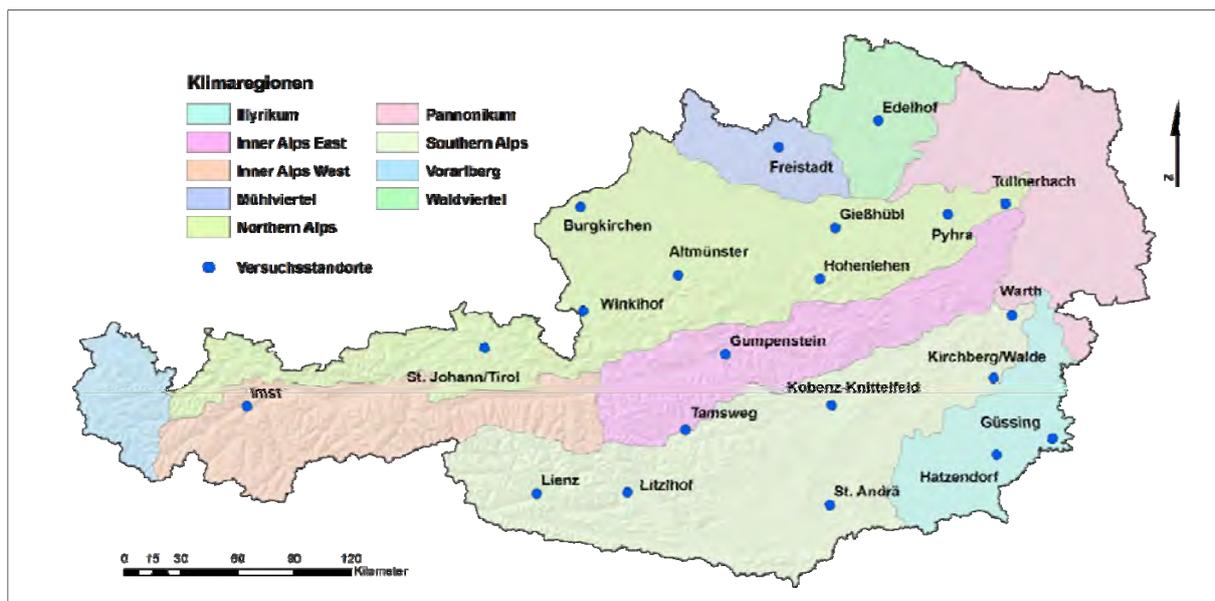


Abbildung 76: Geographische Lage von 21 Versuchsstandorten für die Modellkalibrierung

Die an den Versuchsstellen erhobenen Ernteerträge [dt TM ha⁻¹] dreier unterschiedlicher Nutzungssysteme (Zwei-, Drei- und Vierschnitte) bilden die Grundlage für die Modellentwicklung. Die Standortbedingungen sind für die optimale Wahl des Schnittsystems entscheidend; es gibt zum Beispiel Standorte, die das Potenzial einer Vierschnittnutzung nicht erfüllen. Eine Übersicht über die Schnittpotenziale ist in *Abbildung 77* dargestellt. Dazu wurden die Jahreserträge der einzelnen Standorte im Durchschnitt über alle Versuchsjahre hinsichtlich der numerischen Abstände zwischen den Schnittklassen differenziert:

| | |
|----------------------------|--|
| 2-Schnitt-Potenzial: | Differenz zwischen 2- und 3-Schnitterträgen < 2 dt/ha |
| 3-Schnitt-Potenzial: | Differenz zwischen 3- und 4-Schnitterträgen < 6 dt/ha |
| 3 bis 4-Schnitt-Potenzial: | Differenz zwischen 3- und 4-Schnitterträgen < 9 dt/ha |
| 4-Schnitt-Potenzial: | Differenz zwischen 3- und 4-Schnitterträgen \geq 9 dt/ha |

Da in der Praxis an allen Standorten sowohl extensiv als auch intensiv bewirtschaftet wird und das entwickelte Ertragsmodell sämtliche Nutzungen abdecken soll, werden die einzelnen Standorte unabhängig von ihrem Potenzial in die Modellierung einbezogen. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass dies eine Auswirkung auf die Modellgüte hat – der Zusammenhang zwischen Ertragsquantität und klimabedingten Einflüssen wird auf Grund unterschiedlicher Nutzungseignung relativiert. Die Anzahl der Schnitte hat wesentlichen Einfluss auf die Ertragsqualität, diese ist jedoch nicht Gegenstand der Untersuchung in diesem Projekt.

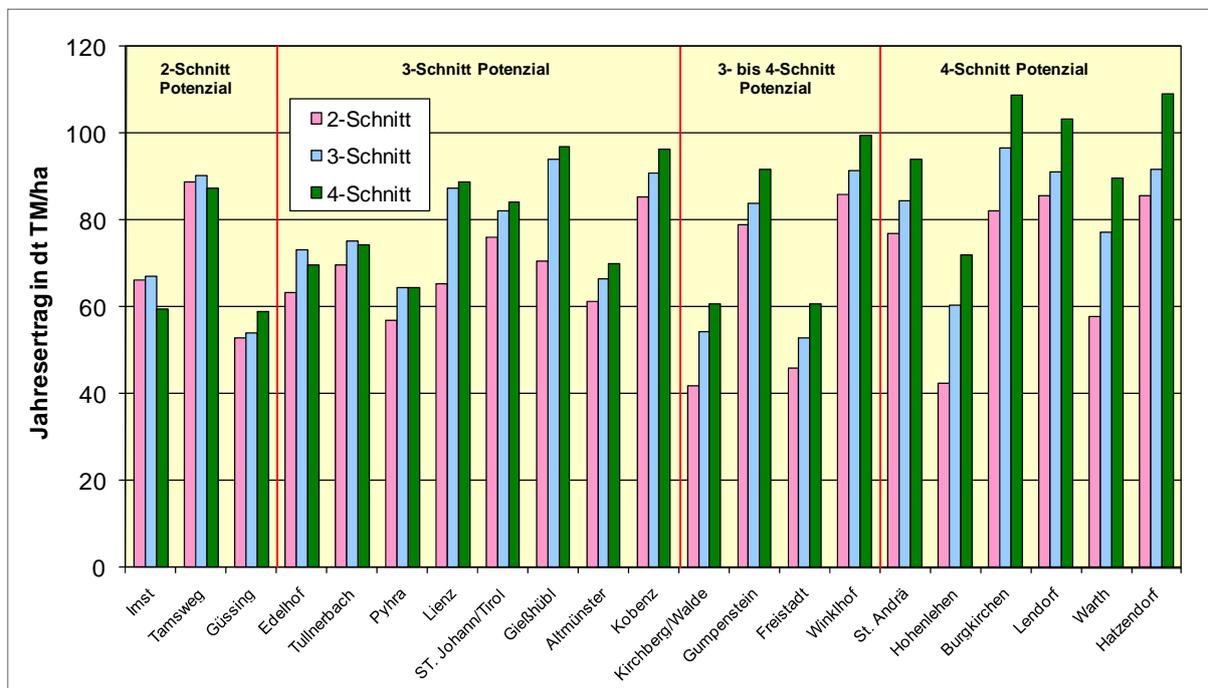


Abbildung 77: Schnittpotenzial der Standorte

Die Düngung spielt für den Ertrag eine wichtige Rolle. An allen Standorten wurde der Nutzung entsprechend gedüngt – eine Standardisierung für alle Standorte schafft jedoch für alle

Experimente weitgehend gleiche Nährstoffversorgungsbedingungen. In das Modell geht daher weder die Art der Düngung noch die Menge ein. An einigen Standorten (Gumpenstein, Winkelhof und Kobenz-Knittelfeld) wurde neben der Düngervariante Gülle auch Stallmist geprüft; in diesen Fällen wurde lediglich die Güllevariante herangezogen.

Der gesamte Datensatz der Grünlandversuche wurde auf jene Versuchsjahre eingeschränkt, in denen sämtliche Aufwüchse der einzelnen Schnittregime erhoben wurden. Weiters wurden Obergrenzen für den Jahresertrag festgesetzt (2-Schnitt-Regime: 90 dt/ha; 3-Schnittregime: 110 dt/ha; 4-Schnittregime: 120 dt/ha) und alle Aufwüchse ausgeschlossen, welche in Summe diese Grenze überschritten haben.

4.5.1 Datenaufbereitung zur Modellkalibrierung

Zur Modellschätzung wurde für den gesamten Datensatz eine robuste Regression, implementiert als MM-Estimator, verwendet (Ripley, 2004, Yohai, 1987). Diese Methode verwendet zur Schätzung der Regressionsparameter den gesamten Datensatz, allerdings werden die Beobachtungen gewichtet, sodass potenzielle Ausreißer weniger Einfluss auf die Regression haben (vgl. *Abbildung 78*).

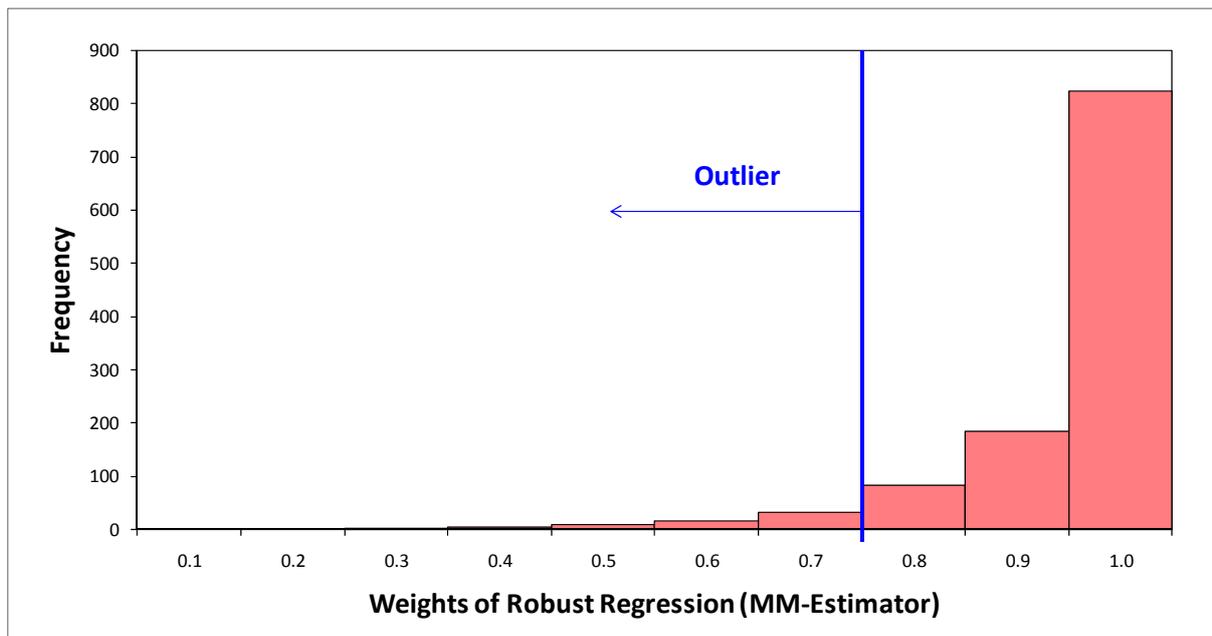


Abbildung 78: Ausreißerqualifizierung durch Datenpunktgewichtung aus einer robusten Regression

Weiters wurde eine *Least Squares (LS) Regression* auf alle Beobachtungen, welche ein aus der robusten Regression ermitteltes Gewicht von mindestens 0,8 erhielten, berechnet. Mit Hilfe der LS-Regression können übliche Kenngrößen wie z.B. Bestimmtheitsmaß berechnet werden, um das Modell mit anderen Modellen vergleichbar zu machen. Die robuste Schätzung unterscheidet sich nicht wesentlich von der LS-Schätzung, für welche der Datensatz um die Ausreißer bereinigt wurde.

Die angewandte Methode führt zu 66 Datensätzen, welche mit einem Gewicht unter 0,8 in die Schätzung eingehen und in weiterer Folge als Ausreißer betrachtet werden. Zwischen den verschiedenen Einflussparametern herrschen zahlreiche Wechselbeziehungen, die für die Beurteilung eines Datenpunktes als Ausreißer entscheidend sind. Die betroffenen Datensätze wurden mit Hilfe von Häufigkeitsanalysen, eines eingehenden Vergleiches mit dem Gesamtdatensatz unterzogen.

Dabei konnten keine Auffälligkeiten in der Verteilung von einzelnen Jahren, Schnittregimen oder Aufwüchsen festgestellt werden. Drei Versuchsstationen (Hatzendorf, Freistadt und Edelhof) sind allerdings mit knapp 40 % in diesen 66 Datensätzen vorhanden. Die Experimente mit niedrigen Erträgen werden im Ausreißerdatensatz überdurchschnittlich repräsentiert – 62,1 % weisen Erträge bis 15 dt/ha auf. Gruppieren nach Schnittregimen zeigt sich, dass bei einem Zweischnittregime die überdurchschnittlich niedrigen Werte von unter 20 dt/ha mit knapp 70 % vertreten sind und drei Werte (19 %) extrem hohe Erträge aufweisen. Beim Dreischnittsystem verhält es sich ähnlich: 70 % weisen weniger als 15 dt/ha auf und drei Werte (16 %) sind extrem hoch. Beim Vierschnittsystem liegen 60 % der Werte bei einem Ertrag von maximal 10 dt/ha und sechs Werte sind mit über 30 dt/ha sehr hoch.

4.5.2 Modellverifizierung

Für die Variablenselektion wurde mit einem Modell mit allen zur Verfügung stehenden Variablen und ihrer Kreuzprodukte gestartet und mittels Kreuzvalidierung ($\frac{3}{4}$ der Daten als Trainingsdatensatz, $\frac{1}{4}$ der Daten als Testdatensatz) schrittweise die Anzahl an Variablen reduziert, so dass durch Eliminierung einer Variable kein Informationsverlust bzw. die Prognose am Testdatensatz verbessert wurde. Anschließend wurden diejenigen nicht signifikanten Variablen entfernt, welche so gut wie keinen Erklärungswert hatten.

In *Tabelle 2* werden die Variablen und Koeffizienten inklusive der kategorialen Variablen für die Schnittnutzung (Cuts2, Cuts3 und Cuts4) und den Aufwuchs (Growth2, Growth3 und Growth4) aufgelistet. Das Modell insgesamt ist als hoch signifikant einzustufen. Fast alle einbezogenen Regressoren sind hochsignifikant; die nicht signifikanten Regressoren, vor allem jene der kategorialen Cut-Kreuzprodukte, wurden im Modell belassen, da sie die Güte der Vorhersage verbessern.

Die Ergebnisse in *Tabelle 2* müssen unter Berücksichtigung der transformierten abhängigen Variablen DM (Dry Matter) gesehen werden. Die nicht transformierte Variable wurde einem Test auf Normalverteilung unterzogen und weicht nach Lilliefors mit einem $p = 0,000$ signifikant von einer Normalverteilung ab. Für die mittels Quadratwurzel transformierten Werte kann mit einem Signifikanzniveau $p = 0,200$ Normalverteilung angenommen werden. In *Abbildung 79* wird mit der Darstellung des Histogramms der originalen und transformierten Zielvariable DM die Notwendigkeit und das Ergebnis der Transformation veranschaulicht.

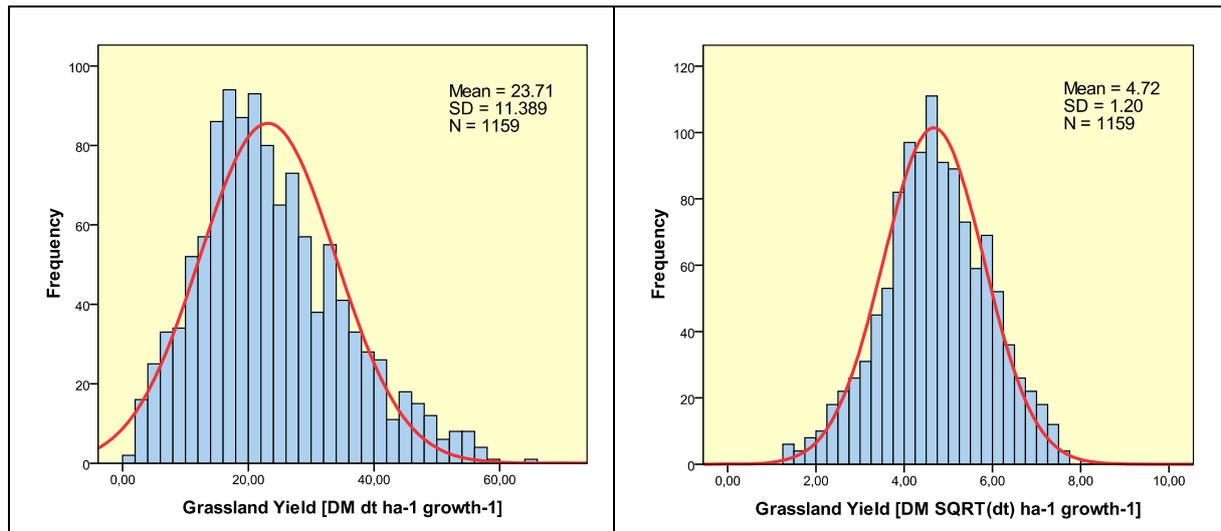


Abbildung 79: Verteilung der abhängigen Variable DM vor und nach der Transformation

Das Modell ist durch die relativ geringe Anzahl an Regressoren robust, eine wichtige Voraussetzung für die Implementierung in GIS.

Tabelle 2: Variablen und Koeffizienten des Grünland-Ertragsmodells (eingeschränkter Datensatz)

| Residuals | Min | 1Q | Median | 3Q | Max |
|-----------|----------|----------|---------|---------|---------|
| | -1.51613 | -0.50193 | 0.02322 | 0.52395 | 1.45423 |

| Coefficients | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) | Sign.Code |
|---------------|------------|------------|---------|----------|-----------|
| (Intercept) | 2.328766 | 0.227659 | 10.229 | 0.000 | *** |
| Te_T | 31.91136 | 6.051679 | 5.273 | 0.000 | *** |
| Ge | 2.67396 | 0.421972 | 6.337 | 0.000 | *** |
| Ge_G | -32.405509 | 6.108266 | -5.305 | 0.000 | *** |
| Cuts2:Te | -0.019538 | 0.081999 | -0.238 | 0.812 | |
| Cuts3:Te | 0.071678 | 0.062672 | 1.144 | 0.253 | |
| Cuts4:Te | 0.171514 | 0.054702 | 3.135 | 0.002 | ** |
| Ge:Cuts3 | -0.055245 | 0.025764 | -2.144 | 0.032 | * |
| Ge:Cuts4 | -0.119092 | 0.034804 | -3.422 | 0.001 | *** |
| Te:Growth2 | -0.057207 | 0.012222 | -4.681 | 0.000 | *** |
| Te:Growth3 | -0.130537 | 0.014744 | -8.854 | 0.000 | *** |
| Te:Growth4 | -0.163553 | 0.017415 | -9.392 | 0.000 | *** |
| Te:Duration | 0.00465 | 0.007449 | 0.624 | 0.533 | |
| Ge:Duration | -0.022581 | 0.007729 | -2.922 | 0.004 | ** |
| Ge_G:Duration | 0.251902 | 0.066426 | 3.792 | 0.000 | *** |
| Te_T:G | -2.432307 | 0.423936 | -5.737 | 0.000 | *** |
| Te_T:Ge | 0.081361 | 0.039742 | 2.047 | 0.041 | * |

Significance codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.1 '.' 1

Cuts and Growth are categorical variables.

Multiple R-squared: 0.633, Adjusted R-squared: 0.6275

Residual standard error: 0.6895 on 1076 degrees of freedom

F-statistic: 116 on 16 and 1076 DF, p-value: < 2.2e-16

In *Abbildung 80* ist das Schätzergebnis mit einer grafischen Trennung der Gewichteklassen aus der robusten Regression (vgl. *Abbildung 80*) dargestellt. Die statistischen Kennzahlen beziehen sich auf jene Werte, welche Gewichte $\geq 0,8$ aufweisen. Das Modell zeigt einen mittelstarken Zusammenhang, wobei durch die Methode der robusten Regression sämtliche Beobachtungen an den 21 Standorten mit den entsprechenden Gewichten einbezogen wurden. Die Schätzwerte wurden für die Interpretation des Ergebnisses in *Abbildung 80* der Zieleinheit wieder angepasst und deshalb quadriert.

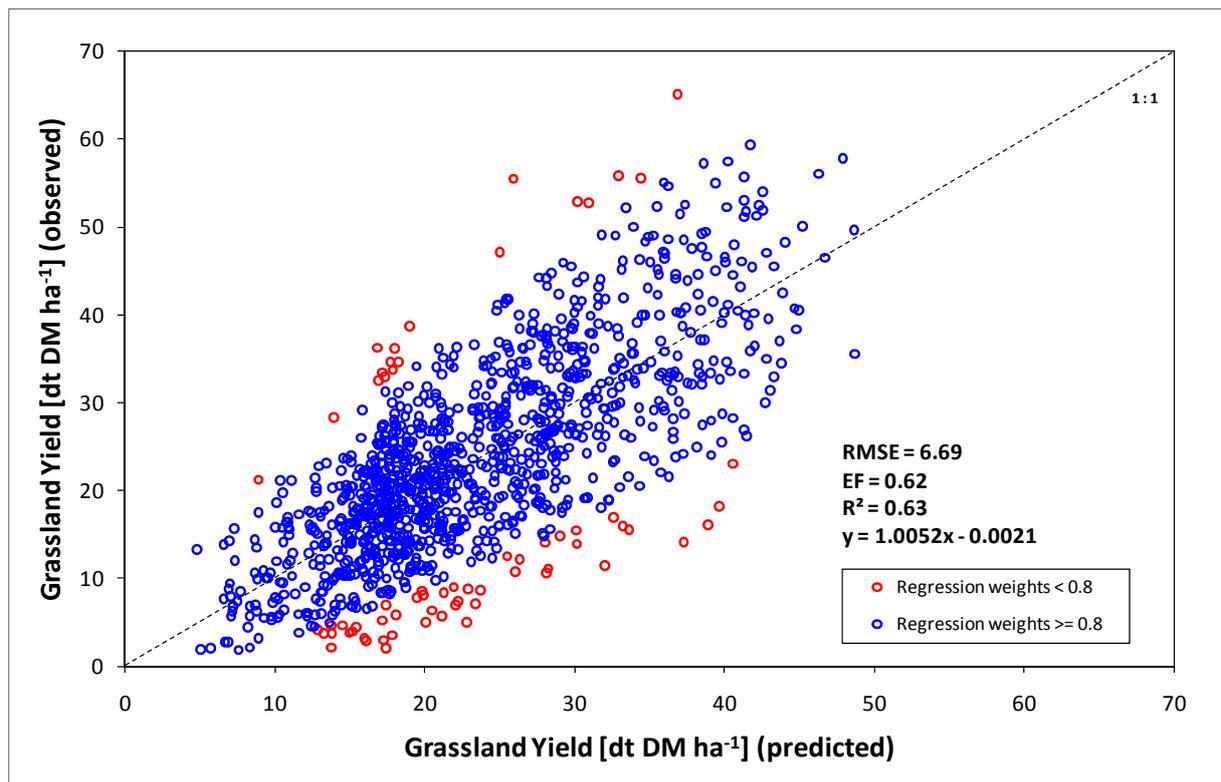


Abbildung 80: Schätzung der Grünlandernteerträge unter Berücksichtigung aller Beobachtungen, gewichtet nach ihrem Einfluss auf die Robuste Regression

Eine farbliche Auftrennung hinsichtlich des Schnittsystems in *Abbildung 81* zeigt höhere Einzelaufwuchserträge beim Zweischnittsystem (längere Aufwuchsdauer) und geringere Erträge im Vierschnittsystem. Eine systematische Verzerrung ist nicht zu beobachten und deshalb kann der Einsatz des entwickelten Modells für unterschiedliche Bewirtschaftungsintensitäten als geeignet angesehen werden.

Die Schätzung für einzelne Jahre ergab ebenfalls keine systematischen Verzerrungen. In *Abbildung 82* sind beispielhaft die beiden Versuchsjahre 2003 und 2008 dargestellt. Der Sommer 2003 war durch eine extreme Trockenheit gekennzeichnet und führte beim Grünland zu deutlichen Mindererträgen. Im Jahr 2008 herrschten gute Wachstumsbedingungen – die Erträge erreichten im Mittel die höchsten Werte im gesamten Versuchszeitraum (2002 bis 2009).

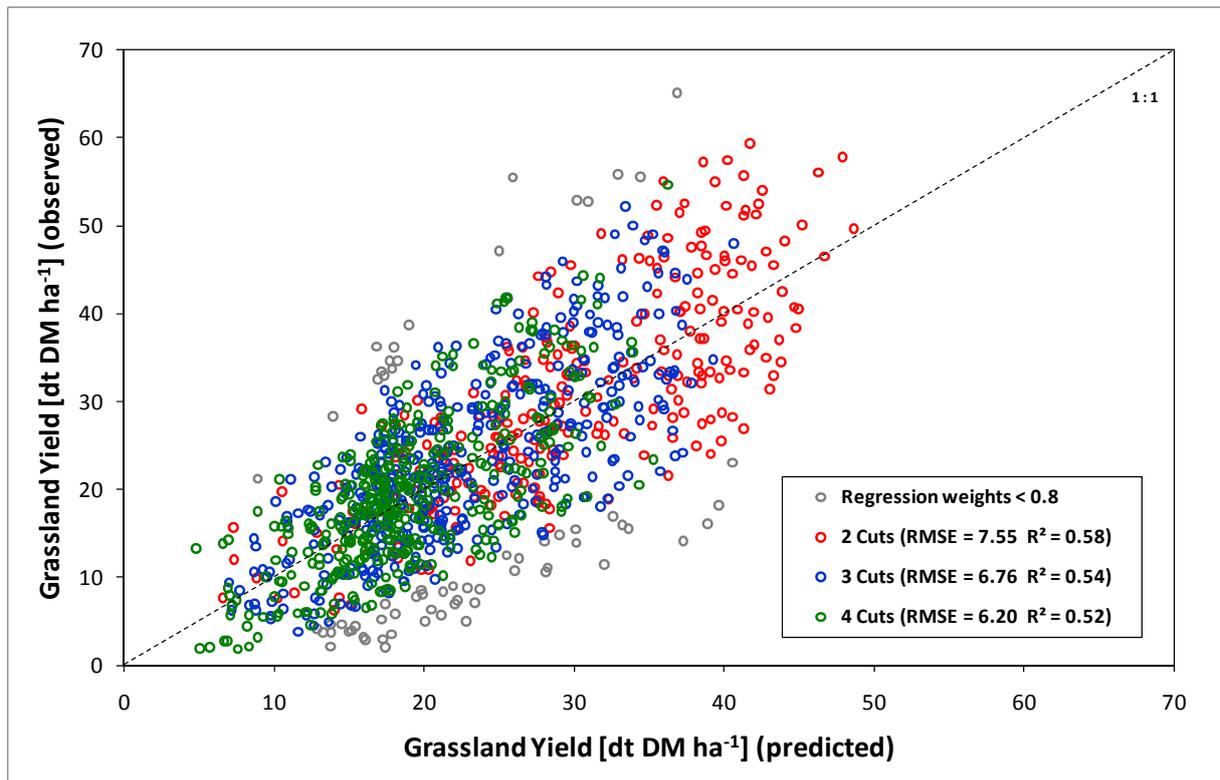


Abbildung 81: Anwendung des Modells zur Schätzung der Grünlandernteerträge für unterschiedliche Nutzungsfrequenzen

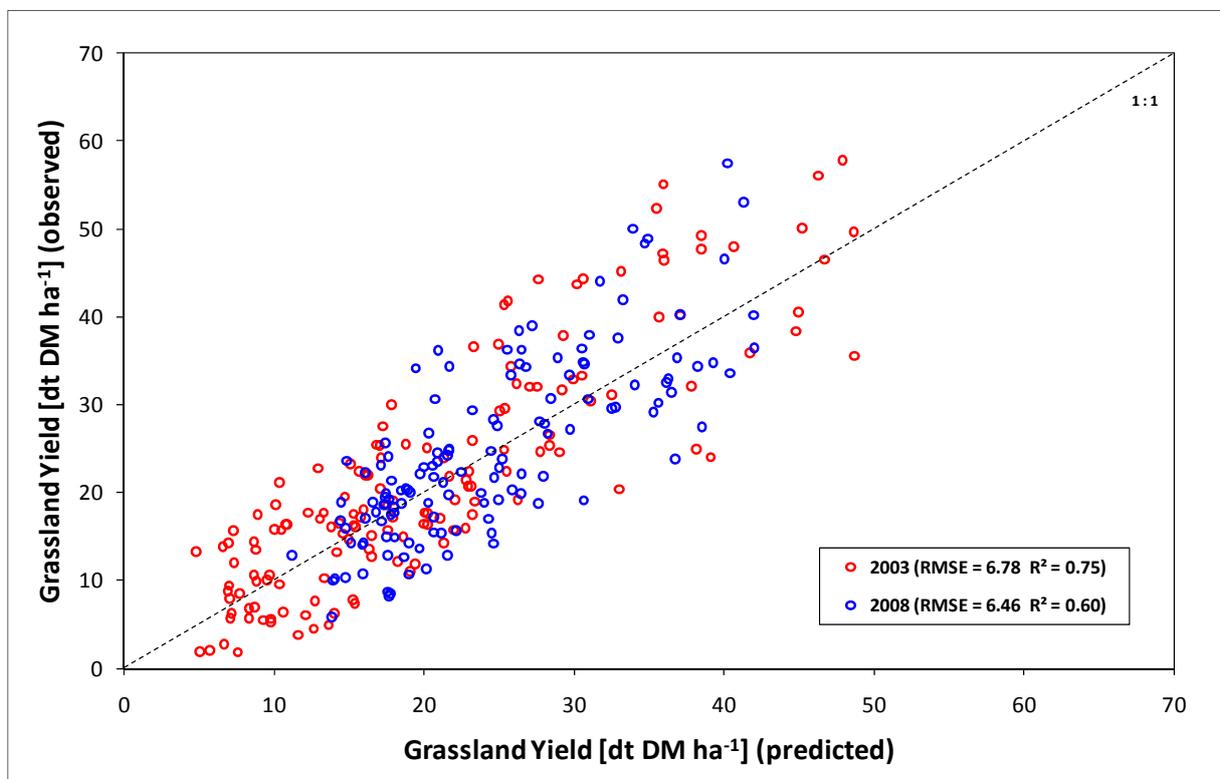


Abbildung 82: Anwendung des Modells zur Schätzung der Grünlandernteerträge für die ausgewählten Jahre 2003 und 2006

Die Unterschiede in den Einzelaufwuchserträgen werden auch in *Abbildung 82* abgebildet und zeigen bei den hohen Zweischnitterträgen kaum eine Beeinträchtigung durch das Extremjahr 2003. Im niedrigen Ertragsniveau zeigt sich allerdings ein deutlicher Effekt des Trockenjahres. Standardfehler und Bestimmtheitsmaß verhalten sich ähnlich, d.h. das Modell bildet die Bandbreite verschiedener klimatischer Bedingungen, insbesondere das Schätzverhalten bei niedriger Wasserverfügbarkeit, wie es im Jahr 2003 zu beobachten war, gut ab.

Zusammenfassend ist in *Abbildung 83* der Vergleich von Schätz- und Beobachtungswerten hinsichtlich Fehler (Mean Absolute Error - MAE) und Zusammenhang (Correlation Coefficient - R) für alle Schnittsysteme und für die einzelnen Versuchsjahre dargestellt. Im Versuchsjahr 2003 ist ein etwas stärkerer Zusammenhang zu beobachten, da sich hier der Einfluss der massiven Trockenheit besonders deutlich auf den Ertrag niedergeschlagen hat.

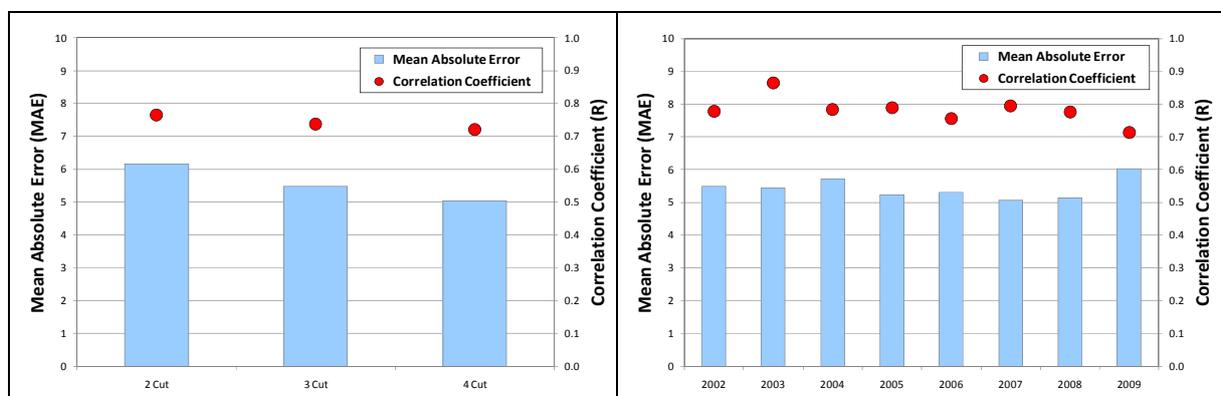


Abbildung 83: Vergleich von Fehler und Zusammenhang zwischen Schätz- und Beobachtungswerten für die einzelnen Schnittsysteme und Versuchsjahre

Die Einbeziehung von 21 unterschiedlichen Standorten ist für eine Ertragsschätzung in ganz Österreich eine wesentliche Voraussetzung, für die Modellentwicklung allerdings eine Herausforderung. Im Gegensatz zur Kalibrierung auf einzelnen Standorten sind bei diesem Ansatz nicht alle Einflussfaktoren vollständig abzudecken. Beispiele dafür sind die Nährstoffverhältnisse im Boden oder die exakte Pflanzenbestandszusammensetzung. Prädiktoren, welche nicht allgemein in eine kontinuierliche Oberfläche zu transformieren sind, wie das bei Klimaparametern oder topographischen Charakteristika der Fall ist, können für eine flächendeckende Applikation des Modells nicht herangezogen werden. Die Modellgüte sinkt daher naturgemäß.

Das entwickelte Modell schätzt die Erträge an den verschiedenen Standorten unterschiedlich gut – wichtig ist allerdings die Anwendbarkeit auf allen Standorten. In *Abbildung 84* werden die Ergebnisse an zwei Standorten präsentiert, die sich in zwei unterschiedlichen Klimaregionen befinden. In beiden Fällen herrscht ein starker Zusammenhang zwischen geschätzten und beobachteten Werten. Auch im Vergleich der einzelnen Stationen können extreme systematische Verzerrungen ausgeschlossen werden.

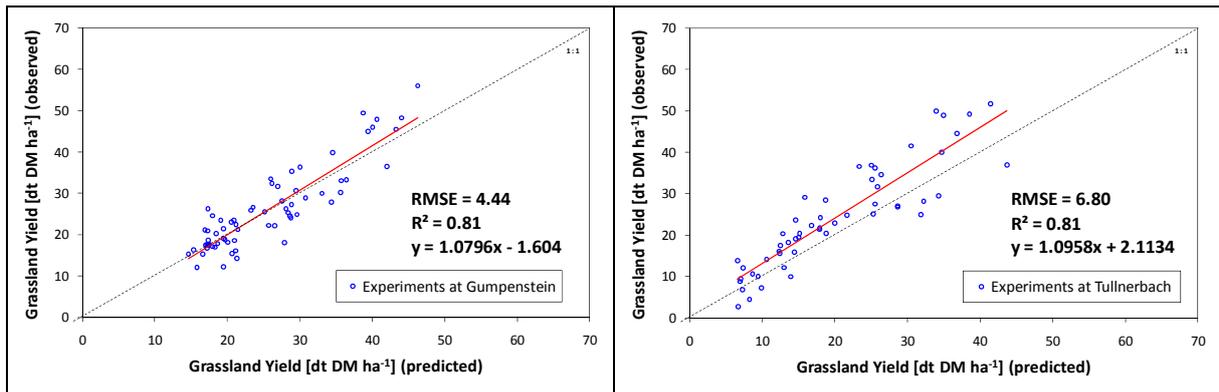


Abbildung 84: Anwendung des Modells zur Schätzung der Grünlandernteerträge auf den ausgewählten Standorten Gumpenstein und Tullnerbach

In *Abbildung 85* wird der Vergleich von Schätzung und Beobachtung mit Hilfe der Parameter MAE und R beschrieben. Sowohl der Fehler als auch der Zusammenhang schwanken an den Versuchsstationen, bleiben jedoch innerhalb einer Variationsbreite, welche die Anforderung an das Modell für eine österreichweite Anwendung erfüllt.

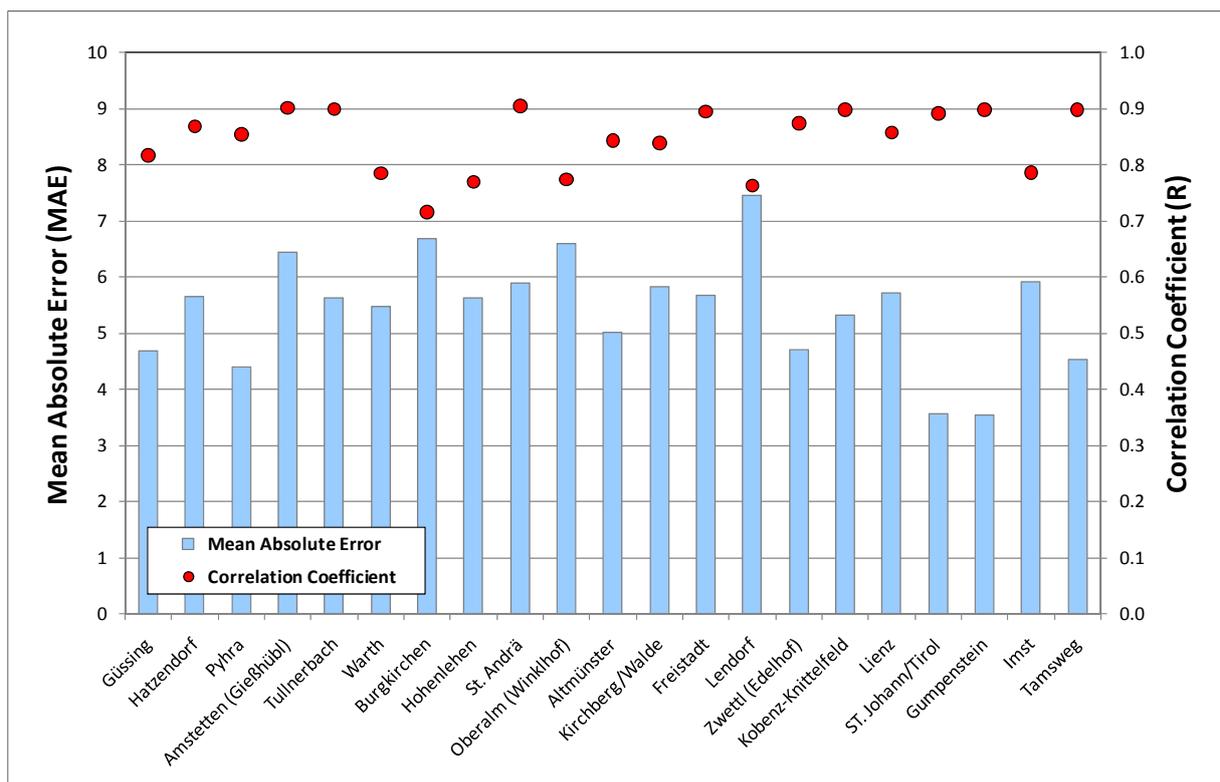


Abbildung 85: Vergleich der von Fehler und Zusammenhang zwischen Schätz- und Beobachtungswerten an allen einbezogenen Standorten

Die geographische Präsentation der in *Abbildung 85* gezeigten Zusammenhänge und Fehler ist in den beiden nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

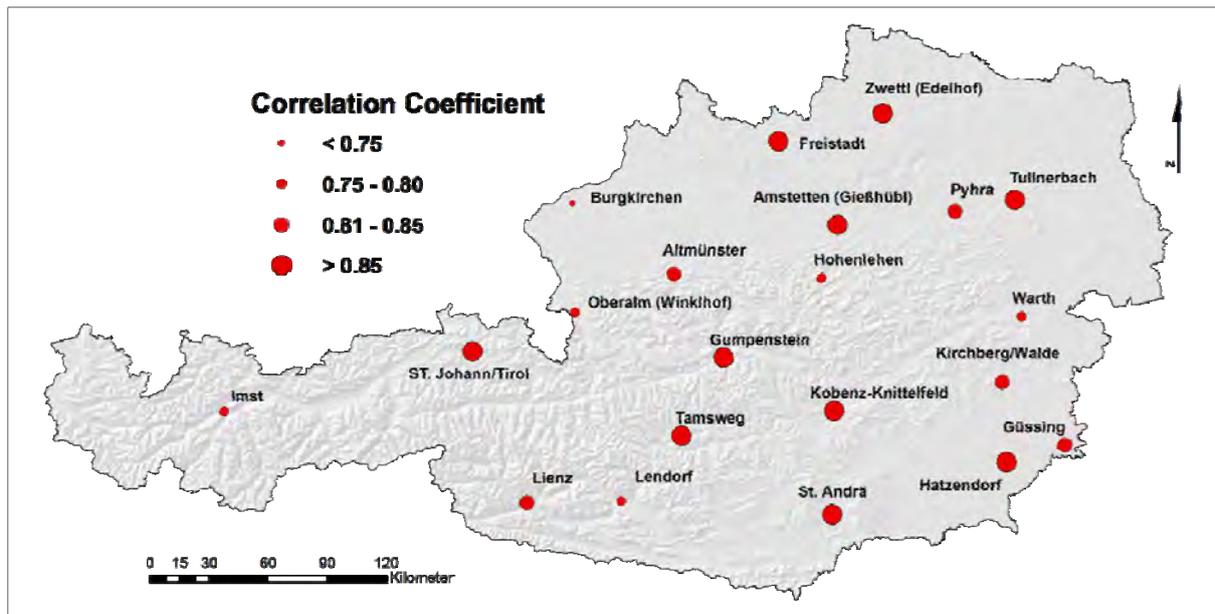


Abbildung 86: Räumliche Verteilung der Versuchsstandorte mit dem Korrelationskoeffizienten für die jeweiligen Standorte

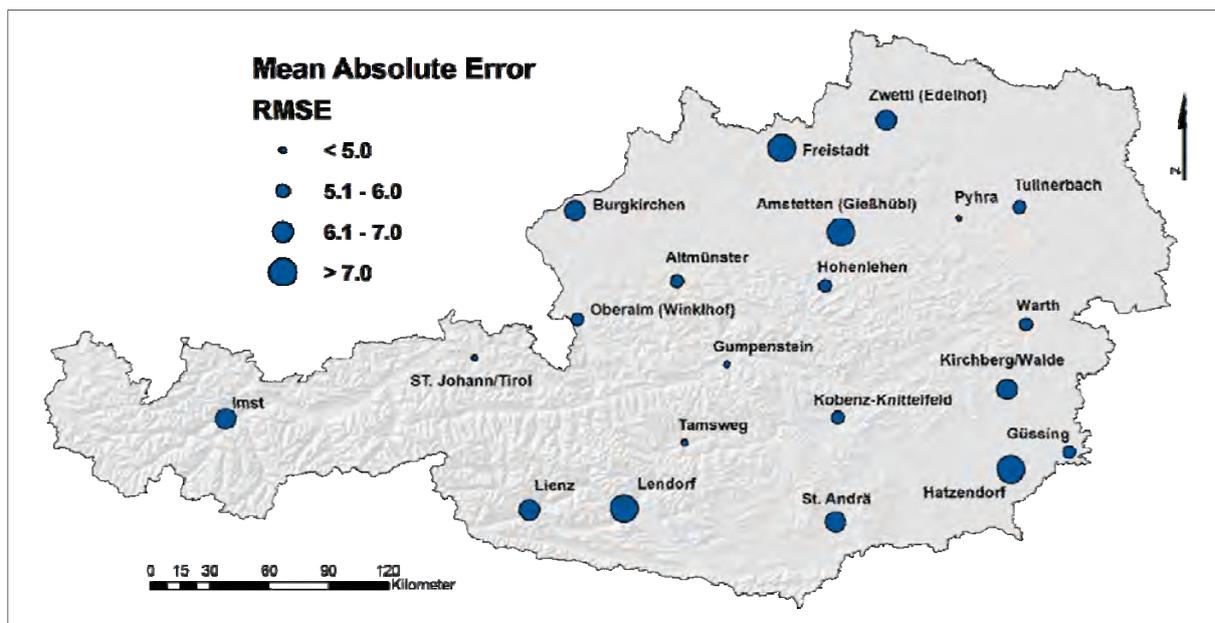


Abbildung 87: Räumliche Verteilung der Versuchsstandorte mit dem RMSE für die jeweiligen Standorte

Die unterschiedliche Stärke des Zusammenhangs und damit auch die Streuung bzw. der Fehler an den einzelnen Stationen hängt von zahlreichen Faktoren ab. Zunächst spielt die Eignung eines Standortes für ein bestimmtes Nutzungsregime eine große Rolle. Wie in *Abbildung 77* dargestellt, ist die Mehrheit der einbezogenen Standorte nicht in der Lage, ausreichende Ernteerträge für ein Vierschnittsystem zu erreichen – dem Schnittpotenzial sind natürliche Grenzen gesetzt. In der vorliegenden Arbeit wurden sämtliche Ertragswerte unabhängig vom Standortpotenzial einbezogen, damit das Modell in der Lage ist, für alle Regionen Österreichs die Erträge aller Schnittsysteme und Nutzungsintensitäten abzubilden. Allerdings muss dabei in Kauf genommen werden, dass Spannungen auftreten, welche die Gesamtperformance

des Modells beeinträchtigen. Beispiel: Auf einem potenziellen Zweischnittstandort wird der Ertrag eines Vierschnittregimes in Beziehung zu den Modellregressoren gesetzt. Aufgrund der beschränkten Leistungsfähigkeit dieses Standortes, welcher durch die Modellparameter nicht quantifizierbar ist, wird der Vierschnitttertrag zu niedrig angesetzt. Die Konsequenz daraus ist eine generelle Unterschätzung von höheren Erträgen in einem Vierschnittsystem.

Neben den verschiedenen Standortbedingungen und -potenzialen spielt auch die Versuchsbetreuung eine große Rolle. Die einzelnen Versuchsstandorte werden von unterschiedlichen Personen betreut und dabei kommt es naturgemäß zu Unterschieden in der Beziehung zwischen Modellparametern und erhobenen Erträgen. Diese Abweichungen können im Modell nicht erfasst werden und tragen zusätzlich zu Verzerrungen im Gesamtmodell bei, die sich auf den einzelnen Standorten hinsichtlich des Zusammenhangs und Fehlers mehr oder weniger stark auswirken. Der wahrscheinlich größte, nicht vom Modell erfasste Einfluss auf die Grünlanderträge ist in der von Standort zu Standort unterschiedlichen Zusammensetzung des Pflanzenbestandes zu sehen. Hier spielt auch die unterschiedliche Veränderung des Bestandes im Laufe des Versuchszeitraums eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Weitere unberücksichtigte Einflussfaktoren sind die Abweichungen des exakten Wasserhaltevermögens von den im Modell berücksichtigten Bodeninformationen sowie die auf kleinklimatische Effekte zurückzuführende Unterschiede im Vergleich zu den im Modell verwendeten und interpolierten Oberflächenmodelle der Wetterparameter.

Die genannten Aspekte zeigen den möglichen Fehlerraum auf und die Leistungsfähigkeit des Modells ist unter Berücksichtigung dieser unbekanntenen Einflussfaktoren zu bewerten. Aus den *Abbildungen 86* und *87* geht klar hervor, dass kein räumlicher Trend der Modellperformance nachgewiesen werden kann; es gibt keine grundsätzliche Bevorzugung von trockenen oder feuchten Standorten und von Flach- oder Berglandstationen.

Kreuzvalidierung

Als Trainingsdatensatz wurden $\frac{3}{4}$ der Daten herangezogen, für den Testdatensatz $\frac{1}{4}$ der Beobachtungen. Die durchschnittliche mittlere absolute Abweichung bei 1000 zufälligen Durchläufen ergab $5,5 \text{ dt TM ha}^{-1}$ (vgl. *Tabelle 3* und *Tabelle 4*).

Tabelle 3: Vergleich der absoluten Fehler in dt TM ha⁻¹ für alle Standorte im Zeitraum 2002 bis 2007

| Absolutfehler | Min | 1Q | Median | Mean | 3Q | Max |
|-----------------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| Gesamter Datensatz(n=1159) | 7.371 | 7.688 | 7.834 | 7.857 | 8.010 | 8.512 |
| Eingeschränkter Datensatz(n=1093) | 5.025 | 5.341 | 5.481 | 5.485 | 5.649 | 6.057 |

Tabelle 4: 95%-Konfidenzintervall des mittleren absoluten Fehlers (aus Kreuzvalidierung ($\frac{1}{4}$ Testdatensatz)) in dt TM ha⁻¹ für alle Standorte im Versuchszeitraum 2002 bis 2007

| Absolutfehler | Min | Mean | Max |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| Gesamter Datensatz(n=1159) | 7.395 | 7.857 | 8.410 |
| Eingeschränkter Datensatz(n=1093) | 5.105 | 5.485 | 5.922 |

4.6 Räumliche Modellierung der Grünlandertragsschätzungen

Im Gegensatz zu einer standortbasierten Anwendung des Modells, dessen Eigenschaften im Abschnitt 4.5 dargestellt wurden, geht es im vorliegenden Projekt um eine Übertragung der Standortinformation auf eine kontinuierliche Fläche. Die Schätzung von Grünlanderträgen soll für jede Rasterzelle der im GIS aufbereiteten Oberflächen durchgeführt werden können. Eine Voraussetzung dafür ist die Verfügbarkeit jedes einzelnen Prädiktors in sämtlichen Rasterzellen des Untersuchungsgebietes. Es muss also schon bei der Modellentwicklung selbst bekannt sein, welche Prädiktoren sich für die Implementierung als räumliche Modelle eignen. In *Abbildung 88* werden die einzelnen, für die räumliche Anwendung notwendigen Komponenten und deren Kombination (Gewichtung sowie Akkumulation) dargestellt.

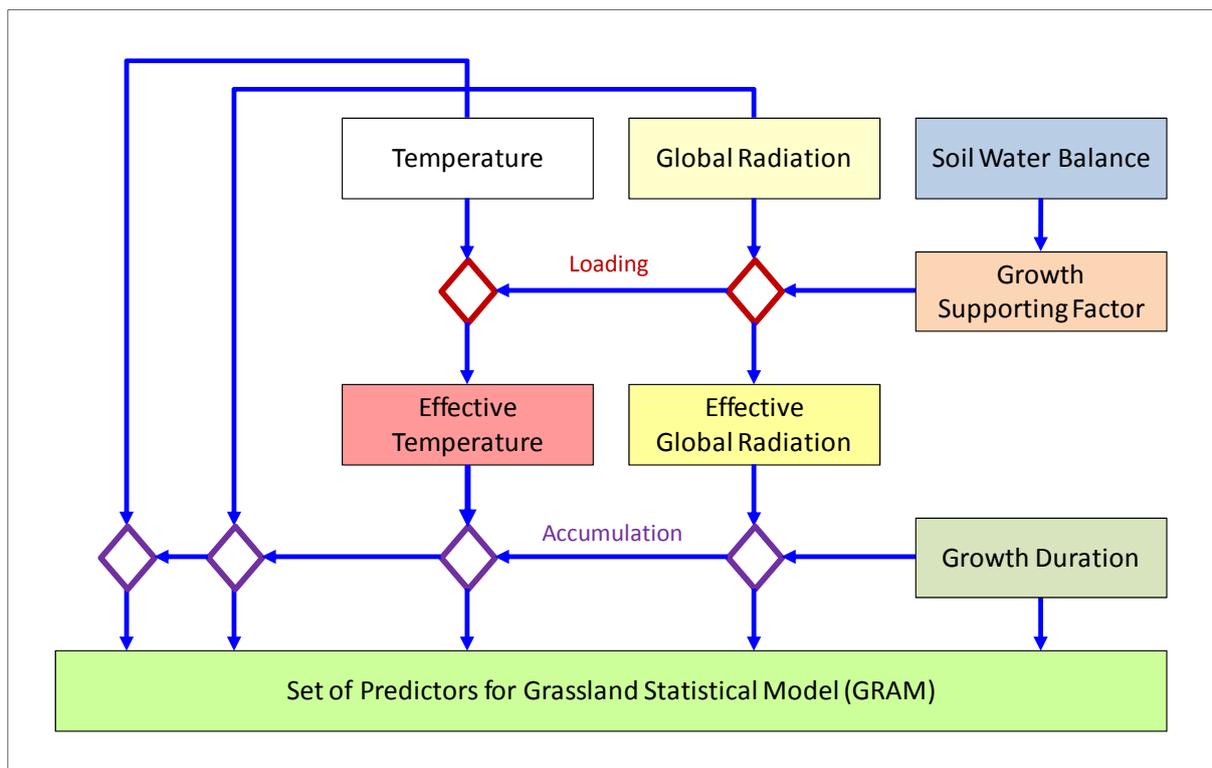


Abbildung 88: Kombination von räumlichen Modellen als Datengrundlage für die Ertragsschätzung

4.6.1 Datengrundlage für die räumliche Ertragsschätzung

Im vorliegenden Ansatz wird angenommen, dass Temperatur und Globalstrahlung die treibenden Kräfte des Wachstums sind, wenn man davon ausgeht, dass die Nährstoff- und Wasserversorgung keinen limitierenden Faktor darstellt. Für die räumliche Implementierung ist es zunächst notwendig, die beiden Parameter bestmöglich in die Fläche zu interpolieren. In *Abbildung 89* ist das Ergebnis der im Abschnitt 2.5.3.1 erläuterten Methodik der Georegression am Beispiel eines Tages dargestellt. Die einzelnen Tagesraster werden über die Aufwuchsdauer akkumuliert und bilden somit für jede einzelne Rasterzelle der Oberfläche die Temperatursumme für den Ertrag eines zu berechnenden Aufwuchses.

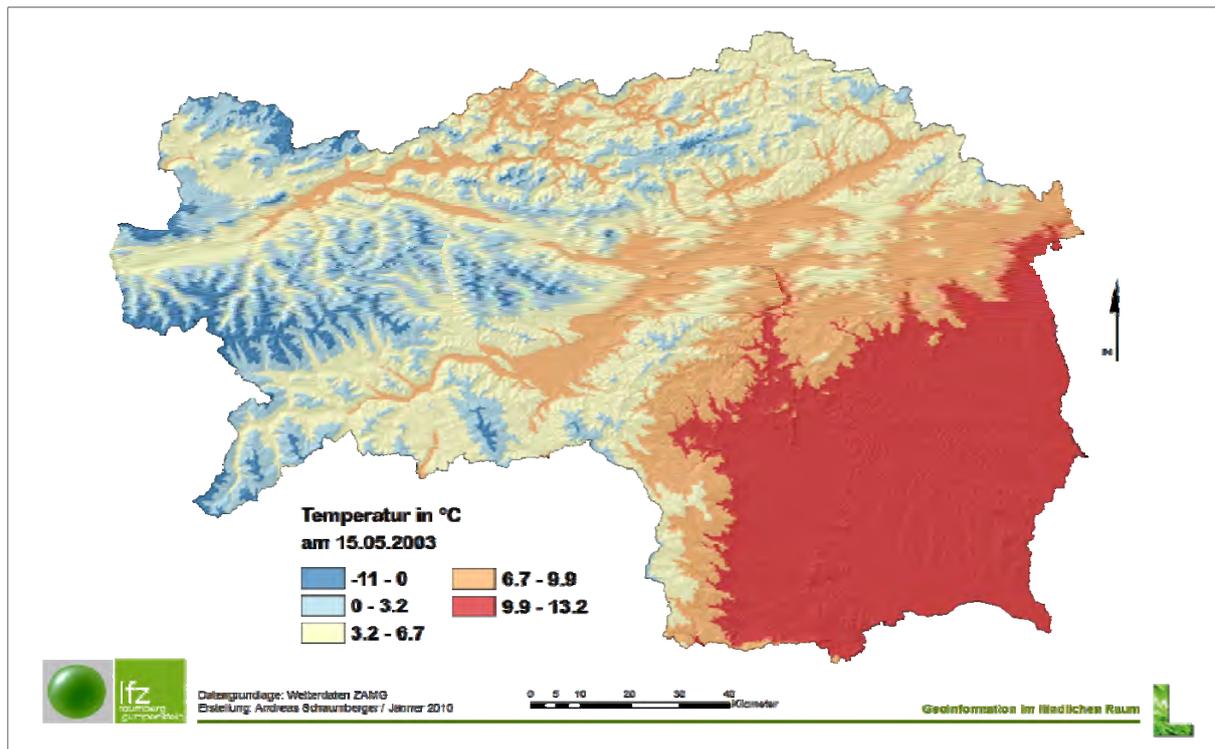


Abbildung 89: Beispiel für die Interpolation der Tagesmitteltemperatur am 15.05.2003

Wie die Temperatur ist auch die Globalstrahlung aus den täglich gerechneten Rasteroberflächen für die Dauer eines Aufwuchses zu akkumulieren. Diese Strahlungssumme ist im Modell als wichtiger Parameter verankert. *Abbildung 90* zeigt beispielhaft das Interpolationsergebnis für den 15.05.2003.

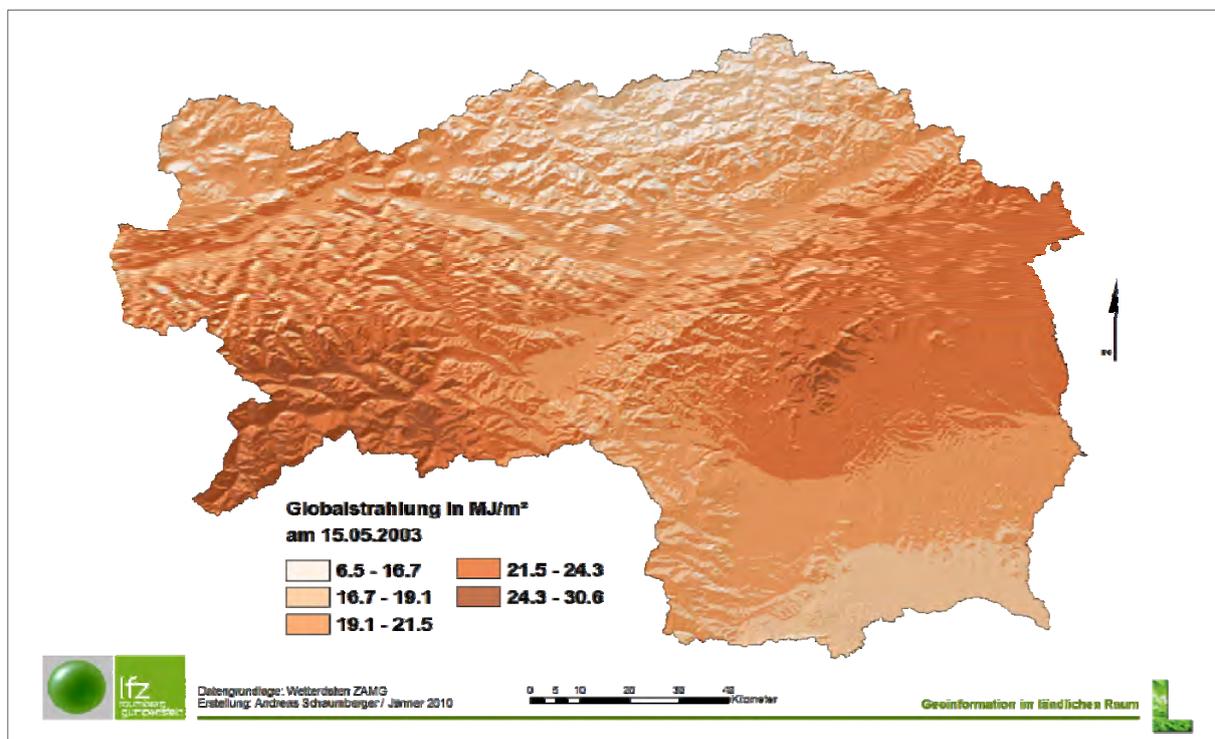


Abbildung 90: Beispiel für die Interpolation der Globalstrahlung am 15.05.2003

Wie in Abschnitt 2.5.1 beschrieben, ist dieser Datensatz eine Kombination aus geostatisch interpolierter Globalstrahlung (Ordinary Kriging), welche an den Wetterstationen gemessen wurde, und des Strahlungsfaktors, welcher die topographische Situation abbildet. Die Unterschiede der Strahlungsintensität in *Abbildung 90* sind einerseits durch rein geometrische Abhängigkeiten (Exposition, Hangneigung, Einstrahlungswinkel), aber auch durch wetterbedingte Beeinträchtigungen verursacht. So sind beispielsweise die niedrigen Werte im Norden auf Wolkenbedeckung zurückzuführen, welche aus der Niederschlagsverteilung dieses Tages (vgl. *Abbildung 68*) angenommen werden kann.

Für die Ermittlung der aufwuchsbezogenen Temperatursumme werden die für jeden Tag gerechneten Temperaturoberflächen aufsummiert. Der erste Aufwuchs beginnt mit dem ersten Tag der Vegetationsperiode, ermittelt nach dem Kriterium der thermischen Vegetationsperiode (vgl. Abschnitt 2.5.3.2), und endet mit dem Schnitttermin. Die Folgeaufwüchse beginnen jeweils mit dem Schnitttermin des vorhergehenden Aufwuchses und enden mit den entsprechenden Erntezeitpunkten.

Die Aufwuchsdauer wird näherungsweise mit dem im Abschnitt 2.5.5 dargestellten Ansatz ermittelt. Dabei wird allerdings die räumliche Ausdehnung nicht auf die rechnerisch ermittelte Schnitthäufigkeit eingeschränkt, sondern für das gesamte Untersuchungsgebiet ermittelt. Es entstehen damit für jedes Schnittregime und jeden Aufwuchs innerhalb der einzelnen Regime flächendeckende Raster, welche die tatsächliche Nutzungsfrequenz nicht berücksichtigen. Es muss an dieser Stelle, wie bereits im Abschnitt 2.5.6.4 angemerkt, nochmals besonders darauf hingewiesen werden, dass die räumliche Abgrenzung der einzelnen Nutzungsfrequenzen im Ergebnisraster der Ertragsschätzung entsprechend erfolgen muss.

Abgesehen von der Anzahl der Schnitte ist auch die Dauer für die einzelnen Aufwüchse entscheidend, da Temperatur und Globalstrahlung über diesen Zeitraum akkumuliert werden. In *Abbildung 91* wird die akkumulierte Temperatur beispielhaft für den 2. Aufwuchs eines Dreischnittregimes im Jahr 2003 dargestellt. Die Bestimmung des Schnittzeitpunktes und die damit verbundene Aufwuchsdauer hängt im Wesentlichen vom Management des einzelnen Landwirtes ab und kann für ein flächendeckendes Modell nur geschätzt werden. Da diese „Produktionsdauer“ als enorm wichtiger Parameter im Modell verankert ist, korrelieren die Ergebnisse der räumlichen Ertragsschätzung unmittelbar mit der Aussagekraft der modellierten Aufwuchszeiten. Für die räumliche Implementierung stellt die Bestimmung der Aufwuchsdauer einen kritischen Faktor dar, den es in einer intensiven, weiterführenden Forschungsarbeit zu verbessern gilt.

Die gerechneten Rasteroberflächen von Temperatur und Strahlung sind kontinuierlich und flächendeckend, da die zugrundeliegenden Tageswerte ebenfalls flächendeckend vorliegen. Im Gegensatz dazu ist die Darstellung der effektiven Temperatur in *Abbildung 92* nur auf jene Flächen beschränkt, für welche Bodeninformationen verfügbar sind, da hier die gesamte Bodenwasserbilanzrechnung einfließt und diese nur dort gerechnet werden kann, wo auch die nutzbare Feldkapazität verfügbar ist.

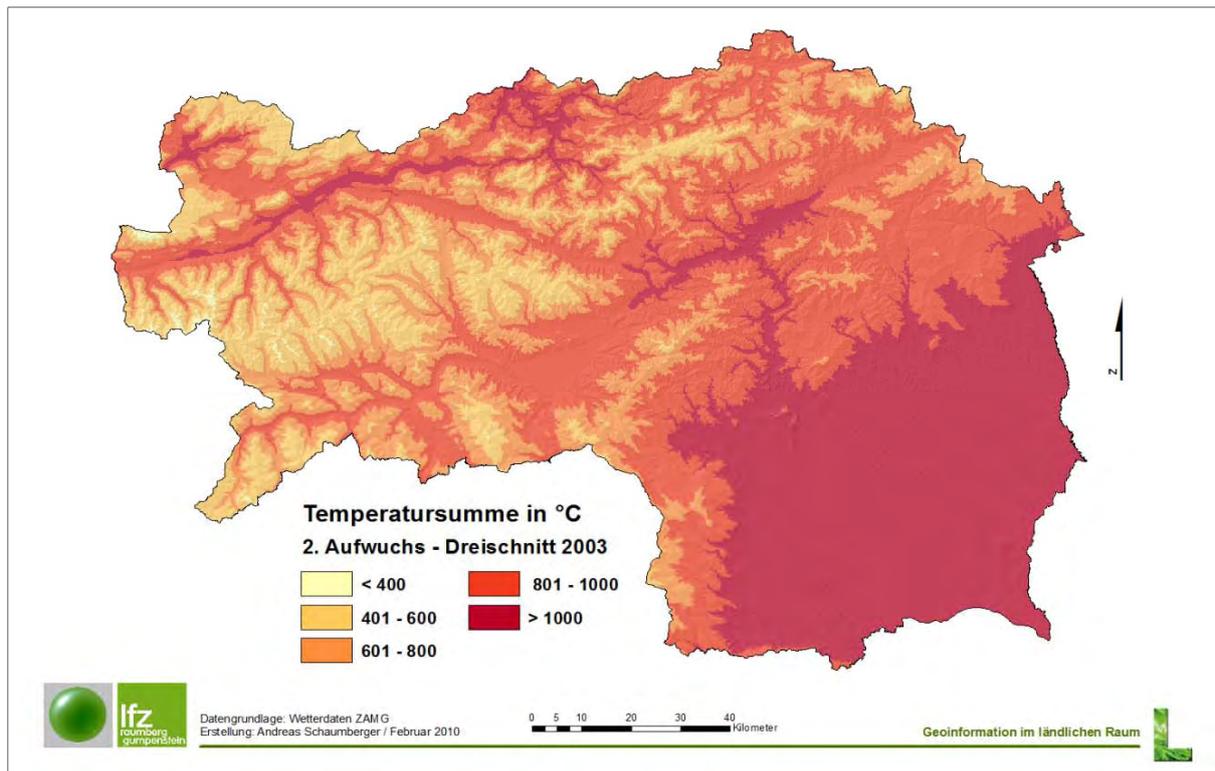


Abbildung 91: Temperatursumme am Beispiel des 2. Aufwuchses eines Dreischnittregimes im Jahr 2003

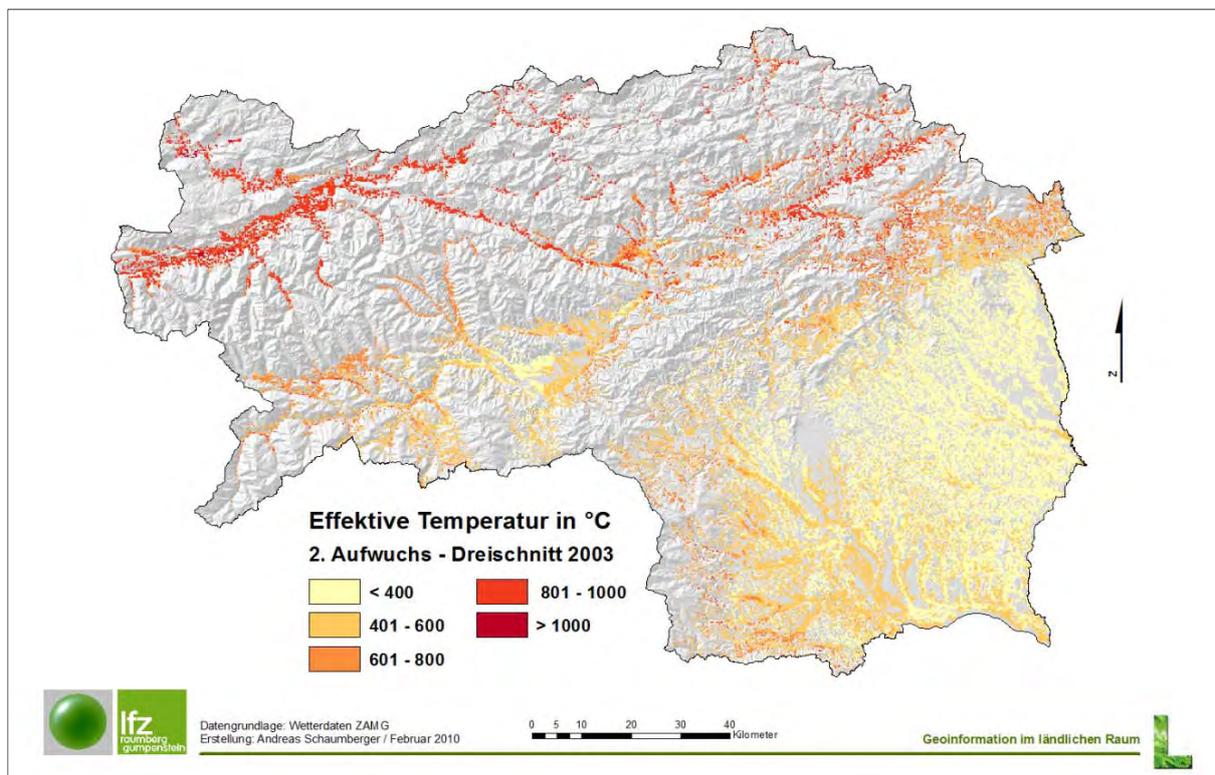


Abbildung 92: Effektive Temperatur am Beispiel des 2. Aufwuchses eines Dreischnittregimes im Jahr 2003

Bei der Ermittlung von Strahlungssumme und effektiver Strahlung wird nach demselben Schema wie bei der Temperatur vorgegangen (Abbildungen 93 und 94).

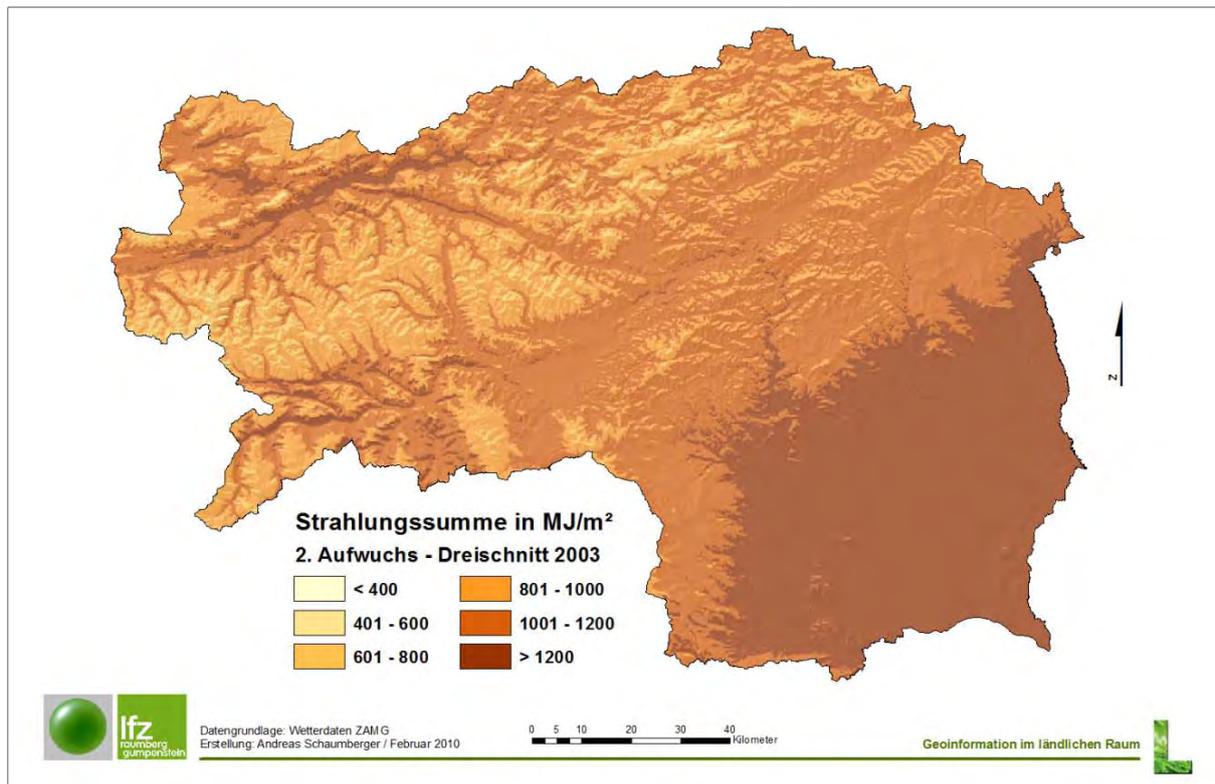


Abbildung 93: Strahlungssumme am Beispiel des 2. Aufwuchses eines Dreischnittregimes im Jahr 2003

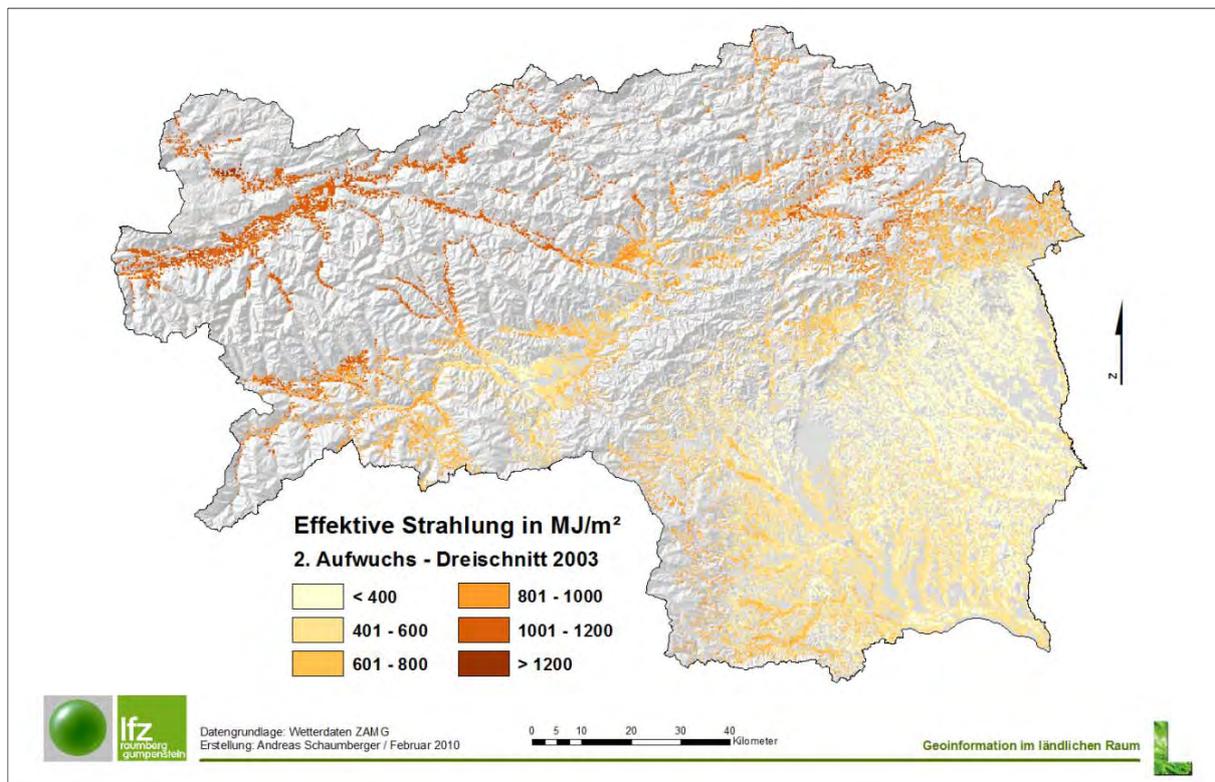


Abbildung 94: Effektive Strahlung am Beispiel des 2. Aufwuchses eines Dreischnittregimes im Jahr 2003

Sowohl in *Abbildung 92* als auch in *Abbildung 94* ist eine deutliche Reduktion der entsprechenden Summen ersichtlich. Im Süden der Steiermark waren im Jahr 2003 die Wuchsbedin-

gungen durch eine Limitierung der Wasserverfügbarkeit gekennzeichnet. Die Auswirkung auf die Temperatur- und Strahlungssumme wird am Beispiel des Standortes Kirchberg/Walde in der Darstellung des zeitlichen Verlaufs von effektiver Temperatur und effektiver Strahlung in den *Abbildungen 31* und *32* veranschaulicht. Dieses Beispiel zeigt die Entwicklung in einer einzigen Rasterzelle, nämlich am Versuchsstandort Kirchberg/Walde. Die *Abbildungen 92* und *94* beschreiben diese Entwicklung für das gesamte Berechnungsgebiet und akkumuliert über die Dauer eines Aufwuchses.

Die hier dargestellten Summen und ihre effektive Ausprägung beinhalten zur Gänze die im Modell verwendete Information über den Witterungsverlauf und seine Auswirkung auf die Wasserverfügbarkeit. Die im vorliegenden Projekt umgesetzte Ertragsschätzung stützt sich im Wesentlichen genau auf diesen Aspekt und ist deshalb besonders dafür geeignet, trockene Perioden und deren Einfluss auf den Ertrag abzubilden. Als Prädiktoren im statistischen Modell sind sie von größter Bedeutung.

4.6.2 Ergebnisse der räumlichen Ertragsschätzung

Für die hier erarbeiteten Ergebnisse wird das ursprüngliche Untersuchungsgebiet, das Bundesland Steiermark, auf das ganze Bundesgebiet erweitert. In einer Visualisierung unter Einbeziehung aller österreichischen Klimaregionen kommen die klimabedingten Unterschiede und ihre Auswirkung auf die Ertragssituation im Grünland besser zur Geltung als in der Betrachtung eines kleineren Gebietsausschnittes.

Mit der Absicht, einen langjährigen Ertragsdurchschnitt zu ermitteln, sind die Erträge für 13 Jahre (1997 bis 2009) gerechnet worden. Dabei wurden sämtliche landwirtschaftliche Nutzflächen einbezogen, d.h. es erfolgte keine Beschränkung auf die tatsächliche Grünlandfläche. Diese Vorgehensweise bietet den Vorteil, aus den Ergebniskarten jene Bereiche nachträglich selektieren zu können, welche einer Grünlandnutzungsform entsprechen. Wie schon im Abschnitt 4.4 erläutert, werden für alle Flächen sämtliche Nutzungsregime gerechnet, d.h. es steht für jede landwirtschaftlich genutzte Fläche in Österreich jeweils ein Ertragsergebnis für eine Zwei-, Drei- und Vierschnittnutzung zu Verfügung. Damit ist ein Höchstmaß an Flexibilität sowohl in der räumlichen als auch in der bewirtschaftungsspezifischen Auswahl gegeben. Allerdings können nur jene Ergebnisse für eine weitere Interpretation herangezogen werden, welche eine Übereinstimmung in Raum und Bewirtschaftung mit der tatsächlichen Situation aufweisen.

Die Ausdehnung der Berechnung auf ganz Österreich und die Anwendung der entwickelten Algorithmen für insgesamt 13 Jahre hat einen signifikanten Anstieg der Rechenzeit und der produzierten Datenmenge zur Folge. Die Umsetzung dieses Projektes ist damit eng mit einer möglichst performanten Datenverarbeitungsinfrastruktur gekoppelt. So wurden beispielsweise für die Errechnung von Zwischen- und Endergebnissen weit über 100.000 Karten von Österreich in einer Auflösung von 250 Metern erstellt. Eine rechnerische Bewältigung dieser Datenmenge ist nur mit einer aufwendigen, individuell programmierten GIS-Applikation mög-

lich (Schaumberger, 2007). Die Implementierung umfasst einerseits für die Modellentwicklung (vgl. Abschnitt 4.5) eine standortorientierte, versuchsstationsbezogene Applikation und andererseits ein Set an Methoden für die Generierung kontinuierlicher Oberflächen im GIS.

In *Abbildung 95* wird das Ertragspotenzial einer Dreischnittnutzung als Beispiel dargestellt. Dazu wurden für alle Aufwüchse die Grünlanderträge jeden Jahres im Zeitraum 1997 bis 2009 ermittelt. Für jeden Aufwuchs wurde das arithmetische Mittel über die 13 Jahre gebildet und diese aufwuchsbezogenen Mittelwerte zu einem Jahresertrag aufsummiert. Im betrachteten Zeitraum sind sämtliche klimatisch bedingte Variationen der Wuchsbedingungen enthalten; so ist beispielsweise das extreme Trockenjahr 2003, das für die Ertragssituation überdurchschnittlich positive Jahr 2006, sowie eine Reihe von mittleren Jahren inkludiert. Auch die Bandbreite der wechselnden Bedingungen innerhalb der Vegetationsperiode (trockenes Frühjahr, feuchte Sommermonate, usw.) ist über diesen Zeitraum ausreichend abgebildet. Der langjährige Mittelwert kann somit als (theoretisches) Potenzial des Grünlandertrages, unabhängig von den jährlich schwankenden Witterungsbedingungen gesehen werden. Im dargestellten Beispiel zeigen die Gebiete im Osten ein sehr niedriges Potenzial, da hier in beinahe allen Jahren eine angespannte Situation der Wasserversorgung herrscht. Am Nordalpenrand bzw. in den Tälern der Alpen ist ein sehr hohes Potenzial zu beobachten, da hier im Durchschnitt eine ausreichende Menge an Niederschlägen anfällt.

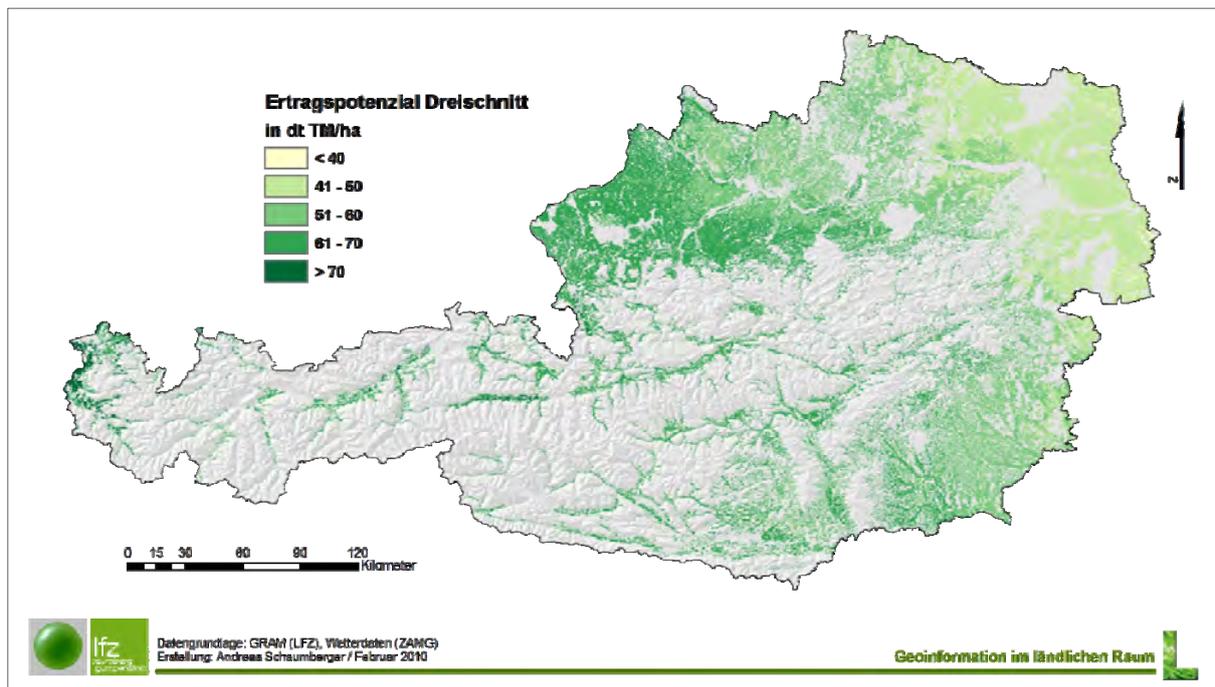


Abbildung 95: Potenzieller Grünlandertrag einer Dreischnittnutzung abgeleitet aus langjährigen Ertragsmittelwerten der Jahre 1997 bis 2009

Die räumliche Verteilung der Erträge wird hauptsächlich durch die klimatischen Unterschiede bestimmt, wobei aus dem Beispiel der *Abbildung 95* eine grundsätzliche Unterschätzung im hohen Ertragsniveau (z.B. im nördlichen Alpenvorland) festgestellt werden muss. Die Bewirt-

schaftung hinsichtlich Schnitttermine wird näherungsweise ermittelt und stellt damit den größten Unsicherheitsfaktor dar. Die Nährstoffsituation wird im Modell nicht abgebildet, da eine landesübliche und ausreichende Düngung angenommen wird.

Abbildung 96 zeigt die Auswirkung der extremen Trockenheit im Jahr 2003 auf die Erträge im Norden, Osten und Südosten des Landes. Als Kontrast dazu wird in Abbildung 97 das ertragsreiche Jahr 2006 dargestellt.

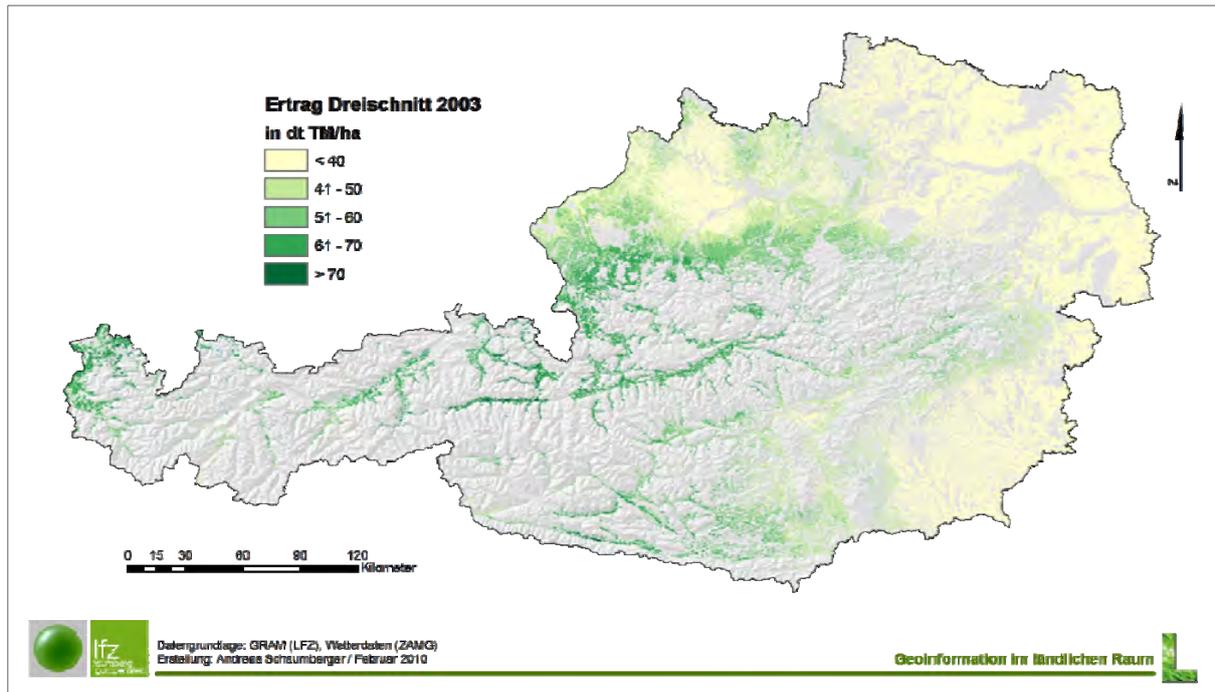


Abbildung 96: Grünlandertrag einer Dreischnittnutzung im Jahr 2003

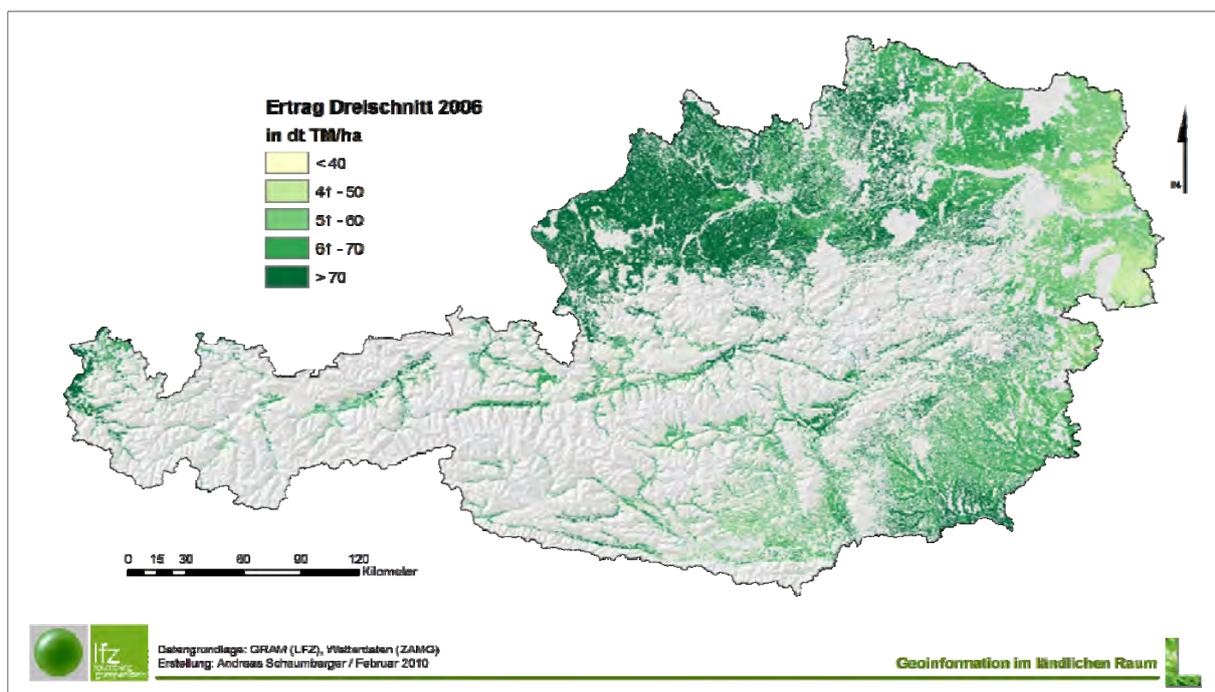


Abbildung 97: Grünlandertrag einer Dreischnittnutzung im Jahr 2006

Die Darstellung der relativen Abweichungen der beiden Jahre zum langjährigen Mittelwert in den *Abbildungen 98* und *99* zeigen die Auswirkung der jährlichen Schwankungen auf die Grünlanderträge. Im Jahr 2003 sind deutliche Ertragseinbußen in den von Trockenheit betroffenen Gebieten zu verzeichnen. In jenen Gebieten mit ausreichender Wasserversorgung ist ein zum langjährigen Mittelwert weitgehend gleichbleibender bzw. in einigen Gebieten sogar ein überdurchschnittlicher Ertrag erzielt worden.

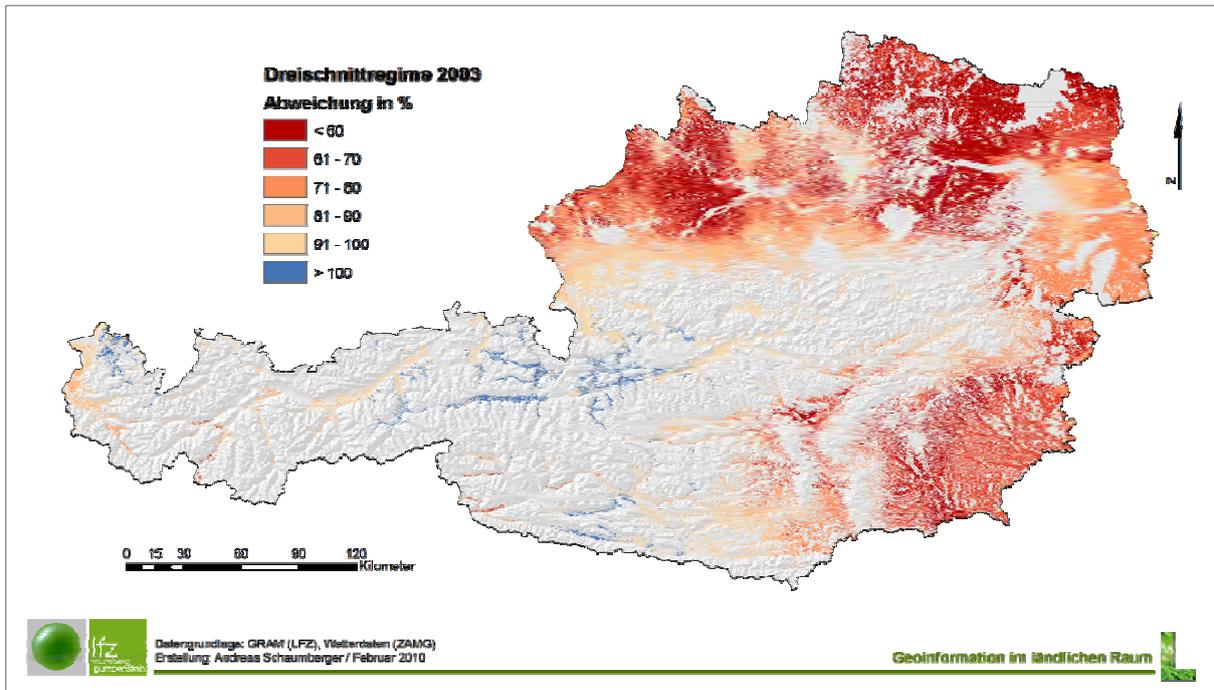


Abbildung 98: Abweichungen des Grünlandertrages vom langjährigen Mittel im Jahr 2003

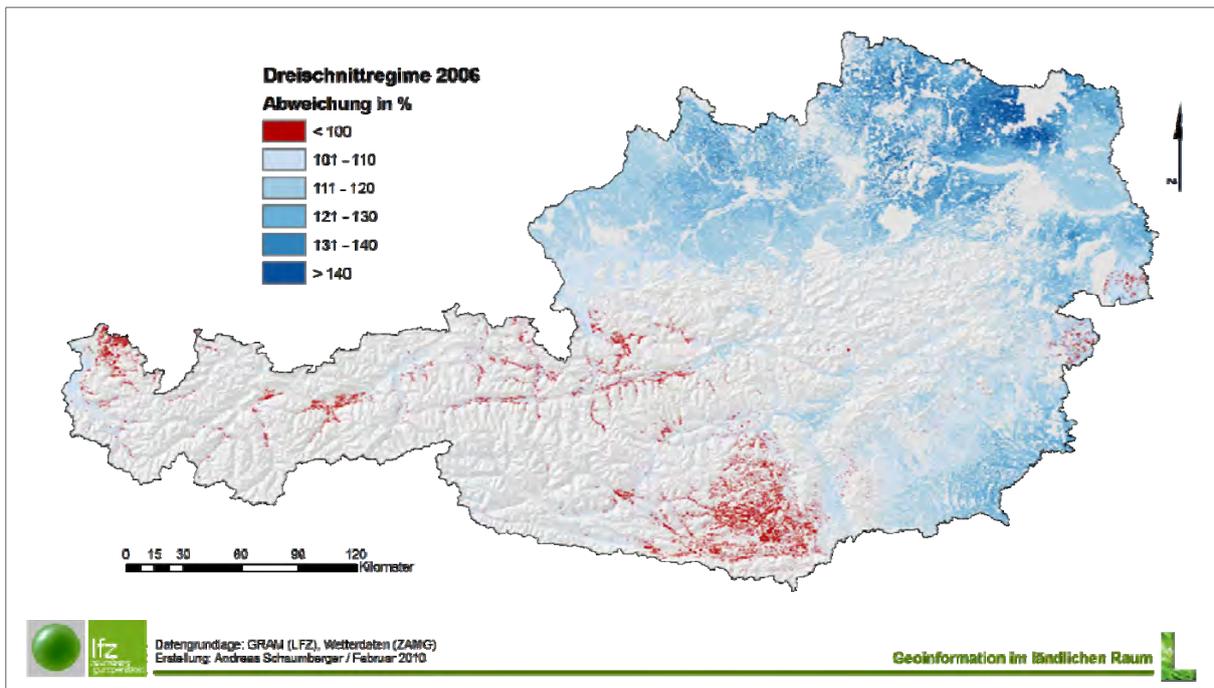


Abbildung 99: Abweichungen des Grünlandertrages vom langjährigen Mittel im Jahr 2006

Das Jahr 2006 war von überdurchschnittlich hohen Niederschlägen und damit ausreichender Feuchtigkeit im Osten geprägt. Im Gegensatz zum Westen und Süden, wo geringe Ertragseinbußen bis etwa 90 % vom langjährigen Mittel ausgewiesen sind, waren jene Landesteile, die in normalen Jahren mit Trockenheit zu rechnen haben, begünstigt.

Für das extreme Trockenjahr 2003 werden nachfolgend die Abweichungen der Einzelaufwüchse eines Dreischnittregimes dargestellt. In *Abbildung 100* sind bereits beim ersten Aufwuchs Beeinträchtigungen in den östlichen und südlichen Trockengebieten zu verzeichnen. In den Nordstaulagen hat es zu Beginn der Vegetationsperiode noch ausreichend Niederschläge gegeben, die zu einem leicht überdurchschnittlichen Ertrag führen. Die Abweichungen in den Alpentälern sind nicht sehr stark ausgeprägt, hier gab es keine signifikanten Änderungen zum langjährigen Mittel.

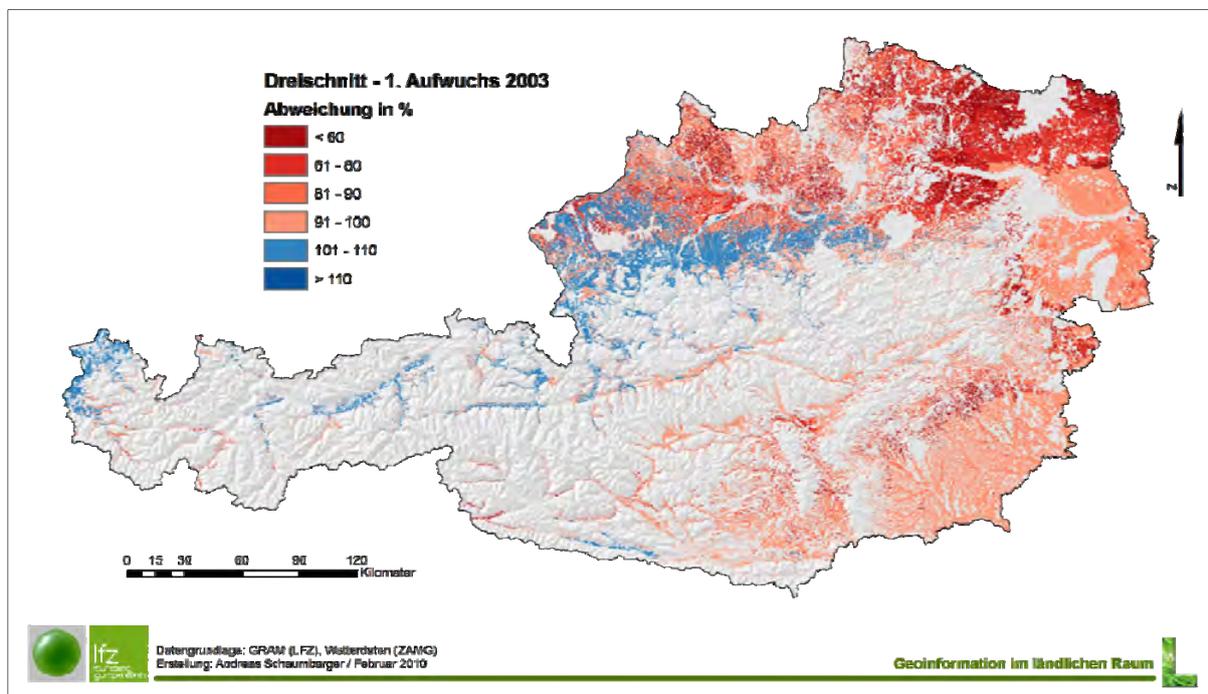


Abbildung 100: Abweichungen des Grünlandertrages für den ersten Aufwuchs eines Dreischnittregimes vom langjährigen Mittel im Jahr 2003

Die Trockensituation verschärft sich in der Zeit des zweiten (vgl. *Abbildung 101*) und dritten Aufwuchses (vgl. *Abbildung 102*) dramatisch. Ausbleibende Niederschläge in den Sommermonaten führen in weiten Teilen des Landes zu einem erheblichen Rückgang der Grünlanderträge. Auch hier bleiben die Alpentäler weitgehend verschont, es wird sogar in manchen Gebieten ein überdurchschnittlicher Ertrag ausgewiesen. Die höheren Temperaturen dieses Jahres sowie eine weitgehend ausreichende Wasserversorgung im Berggebiet beeinflussen die Produktivität der Grünlandflächen positiv.

Eine geringfügige Erholung ist teilweise beim dritten Aufwuchs zu erkennen. Bei einem Dreischnittsystem wird der letzte Aufwuchs relativ spät geerntet und im Jahr 2003 gab es am Ende des Sommers wieder mehr Niederschlag. Dies wirkt sich sofort auf die Bodenwasserbilanz

aus, welche die wichtigste Grundlage für die Ertragsschätzung darstellt. Hier muss angemerkt werden, dass die Information über den Pflanzenbestand nicht im Modell erfasst werden kann und nachhaltige Schäden der Grasnarbe als eine Auswirkung massiver Trockenheit somit auch nicht im Modell repräsentiert werden.

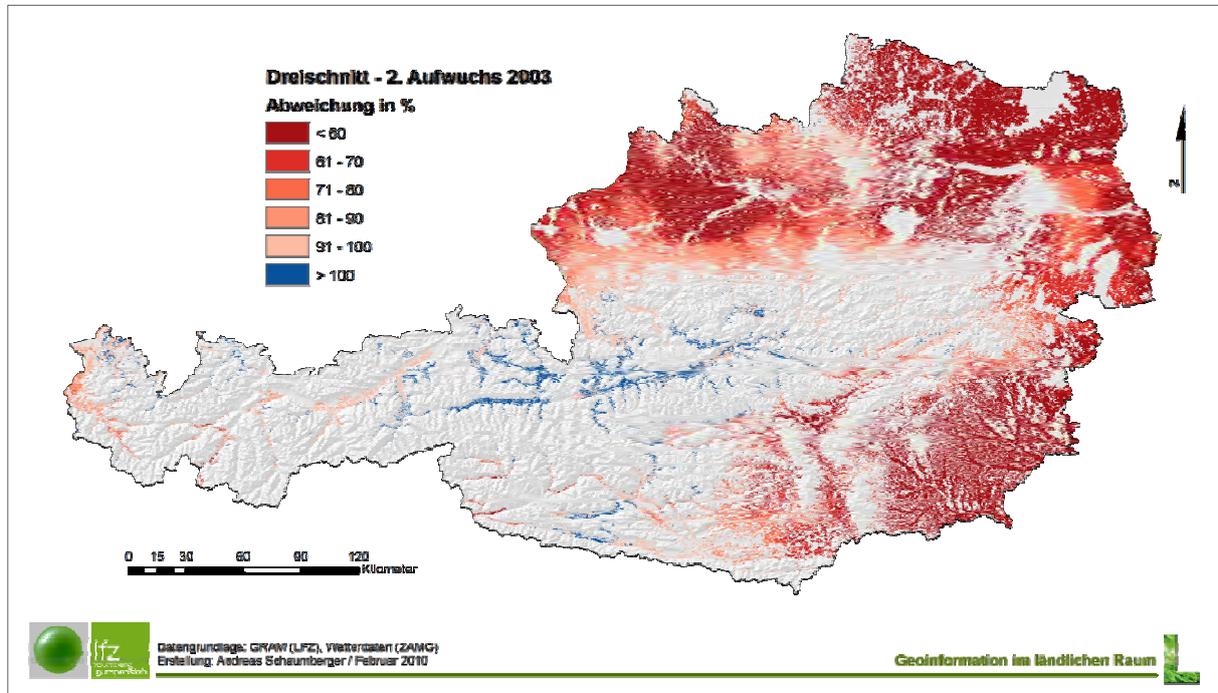


Abbildung 101: Abweichungen des Grünlandertrages für den zweiten Aufwuchs eines Dreischnittregimes vom langjährigen Mittel im Jahr 2003

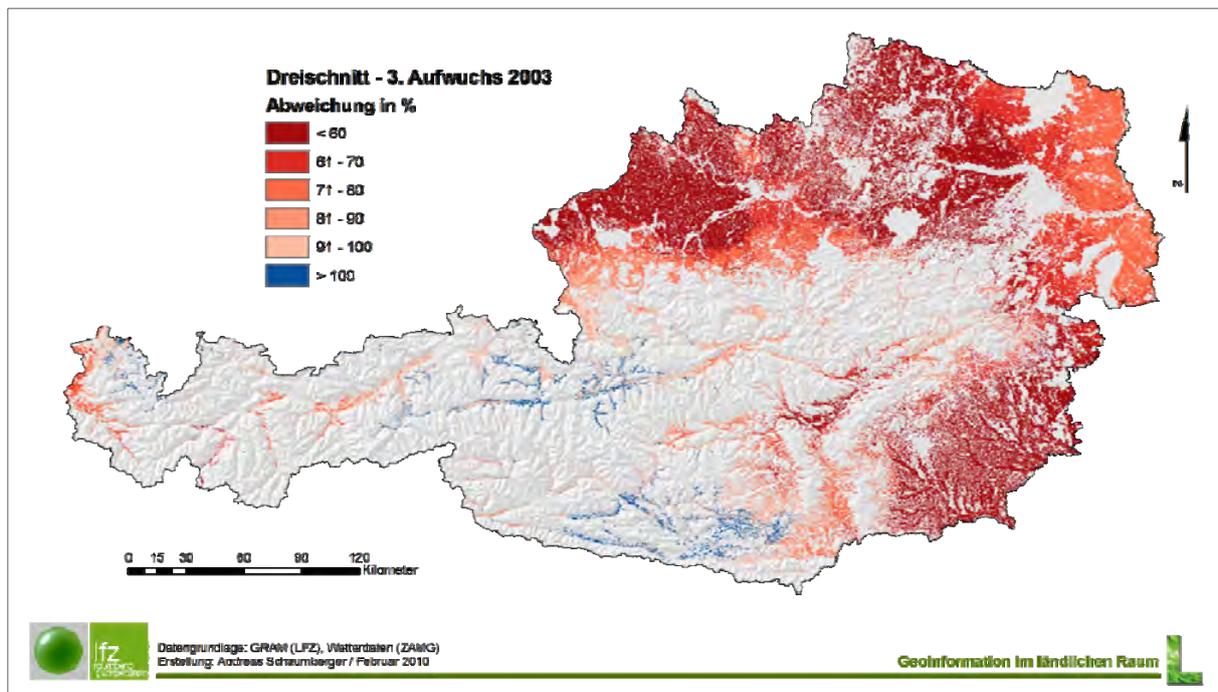


Abbildung 102: Abweichungen des Grünlandertrages für den dritten Aufwuchs eines Dreischnittregimes vom langjährigen Mittel im Jahr 2003

4.7 Evaluierung der Ergebnisse aus der räumlichen Ertragsschätzung

Im vorliegenden Projekt stand die Untersuchung von Möglichkeiten zur Schätzung des Grünlandertrages bzw. von jährlich schwankenden Ertragsänderungen auf einer räumlichen Basis im Vordergrund. Mit Hilfe einer aufwendigen GIS-Implementierung wurde ein empirisch statistisches Modell für eine flächendeckende Anwendung entwickelt. Gerade dieser Anspruch an die räumlich vollständige Beschreibung von Grünlanderträgen erfordert Kompromisse hinsichtlich der Komplexität einzelner beschreibender Parameter, wie zum Beispiel dem Bodenwasserbilanzmodell, und sogar den Verzicht auf Informationen, welche für die genaue Bestimmung des Ertrages eigentlich unumgänglich sind. Als Beispiel sei hier die maßgebliche Bedeutung der Pflanzenbestandszusammensetzung angeführt, welche aufgrund der heterogenen Wirtschaftsweise und der Entkoppelung von objektivierbaren Standortfaktoren mit räumlichen Modellen nicht beschrieben werden kann.

Wie die bisherigen Ausführungen zeigen, ist es gelungen, einen mittelstarken Zusammenhang zwischen den hier verwendeten räumlich modellierten Modellparametern und der Quantität des Grünlandertrages herzustellen. Um die Anwendungsmöglichkeiten für das entwickelte Modell und auch deren Grenzen aufzuzeigen, wurden die Modellergebnisse einer umfassenden und sorgfältigen Evaluierung unterzogen.

4.7.1 Praxiserhebungen zur Modellevaluierung

Wie im Abschnitt 2.6 beschrieben, wurde ein Versuch unternommen, aus Ertragsmessungen in der Praxis einen Evaluierungsdatensatz zu erstellen. Die Erträge stammten von Grünlandflächen im Raum Hartberg und wurden direkt von den Landwirten erhoben. Das Konzept, unabhängige Standorte für die Evaluierung zu verwenden, entsprach der Vorstellung, die Modellergebnisse einem möglichst praxisnahen Test zu unterziehen.

Die Evaluierung wurde zwar vorgenommen, es konnte jedoch kein Zusammenhang zwischen den Erhebungen und den Schätzwerten festgestellt werden. Der Grund dafür lag in der Fülle an unbekanntem Einflüssen, welche sowohl von Modellseite als auch von Erhebungsseite zusammentrafen. Beispielsweise konnte die von den Landwirten geerntete Grünmasse nicht in einen exakten Wert für die Trockenmasse, wie sie im Modell verwendet wird, überführt werden. Der größte Unsicherheitsfaktor war jedoch die Abweichung der tatsächlichen Erntezeitpunkte zum Näherungsmodell der Aufwuchsdauer.

Um die vielen unbekanntem Einflussfaktoren der Praxiserhebung auf jene zu beschränken, welche auch auf das Modell selbst wirken, wurde die gesamte Evaluierung an den Versuchsstandorten vorgenommen. Der verfolgte Ansatz mit den Praxisdaten zeigte klar, dass für die Evaluierung des Modells ein qualitativ hochwertiger Datenbestand notwendig ist, der den Fehleraum des Modells zumindest nicht weiter vergrößert. Aus diesem Grund wird die nachfolgend beschriebene Analyse des Modells mit den Daten aus den Versuchsstandorten vorgenommen. In die Evaluierung wurden auch die Ergebnisse aus dem GIS einbezogen.

4.7.2 Auswahl der Modellparameter

Bei der herkömmlichen Modellierung werden alle verfügbaren Informationen auf ihren Beitrag zur Erklärung des Modells geprüft. Wie im Abschnitt 4.5 dargestellt, wurde dies auch bei dem vorliegenden Modell durchgeführt. Allerdings konnten jene Informationen nicht einbezogen werden, die für eine räumliche Modellierung ungeeignet sind. So ist beispielsweise die Pflanzenbestandszusammensetzung im Rahmen der Versuche zwar erhoben worden, im Modell selbst allerdings nicht anwendbar, da der Pflanzenstand nicht als kontinuierliche Oberfläche dargestellt werden kann. Bei der Anwendung des Modells auf alle landwirtschaftlichen Flächen Österreichs fehlt damit dieser Parameter als Prädiktor und kann deshalb auch nicht im standortbasierten Modell verwendet werden.

Die Parameter müssen sich also auf jene Standortfaktoren beschränken, welche in räumliche Modelle überführt werden können. Dies ist relativ gut mit Wetterdaten möglich, welche auch die Basis für die Bodenwasserbilanzierung bilden und damit der Quantifizierung von Wasserstress zugrunde liegen. Nachdem das Modell darauf abzielt, Trockenschäden im Grünland abzuschätzen, ist die räumliche Beschreibung der Wasserverfügbarkeit als wichtigster Parameter im Modell verankert.

Als geeignete Parameter für die räumliche Modellierung wurden Temperatursumme, Globalstrahlungssumme, effektive Temperatur, effektive Globalstrahlung und Aufwuchsdauer bestimmt (vgl. Abschnitt 4.5). Wie *Abbildung 85* zeigt, ist das über alle Versuchsstationen (global) kalibrierte Modell an manchen Standorten mit geringeren, an anderen mit größeren Fehlern behaftet. Es muss nun die Frage aufgeworfen werden, wie stark der Modellzusammenhang durch nicht im Modell abgebildete, standortspezifische Einflüsse (Nährstoffversorgungsgrad, Betreuung, Bodenqualität, Mikroklima, usw.) beeinträchtigt wird. Eine weitere Frage ergibt sich aus der Wahl der Modellparameter: Sind diese in der Lage, die Ertragssituation unter Einbeziehung der Standortheterogenität in ausreichendem Umfang zu erklären?

Um diese Fragen zu beantworten, wurden die Modellparameter des globalen Ansatzes dazu verwendet, für jeden einzelnen Standort eine individuelle und damit standortangepasste Kalibrierung vorzunehmen. In *Abbildung 103* wird das Bestimmtheitsmaß für jede Station zwischen globalem und dem jeweiligen lokalen Modell gegenübergestellt, in *Abbildung 104* der Mean Absolute Error (MAE). Die lokalen Modelle mit einem mittleren R^2 von 0,72 zeigen, dass mit den gewählten Parametern ein sehr hoher Erklärungsanteil gegeben ist. Jener Anteil, welcher durch das lokale Modell nicht erklärt wird, beinhaltet die oben genannten unbekannt Einflüsse. Diese Auswertung zeigt, dass die gewählten Modellparameter sehr gut dafür geeignet sind, einen erheblichen Teil der Ertragsvariabilität zu erklären.

Die Abweichungen zwischen globalem und lokalem Modell beschreiben die Auswirkung der unbekannt Standortfaktoren auf das Gesamtmodell. Die weitgehende Ähnlichkeit in der Höhe des Bestimmtheitsmaßes von globalem und lokalen Modellen zeigt, dass eine schwächere Erklärungskraft der lokalen Modelle auch im global Modell ihren Niederschlag findet.

Es finden sich aber auch Ausnahmen: Bei der Betrachtung des Standortes Lendorf zeigt sich beispielsweise, dass die gewählten Modellparameter die Erträge mit relativ hoher Erklärungskraft abbilden können ($R^2 = 0,80$). Im globalen Modell erreicht dieser Standort lediglich ein Bestimmtheitsmaß von 0,58. Aus Sicht des Gesamtmodells, auf das sämtliche unbekannte Einflüsse aller Standorte gemeinsam wirken, ergibt sich für Lendorf eine besonders ausgeprägte Abhängigkeit zu den unbekanntem und standortspezifischen Faktoren, welche durch das Gesamtmodell nur beschränkt erklärt wird.

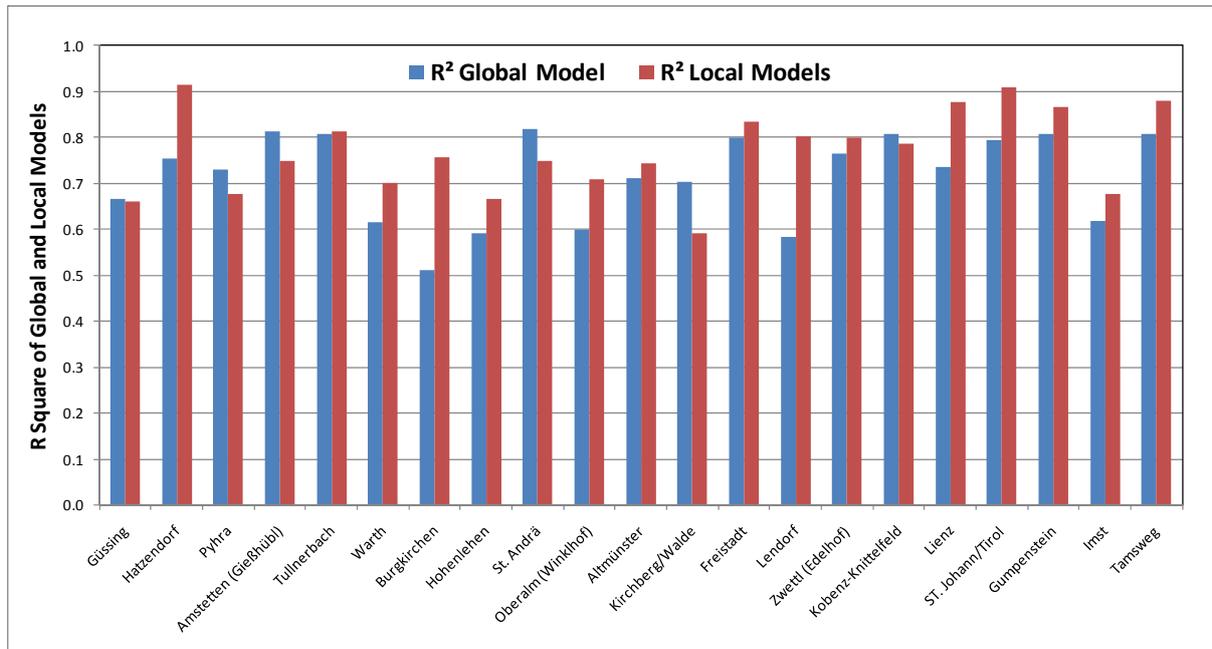


Abbildung 103: Vergleich der Performance zwischen globalem und standortbasierten, lokalen Modellen

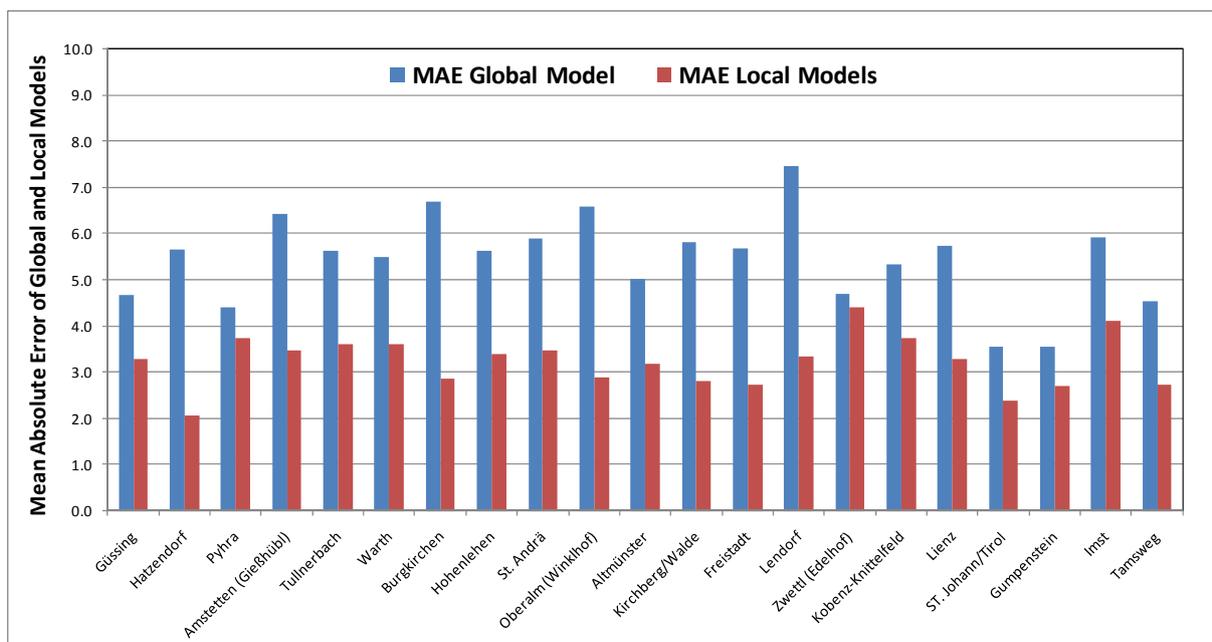


Abbildung 104: Vergleich des Mean Absolute Errors (MAE) von globalem und lokalen Modellen

An manchen Standorten kann in *Abbildung 103* eine geringfügig bessere Modellperformance des globalen Modells im Vergleich zum lokalen Ergebnis beobachtet werden. Im Gegensatz zum R^2 kann jedoch aus der Größe des Fehlers im Vergleich zwischen den Modellen direkt abgelesen werden, wie stark der Anteil der unbekanntem Einflussfaktoren auf das jeweilige Modell wirkt (vgl. *Abbildung 104*). Die Auswertung zeigt, dass die Fehler in den lokalen Modellen deutlich geringer als im globalen Modell sind. Dies ist auch zu erwarten, da nicht bestimmbare Einflussfaktoren an den Standorten in den jeweiligen Modellen Berücksichtigung finden. Beispielsweise werden der Pflanzenbestand oder exakte Bodeneigenschaften indirekt bei der Standortkalibrierung mit einbezogen, da keine Differenzierung zu anderen Standorten erfolgt. Die Folge ist ein starker Rückgang der Fehler im Vergleich zu den Ergebnissen aus dem globalen Modell.

Die Differenz des Fehlers zwischen globalem und lokalen Modellen kann als jener Anteil an unbekanntem Einflussfaktoren interpretiert werden, die in der Unterschiedlichkeit des Standortes begründet liegt. Welche Faktoren den Standort implizit beschreiben und wie hoch deren Einfluss ist, wurde in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht. Im Rahmen einer künftigen Weiterentwicklung des Modells bietet eine genaue Analyse der Standorte hinsichtlich der unterschiedlich wirkenden Einflüsse auf die Ertragsmessergebnisse möglicherweise ein Verbesserungspotenzial.

Die Fehler der lokalen Modelle sind darauf zurückzuführen, dass die Erklärungskraft der gewählten Modellprädiktoren nicht ausreicht, die gesamte Varianz an den Standorten zu erfassen. In Hinblick auf die Art der Modellanwendung, nämlich eine flächendeckende Ertragschätzung bereitzustellen, muss die räumliche Interpretierbarkeit der Prädiktoren im Auge behalten werden. Geringe Fehler lassen sich dabei wohl nicht vermeiden. Ein weiteres wichtiges Argument für die Beschränkung auf möglichst wenige, aber signifikante Prädiktoren liegt in der Forderung nach einem robusten Modell begründet, welches in der Lage ist, Extrapolationen an den Rändern der experimentell abgedeckten Wertebereiche möglichst plausibel zu gestalten.

Zur Demonstration des Standorteinflusses wird in *Abbildung 105* der Zusammenhang zwischen Beobachtungs- und Schätzwerten auf Basis der standortspezifischen, lokalen Modelle dargestellt. Dieses Ergebnis dient dem direkten Vergleich zum globalen Modellverhalten, dargestellt in *Abbildung 80* bzw. *Abbildung 81*. Wird der Einfluss des jeweiligen Standortes berücksichtigt, kommt es insgesamt zu einem stärkeren Zusammenhang und geringeren Fehlern. Für eine flächendeckende Anwendung kann allerdings nur ein globales Modell herangezogen werden, welches „standortneutral“ agiert.

Das hier dargestellte Beispiel soll einen Eindruck geben, wie stark sich die unbekanntem Positionen an den jeweiligen Standorten auf die Schätzwerte auswirken. Die im globalen Modell herrschenden Spannungen zwischen den vielen unbekanntem und standortspezifischen Informationen werden dadurch ausgeglichen, dass es zu einer generellen Zunahme der Streuung

und damit der Fehlerwerte und zu einer geringeren Korrelation zwischen Beobachtung und Schätzung kommt.

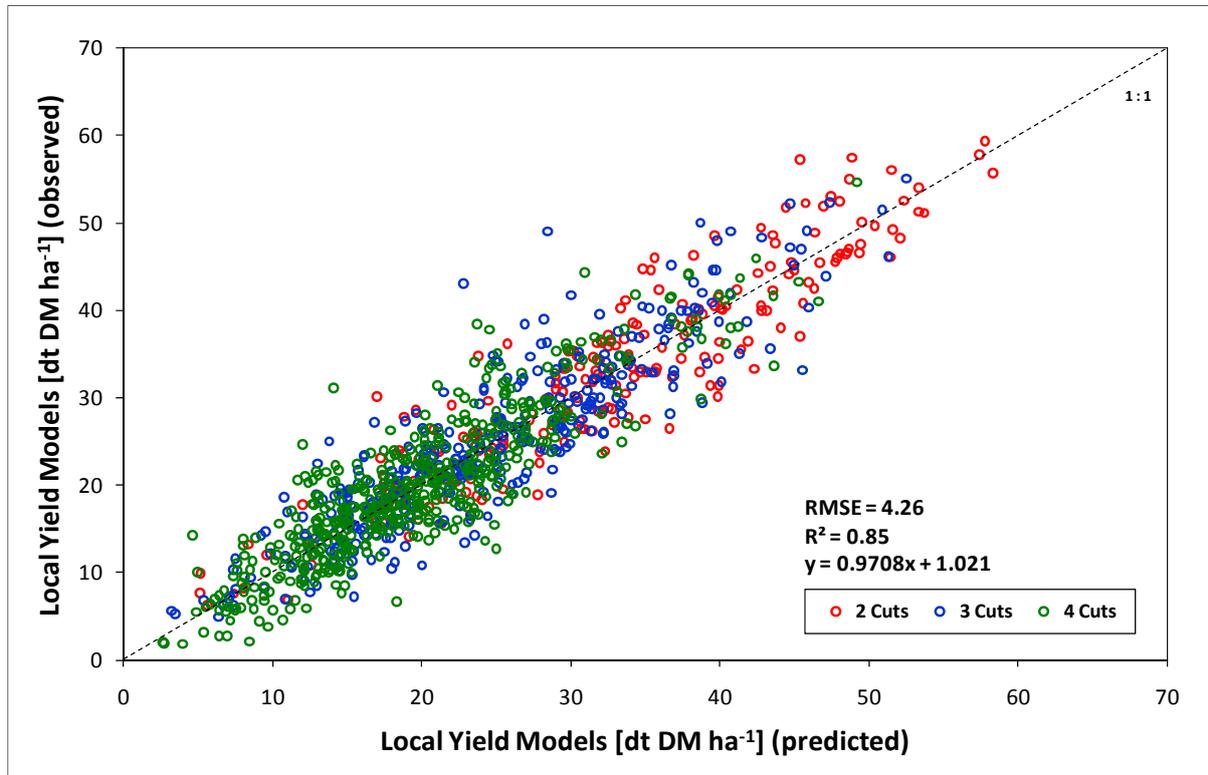


Abbildung 105: Anwendung der lokalen Modelle zur Darstellung des Schätzverhaltens unter Berücksichtigung der Standortvariabilität

Unter den Modellparametern finden sich in Form von Wetterdaten hauptsächlich räumlich modellierbare Standortfaktoren. Der einzige Bewirtschaftungsfaktor, welcher für die Ertragschätzung unverzichtbar ist, wird durch die Aufwuchsdauer repräsentiert. Er ist im Rahmen der Kreuzprodukte mit den Wetterdaten ein für das Modell entscheidender Input (vgl. *Tabelle 2*). Der Erntezeitpunkt kann im Prinzip nicht verallgemeinert in ein flächendeckendes Modell überführt werden, eine grobe Schätzung musste jedoch unternommen werden, um die räumliche Implementierung nicht zu gefährden. Die Konsequenzen daraus sind für die GIS-Ergebnisse äußerst wichtig und spielen in den nachfolgenden Analysen eine wesentliche Rolle.

4.7.3 Einfluss der modellierten Aufwuchsdauer auf die Ergebnisse

Die Modellierung der Aufwuchsdauer mit einem stark vereinfachten Ansatz, nämlich auf Basis der thermischen Vegetationsperiode und mit einer relativen Verteilung der Schnittanzahl (vgl. *Tabelle 1*), ermöglicht es zwar, dem Modell die Information über die Dauer der einzelnen Aufwüchse flächendeckend zur Verfügung zu stellen, allerdings muss eine der vorgenommenen Vereinfachung entsprechende Erhöhung der Streuung in den Ertragsschätzergebnissen in Kauf genommen werden. Als ein wesentlicher Modellprädiktor kann auf die Aufwuchsdauer nicht verzichtet werden und die Implementierung eines räumlichen Modells

hängt somit entscheidend von diesem Parameter ab. Die Bewirtschaftungsfaktoren sind im Gegensatz zu Standortfaktoren nur näherungsweise in Modelle zu überführen, für die Ertragsbildung jedoch besonders wichtig. Die Qualität der Ergebnisse hängt von der Genauigkeit der Bewirtschaftungsmodellierung (Schnittfrequenz und Erntetermine) ab. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Ergebnisse in Form von absoluten Ertragsmengen angegeben werden. Eine Verbesserung in diesem Bereich bietet das größte Potenzial für eine verbesserte Abbildung der Grünlanderträge. In der Weiterentwicklung dieses Aspektes ist ein umfangreicher Forschungsbedarf zu sehen.

Um die Problematik der modellierten Bewirtschaftsmaßnahmen und die daraus abgeleitete Aufwuchsdauer aufzuzeigen, wird in *Abbildung 106* ein Vergleich von Modell und Beobachtung gezeigt. Der RMSE-Wert beträgt hier 17,76 und ist damit an den einbezogenen Versuchsstationen schon beträchtlich hoch, das Bestimmtheitsmaß mit 0,45 zeigt einen mittleren Zusammenhang. Bei dieser Abbildung fällt zunächst auf, dass die einzelnen Schnittregime Cluster bilden, die durch das Modell noch in die einzelnen Aufwüchse aufgetrennt werden. Beispielsweise erkennt man beim Dreischnittregime deutliche Cluster der einzelnen Aufwüchse, die relativ stark voneinander abweichen, zumindest wesentlich stärker, als dies bei den Beobachtungsdaten (Ordinate) der Fall ist. Die vereinfachte Modellierung der Aufwuchsdauer aufgrund thermischer Bedingungen hat zur Folge, dass an vielen Standorten die gleichen Werte ausgewiesen werden, dadurch entstehen die deutlich erkennbaren vertikalen Streifenmuster im Datenplot.

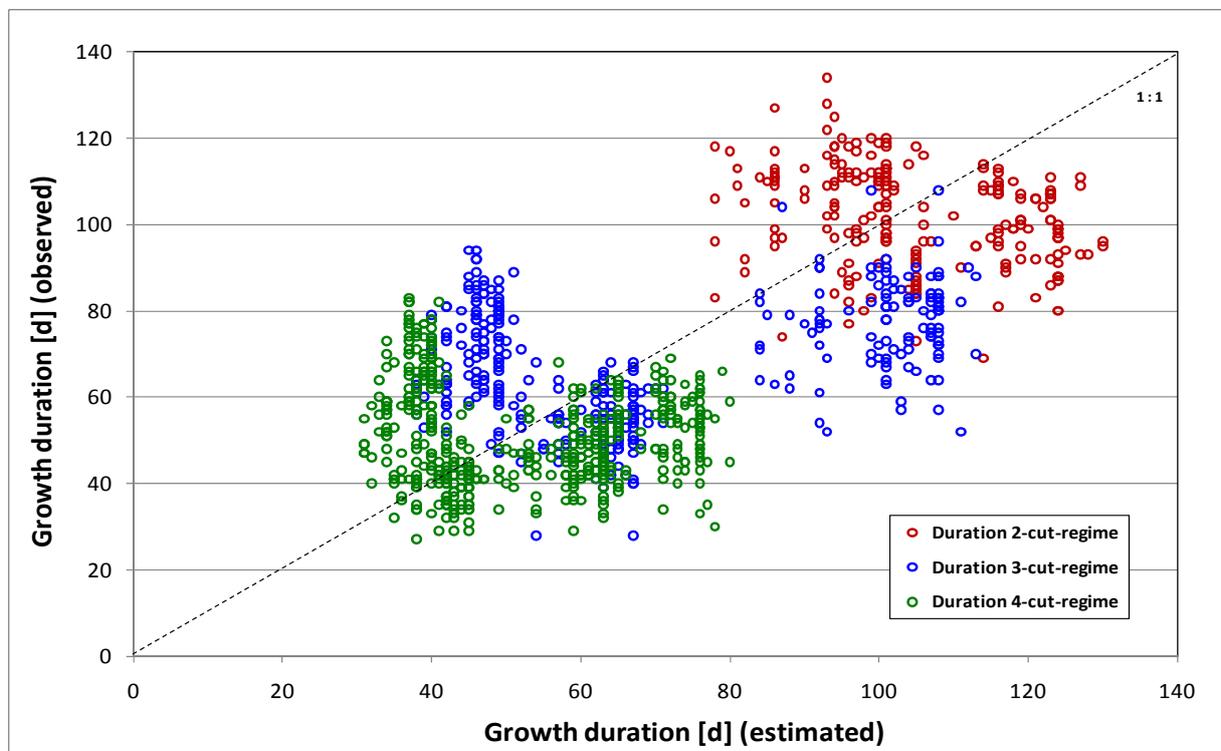


Abbildung 106: Vergleich von modellierten Schnittterminen mit den an den Versuchsstationen vorgenommenen Ernteterminen

Durch die Abweichungen in den Schnittterminen wird auch die Aufwuchsdauer im Vergleich zu den Beobachtungen verzerrt und wirkt sich auf jeden anderen Modellparameter aus, da die Akkumulation von Temperatur, Globalstrahlung, effektiver Temperatur und effektiver Globalstrahlung für die jeweilige Aufwuchsdauer erfolgt.

4.7.4 Statistische Auswertung der Ergebnisse

Für eine übersichtliche Darstellung aller vorgenommenen Analysen von Zusammenhängen und Fehlern zwischen Beobachtungs- und Schätzwerten wurde die Tabellenform gewählt. Damit sind Vergleiche zwischen den einzelnen Untersuchungen einfach durchzuführen. Die Erklärungen und die zur Interpretation notwendigen Abbildungen folgen dieser Tabelle und werden über die Nummerierung in der ersten Spalte (Analyse 1 bis 16) referenziert. Aus den in *Tabelle 5* errechneten Daten kann eine umfassende Bewertung der gesamten Modellierung hinsichtlich standortbasierter als auch räumlicher Ergebnisse vorgenommen werden. Die Übersicht unterstützt damit eine effiziente Einordnung bzw. Abgrenzung der Ergebnisse für mögliche Anwendungen und Umsetzungen.

Tabelle 5: Übersicht der statistischen Auswertung

| Variables [dt Dry Matter growth ⁻¹] | | | Source | N | MIN | MAX | MEAN | MED | SD | R | RMSE | MAE | MAD | SLOPE |
|---|---|--|---------|-----|-------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|
| 1 | X | Predicted Yield - Observed Duration | Station | 590 | 4.82 | 46.70 | 23.24 | 21.34 | 8.51 | 0.817 | 6.627 | 5.285 | 8.979 | 1.060 |
| | Y | Observed Yield | Station | 590 | 1.84 | 59.36 | 24.57 | 23.05 | 11.22 | | | | | |
| 2 | X | Predicted Yield - Observed Duration | GIS | 590 | 6.23 | 41.56 | 21.91 | 20.65 | 7.99 | 0.735 | 5.788 | 4.294 | 5.520 | 0.935 |
| | Y | Predicted Yield - Duration Model | GIS | 590 | 6.55 | 44.75 | 21.13 | 19.66 | 7.77 | | | | | |
| 3 | X | 6-Year-Average of Predicted Yield - Observed Duration | GIS | 590 | 7.29 | 41.26 | 21.91 | 20.68 | 7.19 | 0.736 | 5.218 | 4.017 | 4.806 | 0.941 |
| | Y | 6-Year-Average of Predicted Yield - Duration Model | GIS | 590 | 7.41 | 42.42 | 21.13 | 19.38 | 7.03 | | | | | |
| 4 | X | Predicted Yield | GIS | 590 | 6.23 | 41.56 | 21.91 | 20.65 | 7.99 | 0.973 | 2.390 | 1.630 | 6.953 | 1.058 |
| | Y | Predicted Yield | Station | 590 | 4.82 | 46.70 | 23.24 | 21.34 | 8.51 | | | | | |
| 5 | X | Predicted Yield - Duration Model | GIS | 590 | 6.55 | 44.75 | 21.13 | 19.66 | 7.77 | 0.589 | 9.760 | 7.253 | 9.308 | 1.125 |
| | Y | Observed Yield | Station | 590 | 1.84 | 59.36 | 24.57 | 23.05 | 11.22 | | | | | |
| Variables [%] | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | X | Predicted Relative Yield to 6-Year-Average - Observed Duration | Station | 590 | 31.81 | 156.81 | 100.00 | 100.84 | 17.58 | 0.686 | 19.932 | 15.564 | 21.041 | 1.002 |
| | Y | Observed Relative Yield to 6-Year-Average | Station | 590 | 16.01 | 187.25 | 100.00 | 100.61 | 27.38 | | | | | |
| 7 | X | Predicted Relative Yield to 6-Year-Average - Duration Model | GIS | 590 | 40.83 | 167.94 | 100.00 | 101.47 | 17.70 | 0.797 | 11.586 | 8.463 | 13.432 | 0.995 |
| | Y | Predicted Relative Yield to 6-Year-Average - Observed Duration | GIS | 590 | 36.55 | 161.54 | 100.00 | 101.39 | 18.58 | | | | | |
| 8 | X | Predicted Relative Yield to 6-Year-Average - Duration Model | GIS | 590 | 40.83 | 167.94 | 100.00 | 101.47 | 17.70 | 0.568 | 22.611 | 17.851 | 21.051 | 0.996 |
| | Y | Observed Relative Yield to 6-Year-Average | Station | 590 | 16.01 | 187.25 | 100.00 | 100.61 | 27.38 | | | | | |
| Variables [dt Dry Matter year ⁻¹] | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | X | Predicted Yield - Observed Duration | Station | 112 | 35.92 | 88.70 | 69.76 | 72.26 | 12.15 | 0.736 | 11.960 | 9.321 | 13.729 | 0.996 |
| | Y | Observed Yield | Station | 112 | 24.31 | 112.59 | 69.29 | 73.66 | 17.68 | | | | | |
| 10 | X | Predicted Yield - Observed Duration | GIS | 112 | 31.79 | 84.36 | 65.42 | 67.90 | 12.02 | 0.915 | 5.294 | 3.846 | 8.668 | 0.967 |
| | Y | Predicted Yield - Duration Model | GIS | 112 | 25.47 | 81.94 | 63.40 | 66.51 | 11.71 | | | | | |
| 11 | X | 6-Year-Average of Predicted Yield - Observed Duration | GIS | 112 | 43.21 | 75.55 | 63.18 | 64.61 | 7.79 | 0.966 | 3.713 | 3.108 | 7.797 | 1.039 |
| | Y | 6-Year-Average of Predicted Yield - Duration Model | GIS | 112 | 39.87 | 81.34 | 65.47 | 65.76 | 9.68 | | | | | |
| 12 | X | Predicted Yield | GIS | 112 | 31.79 | 84.36 | 65.42 | 67.90 | 12.02 | 0.968 | 5.290 | 4.447 | 9.940 | 1.064 |
| | Y | Predicted Yield | Station | 112 | 35.92 | 88.70 | 69.76 | 72.26 | 12.15 | | | | | |
| 13 | X | Predicted Yield - Duration Model | GIS | 112 | 25.47 | 81.94 | 63.40 | 66.51 | 11.71 | 0.697 | 13.947 | 10.996 | 14.518 | 1.092 |
| | Y | Observed Yield | Station | 112 | 24.31 | 112.59 | 73.66 | 73.66 | 17.68 | | | | | |
| Variables [%] | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | X | Predicted Relative Yield to 6-Year-Average - Observed Duration | Station | 112 | 56.92 | 139.17 | 100.35 | 101.13 | 13.90 | 0.797 | 13.952 | 11.059 | 13.952 | 0.998 |
| | Y | Observed Relative Yield to 6-Year-Average | Station | 112 | 46.00 | 166.67 | 99.60 | 98.49 | 22.27 | | | | | |
| 15 | X | Predicted Relative Yield to 6-Year-Average - Duration Model | GIS | 112 | 52.04 | 135.99 | 100.59 | 102.54 | 16.68 | 0.919 | 6.573 | 5.101 | 10.852 | 0.992 |
| | Y | Predicted Relative Yield to 6-Year-Average - Observed Duration | GIS | 112 | 58.62 | 140.28 | 100.28 | 101.32 | 14.75 | | | | | |
| 16 | X | Predicted Relative Yield to 6-Year-Average - Duration Model | GIS | 112 | 52.04 | 135.99 | 100.59 | 102.54 | 16.68 | 0.738 | 14.987 | 11.889 | 16.895 | 0.990 |
| | Y | Observed Relative Yield to 6-Year-Average | Station | 112 | 46.00 | 166.67 | 99.60 | 98.49 | 22.27 | | | | | |

Legende:

| | | | |
|--------------|-----------------------|-------------|----------------------------------|
| Source | Datenquelle | SD | Standard Deviation |
| N | Anzahl der Datensätze | R | Correlation Coefficient |
| MIN | Minimum | RMSE | Root Mean Square Error |
| MAX | Maximum | MAE | Mean Absolute Error |
| MEAN | Arithmetisches Mittel | MAD | Mean Absolute Deviation |
| MED | Median | SLOPE | Steigung der linearen Regression |

Die Tabelle teilt sich in zwei Gruppen, die Analysen 1 bis 8 beinhalten die Auswertungen der aufwuchsbezogenen Erträge, die zweite Gruppe (9 bis 16) bezieht sich auf zu Jahreserträgen aggregierte Einzelaufwuchserträge. Die ersten fünf Analysen einer jeden Gruppe basieren auf absoluten Ertragswerten, die restlichen drei auf relativen Erträgen, bezogen auf einen mehrjährigen Mittelwert (2002 bis 2007).

Die zur Verfügung stehende Datenmenge wird durch die Anzahl an Stationen bestimmt, welche aus den GIS-Ergebnisrastern extrahiert werden konnte. Da an manchen Versuchsstandorten keine Bodeninformationen nach Murer (2009) zur Verfügung stand, wurden hier auch keine Ergebnisse errechnet. Von den 21 Standorten sind damit 14 in den Analysen enthalten. Für die Auswertung der Jahreserträge wurden 7 Stationen verwendet, da für die Aggregation der Jahreserträge ein vollständiger Datenbestand über alle Aufwüchse erforderlich war. Die Versuchsjahre 2002 – 2007 sind vollständig und gleichmäßig in der Datenauswahl vertreten.

Analyse 1

Hier werden Beobachtungs- und Schätzwerte auf Standortbasis zueinander in Beziehung gesetzt. Die statistische Auswertung entspricht der Darstellung in *Abbildung 80*, allerdings unter Verwendung des eingeschränkten Datenbestands. Dies führt zu einem geringfügig höheren Bestimmtheitsmaß.

Analyse 2

Bei einem Vergleich der Schätzwerte mit unterschiedlicher Verwendung der Aufwuchsdauer (exakte Werte aus den Experimenten und Näherungen mit dem Aufwuchsmodell) ergibt sich eine Abweichung, welche bereits durch die Abweichungen der Aufwuchsdauer in *Abbildung 106* zu erkennen ist. Bei der Anwendung des Modells werden unterschiedliche Schätzwerte ermittelt, deren Gegenüberstellung in *Abbildung 107* gezeigt wird. Damit kann gut eingeschätzt werden, welche Konsequenzen die Anwendung des Aufwuchsmodells hat. Gemäß den Verzerrungen in der unterschiedlichen Dauer wird vor allem das Drei- und Vierschnittsystem beeinflusst. Im Zweischnittsystem werden lediglich zwei Aufwüchse generiert, die durch eine relativ lange Aufwuchszeit gekennzeichnet sind. Die Variabilität ist damit naturgemäß geringer als beim Drei- und Vierschnittsystem.

Beide Datensätze wurden den GIS-Ergebnisrastern entnommen. Die Karten der aufwuchsbezogenen Erträge sind demnach zusätzlich zum Fehler, welcher das Modell unter Einbeziehung der beobachteten Aufwuchsdauer schon mit sich bringt, auch in Hinblick dieser Verzerrungen zu bewerten. Eine generelle Aussage über den Trend der Verschiebung von beobachteter und modellierter Aufwuchsdauer kann nicht gemacht werden, da die thermischen Verhältnisse (Dauer und zeitliche Lage der thermischen Vegetationsdauer) jedes Jahr wechseln und sich deshalb stets unterschiedliche Abweichungen ergeben. Auf Basis der hier vorgenommenen Auswertung kann jedoch berechtigt angenommen werden, dass bei der Anwendung auf ein Zweischnittsystem die Schätzung der Aufwuchsdauer robuster ist.

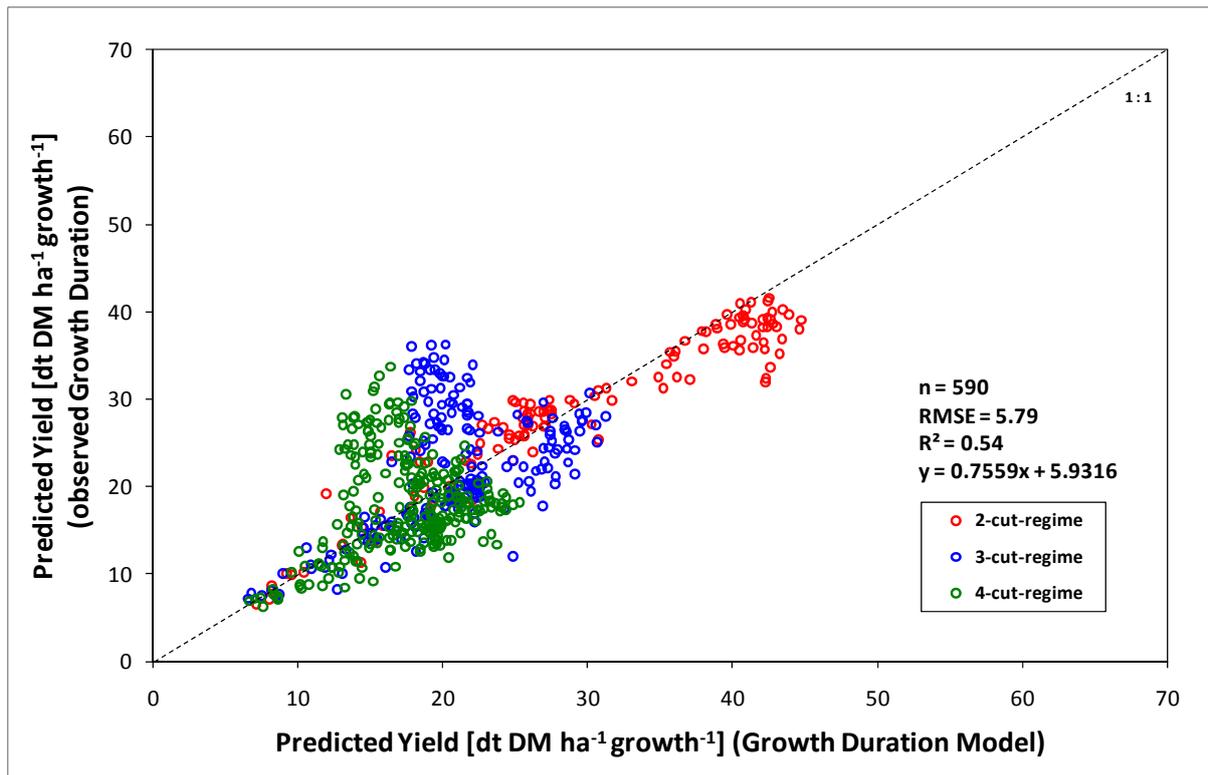


Abbildung 107: Vergleich der Schätzwerte von aufwuchsbezogenen Erträgen mit unterschiedlicher Verwendung der Aufwuchsdauer

Analyse 3

Wie bei Analyse 2 wurde hier ebenfalls die geschätzte Aufwuchsdauer für beide Varianten (Aufwuchsmodell versus Beobachtung) ermittelt und gegeneinander aufgetragen. Das Abweichungsmuster entspricht jenem von Analyse 2, allerdings sind hier die Mittelwerte über sechs Jahre (2002 bis 2007) gebildet worden. Dadurch vermindert sich bei gleichbleibendem Korrelationskoeffizienten der MAE geringfügig.

Analyse 4

Die Evaluierung der Schätzwerte auf Basis der Stationsdaten im Vergleich zu den aus den GIS-Rastern extrahierten Werten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit geringen Fehlern. Dies zeigt, dass die geschätzten Werte im GIS sehr gut repräsentiert werden, solange diese Schätzung auf der beobachteten Aufwuchsdauer beruht.

Analyse 5

Die geschätzten Werte unter Einbeziehung der modellierten Aufwuchsdauer werden mit den Beobachtungsdaten verglichen. Es handelt sich dabei um die Kombination der Abweichungen aus Analyse 2 (vgl. *Abbildung 107*) und der allgemeinen Modellperformance (vgl. Analyse 1). Es handelt sich dabei um das Ergebnis des gesamten Modellierungsprozesses auf Absolutwertebene und wird in *Abbildung 108* an den Evaluierungsstandorten dargestellt. Der Zusammenhang befindet sich durch die Kombination sämtlicher Fehlerräume auf einem sehr

niedrigen Niveau mit einem erheblichen MAE ($7,253 \text{ dt DM ha}^{-1} \text{ growth}^{-1}$). Die aufwuchsdauerbezogenen Verzerrungen beeinflussen die Absolutwerte der Einzelaufwüchse derart hoch, dass eine sinnvolle Anwendung auf räumlicher Ebene nicht möglich ist.

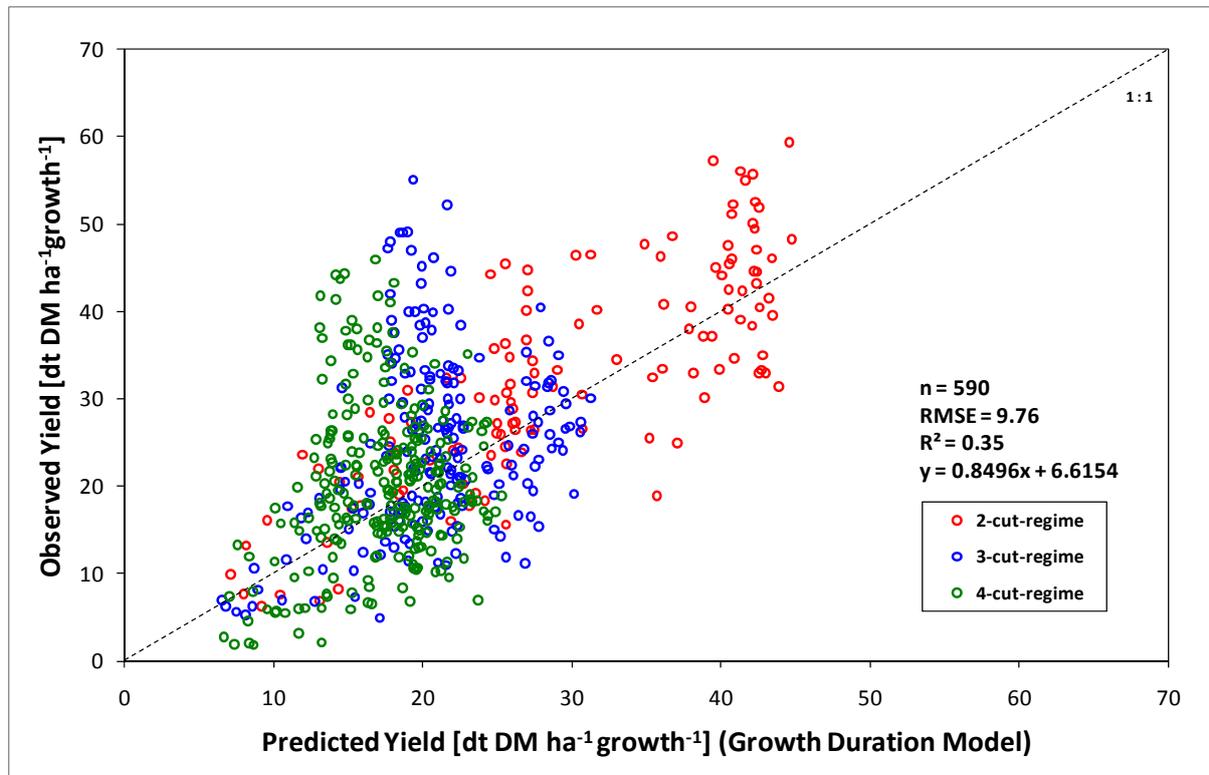


Abbildung 108: Modellevaluierung der aufwuchsbezogenen Erträge auf Absolutwertebene unter Berücksichtigung der modellierten Aufwuchsdauer

Analyse 6

Wie Analyse 5 gezeigt hat, ist eine Auswertung bzw. Modellanwendung auf Basis von Absolutwerten nicht aussagekräftig. Es wurde deshalb die Performance der relativen Ertragsbestimmung untersucht. Die Basis dafür ist ein über sechs Jahre (2002 bis 2007) gebildeter Mittelwert. In Analyse 6 werden die relativen Schätzwerte den relativen Beobachtungen gegenübergestellt – dies entspricht der Analyse 1 auf Absolutwertebene. Der MAE bezieht sich hier auf den Prozentwert und ist mit 15,564 deutlich niedriger als die entsprechenden Fehler bei den Absolutwerten. Allerdings ist auch hier ein Korrelationskoeffizient von 0,686 deutlich zu niedrig.

Analyse 7

Der Vergleich von relativen Erträgen aus den Schätzwerte, welche aus beobachteter und aus modellierter Aufwuchsdauer errechnet wurden, zeigt, dass es zu keinen markanten Verzerrungen kommt, wie dies bei den Absolutwerten (vgl. Analyse 2) der Fall ist. In *Abbildung 109* wird das Ergebnis dieser Gegenüberstellung grafisch dargestellt. Die relativ große Streuung ergibt sich aus der allgemeinen Performance des Modells (vgl. Analyse 1).

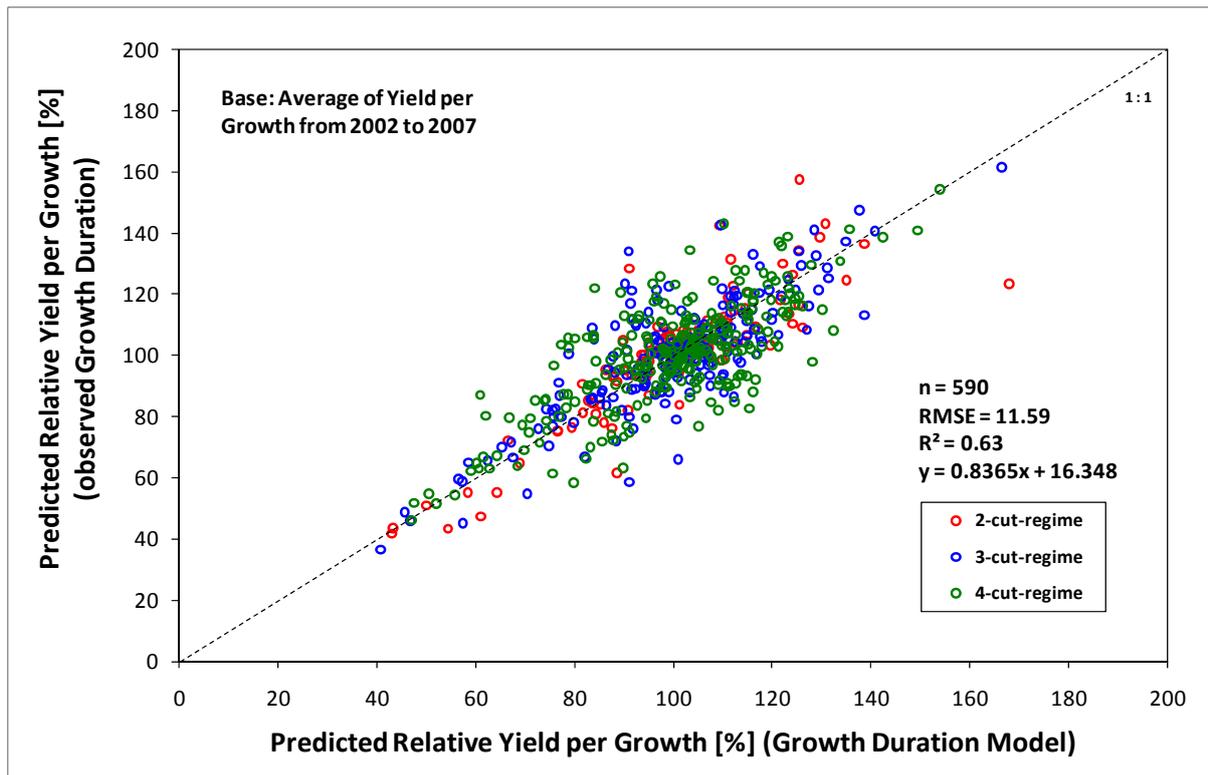


Abbildung 109: Vergleich der relativen, aufwuchsbezogenen Ertragschätzwerte auf Basis der beobachteten und modellierten Aufwuchsdauer

Analyse 8

Das Ergebnis in Analyse 5 beruht auf Absolutwerten und entspricht der hier vorgenommenen Untersuchung auf relativer Ebene. In *Abbildung 110* ist die Gegenüberstellung von Schätzwerten unter Einbeziehung des Aufwuchsmodells und den Beobachtungsdaten dargestellt. Mit einem MAE von 17,851 % (MAD 21,051 %) ist eine erhebliche Streuung der Daten zu beobachten. Wie bei Analyse 5 addieren sich hier die Effekte aus Analysen 6 und 7. Allerdings sind die Fehler auf Basis der prozentuellen Erträge rund halb so groß, wie jene, welche bei den Absolutwerten in Analyse 5 auftreten. Im Wesentlichen bezieht sich diese Verbesserung lediglich darauf, dass die Aufwuchsmodellierung nicht so deutlich auf die Ergebnisse wirkt, wie dies bei den Absolutwerten der Fall ist. Für das mittlere Ertragsniveau (Relativwerte um 100 %) zeigt sich in *Abbildung 110* (wie auch in *Abbildung 109*) eine deutliche Verdichtung. Es kann somit angenommen werden, dass im mittleren Bereich eine geringe Fehlerquote vorhanden ist, die jedoch mit sehr niedrigen und sehr hohen Erträgen deutlich zunimmt.

Auch die Untersuchung der relativen Erträge zeigt, dass die Anwendung auf Einzelaufwüchse nur beschränkt durchgeführt werden kann. Allerdings führt diese Variante zu wesentlich besseren Ergebnissen als eine Auswertung nach Absolutwerten. Aus Sicht der bisherigen Analysen ist zu empfehlen, die Anwendung von aufwuchsbezogenen Ergebnissen lediglich auf die zu den mehrjährigen Ertragsdurschnittswerten bezogenen relativen Erträge zu beschränken.

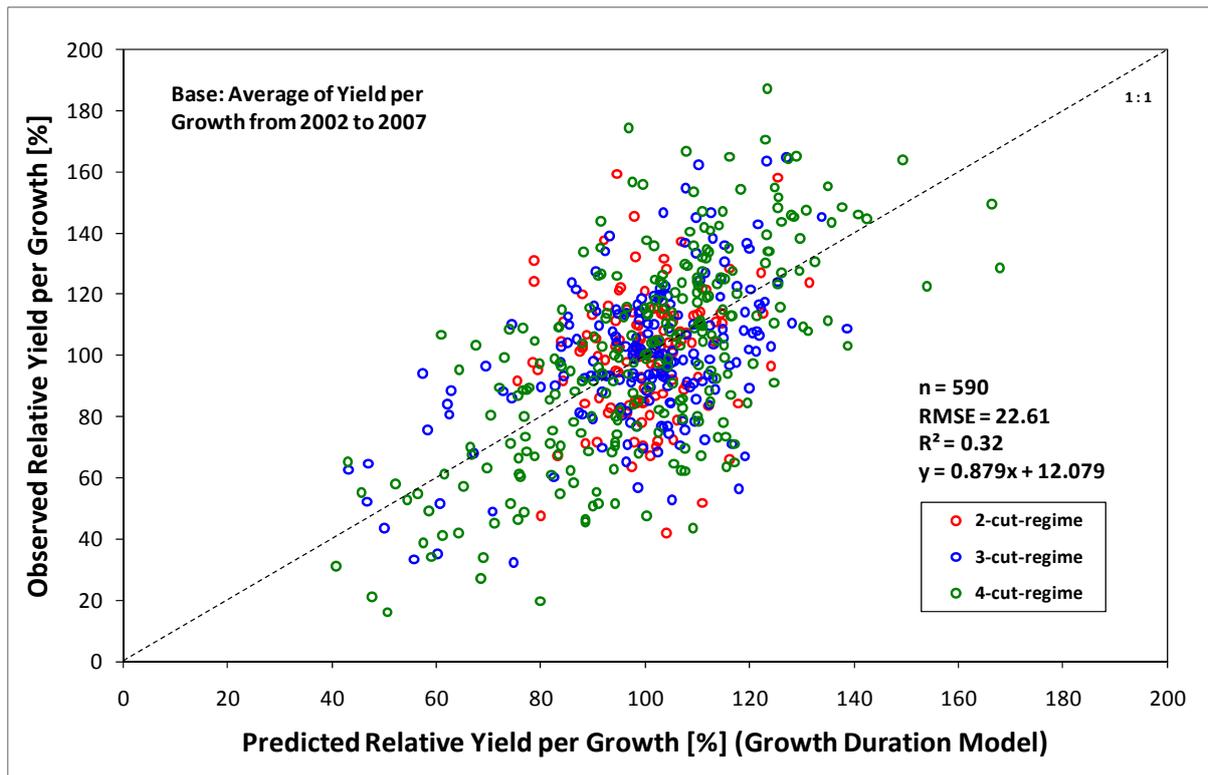


Abbildung 110: Modellevaluierung der relativen, aufwuchsbezogenen Erträgen unter Berücksichtigung der modellierten Aufwuchsdauer

Analyse 9

Zur Berechnung der Jahreserträge wurden die Einzelaufwüchse eines jeden Schnittsystems aufsummiert. Die Anzahl an verfügbaren Experimenten sinkt erheblich, da nur jene Standorte und Versuchsjahre herangezogen werden können, an denen eine lückenlose Erfassung der Einzelaufwüchse erfolgte. Ein weiteres Selektionskriterium besteht darin, dass nur Standorte verglichen werden, an denen auch aus den GIS-Ergebnisrastern Daten extrahiert werden konnten.

Der Vergleich von beobachteten und geschätzten Erträgen in *Abbildung 111* zeigt eine deutliche Streuung der Werte mit einem MAE von 9,32. Dies ist zwar im relativen Vergleich zum Fehler der Einzelaufwuchsbeträge (vgl. Analyse 1) erheblich geringer, dennoch mit beträchtlichen Unsicherheiten belastet. Durch die Akkumulation erfahren die Fehler der Einzelaufwüchse einen gewissen Ausgleich, sodass die Jahreserträge am Ende einen plausiblen Wertebereich repräsentieren. Vor allem im höheren Ertragsniveau (Drei- und Vierschnittsystem) zeigen die Modellergebnisse eine tendenzielle Unterschätzung. Der Grund für diesen Trend ist in der Einbeziehung einer großen Anzahl von Experimenten im mittleren Leistungsbereich für die Modellkalibrierung zu sehen. In der Beziehung dieser mittleren Erträge zu den stark variierenden klimarelevanten Modellprädiktoren und der Vernachlässigung von anderen leistungsbestimmenden Einflüssen wie zum Beispiel dem Bedeckungsgrad, dem Artengruppen-

verhältnis, usw. kommt es zu einer massiven Abschwächung des Zusammenhangs, welche sich besonders im oberen Leistungsbereich auswirkt.

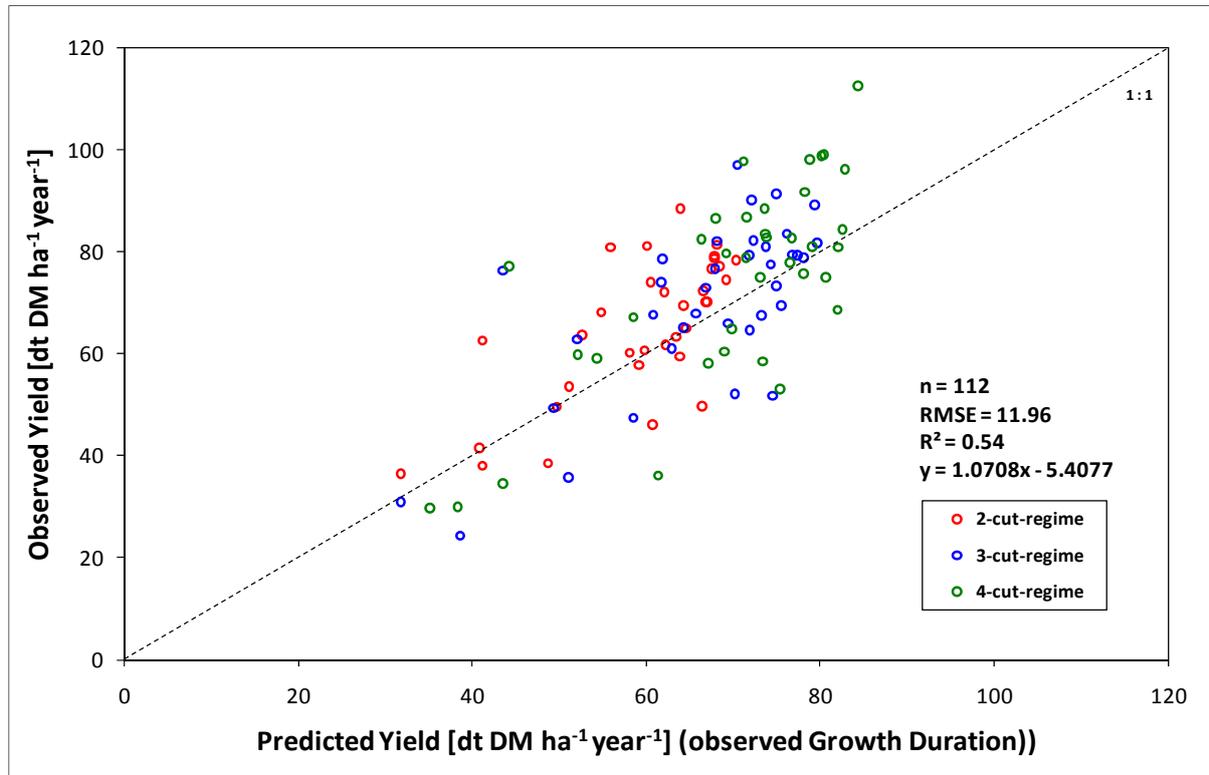


Abbildung 111: Schätzung der Jahreserträge auf Basis von Stationsdaten

Analyse 10

Während die Aufwuchsdauer bei der Bestimmung von Einzelaufwuchserträgen einen außerordentlich hohen Einfluss aufweist, ist dieser bei den Jahreserträgen kaum zu beobachten. Das Ergebnis in *Abbildung 112* kann in direkten Vergleich zu *Abbildung 107* bzw. Analyse 2 gesetzt werden. Der natürliche zeitliche Rahmen für die Generierung eines Jahresertrages ist gleich der Summe von Zeiträumen für die jeweiligen Einzelaufwüchse. Es findet ein Ausgleich statt, der besonders eindrucksvoll beim Zweischnittsystem ausfällt. Die Verschiebung des Erntezeitpunktes für den ersten Aufwuchs wirkt sich hier direkt auf die Dauer des zweiten Aufwuchses aus. Bei den Drei- und Vierschnittsystemen ist das Verschieben der Verhältnisse klarerweise etwas anfälliger auf die Abweichungen der Aufwuchsdauer.

Die Modellanwendung im GIS mit einer flächendeckenden Ertragsschätzung benötigt die Angaben zur Aufwuchsdauer und wie schon die Analysen 2, 3 und 5 gezeigt haben, hängt die Qualität der räumlichen Ergebnisse von diesem Näherungswert der Dauer ab. Aufgrund der ausgleichenden Eigenschaften bei der Berechnung von Jahreserträgen kann festgestellt werden, dass der auf die Dauer zurückzuführende Fehler deutlich geringer ausfällt und die weiteren Analysen damit stark beeinflusst.

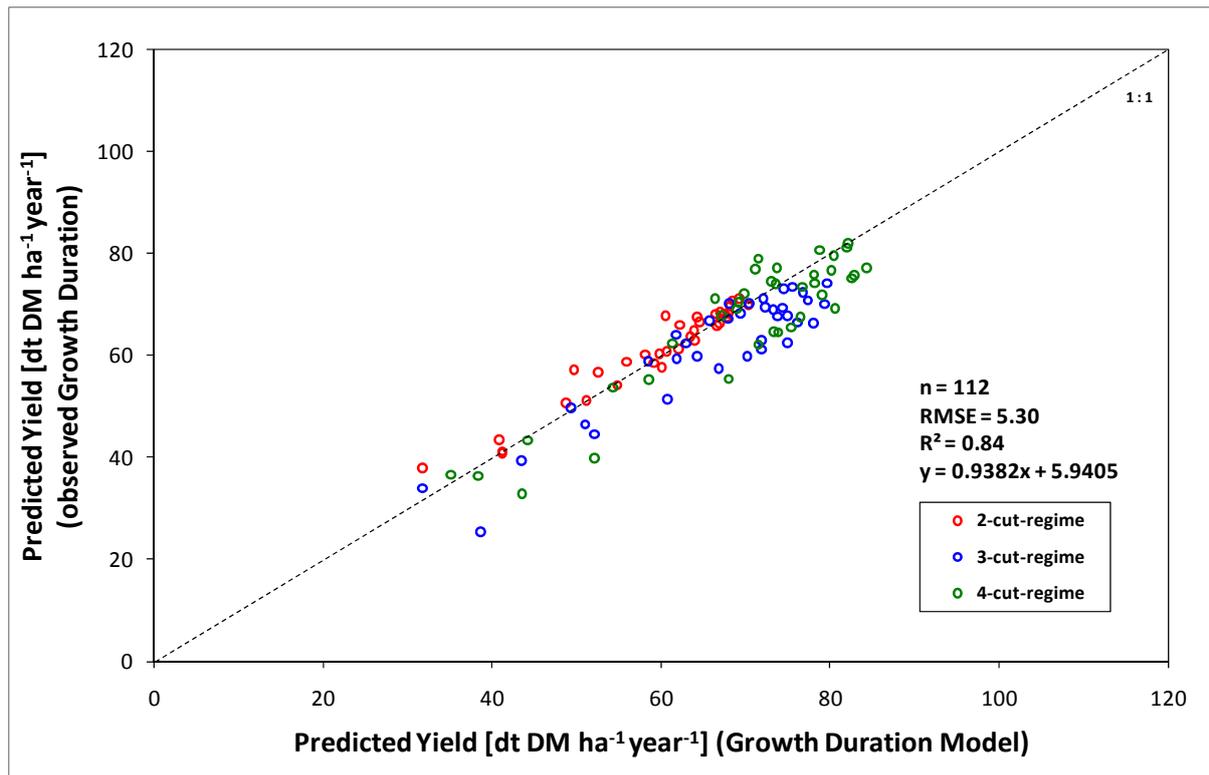


Abbildung 112: Vergleich der geschätzten Jahreserträge mit unterschiedlicher Verwendung der Aufwuchsdauer

Analyse 11

Die Bildung eines Mittelwertes über mehrere Jahre verstärkt den Zusammenhang zwischen den geschätzten Jahreserträgen mit unterschiedlicher Einbeziehung der Aufwuchsdauer. Der MAE mit 3,11 und der Korrelationskoeffizienten von 0,97 belegen, dass die Berechnungen der relativen Erträge von einer ausgezeichneten Basis ausgehen, welche durch das Näherungsmodell der Aufwuchsdauer nicht beeinflusst wird.

Analyse 12

Der Vergleich von Schätzergebnissen zwischen standortbasierter Erhebung und GIS zeigt die hohe Qualität der Wetterdateninterpolation. Der Zusammenhang beträgt hier 0,97 mit einem MAE von 4,45.

Analyse 13

Die Gegenüberstellung von Beobachtung und Schätzung absoluter Jahreserträge wird durch die Modellierung der Aufwuchsdauer kaum beeinträchtigt und entspricht deshalb in etwa dem Zusammenhang aus Analyse 9. Im Gegensatz zu Analyse 5 (Abbildung 108) ist der Korrelationskoeffizient mit 0,70 deutlich höher als das Ergebnis auf Einzelaufwuchsbasis. Auch der Fehler ist deutlich geringer – beim Vergleich der Werte in Tabelle 5 muss natürlich zusätzlich berücksichtigt werden, dass sich die jeweiligen statistischen Kennzahlen von aufwuchsbezo-

genen Erträgen und Jahreserträgen im Wertebereich ihrer Basisvariablen deutlich voneinander unterscheiden.

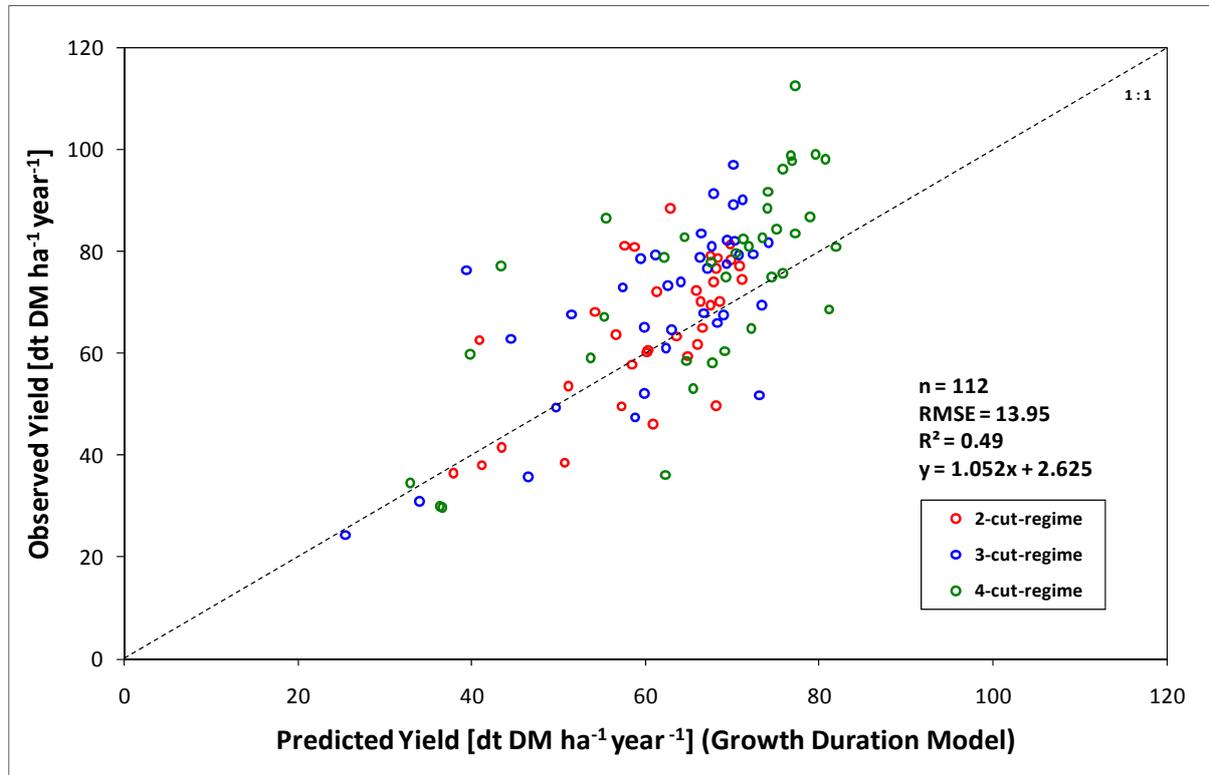


Abbildung 113: Modellevaluierung der Jahreserträge auf Absolutwertebene unter Berücksichtigung der modellierten Aufwuchsdauer

Analyse 14

Wie bereits bei den aufwuchsbezogenen Ergebnissen werden auch die relativen Schätz- und Beobachtungsdaten im Kontext der Jahreserträge einer eingehenden Untersuchung unterzogen. Die Basis bilden wiederum Durchschnittswerte der aus den Einzelaufwüchsen aggregierten Jahreserträge aus den Jahren 2002 bis 2007. Wie in *Abbildung 114* dargestellt, zeigt sich eine wesentliche Verbesserung des Zusammenhangs im Vergleich zu den aufwuchsbezogenen Relativerträgen. Der Grund dafür liegt in der ausgleichenden Wirkung der Jahresergebnisse auf die Fehler der Einzelaufwüchse.

Wie bereits in Analyse 9 festgestellt, kommt es auch bei den Relativergebnissen zu einer tendenziellen Unterschätzung im oberen Leistungsbereich, allerdings nicht so stark ausgeprägt, wie dies in Analyse 9 zu beobachten ist. Insgesamt ist der Fehler um etwa 2 % geringer als bei der Anwendung von Absolutwerten. Dies bedeutet zwar keine massive Verbesserung, allerdings ist dem Verteilungsmuster in *Abbildung 114* zu entnehmen, dass die Problematik der systematischen Fehlschätzung abgemildert wird. Die signifikante Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes um 10 % begründet diese Annahme. Deshalb ist dem relativen Ansatz eindeutig der Vorzug zu geben, wenn die regionalen Unterschiede in den Ergebniskarten interpretiert werden sollen.

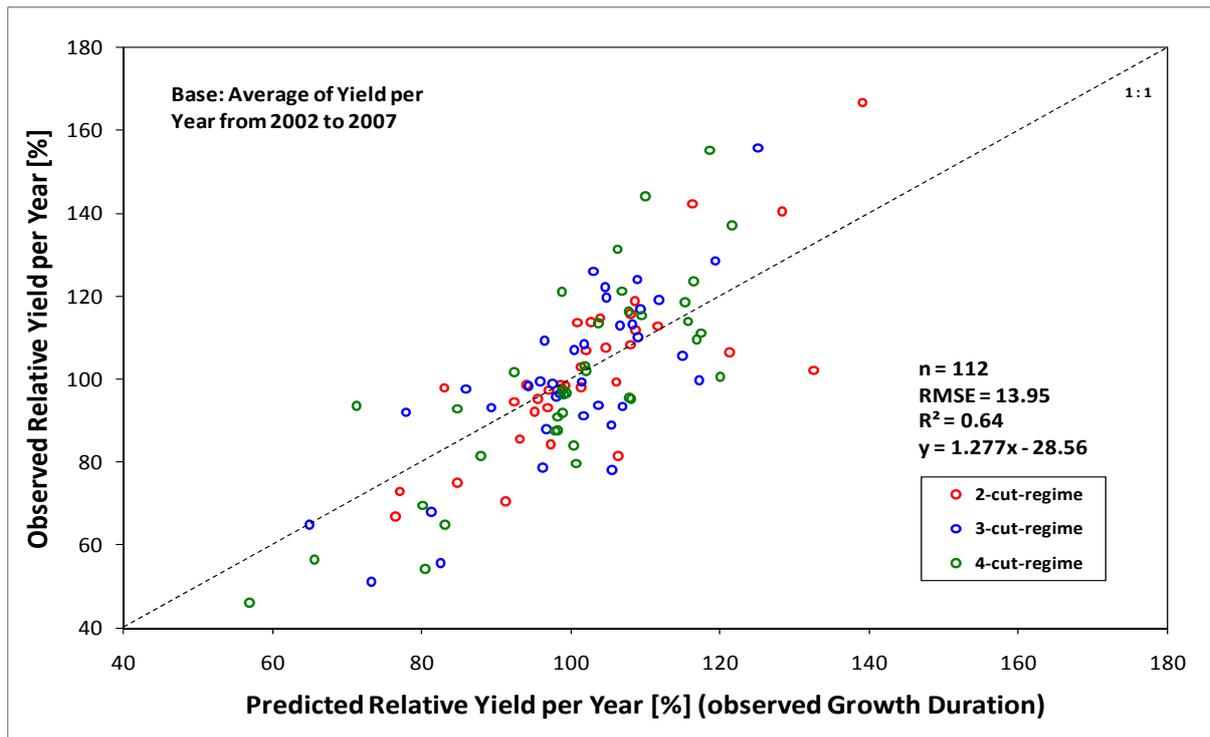


Abbildung 114: Vergleich der relativen Jahreserträge auf Basis von geschätzten und beobachteten Daten

Analyse 15

In *Abbildung 115* wird die numerische Auswertung aus *Tabelle 5* grafisch dargestellt. Die mangelhafte Bestimmung der Aufwuchsdauer hat keinen Einfluss auf die Jahreserträge.

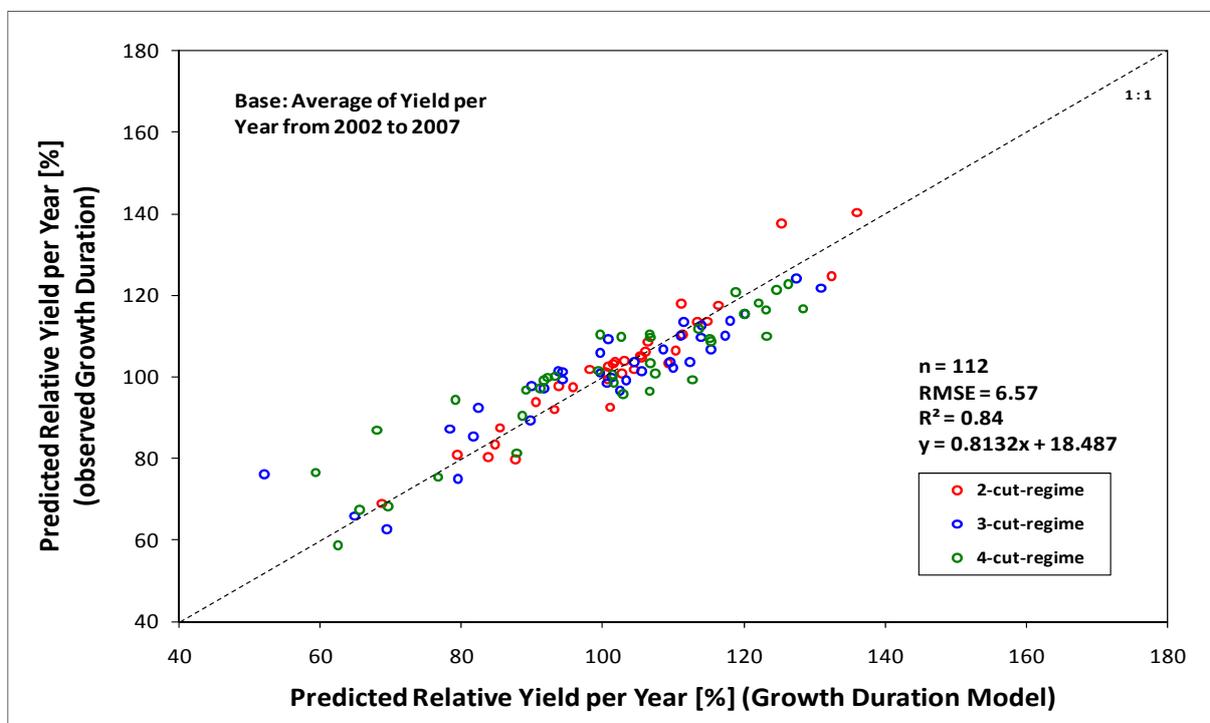


Abbildung 115: Vergleich der relativen, geschätzten Jahreserträge auf Basis der beobachteten und modellierten Aufwuchsdauer

Diese Feststellung gilt sowohl für die absoluten als auch für die relativen Jahreserträge (vgl. *Abbildung 112*). Hinsichtlich des Fehlers ist auch beim relativen Ansatz eine deutliche Verbesserung zu sehen; dies gilt vor allem im direkten Vergleich mit den aufwuchsbezogenen Relativverträgen in Analyse 7 (vgl. *Abbildung 109*).

Analyse 16

Für die Evaluierung der räumlichen Anwendung hat die Gegenüberstellung der Relativverträge mit geschätzter Aufwuchsdauer und den Beobachtungsdaten die wichtigste Aussagekraft. Die in *Abbildung 116* dargestellten Ergebnisse sind in direkten Vergleich zu jenen aus Analyse 8 (vgl. *Abbildung 110*) zu stellen. Der Zusammenhang ist mit einer Verbesserung des Korrelationskoeffizienten von 0,568 auf 0,738 wesentlich stärker, aber auch die Fehler sind um 6 % signifikant geringer. Als Schlussfolgerung daraus kann festgestellt werden, dass in jedem Fall die Jahreserträge durch ihre weitgehende Robustheit gegenüber der Aufwuchsdauerschätzung für eine Anwendung der Ergebnisse herangezogen werden sollten. Im Vergleich mit Analyse 13 schneidet das Relativergebnis gegenüber der Auswertung nach Absolutwerten geringfügig besser ab. Vor allem die Problematik der systematischen Fehlschätzung wird, wie bereits in Analyse 14 dargestellt, durch den Relativansatz besser gelöst.

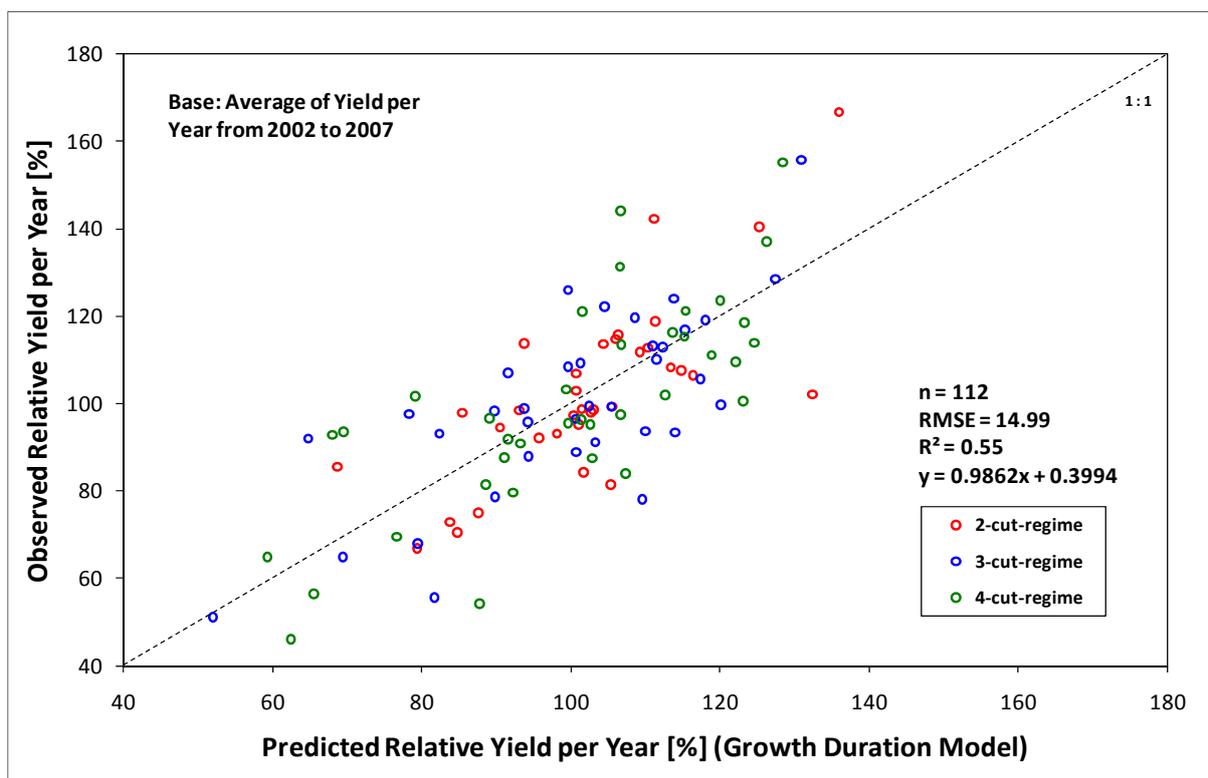


Abbildung 116: Modellevaluierung der relativen Jahreserträge unter Berücksichtigung der modellierten Aufwuchsdauer

Alle durchgeführten Analysen zeigen, dass den Auswertungen auf Basis der Jahreserträge gegenüber den aufwuchsbezogenen Erträgen eindeutig der Vorzug zu geben ist. In weiterer

Folge sind die Relativerträge jenen auf Basis von Absolutwerten vorzuziehen, da zum einen ein besserer Zusammenhang zwischen Schätz- und Beobachtungswerten besteht und zum anderen die systematischen Verzerrungen, vor allem im oberen Ertragsleistungsbereich, reduziert werden. Dies ist vor allem für jede Form der kartographischen Darstellung und damit für die Abschätzung der regionalen Unterschiede entscheidend.

4.7.5 Ausgewählte Evaluierungsbeispiele für die Ergebnisse im GIS

Abgesehen von den im vorangegangenen Abschnitt bereits verwendeten Daten aus den GIS-Rasteroberflächen für die statistische Auswertung, werden hier nochmals beispielhaft einige Ergebnisse mit definierter geographischer Zuordnung gezeigt. In *Abbildung 117* wurden fünf Standorte aus den unterschiedlichsten Klimaregionen ausgewählt.

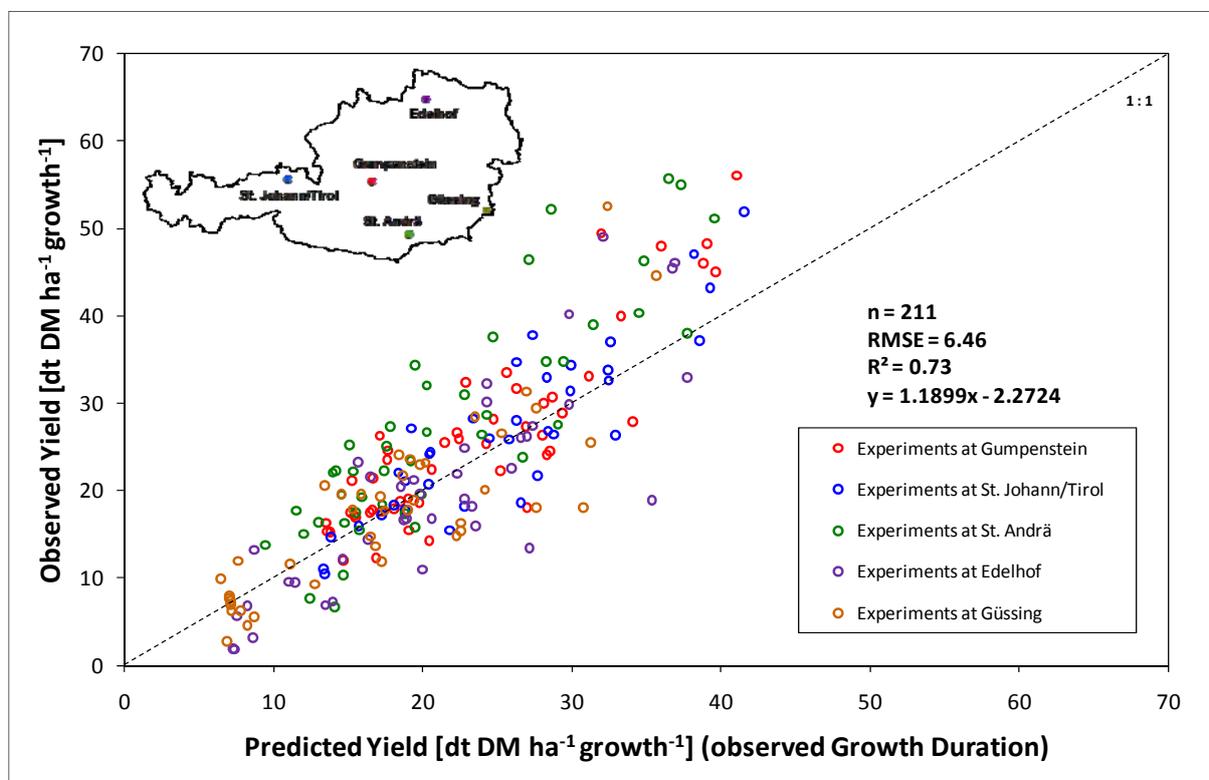


Abbildung 117: Evaluierung von GIS-Ergebnissen an ausgewählten Standorten

Aus der Gegenüberstellung von Schätzung und Beobachtung sind zunächst standortbedingte Unterschiede in der Modellgüte zu beobachten. Wie bereits in *Abbildung 84* für zwei Standorte und in *Abbildung 85* für sämtliche Standorte dargestellt, werden die Grünlanderträge an einigen Stationen mit Hilfe der verwendeten Prädiktoren sehr gut erklärt, andere Stationen weisen systemische Abweichungen auf. In *Abbildung 117* zeigt sich zum Beispiel eine deutliche Unterschätzung am Standort St. Andrä, welcher sich über den gesamten Wertebereich erstreckt und deshalb trotzdem zu einem relativ starken Zusammenhang führt. In St. Johann/Tirol fallen systematische Fehler weniger ins Gewicht, dafür ist die Streuung etwas größer. Allen ausgewählten Standorten gemeinsam ist eine erhebliche Unterschätzung von hohen

Erträgen durch das Modell. Damit wird nochmals das Argument für die sich in den statistischen Analysen bewährte Anwendung der Relativerträge untermauert.

In der Untersuchung von Jahreserträgen konnten bei der statistischen Auswertung nur relativ wenige Datensätze einbezogen werden. Es stellt sich damit die Frage, wie sich die Analyseergebnisse verändern, wenn mehr Daten zur Verfügung stehen. Am Beispiel der Auswirkung der Aufwuchsdauerschätzung auf die Jahresertragsschätzung soll dies demonstriert werden. Für die GIS-Implementierung hat gerade die Fehlerquelle der Aufwuchsdauer den größten Einfluss. In *Abbildung 118* handelt es sich um eine Erweiterung des Datenbestandes von 112 auf 315 Experimente für den in Analyse 10 untersuchten Sachverhalt. Die Daten der Schätzung wurden an den in der Abbildung dargestellten Standorten aus den GIS-Oberflächen extrahiert. Es zeigt sich dabei im Vergleich zu *Abbildung 112* weder eine Verschlechterung des Zusammenhangs noch eine Zunahme des Fehlers.

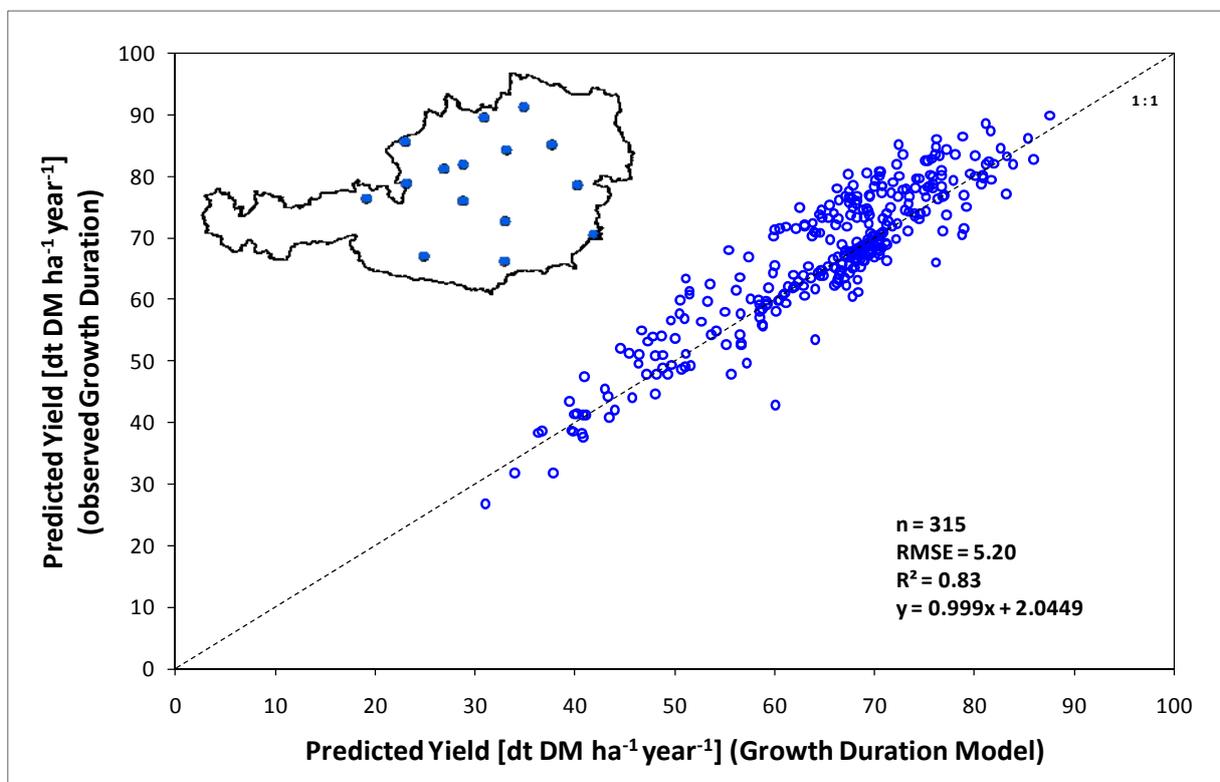


Abbildung 118: Vergleich der geschätzten Jahreserträge mit unterschiedlicher Verwendung der Aufwuchsdauer für einen erweiterten GIS-Datenbestand

Die Ergebnisse der Ertragsschätzung auf räumlicher Ebene können nur in beschränktem Umfang evaluiert werden, da ausschließlich an den Versuchsstandorten Beobachtungsdaten als Vergleichsbasis zur Verfügung stehen. Die heterogenen Verhältnisse an den Vergleichsstandorten ergeben allerdings für die durchgeführten statistischen Analysen ein repräsentatives Bild über Modellgüte, Zusammenhänge und Fehlerräume, die sich aus der räumlichen Anwendung des empirisch statistischen Schätzmodells für den Grünlandertrag ableiten lässt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kulturart Grünland ist in Österreich mit über der Hälfte der landwirtschaftlichen Nutzfläche ein wesentliches Element der Landbewirtschaftung und ein charakteristisches Merkmal der alpenländischen Kulturlandschaft. Als Futtergrundlage für die Viehwirtschaft ist die wirtschaftliche Bedeutung des Grünlandes enorm hoch und vor allem im Berggebiet für über 70 % der landwirtschaftlichen Betriebe eine wichtige Grundlage ihrer Existenz.

Der Ertrag auf Grünlandflächen wird durch eine außerordentlich vielfältige Bewirtschaftung bestimmt und hängt von unterschiedlichen Standortfaktoren ab. Das Wetter und die daraus abgeleitete Wasserverfügbarkeit ist für den gesamten Pflanzenbau vor allem in Regionen mit erhöhtem Risiko von Trockenheit die Hauptursache der jährlich schwankenden Ertragsmengen. Das Grünland mit einem hohen Wasserbedarf reagiert sensibel auf ausbleibende Niederschläge und anhaltende Austrocknung der Böden.

Eine flächendeckende Schätzung von Grünlanderträgen, insbesondere die Quantifizierung des wetterbedingten Einflusses auf die Erträge, ist Grundlage für statistische Auswertungen der landesweiten Ertragssituation, für die Bewertung von Risikoregionen in Bezug auf Trockenheit, für die regionale Differenzierung nach Intensität der Auswirkung von Dürreperioden auf das Grünland und nicht zuletzt für eine Folgenabschätzung eines sich verändernden Klimas. Die Voraussetzung einer landesweiten und flächendeckenden Darstellung dieser Sachverhalte ist eine aufwendige, räumlich basierte Modellierung, welche in der vorliegenden Arbeit umgesetzt und im Rahmen eines mehrjährigen Prozesses optimiert wurde.

Die räumliche Implementierung in einem Geographischen Informationssystem (GIS) ist in der Lage, standortbasierte Zusammenhänge auf eine kontinuierliche Oberfläche zu übertragen, die im Fall der vorliegenden Arbeit, die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche Österreichs umfasst. Allerdings müssen dafür entsprechende Simplifikationen vorgenommen werden, da für jede geographische Lage im Untersuchungsgebiet sämtliche Parameter des Modells vorliegen müssen. Die Nichtberücksichtigung von ertragsrelevanten Faktoren, wie zum Beispiel die Pflanzenbestandszusammensetzung, welche nicht über die Fläche interpoliert werden kann und deshalb auch nicht als Modellparameter in Frage kommt, führt zu Unsicherheiten und Fehlern in der Ertragsschätzung. Es handelt sich bei der vorliegenden Modellierung um kein klassisches Wachstumsmodell, in dem biologische Prozesse nachgebildet werden, sondern um einen empirisch statistischen Ansatz.

Die Basis bilden Ertragsdaten aus mehrjährigen Experimenten an 21 auf ganz Österreich verteilten Standorten und Wetter- bzw. Bodeninformationen als räumlich modellierte, kontinuierliche Oberflächen. An den Versuchsstandorten wurde ein statistischer Zusammenhang zwischen Ertrag und Wettersituation hergestellt, der in weiterer Folge dazu genutzt wurde, um mit Hilfe der räumlichen Prädiktoren auf den Ertrag an beliebigen Standorten zu schließen. Diese Prädiktoren beinhalten an zentraler Stelle ein vereinfachtes, räumliches Modell der Bo-

denwasserbilanz, aus der Wasserstressfaktoren abgeleitet werden. Über den Verlauf der Vegetationsperiode ergibt sich damit eine mehr oder minder schwankende Wasserverfügbarkeit. Die wichtigsten Wetterdaten (Temperatur, Wind, Globalstrahlung und Luftfeuchte) werden zur Referenz-Evapotranspiration aggregiert und der aktuellen Evapotranspiration mit der Einbeziehung von Niederschlag und nutzbarer Feldkapazität gegenübergestellt. Aus diesem Verhältnis ergibt sich eine mögliche Wasserlimitierung, welche im Rahmen des *Grassland Statistical Model* (GRAM) durch eine Minderung der Wachstumsbedingungen zum Ausdruck gebracht und als *Growth Supporting Factor* mit der Temperatur und Globalstrahlung, die treibende Kräfte des Wachstums, kombiniert wird. Die Akkumulation der beiden Parameter über die Aufwuchsdauer ergibt jene Werte, welche für die Erklärung des Ertrages herangezogen werden. Das Modell erreicht bei der Schätzung der aufwuchsbezogenen Erträge mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,63 und einem mittleren Fehler (RMSE) von 6.69 dt TM ha⁻¹ einen mittelstarken Zusammenhang. Die für die räumliche Implementierung dieses Modells wichtigste Eigenschaft ist ein hohes Maß an Robustheit – die Erträge werden mit Hilfe relativ weniger Parameter erklärt. Gruppieren man die geschätzten Werte über die 21 Versuchstationen, ergibt sich ein mittlerer Korrelationskoeffizient von 0,84 und ein mittlerer absoluter Fehler (MAE) von 5,44 dt TM ha⁻¹.

Die standortbasierte Verifizierung zeigt ein sehr gutes Prädiktionsverhalten, allerdings ist das Modell auch auf dessen Anwendbarkeit im geographischen Raum zu prüfen. Dazu wurden verschiedene Konfigurationen zwischen Beobachtungen und Schätzergebnissen untersucht und deren Zusammenhang sowie Fehlerbereich quantifiziert. Die Auswertungen beziehen sich auf unterschiedliche Werteneiveaus:

- (1) Erträge pro Aufwuchs in dt TM ha⁻¹
- (2) Relative Erträge pro Aufwuchs in Bezug auf einen mehrjährigen Ertragsdurchschnitt
- (3) Erträge pro Jahr in dt TM ha⁻¹ (Summe von Einzelaufwuchserträgen)
- (4) Relative Erträge pro Jahr in Bezug auf einen mehrjährigen Ertragsdurchschnitt

(1) Neben den klimarelevanten Parametern wird als Bewirtschaftungsfaktor die Aufwuchsdauer benötigt. Sie ergibt sich aus der Zeit zwischen den einzelnen Ernteterminen. Eine flächendeckende Modellierung ist äußerst schwierig und unsicher, da die Schnittzeitpunkte von vielen Einflüssen bestimmt werden. Im vorliegenden Projekt wurde versucht, aus thermischen Informationen (Vegetationsperiode) und einer statistischen Auswertung von langjährigen Schnittverteilungen eine Näherung zu rechnen, welche für die Umsetzung der Ertragsschätzung als räumliches Modell unverzichtbar ist. Diese Modellierung der Aufwuchsdauer wirkt sich auf die Höhe der Fehler bei den flächendeckenden Ergebniskarten aufwuchsbezogener Erträge massiv aus. Der Vergleich von Beobachtungsdaten mit den Schätzergebnissen aus den GIS-Oberflächen zeigt einen schwachen Zusammenhang (Korrelationskoeffizient von 0,59) und einen hohen mittleren absoluten Fehler von 7,25 dt TM ha⁻¹; bezogen auf den Mittelwert der Erträge bedeutet dies einen relativen Fehlerbereich von 34 %. Die Ergebnisse zeigen klar, dass eine direkte Verwendung der aufwuchsbezogenen Erträge auf Absolutwertbasis nicht

möglich ist. Die Schwankungsbreite in den Schätzwerten ist dermaßen hoch, dass Anwendungen auf dieser Ebene keine seriösen Ergebnisse liefern können.

(2) Um den starken Einfluss der modellierten Aufwuchsdauer abzuschwächen, wurden die relativen Erträge, bezogen auf einen mehrjährigen Mittelwert (2002 bis 2007), berechnet. Die Beobachtungsdaten zeigen einen ebenso schwachen Zusammenhang mit den Schätzwerten (Korrelationskoeffizienten von 0,57) wie bei der Auswertung von Absoluterträgen, allerdings ist der mittlere absolute Fehler mit 18 % deutlich geringer.

Die Wasserverfügbarkeit muss den Erträgen aufwuchsbezogen zugeordnet werden, da nur so die periodisch auftretenden Effekte differenziert werden können. Bei einer Akkumulation der Witterungseinflüsse über die gesamte Vegetationsperiode würden sich negative und positive Schwankungen dermaßen ausgleichen, dass sich ein Zusammenhang zwischen Bodenwasser-situation und Jahreserträgen nicht herstellen lässt.

(3) Demnach werden für die Prüfung der Modellgüte auf Jahresertragsbasis die Einzelaufwüchse zusammengezogen. Dabei ergibt sich ein gewisser Ausgleich zwischen den einzelnen Aufwüchsen, wobei sich der Einfluss der modellierten Aufwuchsdauer relativiert und deutlich in den Hintergrund tritt. Der Zusammenhang zwischen beobachteten und geschätzten Jahreserträgen ist deutlich stärker, als dies bei den Einzelaufwüchsen der Fall ist; der Korrelationskoeffizienten beträgt 0,70. Allerdings ist der mittlere absolute Fehler in Höhe von 10,99 dt TM ha⁻¹ noch immer sehr hoch – relativ zum Jahresertrag entspricht dies einem Fehler von 17 %. Im Vergleich zum aufwuchsbezogenen Absolutertrag mit 34 % ist dies zwar eine deutliche Verbesserung, eine Anwendung der Jahreserträge ist unter Berücksichtigung dieser Unsicherheit allerdings nicht zu empfehlen. Hinzu kommt eine nicht lineare Unterschätzung des Modells, die vor allem im oberen Bereich der Ertragsleistung zunimmt. In den Ergebniskarten führt dies zu einer Unterschätzung in jenen Regionen, welche von intensiver und ertragsreicher Grünlandwirtschaft geprägt sind. Der Grund für die Verzerrung liegt hauptsächlich in der Fehlerakkumulation aus den Einzelaufwüchsen. Niedrige Erträge werden bei der Zusammenfassung zu Jahreserträgen besser ausgeglichen als hohe Werte. Das Modell ist grundsätzlich nur beschränkt in der Lage, hohe Erträge optimal abzubilden, da bereits bei der Installierung der Versuchsstandorte die Zielrichtung „Trockenstandorte“ im Vordergrund stand und Hochleistungsflächen unterrepräsentiert waren.

(4) Die Relativerträge auf Jahresbasis mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,74 und einem mittleren absoluten Fehler von 12 % zeigen eine deutliche Verbesserung. Die Abweichungen von Einzeljahren in Bezug auf einen langjährigen Durchschnitt – es wurden die Erträge der Jahre 1997 bis 2009 gerechnet – ergeben eine nachgewiesenen plausible geographische Verteilung. Diese Anwendung stellt somit die primäre Einsatzmöglichkeit des Modells dar. Die Ertragsminderungen bei Trockenheit bzw. die Steigerungen in Jahren mit optimalen Rahmenbedingungen zeigen sowohl im Wertebereich als auch in der räumlichen Repräsentation gute Ergebnisse. Sie können zur Bewertung der regionalen Auswirkung von jährlichen Ertragsschwankungen für die Grünlandwirtschaft Österreichs herangezogen werden.

Aus den durchgeführten Analysen ergeben sich für die Anwendung des Modells klare Handlungsempfehlungen: Aufwuchsbezogene Erträge können weder auf Basis von Absolutwerten noch auf relativer Ebene für weitere Interpretationen und Berechnungen herangezogen werden. Die zu Jahreserträgen aufsummierten Einzelaufwüchse eignen sich für die räumliche Darstellung gut, allerdings muss bei den Absoluterträgen ein großer Fehler, sowie eine systematische Unterschätzung bei hohen Erträgen hingenommen werden. Die geographische Darstellung von Jahreserträgen hat somit nur bedingte Aussagekraft und darf lediglich unter dem Hinweis auf den möglichen Fehlerraum verwendet werden. Die Relativerträge auf Jahresbasis eignen sich für eine qualitativ hochwertige Abschätzung der regionalen Variabilität in den einzelnen Jahren. Besonders eindrucksvoll ist diese Auswertung bei der Anwendung auf Extremjahre (z.B. das Trockenjahr 2003).

Da das Modell zum gegenwertigen Entwicklungsstand nicht in der Lage ist, auf Basis absoluter Erträge Schätzungen in ausreichender Genauigkeit vorzunehmen, können sämtliche Anwendungen, welche sich auf Ertragsquantitäten beziehen, nicht umgesetzt werden.

Die Ursachen für die Fehlerquote liegen hauptsächlich in der Unterschiedlichkeit der Standorte bzw. der dort generierten Grünlanderträge in Bezug auf ihren Zusammenhang mit der Witterung. Das räumliche Modell beschränkt sich bei der Erklärung des Ertrages auf Wasserverfügbarkeit, Temperatur, Globalstrahlung und Aufwuchsdauer. Dies sind zwar wichtige Faktoren, jedoch begründet sich die Ertragsvarianz natürlich nicht nur in der Variabilität der Wetersituation, sondern setzt sich aus einer Menge an Einflüssen zusammen, welche durch das räumliche Modell nicht beschrieben werden können. Die aus Sicht der Modellierung unbekannt Faktoren wie kleinklimatische Effekte, die Art der Versuchsbetreuung, die Nährstoffverfügbarkeit, die Veränderung der Pflanzengesellschaft im Laufe des Versuchszeitraums, die Besonderheiten in der Bodenbeschaffenheit, usw. sind dafür verantwortlich, dass der Ertrag nur bis zu einem gewissen Grad erklärt werden kann. Der verbleibende Fehlerraum subsumiert somit die gesamten unbekannt Einflüsse.

Weiterführende Arbeiten müssen sich eingehend mit einer Standortanalyse auseinandersetzen, Fehlergrößen identifizieren und quantifizieren. Können bei der Kalibrierung des Modells möglichst viele zusätzliche Faktoren einbezogen werden, wirkt sich dies auf die Modellperformance positiv aus. Eine Standortanalyse wurde im vorliegenden Projekt zwar durchgeführt, allerdings ist hier noch ein erhebliches Verbesserungspotenzial zu erkennen. Eine weitere vielversprechende Möglichkeit zur Hebung der Modellqualität liegt in der getrennten Kalibrierung nach einzelnen Aufwüchsen. Beispielsweise wirken auf den Ertrag des ersten Aufwuchses andere, nicht wetterbedingte Faktoren (z.B. Pflanzenbestandszusammensetzung) stärker als bei den Folgeaufwüchsen. Voraussetzung dafür ist jedoch eine umfangreiche Standortanalyse und die Untersuchung von Wechselbeziehungen zwischen den unbekannt Einflussfaktoren. Ein entscheidendes Verbesserungspotenzial liegt in der Verbesserung der prognostizierten Schnitttermine und damit eine möglichst optimale Annäherung der Aufwuchsdauer an die realen Verhältnisse.

Ein Schwerpunkt der vorliegenden Projektarbeit war die Implementierung von Algorithmen, welche eine Weiterentwicklung effektiv und effizient gestalten. Dieses „Werkzeug“ war eine wichtige Voraussetzung für die Erarbeitung der vorliegenden Ergebnisse, da bei der Feinabstimmung von empirischen Modellkoeffizienten zahlreiche Rechendurchläufe vorgenommen werden mussten. Eine weitere Entwicklung am vorliegenden Modell bzw. die Bearbeitung ähnlicher Fragestellungen kann die hier etablierte technischen Infrastruktur, insbesondere die komplexen GIS-Algorithmen, nutzen und damit den hohen Aufwand künftiger projektspezifischer Softwareentwicklung optimieren.

6 Literaturverzeichnis

- Aasa, A.; Jaagus, J.; Ahas, R.; und Sepp, M. (2004): The influence of atmospheric circulation on plant phenological phases in central and eastern Europe. *International Journal of Climatology* **24** (12), 1551-1564.
- Ahrens, C.D. (2007): *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*, Thomson Brooks/Cole, 537 S.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; und Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Papers Paper No 56, FAO, Rome, 326 S.
- Bailer-Jones, D.M. (2000): *Naturwissenschaftliche Modelle: Von Epistemologie zu Ontologie*. mentis-Verlag, Paderborn, 4. Internationaler Kongress zu GAP "Argument und Analyse", Bielefeld, 11 S.
- Bartelme, N. (2000): *Geoinformatik - Modelle, Strukturen, Funktionen*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 419 S.
- Bernhardsen, T. (2002): *Geographic Information Systems - An Introduction*, John Wiley & Sons, New York, 428 S.
- Blaney, H.F. und Criddle, W.D. (1950): Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. Technical Paper 96, *U.S. Soil Conservation Service*, 48 S.
- Blöschl, G. und Merz, R. (2002): Methoden der hydrologischen Regionalisierung im Zusammenhang mit der Niederschlags-Abflussmodellierung. In *Wiener Mitteilungen Wasser - Abwasser - Gewässer*, 164 S.
- BMLFUW (2008): *Grüner Bericht 2008 - Bericht über die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft*, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 322 S.
- Brown, P. (2000): *Basics of Evaporation and Evapotranspiration*. University of Arizona, Tucson, 4 S., <http://cals.arizona.edu/pubs/water/az1194.pdf>, (24.11.2009).
- Buchgraber, K. und Gindl, G. (2004): *Zeitgemäße Grünlandbewirtschaftung*, Leopold Stocker Verlag, 192 S.
- Buchgraber, K.; Resch, R.; Schaumberger, A.; Schwab, E.; und Schwaiger, E. (2006): Abschlussbericht zum Forschungsprojekt "Entwicklung eines Modells für die konkrete Ermittlung von Trockenschäden in den einzelnen Grünlandregionen Österreichs", HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irdning, 233 S.
- Cazorzi, F. und Dalla Fontana, G. (1996): Snowmelt modelling by combining air temperature and a distributed radiation index. *Journal of Hydrology* **181** (1-4), 169-187.
- Clark, I. und Clausen, F.L. (1981): Simple alternative to disjunctive kriging. *Trans. Inst. Min. Metall.* **90**, 13-24.
- Deutscher Wetterdienst (1976): *Aspirations-Psychrometer-Tafel*, Vieweg Verlag, Braunschweig.
- Ehlers, W. (1996): *Wasser in Boden und Pflanze. Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag*, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 272 S.
- Eller, F. (2006): *Visual C# 2005: Grundlagen, Programmier Techniken, Datenbanken*. Programmer's Choice, Addison-Wesley Verlag, München.

- ESRI (2000): Developing Applications with ArcInfo: An Overview of ArcObjects. ESRI, Redlands, CA, USA, 22 S., http://www.discovergis.com/pdf/ai8_arcobjects.pdf, (24.11.2009).
- ESRI (2004): ArcGIS Desktop Developer Guide (ArcGIS 9.1), *ESRI Press*, Redlands, CA, USA, 335 S.
- Fank, J. (2007): Die Gras-Referenzverdunstung: Berechnungsergebnisse in Abhängigkeit von Messgeräten und Messintervall. HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 12. Gumpensteiner Lysimetertagung, Irdning, 53-56 S.
- Fowler, M. (2004): UML konzentriert - Eine kompakte Einführung in die Standard-Objektmodellierungssprache, *Addison-Wesley Verlag*, München, 192 S.
- Fu, P. und Rich, P.M. (1999): Design and Implementation of the Solar Analyst: an ArcView Extension for Modeling Solar Radiation at Landscape Scales. Environmental Systems Research Institute (ESRI), ESRI International User Conference, San Diego, 23 S.
- Goos, G. (2001): Vorlesungen über Informatik. Band 2: Objektorientiertes Programmieren und Algorithmen, *Springer Verlag*, Berlin, Heidelberg, New York, 371 S.
- Goovaerts, P. (1997): Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Applied Geostatistics Series, *Oxford University Press*, New York, Oxford, 483 S.
- Goovaerts, P. (2000): Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology* **228** (1-2), 113-129.
- Häckel, H. (2005): Meteorologie. Ulmer UTB, *Eugen Ulmer KG*, Regensburg, 446 S.
- Hall, D.O.; Riggs, G.A.; Salomonson, V.V.; Barton, J.S.; Casey, K.; Chien, J.Y.L.; Digirolamo, N.E.; Klein, A.G.; Powell, H.W.; und Tait, A.B. (2001): Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms. NASA, 45 S.
- Hargreaves, G.L. (1985): Defining and using reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* (ASCE 120), 1132-1139.
- Haude, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. *Mitteilungen Deutscher Wetterdienst* **11**, 1-24.
- Höck, M. und Manegold, J. (2006): ArcMap - Programmierung mit VBA, *Eigenverlag*, 831 S.
- IPCC (2007a): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, S.
- IPCC (2007b): Summary for Policymakers. 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, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 18 S.
- Klein, S.A. (1977): Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy* **19**, 325-329.
- Kromp-Kolb, H. (2003): Ursachen der globalen und regionalen Klimaveränderung und deren mögliche Auswirkungen auf die Landwirtschaft. BAL Gumpenstein, 1. Klimaseminar zum Generalthema "Klimaforschung für die Grünlandwirtschaft", Irdning, 3 S.
- Kromp-Kolb, H.; Eitzinger, J.; Formayer, H.; Trnka, M.; Laube, W.; und Gruszczynski, G. (2005): Abschlussbericht zum Forschungsprojekt " Bestimmung der Auswirkungen von Trockenperioden

- im Grünland mittels Wachstumsmodellen und klimatologische Analysen österreichischer Daten", Universität für Bodenkultur (BOKU), Institut für Meteorologie und Physik, Wien, 88 S.
- Li, S.; Tarboton, D.; und McKee, M. (2003a): GIS-based temperature interpolation for distributed modelling of reference evapotranspiration. 23rd AGU Hydrology Days, Fort Collins, Colorado, AGU Hydrology Days 2003, Colorado State University, 2 S.
- Li, S.; Tarboton, D.; und McKee, M. (2003b): Development of an ArcMap Toolbar for Regional Evapotranspiration Modeling. ESRI, ESRI International User Conference, San Diego, 12 S.
- Liberty, J. (2005): Programmierungen mit C#, *O'Reilly Verlag*, Köln, 655 S.
- Longley, P.A.; Goodchild, M.F.; Maguire, D.J.; und Rhind, D.W. (2005): Geographic Information Systems and Science, *John Wiley & Sons, UK*, 517 S.
- Menzel, A. und Fabian, P. (1999): Growing season extended in Europe. *Nature* **397** (6721), 659-659.
- Mössenböck, H. (2006): Softwareentwicklung mit C# 2.0, *dpunkt. Verlag*, Heidelberg, 272 S.
- Murer, E. (2009): Überprüfung und Verbesserung der Pedotransferfunktion zur Ermittlung der Wasserspeicherfähigkeit im Boden, Abschlussbericht, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen, 54 S.
- Murer, E.; Wagenhofer, J.; Aigner, F.; und Pfeffer, M. (2004): Die nutzbare Feldkapazität der mineralischen Böden der landwirtschaftlichen Nutzfläche Österreichs. In BUNDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT: Schriftenreihe BAW, *Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt*, Petzenkirchen, 72-78 S.
- Parajka, J. und Blöschl, G. (2006): Validation of MODIS snow cover images over Austria *Hydrology and Earth System Sciences* **10**, 679-689.
- Parajka, J.; Holko, L.; und Kostka, Z. (2001): Distributed modelling of snow water equivalent - coupling a snow accumulation and melt model and GIS. GIS Development - The Geospatial Resource Portal, GISdevelopment.net, 8 S., <http://www.gisdevelopment.net/application/nrm/mountain/mount0007.htm>, (24.11.2009).
- Pötsch, E.M. und Resch, R. (2005): Einfluss unterschiedlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Nährstoffgehalt von Grünlandfutter. HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 32. Viehwirtschaftliche Fachtagung, Irdning, 14 S.
- Pötsch, E.M. (2007): Austrian agriculture - data and facts. In HELGADOTTIR, A. and PÖTSCH, E.M.: Quality Legume-Based Forage Systems for Contrasting Environments, COST 852, *LFZ Raumberg-Gumpenstein*, Irdning, Austria, 242 S.
- Rechenberg, P. (2000): Was ist Informatik? Eine allgemeinverständliche Einführung, *Carl Hanser Verlag*, München, Wien, 256 S.
- Ripley, B.D. (2004): Robust Statistics. Department of Statistics, University of Oxford, Oxford, 11 S., <http://www.stats.ox.ac.uk/pub/StatMeth/Robust.pdf> (24.11.2009).
- Schaumberger, A. (2005): Ertragsanalyse im österreichischen Grünland mittels GIS unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Veränderungen. Veröffentlichungen 42, *Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein*, Irdning, 66 S.
- Schaumberger, A. (2007): GIS zur Bestimmung von Grünlanderträgen: Implementierung eines Ertragmodells. Master Thesis, Zentrum für Geoinformatik Salzburg, Salzburg, 103 S. S.
- Scheppler, P. (2000): Schneedeckenmodellierung und Kalibrationsmöglichkeiten für ausgewählte Beobachtungsstationen. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Bern, Bern, 111 S.

- Trnka, M.; Zalud, Z.; Eitzinger, J.; und Dubrovský, M. (2005): Global solar radiation in Central European lowlands estimated by various empirical formulae. *Agricultural and Forest Meteorology* **131** (1-2), 54-76.
- Trnka, M.; Eitzinger, J.; Gruszczynski, G.; Buchgraber, K.; Resch, R.; und Schaumberger, A. (2006): A simple statistical model for predicting herbage production from permanent grassland. *Grass and Forage Science* **61** (3), 253-271.
- Turc, L. (1961): Evaluation de besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration potentielle. *Annales Agronomiques* **12**, 13-49.
- Tveito, O.E.; Wegehenkel, M.; Van der Wel, F.; und Dobesch, H. (2006): The use of Geographic Information Systems in Climatology and Meteorology, Final Report, COST Action 719, 245 S.
- Vicente-Serrano, S.M.; Lanjeri, S.; und López-Moreno, J.I. (2007): Comparison of different procedures to map reference evapotranspiration using geographical information systems and regression-based techniques. *International Journal of Climatology* **27** (8), 1103-1118.
- Weibel, D.; Wunderle, S.; und Kleindienst, H. (2003): Snow pack simulation in the Swiss Alps - combining GIS and remote sensing to model snow cover in Switzerland. *EARSeL eProceedings* **2** (1), 179-188.
- Yohai, V.J. (1987): High Breakdown-Point and High Efficiency Robust Estimates for Regression. *The Annals of Statistics* **15** (20), 642-656.
- ZAMG (2002): Klima-Monatsübersicht - Witterungsübersicht Dezember 2002. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, 1 S., <http://www.zamg.ac.at/fix/klima/wiewars12-02.pdf>, (09.12.2009).
- ZAMG (2004): Klima-Monatsübersicht - Witterungsübersicht März 2004. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, 1 S., <http://www.zamg.ac.at/fix/klima/wiewars03-04.pdf>, (09.12.2009).
- Zhang, X.; Friedl, M.A.; Schaaf, C.B.; und Strahler, A.H. (2004): Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data. *Global Change Biology* **10** (7), 1133-1145.

Danksagung

Wir bedanken uns bei Herrn Mag. Alexander Kowarik, Bundesanstalt Statistik Österreich, für seine Unterstützung und Beratung bei der Kalibrierung, Verifizierung und statistischen Auswertung des Grünlandertragsmodells.